

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ESTUDIO DE INGENIERIA SOSTENIBLE PARA LA  
OBTENCIÓN DE FURFURAL COMO SUBPRODUCTO DE  
LA AGROINDUSTRIA DEL MAÍZ.**

PRESENTADO POR:

**FRANCIS RENÉ AMAYA JUÁREZ**

**OSCAR DANIEL FLORES SOLANO**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 2011.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA**

DIRECTOR :

**ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Título :

**ESTUDIO DE INGENIERIA SOSTENIBLE PARA LA  
OBTENCIÓN DE FURFURAL COMO SUBPRODUCTO DE  
LA AGROINDUSTRIA DEL MAÍZ.**

Presentado por :

**FRANCIS RENÉ AMAYA JUÁREZ  
OSCAR DANIEL FLORES SOLANO**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docentes Directoras :

**M.Es. e ING. TANIA TORRES RIVERA  
LICDA. XOCHIL MARÍA GODOY DE VILLATORO**

Docente Director Externo :

**DR. ORLANDO CANJURA URRUTIA**

San Salvador, Enero de 2011.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directoras :

**M.Es. ING. TANIA TORRES RIVERA**

**LICDA. XOCHIL MARÍA GODOY DE VILLATORO**

Docente Director Externo :

**DR. ORLANDO CANJURA URRUTIA**

## AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Luis Gilberto Parada**, Director del Laboratorio de Polímeros y su personal académico, por su colaboración en el uso de su laboratorio, equipo y análisis de espectro infrarrojo para la caracterización de furfural producido.

Al Departamento de Química Física de la **Facultad de Química y Farmacia** por proveernos de equipo de cristalería necesario para la obtención de furfural a partir de desechos de maíz.

A los laboratorios de Química Agrícola del **CENTA** y la **Facultad de Ciencias Agronómicas de la UES** por colaborar con el equipo y pretratamiento necesario en las muestras de desechos de maíz para la producción de furfural.

A la **Inga. Cecilia de Flamenco, Sr. Padilla y Sr. Morán** por permitirnos el uso del material de la Planta Piloto necesario para poder realizar las diferentes experimentaciones en el laboratorio.

A nuestros asesores **Inga. Tania Torres, Licda. Xochil de Villatoro y Dr. Orlando Canjura** por su apoyo incondicional y cuya instrucción ha permitido llevar a cabo este trabajo de graduación.

## DEDICATORIA

El paso por las aulas me ha enseñado que juntos el idealismo y los conocimientos, componen una fuerza capaz de vencer cualquier obstáculo, todo depende de la pasión con la que decidamos vivir.

Así me lo han demostrado también muchas personas, a quienes agradezco y dedico de manera especial este logro que ahora comparto.

### *A Dios*

Mis gracias y mi fe de que este logro es el primero de una carrera llena de éxitos y satisfacciones la cual le dedico enteramente.

### *A mi familia*

Y de manera especial a mis padres Mauricio Amaya y Cecy de Amaya, a quienes agradezco grandemente cuanto sacrificio han hecho por apoyarme en cada una de mis metas, por compartir tantos momentos de gloria y pena, pero principalmente por ser para mí el mayor ejemplo de trabajo y superación que pueda seguir. Saben que los amo y ansío de corazón que se sientan orgullosos de cuánto hemos logrado.

### *A mis hermanos scouts*

Miembros en su mayoría del Grupo San Rafael 60 de Santa Ana, con quienes he crecido y que con su ejemplo y dedicación han formado el ciudadano y hombre que ahora soy, forjando mi vida en base a valores y demostrándome que lo imposible no existe.

### *A mis compañeros y amigos*

El camino ha sido más fácil con amigos como ustedes, Silvia C., Silvia T, Sara, Marilyn, José L., Luz, Sara, Marcia, Andrea, Rocío, Gaby, Patty, Yid, Oscar, Denisse, Nena, Alfredo, Mauri, Irving, Henry, José y Benjamín y a cuantos más han influido de manera especial en mi vida; les quiero mucho y cuentan conmigo incondicionalmente.

*A mis profesores*

A quienes debo su valiosa instrucción, su dedicación y el haber influido cada uno de manera particular para formar el ingeniero profesional que ahora soy.

*Amigos y colegas de ASEIQA, ALEIQ y AGU*

Con quienes he trabajado y luchado por fortalecer a la Universidad de El Salvador y en especial a la Ingeniería Química salvadoreña y latinoamericana. Les agradezco su apoyo y amistad, así como por ampliar mi horizonte y demostrarme lo que somos capaces de lograr.

Y finalmente, en virtud de lo que Sir Baden Powell nos ha encomendado para ser felices haciendo el bien, “*Tratad de dejar este mundo en mejores condiciones de como lo encontrasteis*”, deseo que mi trabajo y esfuerzo sirvan para la gloria de El Salvador al que amo.

*Francis René Amaya Juárez*

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto y toda mi carrera universitaria a Dios Todopoderoso porque sin él no hubiese sido posible, pues siempre ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias cuando todo parecía cuesta arriba.

Con mucho amor se lo dedico a mis padres: Mauricio Adalberto Flores Gómez y Edna Mabel Solano de Flores, ya que gracias a ellos soy quien soy hoy en día, fueron los que me dieron ese cariño, ejemplo de lucha y humildad, son los que han velado por mis estudios, por mi salud; son a ellos a quien les debo todo, han estado conmigo siempre en los momentos que más los necesitaba para brindarme consejos, regaños pero sobre todo su apoyo incondicional, estoy muy seguro que lo han hecho con todo el amor del mundo.

Le agradezco a mis hermanos: Mauri y Jorge, por siempre estar a mi lado en especial cuando más los he necesitado. Gracias por preocuparse por mí y por quererme mucho.

A mis cuñadas Ivette y Beatriz, por su apoyo por estar siempre pendientes de mí.

A mis sobrinos que gracias a sus sonrisas, travesuras, ocurrencias me hacían olvidar todas las preocupaciones de la universidad (tareas, parciales, etc.)

A mi abuela Rosalina (Q.P.P.D) por regalarme la mejor mamá del mundo y a pesar que se fue hace mucho siempre tengo presente sus muestras de preocupación y cariño. A mi abuela Rosa por sus muestras de afecto y por estar siempre pendiente de mis estudios

A mis tíos y tías en especial a mi tío Iván por regalarme la calculadora Voyage (amiga inseparable en toda mi carrera universitaria) y a mi tío Memo por su apoyo y ayuda.

A Iris Guerrero una persona muy especial por estar a mi lado a lo largo de mi carrera y darme su apoyo y amor en cada año de mi formación y por alentarme a seguir adelante pese a lo difícil que en momentos llegue a sentir.

A Francis mi amigo y compañero de tesis por compartir tantos buenos e inolvidables momentos, por su paciencia y amistad.

A mis asesores de tesis con mucho respeto y cariño, gracias por orientarnos y transmitirnos sus conocimientos y ser una base en nuestro trabajo de investigación.

A mis amigas y compañeras Denisse, Gaby, Paty, Nena y Yid por sus muestras de cariño y afecto, por todas las noches de desvelos, por su ayuda y sus palabras de apoyo agradezco a Dios por haberlas puesto en mi camino.

A mis lindas niñas de alimentos Zulma, Bea, Eva y Bere por su amistad, por permitirme compartir tantos momentos bonitos disculpas por molestarlas tanto.

A todos mis compañeros y compañeras: Fernando, Gatucho, Luz, Pedrito, Marcia, Edwin, Sara, René, Mora, Alan, etc. Por su ayuda y muestras de compañerismo, por todo lo que vivimos.

Al Ingeniero Teo por su colaboración y apoyo para la realización de este proyecto y a la Ingeniero Rico por transmitir sus conocimientos y ser un ejemplo a seguir.

*Oscar Daniel Flores Solano*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
RESUMEN .....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xiii
OBJETIVOS.....	xv
OBJETIVO GENERAL .....	xv
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	xv
MARCO TEÓRICO .....	1
1    DESARROLLO SOSTENIBLE Y PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA. ....	2
1.1    DESARROLLO SOSTENIBLE.....	2
1.1.1    LA SOSTENIBILIDAD BASADA EN CRITERIOS. ....	4
1.1.2    PRINCIPIOS DE SOSTENIBILIDAD. ....	5
1.1.3    LA SOSTENIBILIDAD Y EL DESARROLLO AGRÍCOLA. ....	6
1.2    PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.....	8
1.2.1    DEFINICIÓN DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA. ....	9
1.2.2    ¿POR QUÉ APLICAR PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA?.....	10
1.2.2.1    BENEFICIOS.....	11
1.2.3    ESTRATEGIAS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA. ....	12
1.2.4    ACCIONES MÁS COMUNES DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA. ....	12
1.3    AGRICULTURA LIMPIA.....	14

1.3.1	LA AGROINDUSTRIA Y SUS CO-PRODUCTOS.....	15
1.3.1.1	LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y LOS MERCADOS QUÍMICOS. .	17
2	GENERALIDADES DEL MAÍZ.....	18
2.1	ORIGEN DEL MAÍZ.....	18
2.2	CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DEL MAÍZ. ....	18
2.3	DESCRIPCIÓN BOTÁNICA.....	19
2.4	ASPECTOS AGRONÓMICOS.....	21
2.4.1	TIPOS DE MAÍZ (VARIEDADES E HÍBRIDOS).....	22
2.5	GRANOS BÁSICOS EN EL SALVADOR.....	22
2.6	RESIDUOS AGRÍCOLAS DEL MAÍZ EN EL SALVADOR.....	23
2.6.1	AGRICULTORES CON RESIDUOS SOBRANTES.....	23
2.6.2	MANEJOS ACTUALES DE LOS RESIDUOS DE MAÍZ.....	26
2.6.3	USOS POTENCIALES DE LOS RESIDUOS DEL CULTIVO DE MAÍZ..	27
2.6.3.1	COMERCIALIZACIÓN DE LOS RESIDUOS.....	28
3	GENERALIDADES DEL FURFURAL.....	29
3.1	ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA PRODUCCIÓN DE FURFURAL..	29
3.2	FUENTES DE PENTOSANAS Y SÍNTESIS DE FURFURAL.....	31
3.2.1	ESTEQUIOMETRÍA.....	32
3.2.2	MECANISMOS DE REACCIÓN.....	33
3.2.2.1	MECANISMO PARA LA HIDRÓLISIS DE PENTOSAS.....	34
3.2.2.2	DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA CON LA ACIDEZ.....	37
3.2.2.3	CINÉTICA DE LA FORMACIÓN DE PENTOSAS A PARTIR DE LAS PENTOSANAS.....	38
3.2.2.4	REACCIONES DE PÉRDIDA DEL FURFURAL.....	39

3.3	MATERIAS PRIMAS.....	40
3.4	TECNOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO.....	42
3.4.1	PROCESOS DEL FUTURO.....	43
3.5	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS.....	44
3.6	MÉTODO DE ANÁLISIS.....	45
3.7	RELEVANCIA Y POTENCIALES BENEFICIOS.....	46
3.7.1	APLICACIONES Y USOS.....	46
3.7.1.1	ALCOHOL FURFURÍLICO.....	46
3.7.1.2	ALCOHOL TETRAHIDROFURFURÍLICO.....	47
3.7.1.3	THF (Tetrahidrofurano).....	47
3.7.1.4	PTMEG (Spandex).....	47
3.7.1.5	FURFURAL COMO EXTRACTOR.....	48
3.7.1.6	FURFURAL COMO FUNGICIDA.....	48
3.7.1.7	ÁCIDO FUROICO.....	49
3.7.1.8	USOS ADICIONALES.....	49
	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	51
4	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE FURFURAL A PARTIR DE DESECHOS AGRÍCOLAS.....	53
4.1	DESARROLLO EXPERIMENTAL PRELIMINAR.....	54
4.1.1	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	54
4.1.2	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA HIDRÓLISIS DE PENTOSANAS Y PRODUCCIÓN DE FURFURAL.....	54
4.1.3	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	55
4.1.4	PRUEBAS PRELIMINARES.....	56

4.1.4.1	PRUEBAS VARIANDO TIEMPO DE MACERADO, TEMPERATURA DE TRABAJO Y DIÁMETRO DE PARTÍCULAS. ....	57
4.1.4.2	CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO.....	57
4.2	CRIBADO DE VARIABLES. ....	58
4.2.1	FACTORES EXPERIMENTALES. ....	58
4.2.2	ORGANIZACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS. ....	58
4.2.3	VARIABLE RESPUESTA. ....	60
4.2.4	CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO.....	60
4.2.5	RESULTADOS OBTENIDOS.....	60
4.2.5.1	ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE LOS FACTORES SOBRE EL RENDIMIENTO DE REACCIÓN.....	61
4.3	DESARROLLO DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.....	66
4.3.1	OPTIMIZACIÓN DE LA RESPUESTA. ....	71
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
5	DISEÑO BÁSICO PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FURFURAL.....	78
5.1	DISEÑO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FURFURAL.....	78
5.1.1	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN. ....	79
5.2	DETALLES DE OPERACIÓN.....	80
5.2.1	DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FURFURAL.....	84
5.2.2	BALANCE GLOBAL DEL PROCESO. ....	85
5.2.3	ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS Y CORRIENTES. ....	87
5.2.3.1	SERVICIOS AUXILIARES .....	93
5.2.4	PROPUESTA PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS Y DESECHOS. ....	97

6	FURFURAL: FUENTE DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y COMBUSTIBLES DEL FUTURO.....	102
6.1	RECUPERACIÓN DE SUBPRODUCTOS.....	102
6.2	USO DE DERIVADOS.....	103
6.3	COMERCIO INTERNACIONAL.....	105
6.4	INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO.....	107
6.5	POTENCIALES IMPACTOS AMBIENTALES.....	108
7	CONCLUSIONES.....	110
8	RECOMENDACIONES.....	112
9	BIBLIOGRAFÍA.....	113
	ANEXOS.....	116
	ANEXO I.....	117
	TECNOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO.....	117
	TECNOLOGÍA QUAKER OATS.....	117
	EL PROCESO POR LOTES USADOS EN CHINA.....	118
	EL PROCESO POR LOTES DE AGRIFURANE.....	119
	EL PROCESO DE SUPRATHERM.....	120
	EL PROCESO STAKE.....	123
	EL PROCESO DE SUPRAYIELD.....	124
	ANEXO II.....	127
	BASES PARA EL DISEÑO DE UN REACTOR DE MEZCLA COMPLETA.....	127
	ANEXO III.....	131
	RECTIFICACIÓN DE MEZCLAS PARCIALMENTE MISCIBLES.....	131
	ANEXO IV.....	134

ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	134
TEORIA .....	134
APARATOS Y REACTIVOS.....	135
PROCEDIMIENTO .....	135
CÁLCULOS .....	136

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. La triangularidad de la Sostenibilidad. ....	5
Figura 2-1. Principales usos de residuos de maíz que conocen los agricultores en El Salvador. ....	27
Figura 3-1. Unidad de Pentosana.....	33
Figura 3-2. Mecanismo de Hidrólisis de Pentosanas.....	34
Figura 3-3. Mecanismo de Deshidratación de Pentosas para formar Furfural. ....	36
Figura 3-4. Constante dieléctrica del agua como función de la temperatura. ....	38
Figura 3-5. Espectro IR del furfural. ....	46
Figura 3-6. Esquema de Aplicaciones del furfural. ....	50
Figura 4-1. Aparato de destilación Dean Stark.....	55
Figura 4-2. Sistema de destilación a presión reducida. ....	56
Figura 4-3. Espectro FTIR para Furfural.....	60
Figura 4-4. Gráfico de Pareto para Rendimiento.....	63
Figura 4-5. Gráfico de Probabilidad Normal para Rendimiento. ....	63
Figura 4-6. Gráfica de Pareto Estandarizada para Rendimiento. ....	65
Figura 4-7. Gráfica de Probabilidad Normal para Rendimiento ....	65
Figura 4-8. Gráfico de Efectos Principales para Rendimiento. ....	66
Figura 4-9. Gráfico de Pareto Estandarizado para Rendimiento. ....	69
Figura 4-10. Gráfico de Probabilidad Normal para Rendimiento ....	70
Figura 4-11. Gráfico de efectos principales para rendimiento. ....	70
Figura 4-12. Superficie de Respuesta Estimada ....	71
Figura 4-13. Contornos de la superficie de respuesta estimada. ....	71
Figura 5-1. Diagrama de Bloques de Proceso ....	81
Figura 5-2. Diagrama de Proceso de Producción de Furfural ....	84
Figura 5-3. Trituradora de Martillo para biomasa. ....	88
Figura 5-4. Reactor de tanque vertical.....	89
Figura 5-5. Ilustración de un filtro de bandas.....	90

Figura 5-6. Ilustración de Torres de destilación .....	91
Figura 5-7. Intercambiador de tubos.....	92
Figura 5-8. Decantador Vertical .....	93
Figura 5-9. Caldera .....	94
Figura 5-10. Línea Isoterma de Adsorción.....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Composición química de la planta y grano de maíz (% en base húmeda). .....	20
Tabla 2-2. Épocas de siembra recomendadas para el cultivo de maíz en las diferentes zonas de El Salvador.....	21
Tabla 2-3. Regionalización agrícola por departamentos en El Salvador.....	23
Tabla 2-4. Retrospectiva, Superficie, Producción y Rendimiento de Producción del Cultivo del Maíz en El Salvador 2000/01-2009/10.....	25
Tabla 2-5. Cantidad de Residuos Generados para el Cultivo de Maíz en Toneladas en El Salvador (2000/01-2009/10).....	26
Tabla 2-6. Principales destinos de residuos del cultivo de maíz en El Salvador (%). .....	27
Tabla 2-7. Interés de los agricultores en comercializar los residuos del maíz .....	28
Tabla 3-1. Contenido de pentosanas de varias materias primas en porcentaje (Base Seca). 41	
Tabla 3-2. Propiedades Fisicoquímicas del Furfural grado técnico. ....	44
Tabla 4-1. Caracterización de Materia Prima.....	54
Tabla 4-2. Desarrollo Experimental Preliminar. ....	57
Tabla 4-3. Niveles de los factores experimentales. ....	59
Tabla 4-4. Codificación de variables para cada prueba.....	59
Tabla 4-5 Resultados Experimentales. ....	61
Tabla 4-6. Estimación de efectos.....	62
Tabla 4-7. Análisis de la Varianza para Rendimiento.....	64
Tabla 4-8. Factores y Dominio Experimental .....	66
Tabla 4-9. Respuestas observadas. ....	67
Tabla 4-10. Análisis de Varianza para el Rendimiento.....	68
Tabla 4-11. Ruta ascendente para Rendimiento. ....	69
Tabla 4-12. Factores óptimos de operación.....	72
Tabla 4-13. Comparación de rendimientos y parámetros de operación. ....	75
Tabla 5-1. Ventas internacionales por consumo de furfural.....	79

Tabla 5-2. Superficie, Producción y Rendimiento de Producción del Cultivo del Maíz en la Región IV .....	80
Tabla 5-3. Cantidad de Residuos Generados y Utilizables como materia prima a partir del cultivo de maíz en la Región IV. (Toneladas) .....	80
Tabla 5-4. Listado de los equipos de proceso.....	87
Tabla 5-5. Denominación de las corrientes de proceso .....	97
Tabla 5-6. Datos experimentales para pruebas de Carbón .....	99
Tabla 5-7. Resultados en pruebas de adsorción.....	99
Tabla 6-1. Resultados para los primeros 30 químicos de mayor interés. ....	104
Tabla 6-2. Producción anual de furfural.....	106
Tabla 6-3. Demanda mundial de Furfural .....	106

## RESUMEN

---

El furfural,  $C_4H_3OCHO$ , es un líquido claro como el agua cuando está recién destilado, es el más importante de los compuestos que contienen el anillo furánico de cinco miembros, caracterizado por un átomo de oxígeno. Es un aldehído (II) con el grupo  $-CHO$  en la posición 2 (ó  $\alpha$ ).

La mayor ventaja del furfural es que proviene de recursos renovables. El furfural junto con el fenol y el etanol son los mayores productos comerciales o semicomerciales derivados de materiales hemicelulósicos. Tras 90 años de su producción a nivel industrial, aún emergen nuevas y más eficientes tecnologías de proceso, creando posibilidades de nuevos productos para una industria química preocupada de su dependencia en materia prima y energía proveniente de recursos no renovables.

La Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable de los Estados Unidos reorganizó y combinó programas que solían estar separados como el de biocombustibles, el de bioenergía y los programas de productos de base biológica en un único Programa de Biomasa.

Esta reorganización incluye la identificación de las mejores oportunidades para la síntesis de productos químicos de valor añadido a partir de biomasa, que complementarían económica y técnicamente la producción de combustibles y energía, aspectos que la ingeniería sostenible integra mediante consideraciones sociales, ambientales y económicas en los métodos de diseño de productos, procesos y sistemas de energía.

La elección de la materia prima, en la producción de furfural es fundamental, para determinar las condiciones de operación y medir el rendimiento de la reacción. El proceso de aprovechamiento de desechos de maíz está basado en su alto contenido de pentosanas (30%) y el poco uso que recibe después de la cosecha.

Este proceso productivo depende de muchos factores influyentes, los cuales es necesario identificar y considerar su efecto, para trabajar en condiciones óptimas. Dentro de los efectos que resultan significativos en el proceso productivo se tienen: temperatura, porcentaje de acidez en la alimentación de catalizador, trituración de la materia prima y el tiempo de pretratamiento y reacción.

En el diseño de procesos industriales, es necesario conocer información sobre el tipo de reacción que se efectúa, así como el proceso de separación necesaria para obtener un producto tan puro como se desee; para ello es necesario poseer conocimientos de cinética química, mecánica de fluidos, transferencia de calor y transferencia de masa.

El estudio de ingeniería sobre las condiciones de operación y características de diseño de equipos industriales para la producción de furfural a partir de desechos de maíz, brinda la oportunidad de impulsar la utilización de materias primas residuales, y complementar estudios previos sobre la cinética de reacción de la deshidratación de pentosanas a furfural, su mecanismo de formación de furfural y sus modelos cinéticos, los cuales están incompletos o muestran inconsistencias entre distintos autores.

El presente estudio se enfoca en las condiciones de operación óptimas para la producción de furfural a partir de las pentosanas contenidas en los desechos del maíz, recolectando datos experimentales generados por un modelo factorial y a partir de los cuales se diseña un sistema de equipos industriales que operen bajo una perspectiva de desarrollo sostenible y producción más limpia.

# INTRODUCCIÓN

---

Actualmente la ingeniería sostenible se refiere a la integración de consideraciones sociales, ambientales y económicas en los métodos de diseño de productos, procesos y sistemas de energía. Además, la ingeniería sostenible fomenta la atención al producto y ciclo de vida del proceso durante el esfuerzo de diseño. La intención es reducir al mínimo el total de los impactos ambientales de todo el ciclo y, al mismo tiempo, maximizar los beneficios a los actores sociales y económicos (Rochester Institute of Technology, 2010).

La ingeniería sostenible incluye el uso de métodos que minimicen el daño ambiental, diseñar productos y procesos de manera que los desechos de uno se utilicen como insumos para otro proceso; y la incorporación de las limitaciones ambientales y sociales, así como de los aspectos económicos en las decisiones de ingeniería que se planean ejecutar.

El manejo de los residuos constituye un problema importante en la sociedad actual, tanto en la vida cotidiana como en la industria y agricultura. Por tal motivo, debe llevarse a cabo una gestión adecuada de los mismos. Aparte de tratar de reducir su producción en origen, mediante técnicas de producción más limpia, se ha de tratar de transformarlos de manera sostenible en productos que se puedan utilizar posteriormente.

La industrialización del maíz es una de las actividades agroindustriales que genera un valor agregado, puesto que permite obtener gran número de productos que se consumen en forma directa o como insumos de otras industrias. En El Salvador, como en otros países del mundo, se tiene un especial respeto y admiración por el maíz, porque desde hace muchos años ofrece alimento a muchos pueblos.

Los residuos del maíz, como sus tallos, hojas y zuros (olotes), representan una materia prima óptima y anualmente renovable, gracias a su alto contenido de pentosanas para la producción de compuestos químicos orgánicos como el furfural y otros muchos productos.

El furfural es uno de los tantos productos posibles a obtener en una refinería química procesadora de biomasa, y se considera que estos proyectos tienen el potencial para mejorar el desempeño ambiental y la sostenibilidad de la producción química.

El estudio examina nuevas tecnologías de extracción que pueden dar rendimientos superiores de furfural y menores costos de procesamiento. Esto podría ser capaz de utilizar la, relativamente abundante, oferta de biomasa y residuos de otras operaciones de procesamiento agrícola en el país.

Dentro del diseño de plantas de procesamiento químico se contemplan los principios de la Producción más Limpia como una de las estrategias hacia el Desarrollo Sostenible, considerando la eficiencia energética, la minimización de desechos y la reducción de emisiones al ambiente desde la concepción del proyecto.

En el diseño de procesos químicos industriales, es necesario entender las bases de la reacción química que se efectúa; así como su comportamiento; por tanto, resulta necesaria la aplicación de conocimientos de ingeniería en las áreas de cinética química, mecánica de fluidos, manejo de sólidos, transferencia de calor y masa, así como la evaluación económica del proyecto.

En esta investigación se diseñará un proyecto de aprovechamiento integral de desechos de maíz, obteniéndose a partir de dicha materia prima el furfural, un aldehído de gran aplicación industrial, que brinde un aporte para convertir la agricultura salvadoreña en una actividad económica competitiva y productiva, proveyendo nuevas oportunidades de comercio y desarrollo a este sector vital de la matriz insumo producto salvadoreña, colocando al país con la capacidad de ponerse al nivel del resto de naciones que han iniciado la ejecución de planes de aprovechamiento industrial, basados en la gestión de residuos agrícolas.

# OBJETIVOS

---

## OBJETIVO GENERAL

Realizar el estudio de Ingeniería para la obtención de furfural como subproducto de la agroindustria del maíz, bajo la perspectiva de Desarrollo Sostenible y Tecnologías Limpias de Producción.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar, mediante información bibliográfica y de campo, la situación actual en el manejo de los desechos de la agroindustria del maíz.
2. Determinar el pre tratamiento físico y químico que necesita el zuro y las hojas de elote para ser utilizados como materia prima en la producción del furfural.
3. Optimizar el método de laboratorio para la hidrólisis de las pentosanas en la producción de furfural.
4. Extrapolar el trabajo de laboratorio hacia el diseño de las operaciones y los procesos unitarios técnicamente óptimos, con enfoque de Tecnología Limpia, para la Producción de furfural a partir de zuro (olote) y hojas de maíz.
5. Identificar mediante análisis químico infrarrojo (IR), la obtención de furfural a partir de desechos provenientes de la agroindustria del maíz.
6. Evaluar el impacto ambiental al implementar la producción del furfural en El Salvador como subproducto de la agroindustria del maíz.
7. Formular una propuesta para la disposición final de los residuos generados en la producción del furfural según la perspectiva de Tecnologías Limpias.

## MARCO TEÓRICO

---

Dado el actual requerimiento por comprender un concepto tan recurrente en los campos académico, social, político y económico, como el Desarrollo Sostenible, este Marco Teórico pretende desarrollar su significado y aplicación a la temática en estudio.

Se plantearán los conceptos básicos, complementarios y específicos de un proyecto de aprovechamiento integral de desechos de maíz, como una medida de aprovechamiento de residuos agrícolas y la implementación de técnicas de Producción más Limpia en la agroindustria; obteniéndose así el furfural, un aldehído de gran importancia como solvente industrial y usado en la fabricación de resinas poliméricas, entre otras aplicaciones.

Con este fin, el proyecto se organiza de la siguiente manera: en primer lugar se hace referencia a un marco teórico para conocer el significado y los diferentes enfoques asociados al Desarrollo Sostenible. A partir de ello, se aborda la Producción más Limpia (P+L) como una de las estrategias enfocadas al Desarrollo Sostenible, derivando en la Agricultura Limpia donde se aplican los principios de P+L en la agroindustria, las cuales enfatizan el nivel local como sólido punto de partida para la minimización o eliminación de residuos de procesos.

Así se muestra el caso de la agroindustria del maíz, predominante en la cultura salvadoreña, tanto en su cultivo como en el consumo de sus productos; señalando la utilización de la gran cantidad de residuos agrícolas disponibles, mediante su transformación industrial, en productos de valor técnico y económico, lo cual resuelve un problema de fundamental interés para los países productores en vías de desarrollo al realizar una gestión adecuada de los desechos, obteniendo un valor agregado en la producción agrícola.

# **1 DESARROLLO SOSTENIBLE Y PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.**

---

El desarrollo sostenible no es una idea nueva. Muchas culturas a través de la historia humana han reconocido la necesidad de armonía entre la naturaleza, la sociedad y la economía. Lo que sí es nuevo es la articulación de estas ideas en el contexto de una sociedad global industrial y de información. Requiere la comprensión de que la inacción tiene consecuencias negativas y que debemos encontrar formas innovadoras de cambiar estructuras institucionales e influenciar conductas individuales. Se trata de tomar acción, de cambiar políticas y prácticas en todos los niveles, desde el ámbito individual hasta el internacional (CNPMLTA, s. f.).

La Producción Más Limpia resulta a partir de la conservación de materias primas, agua y energía; eliminación de las materias primas tóxicas y peligrosas; y reducción de la cantidad y la toxicidad de todas las emisiones y desperdicios en la fuente durante el proceso de producción (CNPMLTA, s. f.).

Esta iniciativa describe un acercamiento preventivo a la gestión ambiental. No es ni una definición legal ni científica que se pueda diseccionar, analizar o someter a disputas teóricas. Es un amplio término que abarca lo que algunos países o instituciones llaman: ecoeficiencia, minimización de residuos, prevención de la contaminación o productividad verde.

## **1.1 DESARROLLO SOSTENIBLE**

Desarrollo sostenible es un concepto en constante cambio y aún no existe un único significado; históricamente hablando, se puede asociar el nacimiento de este concepto a dos constataciones importantes que empieza a tener la humanidad hacia los años 70 del siglo XX:

1. El incremento de los crecimientos y de los desequilibrios,
2. La existencia de límites y de impactos medioambientales.

El Informe Brundtland (1987) vincula desarrollo y medio ambiente como interdependientes e imprescindibles y utiliza por primera vez, de forma popular, el concepto de desarrollo sostenible (Xercavins et al., 2005).

Según su definición clásica, obtenida de dicho informe, el desarrollo sostenible es *“Aquel desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”* (ONU, 1987). Contiene en su interior dos conceptos clave:

- a) el concepto de "necesidades", en particular las necesidades esenciales de los pobres del mundo, a quienes debe darse una prioridad principal, y
- b) la idea de las limitaciones impuestas por el estado de la tecnología y organización social en la capacidad del medio ambiente para satisfacer las necesidades presentes y futuras.

Así, los objetivos de desarrollo económico y social deben ser definidos en términos de sostenibilidad en todos los países -desarrollados o en vías de desarrollo- orientados al mercado o de planificación centralizada. Las interpretaciones pueden variar, pero deben compartir ciertas características generales y debe surgir de un consenso sobre el concepto básico de desarrollo sostenible y un marco estratégico amplio para su realización.

La satisfacción de las necesidades y aspiraciones humanas es el objetivo principal del desarrollo. Las necesidades esenciales de un gran número de personas en los países en desarrollo, como: alimentación, vestido, vivienda y empleo, no se están satisfaciendo; y más allá de las mencionadas, estas personas tienen legítimas aspiraciones a una mejor calidad de vida. Un mundo en el que la pobreza y la desigualdad son endémicas de regiones específicas será siempre propenso a sufrir crisis, entre ellas la ecológica. El desarrollo sostenible busca satisfacer lo antes expuesto (ONU, 1987).

Lograr tal cometido depende, en parte, del logro de potencial crecimiento y desarrollo sostenible aunado al crecimiento económico en los lugares deficitarios. La consistencia entre

ellos reflejará los principios generales de la sostenibilidad y la no explotación de los demás. Pero el crecimiento por sí solo no es suficiente; los altos niveles de actividad productiva y la pobreza generalizada pueden coexistir y poner en peligro el medio ambiente. Por lo tanto el desarrollo sostenible exige que las sociedades satisfagan las necesidades humanas, al aumentar la capacidad productiva garantizando la igualdad de oportunidades para todos (ONU, 1987).

Una expansión en número puede aumentar la presión sobre los recursos y disminuir el aumento de los niveles de vida en las zonas en que la privación es generalizada. Aunque la cuestión no es sólo del tamaño de la población, sino de la distribución de los recursos; el desarrollo sostenible sólo puede llevarse a cabo siempre que la evolución demográfica esté en armonía con las variaciones del potencial productivo del ecosistema (ONU, 1987).

Una sociedad puede poner de muchas maneras en peligro su capacidad para satisfacer las necesidades esenciales de su pueblo en el futuro, por ejemplo con la sobreexplotación de los recursos. La dirección de los avances tecnológicos puede solucionar algunos problemas inmediatos pero puede conllevar a otros mayores. Grandes sectores de la población pueden ser marginados por el desarrollo mal dirigido (ONU, 1987).

La agricultura sedentaria, la desviación de cursos de agua, la extracción de minerales, la emisión de calor y gases nocivos a la atmósfera, los bosques comerciales, y la manipulación genética, son todos ejemplos de la intervención humana en los sistemas naturales en el curso del desarrollo. Hasta hace poco, estas intervenciones fueron de pequeña escala y su impacto limitado. Las intervenciones actuales son más drásticas en escala e impacto, y más amenazantes a los sistemas sustentadores de la vida tanto a nivel local como mundial. Como mínimo, el desarrollo sostenible no debe poner en peligro los sistemas naturales que sustentan la vida en la Tierra: la atmósfera, las aguas, los suelos y los seres vivos (ONU, 1987).

### **1.1.1 LA SOSTENIBILIDAD BASADA EN CRITERIOS.**

La sostenibilidad ha de ser ambiental, social y económica, es decir, ha de utilizar criterios ecológicamente viables y no degradantes, ser socialmente aceptada y deseada, económicamente realizable con tecnologías apropiadas, y ha de facilitar finalmente para el futuro los correspondientes capitales naturales, sociales y económicos.

Así, tal y como dice lo anterior y como se refleja en la Figura 1-1, la sostenibilidad debe ser desde tres puntos de vista: ambiental, social, económico y conjuntamente (Xercavins et al., 2005).

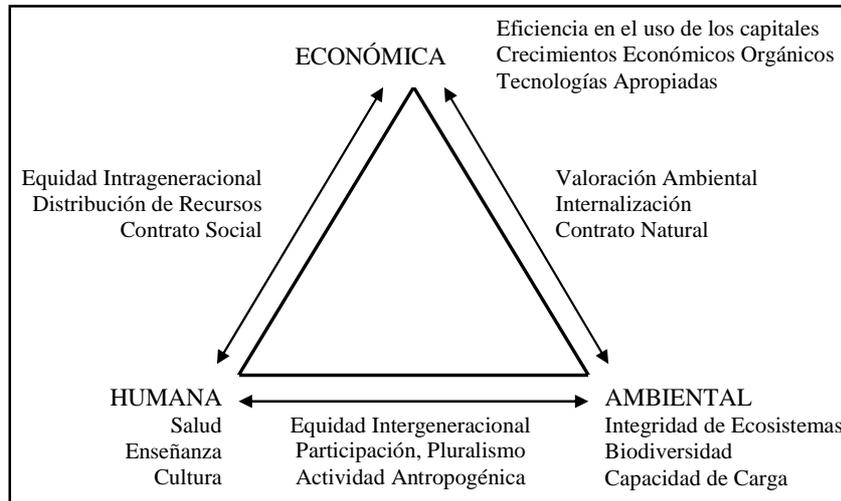


Figura 1-1. La triangularidad de la Sostenibilidad. (Fuente: Xercavins, et al., 2005)

### 1.1.2 PRINCIPIOS DE SOSTENIBILIDAD.

Globalidad, integración, límites, participación y justicia son las piezas que integran el complejo concepto del desarrollo sostenible. La química verde consiste en el desarrollo de las metodologías para modificar la naturaleza intrínseca de los productos o procesos con la finalidad de reducir los riesgos que estos involucren tanto para el ambiente como para la salud humana (Anastas 1998).

1. Es preferible evitar la generación de un residuo que tratarlo o limpiarlo una vez formado.
2. Se deben desarrollar métodos que maximicen la incorporación de todos los materiales de un proceso en el producto final.
3. Cuando sea posible, se deben diseñar sustancias químicas que sean de baja o nula toxicidad para el ambiente o los seres humanos.

4. Las sustancias químicas se deben diseñar de manera que sean eficientes al mismo tiempo que tengan baja peligrosidad.
5. El uso de sustancias auxiliares (solventes, agentes de separación, etc.) debe ser evitado cuando sea posible y cuando no, se deben utilizar sustancias inocuas.
6. Se deben analizar, y de ser posible reducir, los requerimientos de energía dependiendo de sus impactos ambientales y económicos. Son preferibles los procesos a temperatura y presión atmosférica.
7. Las materias primas deben ser preferentemente renovables.
8. Cuando sea posible se debe evitar la derivación innecesaria (protección/desprotección, modificaciones temporales de procesos fisicoquímicos, etc.).
9. El uso de catalizadores es preferible al uso estequiométrico de sustancias químicas.
10. Los productos químicos deben diseñarse para que al final de su vida útil no persistan en el ambiente y formen productos de degradación inocuos.
11. Es necesario el desarrollo de metodologías analíticas que permitan el monitoreo continuo de los procesos para verificar y controlar la formación de sustancias peligrosas.
12. Las sustancias utilizadas en los procesos químicos se deben seleccionar de manera que se minimice el potencial de ocurrencia de accidentes químicos (como explosiones e incendios).

### **1.1.3 LA SOSTENIBILIDAD Y EL DESARROLLO AGRÍCOLA.**

Se define la agricultura sostenible como “un sistema integrado de prácticas de producción vegetal y animal que tienen aplicación a un sitio específico y que a largo plazo debe: satisfacer el alimento humano; mejorar la calidad ambiental, y la base de los recursos naturales, de la que depende la actividad agrícola; hacer el más eficiente uso de los recursos no renovables y de los recursos locales, integrando en lo posible los ciclos y controles naturales biológicos; sostener la viabilidad económica de las operaciones de las fincas, y mejorar la calidad de vida de los finqueros y de la sociedad en general” (IICA, 1995).

El Comité Asesor Técnico del Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (TAC/CGIAR) entiende por agricultura sostenible: "...el manejo exitoso de los recursos para la agricultura, para satisfacer las necesidades cambiantes del ser humano mientras se mantiene o mejora la calidad del ambiente y se conservan los recursos naturales" (IICA, 1995).

A partir de todo lo anterior, los requisitos indispensables para alcanzar la sostenibilidad serían que todas las acciones y sus resultados cumplan con los criterios ambientales, sociales y económicos antes descritos.

En el caso específico de la agricultura se ha de procurar un equilibrio entre el uso de los recursos naturales y su producción, de manera que no se ponga en peligro el futuro de las próximas generaciones, reduciendo lo más posible el uso de insumos foráneos y eliminando la contaminación. Debe procurarse un crecimiento con igualdad, con gran participación comunitaria, y que promueva la conservación de los recursos naturales, manteniéndose dentro de la capacidad de carga de la tierra.

Existen dos extremos en la agricultura tropical: la que se fundamenta en el alto uso de insumos externos que afectan el ambiente y el agotamiento de los recursos no renovables, y la basada en bajo uso de insumos externos, generalmente practicada con el empleo de métodos erosivos que hacen que los recursos naturales no brinden sustento a las poblaciones locales (IICA, 1995).

Entre los dos extremos de prácticas agrícolas existen elementos que ofrecen grandes oportunidades para orientar las prácticas agrícolas del futuro hacia la sostenibilidad. Para el caso, la alta innovación en ciencia y tecnología agrícola nos indica que los científicos dedicados a esta labor podrían reorientar, con el apoyo de otras áreas del saber, la investigación hacia la sostenibilidad agrícola (IICA, 1995).

Es vital para este proceso de alcanzar la sostenibilidad impulsar la participación de la población a nivel local; es decir, que en todas las acciones que tomemos se deben anteponer los intereses de esa población y su bienestar, su seguridad alimentaria, su calidad de vida, y

permitir su participación en todos los procesos de decisión y ejecución. Para ello será necesaria una inducción que posibilite que los productores agrícolas se compenetren del efecto de sus acciones en el medio ambiente, de manera que adquieran conciencia de que este cambio es absolutamente necesario, no sólo para su bienestar personal y económico, sino también para el de las generaciones futuras (IICA, 1995).

Para que se adopten con prontitud las nuevas tecnologías se requerirá contar con una organización adecuada de los productores agrícolas, a fin de que tengan acceso inmediato a ellas, y puedan obtener ventaja de las oportunidades que brinda la agricultura orgánica, la agricultura basada en sistemas de producción y en la producción forestal, así como en la fijación de bióxido de carbono y la conservación de la biodiversidad, entre otros. Esta organización es necesaria también para acceder a mercados que les permitan vender sus productos a mejores precios.

Esto debe funcionar tanto para que la investigación y la transferencia sean efectivas, como para que los productores y consumidores sean beneficiados de las prácticas de agricultura sostenible.

## **1.2 PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.**

El enfoque moderno de las tecnologías limpias, en el sentido de que la forma más inteligente de resolver la problemática ambiental es evitarla, se debe lograr con procesos productivos y de servicios capaces de utilizar un número reducido de recursos y generar una cantidad reducida de desechos. El concepto más ampliado es el de tecnologías ambientalmente integradas, en el sentido de que todo el sector productivo sea capaz de trabajar en procesos productivos limpios y complementarios entre sí, donde el desecho de un proceso productivo constituya un insumo de otro (Carbajal, 2001).

Esto implica una relación entre el concepto de producción y consumo sostenible. La producción limpia es parte de una estrategia fundamentalmente dirigida al desarrollo sostenible y sus características son una oferta ambientalmente responsable y una demanda ambientalmente informada. Es decir, quien produce debe tener clara su responsabilidad

ambiental; y el que demanda, conocer bien las implicaciones ambientales de los bienes y servicios que demanda.

### **1.2.1 DEFINICIÓN DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.**

El concepto de producción más limpia fue creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 1989 ante la necesidad de diseñar un enfoque más general e integrado sobre los cambios en los procesos productivos que superara el restrictivo de diversas técnicas que se venían utilizando, como “minimización de residuos”, “prevención de la contaminación”, “reducción en origen”, etc. Considera que *“la producción más limpia constituye la continua aplicación de una estrategia ambiental integrada y preventiva a los procesos y productos con el objeto de reducir los riesgos para la salud humana y el medio ambiente”* y es, además, promovida ya que “ofrece una aproximación más sistemática y amplia” que la ecoeficiencia.

La producción más limpia incluye la conservación de materias primas y energía, la eliminación de materias primas tóxicas y la reducción de la cantidad y capacidad de impacto de todas las emisiones y los residuos antes de que estos abandonen el proceso. En relación con los productos, la estrategia se centra en reducir los impactos a lo largo de su ciclo de vida. Nos encontramos no ante un objetivo determinado, sino ante una política de mejora continua (Bermejo, 2005).

La producción más limpia aborda la contaminación industrial de manera preventiva. Concentra la atención en los procesos, productos y servicios, y la eficiencia en el uso de las materias primas e insumos, con el objetivo de promover mejoras que permitan reducir o eliminar los residuos antes que se generen (UTN, 2008).

La experiencia internacional comparada ha demostrado que, a largo plazo, la producción más limpia es más efectiva desde el punto de vista económico y más coherente desde el punto de vista ambiental, con relación a los métodos tradicionales de tratamiento de residuos “al final del proceso” (UTN, 2008).

Los métodos de tratamientos “al final del proceso” se concentran en qué hacer con los desperdicios una vez que ya han sido creados, a diferencia de la Producción más Limpia donde las técnicas de prevención de la contaminación pueden aplicarse a cualquier proceso de manufactura y abarcan desde cambios operacionales relativamente fáciles de ejecutar, hasta cambios más extensos, como la sustitución de insumos tóxicos o el uso de tecnologías más limpias y eficientes.

Es importante destacar que la filosofía del proceso de producción más limpia está sobre todo relacionada con la reducción al máximo de la generación de residuos a lo largo de toda la cadena de producción. Sin embargo, no existe una producción limpia como tal, la generación de residuos es inherente a cualquier proceso productivo. Lo que busca el proceso es evitar una generación excesiva de residuos, dado que por un lado es considerada una pérdida económica debido al mal aprovechamiento de los recursos e insumos empleados, y por el otro, éstos son contaminantes y afectan a la salud y el ambiente, por lo que su reducción permite prevenir impactos ambientales negativos (UTN, 2008).

Por tanto, el enfoque de la Producción más Limpia, trata de reducir de manera continua la generación de residuos y contaminantes en cada etapa del ciclo de vida.

### **1.2.2 ¿POR QUÉ APLICAR PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA?**

La Producción Más Limpia (P+L), además de brindar una opción eficiente para lograr disminuir los niveles de contaminación y riesgos ambientales y ocupacionales, es frecuentemente una buena propuesta de negocio. Al gestionar de manera eficiente los materiales y optimizar los procesos, se obtienen menos desechos y costos de operación más bajos. Generalmente, los trabajadores aumentan en su productividad, debido al mejor clima de trabajo, la menor pérdida de tiempo en sus tareas, y la disminución del ausentismo por accidentes o enfermedades (Rosemberg, 2008).

Es importante destacar que la P+L, al revisar los procesos productivos, permite visualizar oportunidades de mejora para utilizar de manera racional las materias primas y la energía, contribuyendo a reducir las emisiones y los desechos en la fuente. Asimismo, esta técnica

tiene en cuenta la disminución en los impactos producidos por los productos a lo largo de todo su ciclo de vida (Rosemberg, 2008).

### **1.2.2.1 BENEFICIOS.**

Además de los beneficios ambientales que se observan con la implantación de un programa de producción más limpia, se identifican otros, como los financieros, operacionales y comerciales, detallados a continuación (UTN, 2008):

#### **1. Beneficios Financieros**

- a. Reducción de costos por optimización del uso de las materias primas e insumos en general.
- b. Ahorro por mejor uso de los recursos (agua, energía, etc.)
- c. Reducción en los niveles de inversión asociados a tratamiento y/o disposición final de residuos.
- d. Aumento de las ganancias.

#### **2. Beneficios Operacionales**

- a. Aumento de la eficiencia de los procesos.
- b. Mejora de las condiciones de seguridad y salud ocupacional.
- c. Mejora en las relaciones con la comunidad y la autoridad de auditoría ambiental.
- d. Reducción en la generación de residuos.
- e. Aumento de la motivación del personal.

#### **3. Beneficios Comerciales**

- a. Mejora el posicionamiento de los productos que se venden en el mercado.
- b. Mejora la imagen corporativa de la empresa.
- c. Facilita el acceso a nuevos mercados.
- d. Aumenta las ventas y el margen de ganancias.

### **1.2.3 ESTRATEGIAS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.**

Cuando se decide implementar un plan de P+L en una empresa se debe hacer con un criterio jerárquico de actuación medioambiental de acuerdo al siguiente orden de prioridades:

1. Prevenir la generación de residuos y emisiones.
2. Reciclaje.
3. Tratamiento.
4. Disposición segura.

Cada una de estas alternativas se deben usar sólo cuando se hayan acabado las posibilidades de actuación del estadio superior, por ejemplo, el reciclaje de materiales se debe realizar únicamente cuando se hayan agotado las posibilidades de prevención; y así sucesivamente (Rosemberg, 2008).

### **1.2.4 ACCIONES MÁS COMUNES DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA.**

- 1. Buenas prácticas operativas.**
  - a. Procedimientos y métodos de trabajo y organización.
  - b. Segregación de desechos.
  - c. Sistemas de Gestión.
  - d. Mejor manejo de materias primas e insumos.
  - e. Capacitación del recurso humano.
  
- 2. Sustitución de insumos.**
  - a. Menos tóxicos.
  - b. Renovables.
  - c. Materiales auxiliares con más vida útil.

- 3. Control de los procesos.**
  - a. Instrucciones y procedimientos operativos redactados en forma clara y disponible al personal.
  - b. Registros de las operaciones para corroborar cumplimiento de especificaciones de procesos.
  
- 4. Modificación de las máquinas y equipos.**
  - a. Mejor equipamiento.
  - b. Mejores condiciones de trabajo y operación.
  
- 5. Modificación de tecnología.**
  - a. Cambios en la Planta.
  - b. Mejor Tecnología.
  - c. Mayor automatización.
  
- 6. Reutilización, recuperación y reciclaje.**
  - a. Reaprovechamiento de materiales para que sirvan como insumo de otro proceso dentro de la empresa.
  
- 7. Aprovechamiento de subproducto.**
  - a. Separación y transformación del residuo en un subproducto para ser utilizado por la misma empresa o vendido a otras.
  
- 8. Reformulación-rediseño del producto.**
  - a. Diseño con menor impacto ambiental durante su producción.
  - b. Diseño con menor impacto ambiental durante su utilización.
  - c. Alargamiento de la vida útil del producto.

### **1.3 AGRICULTURA LIMPIA.**

Todas las prácticas de P+L están encaminadas a la conservación de las materias primas, agua y energía, eliminación de las materias primas tóxicas y peligrosas, reducción de la cantidad y toxicidad de todas las emisiones y desperdicios durante el proceso de producción, buscando la obtención de productos más inocuos para los consumidores, la preservación de los recursos utilizados, y una mejor relación beneficio – costo para los productores, gracias a la eficiencia de los procesos implementados (Borbón et al., 2009).

Para la aplicación de procesos de Producción Más Limpia en las fincas, se deben tener en cuenta estrategias de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), contribuyendo a mejorar la producción, reduciendo los costos ambientales ligados a ella, dando como resultado la preservación de los recursos naturales (Borbón & al, 2009).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), las Buenas Prácticas Agrícolas son un conjunto de normas, principios y recomendaciones técnicas aplicadas a las diversas etapas de la producción agrícola; las cuales incorporan el Manejo Integrado de Plagas (MIP) y el Manejo Integrado del Cultivo (MIC), cuyo objetivo es ofrecer un producto de alta calidad e inocuidad con un mínimo impacto ambiental, con bienestar y seguridad para el consumidor y los trabajadores, y que permita proporcionar un marco de agricultura sustentable, documentado y evaluable (Borbón et al., 2009).

En general, las Buenas Prácticas Agrícolas se basan en tres principios fundamentales:

1. La obtención de productos sanos que no representen riesgos para la salud de los consumidores.
2. La protección del medio ambiente.
3. El bienestar de los agricultores.

La importancia de conocer y aplicar las Buenas Prácticas Agrícolas como estrategia de manejo para una Producción Más Limpia de alimentos y materias primas, enmarcadas en el

Desarrollo Sostenible, radica en que con un inadecuado manejo en los sistemas de producción agrícola, se causa un gran impacto ambiental, puesto que según la FAO, un tercio del calentamiento atmosférico y el cambio climático obedece a las malas prácticas en la agricultura (Borbón et al., 2009).

En general se reconoce que alrededor del 25% del principal gas que produce el efecto de invernadero, el dióxido de carbono, procede de la agricultura, en especial, de la deforestación y la quema de biomasa. Los rumiantes domésticos, los incendios forestales, el cultivo de arroz en los humedales y los productos de desecho producen la mayor parte del metano que existe en la atmósfera, a la vez que la labranza convencional y la utilización de fertilizantes generan el 70% de los óxidos nitrosos (Borbón et al., 2009).

### **1.3.1 LA AGROINDUSTRIA Y SUS CO-PRODUCTOS.**

La coincidencia de disciplinas y áreas de conocimiento comunes en la formación de los profesionales de la química, y otras profesiones afines, permite considerar la posibilidad de actuar interdisciplinariamente en campos que requieren innovación y desarrollo. La reorganización de saberes lleva a vislumbrar nuevas formas de aprendizaje e investigación aplicada, ello constituye un nicho de oportunidad profesional bajo enfoques tecnológicos convergentes, tanto ínter como multidisciplinarios. Las áreas de alimentos y agroindustrias son áreas de oportunidad para la producción y la investigación aplicada (Islas, 2007).

El campo de trabajo se encuentra en las áreas productivas de transformación y de servicios. En el caso de los químicos agrícolas y la ingeniería de agroquímicos, las principales áreas son: industria alimentaria; laboratorios de biotecnología de plantas; centros de investigación y desarrollo tecnológico; laboratorios de análisis químicos de materias primas, aguas, suelos, fertilizantes, forrajes y alimentos, y laboratorios y bufetes de certificación o de asesoría técnica.

En las ingenierías debe incluirse la planeación e instalación de agroindustrias, las estrategias de escalamiento de los procesos industriales, el diseño de plantas y la optimización de procesos. Muchas de las áreas y funciones descritas también pueden ser el

campo de acción de los ingenieros químicos, ingenieros ambientales, químicos industriales y otros profesionales, como los licenciados en nutrición o ingenieros agrónomos. Todos ellos pueden evaluar y controlar las variables de rendimiento de los cultivos y los parámetros de madurez comercial y de calidad pos cosecha de los productos de campo; además de investigar, seleccionar y desarrollar nuevos productos alimenticios y aprovechar y tratar desechos agroindustriales y municipales para proteger el medio ambiente, estos profesionales también pueden contribuir a crear nuevos productos. Es indudable que en alimentos, tecnología y desarrollo, ésta es una de las mejores oportunidades para hacer investigación y desarrollo en condiciones ínter y multidisciplinarias (Islas, 2007).

Carole Brookins, ex vicepresidente del Banco Mundial (2001-2005), ha estimado que el crecimiento de los países con economías emergentes (fundamentalmente China e India) hará que se incorporen mil millones de personas a la clase media mundial. El aumento consecuente en el consumo de alimentos constituye una formidable oportunidad para los países que cuenten con la capacidad para producirlos. De ahí que –según un artículo de Eduardo Remolins– aunque hace treinta o cuarenta años producir alimentos no se consideraba una buena estrategia para una nación en desarrollo pues había que industrializarla, *“hoy el mundo ha cambiado y los alimentos ya no son lo que solían ser. No sólo la creciente demanda garantizará buenos precios para las próximas décadas, sino que el valor agregado a los alimentos también es creciente y los asemeja más a sofisticados bienes de la era del conocimiento que a modestas materias primas”* (Islas, 2007).

Por otra parte, el mercado emergente de los productos fitoterapéuticos (químicos naturales de origen vegetal) es otro nicho promisorio. El desarrollo de esos productos incluye el trabajo con organismos nacionales de ciencia y tecnología y novedosas formas de cooperación pública y privada. Pequeños centros científicos que realizan descubrimientos se asocian con las grandes empresas para perfeccionar y lanzar internacionalmente los productos; sin embargo, el mercado de los alimentos funcionales no excluye a productores menores, como las pequeñas y medianas empresas (PyMEs), donde se pueden encontrar pequeños laboratorios con procesos confiables y productos innovadores. Esta es una

tendencia creciente dada la demanda y el nivel de sofisticación requerido en los productos (Islas, 2007).

### **1.3.1.1 LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA Y LOS MERCADOS QUÍMICOS.**

Dentro de la química, en forma general, se prevé que la biotecnología permitirá ampliar la producción agrícola hacia el mercado de productos intermedios, con el criterio de que sus aplicaciones contribuirán a:

- a. Disminuir los costos de producción y de transformación de la biomasa agrícola;
- b. Aumentar los volúmenes producidos a fin de satisfacer simultáneamente las necesidades agroalimentarias y las necesidades energético-químicas, sin incrementar los precios agrícolas;
- c. Ampliar la gama de productos de la química orgánica (Arias, 1991).

## 2 GENERALIDADES DEL MAÍZ.

---

Con el propósito de abordar la agroindustria salvadoreña para implementar proyectos de ingeniería sostenible, el maíz resulta ser el cultivo predominante en la intención de siembra, así como en el consumo de gran parte de la población. En esta sección se presenta una recopilación de factores productivos y económicos de la agroindustria del maíz, terminando con un aspecto importante como es la generación de los desechos agrícolas y su potencial aprovechamiento.

### 2.1 ORIGEN DEL MAÍZ.

En la actualidad se acepta que el maíz es originario de América, concretamente de la zona situada entre la mitad del sur de México y el sur de Guatemala según sus registros fósiles más antiguos, encontrados en la ciudad de México, consistentes en muestras de polen de un maíz primitivo y tienen entre sesenta y ochenta mil años de antigüedad, en Sudamérica las pruebas arqueológicas de la transformación del maíz son más recientes y escasas; se localizan principalmente en las zonas costeras del Perú. A partir de estas áreas, el cultivo del maíz fue extendiéndose, primero a América del Norte y, tras la llegada de Colón al continente, al resto del mundo (Garcés, N. 1987).

### 2.2 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DEL MAÍZ.

Taxonómicamente, el maíz se clasifica así (Garcés, N., 1987):

- **DIVISIÓN:** Angiosperma.
- **CLASE:** Monocotiledóneas.
- **SUBCLASE:** Macrantineas.
- **ORDEN:** Graminales.
- **FAMILIA:** Gramínea.
- **GENERO:** Zea.
- **ESPECIE:** mays.
- **NOMBRE CIENTÍFICO:** Zea mays(Garcés, N. 1987).

## 2.3 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA.

**Planta.** El maíz es una gramínea anual de crecimiento rápido y gran capacidad productiva, adaptada a las más diversas condiciones de clima y suelo. Se constituye después del arroz y el trigo, en el cultivo más importante del mundo para la alimentación humana y animal. (Verissimo, L. 1999).

**Raíz.** Las cuatro o cinco raíces se desarrollan inicialmente a partir de la semilla (raíces primarias) sólo son funcionales durante los primeros estados de desarrollo. Estas raíces van degenerando y son sustituidas por otras secundarias o adventicias, que se producen a partir de los 8 o 10 primeros nudos de la base del tallo, situados por debajo del nivel del suelo, formando un sistema radicular denso a modo de cabellera que se extiende a una profundidad variable, a partir de los 4 o 5 nudos por encima de la superficie, emite otro tipo de raíces adventicias más gruesas. (Fernández, J. 1999).

**Tallo.** El maíz es una planta anual, su tallo es una caña formado por nudos y entrenudos macizos, de longitud variable, gruesos en la base y menos grueso en los entrenudos. El número de nudos es variable en las diferentes variedades, en cada entrenudo hay una depresión en forma de canalito que se extiende a lo largo del entrenudo, cada nudo es el punto de inserción de una hoja. (Reyes, r. 1985).

**Hojas.** La vaina de la hoja forma un cilindro alrededor del entrenudo, pero con los extremos desunidos. Su color visual es verde pero se pueden encontrar hojas rayadas de blanco y verde, o verde y púrpura. El número de hojas por planta varía entre 8 a 25. (Parsons, D. 1998).

**Flor.** Es una planta monoica es decir, con flor masculina y femenina que están en la misma planta, pero separadas, las flores masculinas aparecen en la extremidad del tallo y están agrupadas en panículas, las flores femeninas aparecen en las axilas de algunas hojas y están agrupadas en una espiga rodeada de largas brácteas. A esta espiga suele llamarse mazorca y presenta, en su extremidad superior, largos estilos en forma de pincel que reciben el nombre de barbas o sedas. (Herrera, J. sf).

**Fruto.** La mazorca o fruto, está formada por una parte central llamada zuro, donde se adhieren los granos de maíz en número de varios centenares por cada mazorca. El zuro o corazón, representa del 15 al 30% del peso de la espiga. La fecundación de las flores femeninas puede suceder mediante el polen de las panojas de la misma planta o de otras plantas; el fruto y la semilla forma un sólo cuerpo que tiene la forma de una cariósida brillante, de color amarillo, rojo, morado o blanco que se denominan vulgarmente como granos y dentro del fruto, que es el ovario maduro, se encuentran las semillas (óvulos fecundados y maduros), la semilla está compuesta de cubierta o pericarpio, endospermo amiláceo y embrión o germen y pesa aproximadamente 0.3 gramos. (Garcés, 1987)

En la Tabla 2-1 se muestran resultados de análisis físicoquímicos realizados a la planta de maíz. Donde el contenido de fibra para zuros, hojas y rastrojos es de 39, 31 y 28% en base húmeda. (Berrios y Castro 1997.)

**Tabla 2-1. Composición química de la planta y grano de maíz (% en base húmeda).**

<b>Aspecto</b>	<b>Maíz</b>	<b>Zuro (Olote)</b>	<b>Hojas (Tusa)</b>	<b>Rastrojo</b>
<i>Materia seca</i>	85.00	90.00	89.00	83.00
<i>Proteína total</i>	8.70	2.50	3.10	1.50
<i>Proteína digestible</i>	6.70	~	0.90	0.80
<i>Nutrientes digestibles totales (TND)</i>	8.00	42.00	60.00	41.00
<i>Grasa</i>	4.00	0.40	0.90	0.80
<i>Fibra cruda</i>	2.00	39.00	31.00	28.00
<i>Calcio</i>	0.02	0.11	0.08	0.32
<i>Fósforo</i>	0.27	0.40	0.52	0.23

Fuente: Berrios y Castro. TND = Nutrientes digestibles totales.

## 2.4 ASPECTOS AGRONÓMICOS.

El maíz prospera en climas templados y soleados, donde el suministro de humedad es adecuado durante la temporada de crecimiento. En cuanto a la humedad, los momentos, más críticos en el período del desarrollo del cultivo coincide con la aparición de la espiga masculina, la polinización y el período en que aparecen los granos.

El maíz se adapta típicamente en los suelos de alta fertilidad y buen drenado. El cultivo requiere abundancia de nitrógeno y cantidades liberales de fosfato y potasio. Mejora en los suelos cuya acidez no es más que moderada y que contienen considerable cantidades de calcio, magnesio y azufre. El cultivo es sensible también a deficiencias en los vestigios de elementos en especial del cinc y el boro. Las escasas pruebas de la investigación tropical sugieren que, en algunos suelos de altura considerablemente intemperizados, algunos de los vestigios de elementos cobre, cinc, boro, molibdeno, manganeso y hierro, pueden ser demasiados escasos para la producción lucrativa del maíz

La práctica del cultivo del maíz se realiza con una metodología sencilla, y comienza con la elección de la época adecuada de siembra (Tabla 2-2), luego se continúa con una preparación adecuada del terreno a cultivar, para aprovechar al máximo los nutrientes y mejorar el drenaje del suelo. Una vez se tenga las condiciones óptimas del suelo y climáticas se procede a la siembra de la semilla de maíz la cual una vez germinada da paso al sistema de raíces que toma los nutrientes del suelo, para permitir el desarrollo del tallo y hojas hasta alcanzar su plena madurez. (Berrios y Castro, 1997)

**Tabla 2-2. Épocas de siembra recomendadas para el cultivo de maíz en las diferentes zonas de El Salvador.**

<b>Épocas</b>	<b>Zona Costera de (0-450 m.s.n.m.)</b>	<b>Valles INT de (450-900 m.s.n.m.)</b>	<b>Zonas altas de (900-1600 m.s.n.m.)</b>
<i>Primavera</i>	15-30 de mayo	15 mayo/15 junio	26 abril/26 junio
<i>Postrera</i>		15 mayo/31 agosto	
<i>De riego a humedad</i>	Del 1-15 de Dic.	Del 1-15 de Dic.	

(Fuente: Berrios y Castro, 1997)

### **2.4.1 TIPOS DE MAÍZ (VARIEDADES E HÍBRIDOS).**

**Maíz Reventón.** Se caracteriza por tener un almidón más duro y en él existen tubos capilares rellenos de agua y aire. Al ser sometidos a la acción del calor, el endospermo explota, dejando expuesta la parte interior del grano. Se utiliza sobre todo para el consumo humano. (Parsons, D. 1998).

**Maíz Harinoso.** El maíz harinoso es de importancia comercial, los granos no son dentados y están formados principalmente por almidón suave exceptuando una pequeña y delgada capa de almidón duro situado alrededor del grano, sus colores más comunes son el blanco y azul. (Richard, J. 1983). 4.3.

**Maíz dulce.** El grano es de aspecto arrugado y el endospermo córneo, contiene 11% de azúcar, es adecuado para el consumo humano. (Irigoyen, H. 1982).

**Maíz Cristalino.** Tiene un endospermo duro y granos con almidón compacto. Este maíz se usa tanto en la alimentación como materia prima para la obtención de alcohol y almidón. (Parsons, D. 1998).

**Maíz Dentado.** Es un tipo intermedio entre los duros y los harinosos. Su característica principal es una depresión en la parte superior del grano. (Herrera, J. sf). 4.6. Maíz duro. Las semillas contienen una porción central harinosa pequeña, el endospermo periférico es córneo, se usa en la alimentación de las aves. (Crespo, S. 1999).

**Maíz Tunicado.** Considerado como primitivo, cada grano individual está envuelto o cubierto por glumas o túnica, similar al arroz, insertado en el raquis, y la mazorca a su vez está cubierta por las brácteas. (Reyes, R. 1985).

### **2.5 GRANOS BÁSICOS EN EL SALVADOR.**

La producción de granos básicos como el arroz, maíz, sorgo y frijol son de suma importancia para el país; ya que forman parte esencial de la dieta alimenticia de la

población. Además El Salvador posee las condiciones climáticas y de suelos adecuadas para cultivar y cosechar dichos productos.

Se puede mencionar que de los granos básicos el que se destaca por ocupar un mayor porcentaje de superficie cosechada es el maíz con, seguido del sorgo y frijol y en último lugar el arroz (DGEA-MAG).

## 2.6 RESIDUOS AGRÍCOLAS DEL MAÍZ EN EL SALVADOR.

La división territorial del país que utiliza la Dirección General de Economía Agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG-DGEA) se divide en cuatro regiones departamentales (Tabla 2-3) y con base en ello generan información sobre la producción agrícola en El Salvador.

**Tabla 2-3. Regionalización agrícola por departamentos en El Salvador**

<b>Región</b>	<b>Departamento</b>	<b>Región</b>	<b>Departamento</b>
<b>I</b>	Ahuachapán	<b>III</b>	La Paz
	Santa Ana		Cabañas
	Sonsonate		San Vicente
<b>II</b>	Chalatenango	<b>IV</b>	Usulután
	San Salvador		San Miguel
	Cuscatlán		Morazán
	La Libertad		La Unión

Fuente: MAG-DGEA

### 2.6.1 AGRICULTORES CON RESIDUOS SOBANTES.

El MAG-DGEA no cuantifica los residuos generados del maíz, solo se limita a la producción de maíz en sí. Para el cálculo de las cantidades de residuos generados, se utilizó información proporcionada por dicha dependencia gubernamental, sobre rendimientos de maíz por manzana de tierra cultivada y la superficie en manzanas de tierra cultivada por los agricultores. Para los cálculos se utilizarán los datos experimentales de las razones peso y se aplicarán las siguientes ecuaciones:

$$CRTOTAL = CRT + CRO + CRHC$$

$$CRT = 0.1764 \times R \times S \times (1/20)$$

$$CRO = 0.2195 \times R \times S \times (1/20)$$

$$CHC = 0.8302 \times R \times S \times (1/20)$$

Donde:

- *CRTOTAL*: Cantidad de residuos totales del cultivo de maíz (Ton)
- *CRT* : Cantidad de Residuos de Hoja (Ton)
  - ✓ 0.1764: Razón peso promedio Hoja/Maíz al 12.32% de humedad
- *CRO* : Cantidad de Residuos de Zuro (Ton)
  - ✓ 0.2195: Razón peso promedio Zuro/Maíz al 9.56% de humedad
- *CRHC*: Cantidad de Residuos de Hoja/Caña (Ton)
  - ✓ 0.8302 : Razón peso promedio Hoja/Caña/Maíz al 11.12% de humedad
- *R*: Rendimiento de maíz por manzana en qq/Mz
- *S* : Superficie cultivada en manzana

**Ejemplo de cálculo** - Para año 2009/ 2010 en base a los resultados de la segunda encuesta de propósitos múltiples 2009-2010.

- Cálculo de la Cantidad de Residuos de Hoja de Maíz
 
$$CRT = 0.1764 * R * S * \left(\frac{1}{20}\right)$$

$$CRT = 0.1764 \left(\frac{qq}{qqm}\right) * 46.2 \left(\frac{qqm}{Mz}\right) * 374,128 (Mz) * \left(\frac{1Ton}{20qq}\right)$$

$$CRT = 152,451.17 \text{ Ton de hoja}$$
- Cálculo la Cantidad de Residuos de Olote
 
$$CRO = 0.2195 * R * S * \left(\frac{1}{20}\right)$$

$$CRO = 0.2195 \left(\frac{qq}{qqm}\right) * 46.2 \left(\frac{qqm}{Mz}\right) * 374,128 (Mz) * \left(\frac{1Ton}{20qq}\right)$$

$$CRO = 168,874.03 \text{ Ton de zuro}$$

- Cálculo la Cantidad de Residuo de Hoja/caña/maíz

$$CRHC = 0.8320 * R * S * \left(\frac{1}{20}\right)$$

$$CRHC = 0.8320 \left(\frac{qq}{qqm}\right) * 46.2 \left(\frac{qqm}{Mz}\right) * 374,128 (Mz) * \left(\frac{1Ton}{20qq}\right)$$

$$CRHC = 717,488.46 \text{ Ton de hoja de caña}$$

- Cálculo la Cantidad de Residuos Totales

$$CRTOTALES=CRT+CRO+CRHC$$

$$CRTOTALES= 1, 038,813.66 \text{ Ton Residuos}$$

La producción nacional de maíz en el período 2000 -2010 se presenta en la Tabla 2-4.

**Tabla 2-4. Retrospectiva, Superficie, Producción y Rendimiento de Producción del Cultivo del Maíz en El Salvador 2000/01-2009/10**

<b>Año Agrícola</b>	<b>Superficie (MZ)</b>	<b>Producción (QQ)</b>	<b>Rendimiento (QQ/MZ)</b>
2000/01	370,370	12,673,200	34.20
2001/02	420,150	12,429,497	29.60
2002/03	353,487	14,014,886	39.60
2003/04	327,089	13,815,565	42.20
2004/05	335,458	14,257,000	42.50
2005/06	353,699	16,007,357	45.30
2006/07	344,255	16,325,476	47.40
2007/08	343,614	15,387,155	44.78
2008/09	364,364	19,148,927	52.60
2009/10	374,128	17,291,237	46.20

**Fuente:** Estadísticas Agropecuarias, D.G.E.A.-M.A.G.

La Tabla 2-5 resume la cantidad de residuos generados por la producción de maíz en El Salvador, en el período 2000 – 2010.

**Tabla 2-5. Cantidad de Residuos Generados para el Cultivo de Maíz en Toneladas en El Salvador (2000/01-2009/10).**

<b>Año Agrícola</b>	<b>CRT</b>	<b>CRO</b>	<b>CRHC</b>	<b>CRTOTAL</b>
2000/01	111,719.89	139,016.53	526,932.81	777,669.22
2001/02	109,689.40	136,489.93	517,355.90	763,535.23
2002/03	123,463.11	153,628.99	582,320.34	859,412.44
2003/04	121,743.83	151,489.63	574,211.28	847,444.75
2004/05	125,746.43	156,470.19	593,089.74	875,306.37
2005/06	141,319.02	175,847.65	666,538.69	983,705.36
2006/07	143,922.00	179,086.61	678,815.78	1001,824.39
2007/08	135,713.65	168,872.71	640,100.65	944,687.01
2008/09	169,040.12	210,341.87	797,286.73	1176,668.72
2009/10	152,451.17	189,699.73	719,044.09	1061,194.99
<b>PROMEDIO</b>	<b>133,480.86</b>	<b>166,094.38</b>	<b>629,569.60</b>	<b>929,144.85</b>

Fuente: Estadísticas Agropecuarias, D.G.E.A.-M.A.G.

Se estima que a lo largo de ésta década se ha estado generando en promedio 929,144.85 toneladas métricas anuales de desechos agroindustriales provenientes de la cosecha de maíz, del cual aproximadamente un 25.49% no tiene un uso definido y simplemente se desperdicia (Berrios y Castro, 1997).

El porcentaje restante es aprovechado por los agricultores pero no de manera tal que genere un valor agregado a los ingresos de los productores de maíz

## **2.6.2 MANEJOS ACTUALES DE LOS RESIDUOS DE MAÍZ.**

Tal como se detalla en el planteamiento del problema, el 60% de los residuos se manejan como desperdicios y quema, destinándose solo un 40% para abono, forrajes y combustibles. Por tanto, habría disponibilidad del 60% de ellos para producir químicos orgánicos intermedios o como fuente de energía, sin afectar el uso tradicional de ellos (Tabla 2-6).

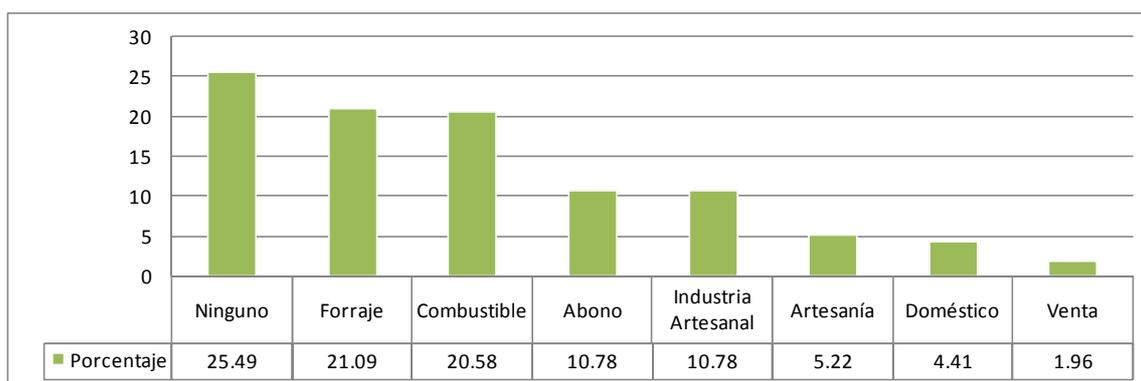
**Tabla 2-6. Principales destinos de residuos del cultivo de maíz en El Salvador (%).**

<b>Manejo</b>	<b>Región I</b>	<b>Región II</b>	<b>Región III</b>	<b>Región IV</b>	<b>Total</b>
<b>Desperdicio</b>	55.55	59.09	50.00	35.00	<b>50.83</b>
<b>Quema</b>	19.44	0.00	9.52	0.00	<b>9.17</b>
<b>Forraje</b>	0.00	4.54	0.00	5.00	<b>1.67</b>
<b>Abono</b>	22.22	31.83	40.48	10.00	<b>28.33</b>
<b>Venta</b>	2.77	0.00	0.00	30.00	<b>5.83</b>
<b>Combustible</b>	0.00	4.54	0.00	20.00	<b>4.17</b>

Fuente: Berrios y Castro 1997

### 2.6.3 USOS POTENCIALES DE LOS RESIDUOS DEL CULTIVO DE MAÍZ.

Los resultados obtenidos al consultar a los agricultores de maíz sobre los usos que conocen y podría dársele a los residuos generados de este cultivo en El Salvador son los siguientes: forraje (alimento para ganado), combustible y ningún uso, con porcentajes de 21.09, 20.58 y 25.49, respectivamente. Otros usos identificados son: artesanías, venta y usos domésticos, con porcentajes de 5.22, 1.96 y 4.41, respectivamente, tal como se muestra en la Figura 2-1 (Berrios y Castro 1997).



**Figura 2-1. Principales usos de residuos de maíz que conocen los agricultores en El Salvador.**

### 2.6.3.1 COMERCIALIZACIÓN DE LOS RESIDUOS.

El porcentaje de agricultores interesados es comercializar los residuos del cultivo de Maíz por región es mostrado en la Tabla 2-7, donde los productores de las Regiones I, II y III están interesados en comercializar los residuos con porcentajes de 84.21, 66.67 y 72.97 respectivamente; mientras los productores de la Región IV presentan un menor interés (36.67%) en ese sentido. A nivel de El Salvador el 66.67% manifiesta interés en comercializar los residuos del cultivo de Maíz; cuyo porcentaje es mayor comparado con el de aquellos con residuos sobrantes (45.17%), esto indica que un porcentaje significativo de ellos sacrificaría algún uso de los residuos con el fin de comercializarlos.

**Tabla 2-7. Interés de los agricultores en comercializar los residuos del maíz**

<b>Región</b>	<b>Si (%)</b>	<b>No (%)</b>
<b>I</b>	84.21	13.79
<b>II</b>	66.67	33.33
<b>III</b>	72.97	27.03
<b>IV</b>	36.67	63.33
<b>Totales</b>	<b>66.67</b>	<b>33.33</b>

Fuente: Berrios y Castro 1997

### **3 GENERALIDADES DEL FURFURAL.**

---

Los proyectos para producir furfural no provienen de un esfuerzo encaminado a producir sustancias químicas como co-productos agrícolas, y precisamente cuando este proyecto fue planteado en sus inicios, nadie tenía en mente la producción del furfural, de manera específica, como posible resultado de estas investigaciones.

Este tipo de proyectos se iniciaron en una época en que a excepción del alcohol etílico y otros procesos de fermentación, los subproductos agrícolas se consideraban de manera casi exclusiva como materia prima para la alimentación animal; corriente que actualmente predomina en los países en vías de desarrollo, los cuales van sumándose poco a poco a este tipo de iniciativas.

Actualmente el furfural es un químico de mucha utilidad, de producción relativamente sencilla y cuya fuente son los desechos agrícolas, y el capital de inversión para quienes lo producen está al alcance de comunidades agrícolas.

#### **3.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA PRODUCCIÓN DE FURFURAL.**

En 1921, Quaker Oats Company de Cedar Rapids, Iowa, tenía unas ollas a presión en desuso que se empleaban en un procesamiento de cereales discontinuado. Para hacer uso de este equipo y de cantidades masivas de cascarilla de avena, generadas en la fabricación de hojuelas de avena, comenzaron la producción industrial de furfural (Zeitsch, 2000).

Las circunstancias de esta iniciativa histórica están espléndidamente descritas en un artículo de Harold J. Brownlee y Carl S. Miner en 1948, que contiene los siguientes pasajes:

"Esta empresa nunca tuvo una planta piloto para furfural. El trabajo se trasladó directamente de los experimentos de laboratorio para lo que era esencialmente una unidad de escala completa. Este fue el resultado del hecho de que la Quaker Oats Company tenía disponible en la planta en Cedar Rapids, donde operaría la primera planta de producción de

furfural, una serie de ollas a presión de hierro alrededor de 8 x 12 pies, que habían sido utilizadas en la fabricación de un producto de cereales, que no resultó rentable. Dado que estas cocinas estaban disponibles y ya que el proceso iba a consistir del tratamiento de la cascarilla de avena con ácido bajo presión, parecía aconsejable tratar de utilizar estos digestores al menos para los primeros intentos de operación en gran escala.

Cuando se tomó la decisión de revestir el digestor de hierro en Cedar Rapids con un material resistente al ácido, se realizó un estudio de una serie de metales. Una consulta con los diversos proveedores indicó el uso de 20 capas de Monel, que los bordes debían ser subidos y soldados. El revestimiento del digestor se terminó, y la digestión se realizó por primera vez en noviembre de 1921.

Antes del experimento real, se ejecutó una prueba con el recubrimiento de metal Monel mediante la aplicación de presión de vapor que soplaba de 60 a 70 libras, y la aplicación inmediata de vacío, pero cuando el digestor se abrió después de la prueba, el revestimiento se había hundido de mala manera. Al parecer había unos pocos agujeros que permitían que el aire y el vapor de agua se filtraran lentamente por detrás del revestimiento. Esta prueba se repitió al menos una vez más antes de que este método de instalación de un revestimiento ajustado fuera abandonado. Por último, se dejaba un agujero en cada extremo del digestor en el revestimiento de Monel para que actuaran como respiraderos y equilibraran la presión en ambos lados de la chaqueta. Esto previno más cavitaciones, pero tenía el inconveniente de que los vapores corrosivos de las cáscaras penetraron detrás de la coraza de metal Monel y, finalmente, provocaron la corrosión del hierro. El revestimiento sirvió, sin embargo, para gran parte del trabajo preliminar sobre el furfural, pero nunca resultó del todo satisfactoria. Más tarde estas corazas estaban hechas de cobre, pero nunca fueron muy satisfactorias, y en última instancia se utilizaron revestimientos de ladrillo de carbono con cemento resistente al ácido, que es del tipo de material que todavía se pone en uso en las plantas de furfural en la actualidad”.

Por lo tanto, hay que señalar que el diseño del reactor fue dictado por el equipo disponible de la época, y no era el resultado de un estudio de optimización. Esto es comprensible, ya

que la cinética de la formación de furfural no fue establecida sino hasta muchos años después. Es aún más notable que este proceso utilizado a principios de 1921 todavía esté en uso. Sin embargo, desde su creación descrita anteriormente, el proceso de producción de furfural, y los procesos en relación con sus productos derivados, han sido sometidos a una evolución arrasadora, y se basa en la intuición química que ha llegado a un grado sorprendente de sofisticación (Zeitsch, 2000).

El furfural es un disolvente producido a partir de las pentosanas de las planta, complejos de hidratos de carbono contenidos en la celulosa de los tejidos vegetales. Este producto ha suscitado interés porque ayuda en la factibilidad de convertir los suministros relativamente abundantes de materias primas de lignocelulosa (es decir, los materiales utilizados para la transformación en su procesamiento) en etanol y co-productos químicos de mayor valor (Wondu Business and Technology Services, 2006).

Las fuentes comunes de pentosanas son el maíz y zuros de maíz (fuente principal), el bagazo de caña de azúcar, residuo de pulpa de papel, bambú, kenaf, cascarillas de cereales, trigo y la paja de arroz, cáscaras de frutos secos, semillas de algodón y madera (dura y blanda) (Wondu Business and Technology Services, 2006).

El furfural es utilizado en la industria química como un producto intermedio en la síntesis de otros productos químicos, como nylon, lubricantes y solventes, adhesivos, medicinas y plásticos. Se produce principalmente por hidrólisis ácida de materiales ricos en celulosa o hemicelulosa utilizando soluciones de ácidos (generalmente minerales) para romper los polisacáridos en azúcares (Wondu Business and Technology Services, 2006).

### **3.2 FUENTES DE PENTOSANAS Y SÍNTESIS DE FURFURAL.**

El furfural se produce a partir de residuos agrícolas que contienen pentosanas, que son hidrolizadas a furfural y otros subproductos. Las pentosanas son hemicelulosas (carbohidratos complejos) que están presentes dentro de la celulosa en muchos tejidos de plantas leñosas. Las materias primas más comunes para la producción de furfural incluyen

mazorcas de maíz, bagazo de la transformación de caña de azúcar, y el producto de las corrientes de curtido y la producción de fibras celulósicas (Gubler, 2008).

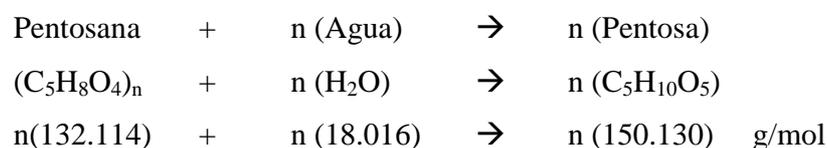
La mayoría de las plantas de furfural se encuentran cerca de las materias primas disponibles. Pocos operan sobre una base de doce meses, la mayoría lo hacen en un período de siete a ocho meses, coincidiendo con la cosecha de productos agrícolas. La mayoría de la producción se destina para la preparación de alcohol furfurílico y resinas de furano, utilizado como tal en el refinado de aceite de lubricación o de extracción de butadieno, o para exportación (Gubler, 2008).

### 3.2.1 ESTEQUIOMETRÍA.

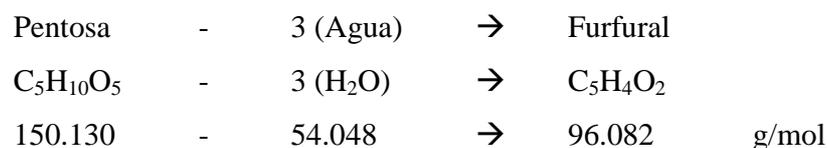
Las pentosanas se hidrolizan a pentosas, en catálisis en medio ácido acuoso, y esta pentosa se deshidrata a furfural en un proceso unificado.

La estequiometría de las dos reacciones es el siguiente:

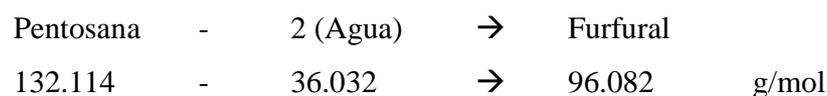
1. La hidrólisis de pentosanas:



2. Deshidratación de las pentosas:



Por lo tanto, la reacción general se puede decir que es:



Siendo el rendimiento teórico del furfural a partir de las pentosanas:

$$Y_t = 96.082/132.114 = 0.72727$$

Y este se convierte en el valor referencia con el cual se miden las plantas productoras de furfural (Zeitsch, 2000).

### 3.2.2 MECANISMOS DE REACCIÓN.

Las pentosanas (polipentosas) se conforman predominantemente por anillos unidos por puentes de oxígeno como se muestra en la figura 3-1.

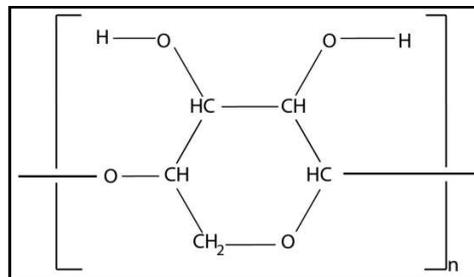


Figura 3-1. Unidad de Pentosana (Zeitsch, 2000)

En la medida en la estructura de la pentosana representa un poliacetal, la hidrólisis ácida de pentosanas corresponde a la hidrólisis de acetales (Zeitsch, 2000).

El mecanismo de la hidrólisis ácida de pentosanas se muestra esquemáticamente en la Figura 3-2 y se compone de los siguientes pasos:

1. La protonación de un enlace de oxígeno, lo que conduce a oxígeno trivalente (primera y segunda líneas del diagrama).
2. La escisión de un enlace de carbono/oxígeno que produce un carbocatión a un lado del puente de oxígeno, y un grupo hidroxilo en el otro lado del puente de oxígeno (tercera línea del diagrama).
3. El carbocatión consume agua (cuarto línea del diagrama).
4. El grupo resultante  $H_2O^+$  libera un ion de hidrógeno, dejando detrás un grupo hidroxilo (quinta línea de la figura) (Zeitsch, 2000).

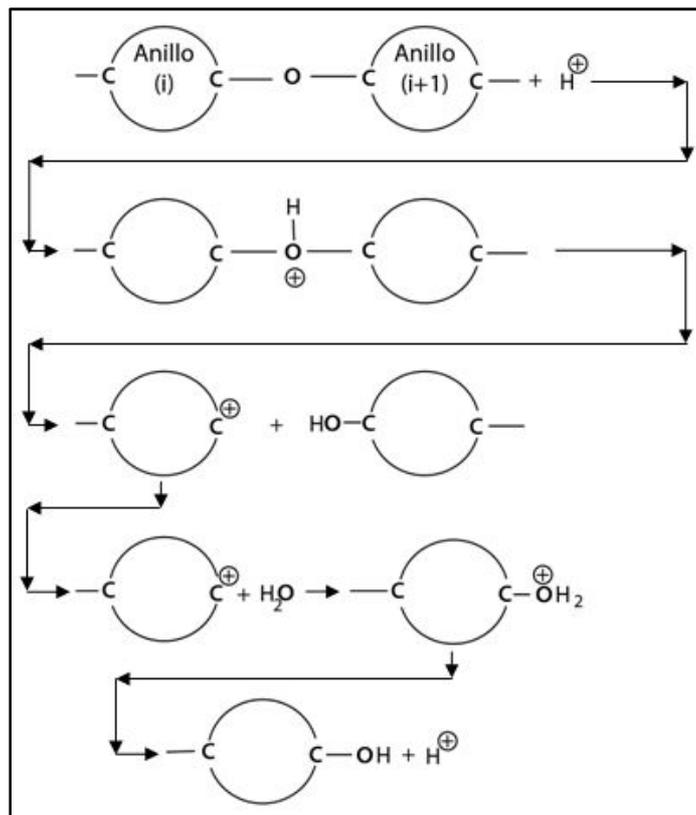


Figura 3-2. Mecanismo de Hidrólisis de Pentosanas. (Zeitsch, 2000)

### 3.2.2.1 MECANISMO PARA LA HIDRÓLISIS DE PENTOSAS.

Esta secuencia de procesos se repite hasta que todos los puentes de oxígeno han desaparecido de manera que los anillos se han convertido en moléculas individuales de pentosa.

La subsiguiente formación de furfural a partir de las pentosas implica la liberación de tres moléculas de agua por cada molécula de pentosa. Todas esas grandes transformaciones de estas moléculas no se producen de forma directa, sino en etapas pausadas. Un mecanismo aceptable se ilustra en la Figura 3-3.

La pentosa inicial se muestra en su forma de anillo que representa un hemiacetal intramolecular.

La forma de cadena abierta del aldehído en equilibrio con el anillo puede pasar por alto, ya que representa menos del uno por ciento de la pentosa total. Los pasos que se muestran en la transformación constarán de dos eliminaciones 1,2- y una eliminación de agua 1,4-. La eliminación debe implicar la participación de dos átomos de carbono vecinos y la formación de un doble enlace entre ellos, mientras que la eliminación en 1,4- afecta a dos átomos de carbono separados por otros dos átomos de carbono y la formación de un anillo (Zeitsch, 2000).

En concreto, cuando un ion de hidrógeno ataca a un par solitario de electrones (no enlazantes) del oxígeno hidroxilo unido a un átomo de carbono, el resultado es un estado de transición con un átomo de oxígeno trivalente con carga positiva. Como el oxígeno es más electronegativo que el carbono, la carga positiva (deficiencia de electrones) de inmediato se desplaza hacia el átomo de carbono más próximo antes que la fisión del enlace C-O conduzca a un fragmento de carga positiva y la liberación de una molécula de agua neutral. En el fragmento, el átomo de carbono con carga positiva es trivalente. Debido a esta situación inusual, los dos electrones vecinos de un enlace C-X son absorbidos en el espacio entre los dos átomos de carbono para formar un doble enlace.

Esto provoca una fisión del enlace C-X del cual los electrones se tomaron, liberando un átomo de hidrógeno para la migración dentro de la molécula. Este ion de hidrógeno buscará otro par solitario de electrones (no enlazantes) de un oxígeno hidroxilo para desencadenar una nueva liberación de agua (Zeitsch, 2000).

En la eliminación final 1,4-, la trivalencia de un átomo de carbono no conduce a una formación de doble enlace, sino a una formación de anillos estéricamente facilitada por el hecho de que los átomos de carbono que participan en enlaces dobles forman estructuras planas caracterizadas por los ángulos de enlace de  $120^\circ$  (orbitales trigonales planos). Después de la eliminación en 1,4-, la expulsión de un ion de hidrógeno completa el proceso (Zeitsch, 2000).

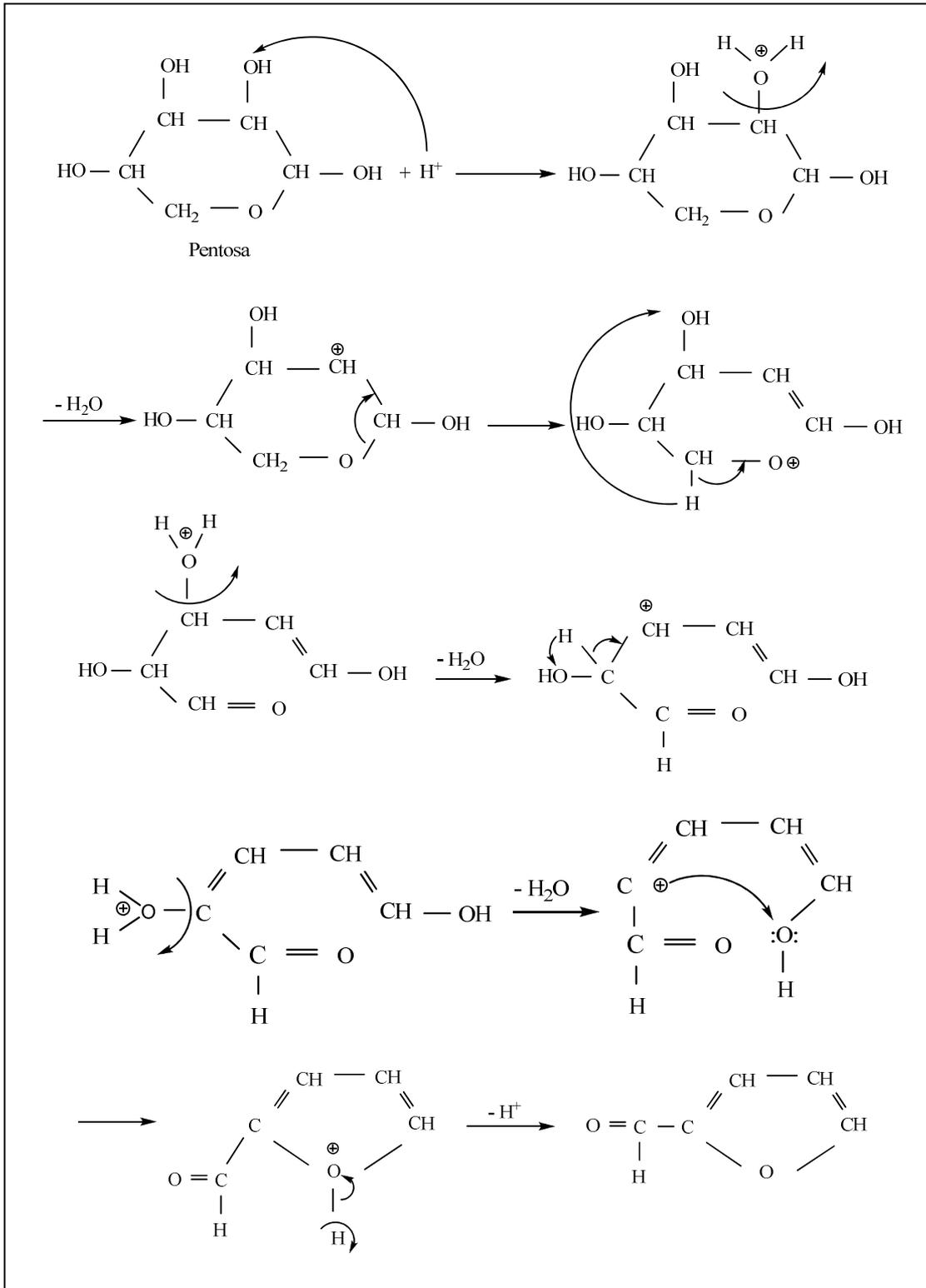


Figura 3-3. Mecanismo de Deshidratación de Pentosas para formar Furfural. (Zeitsch, 2000)

### **3.2.2.2 DEPENDENCIA DE LA TEMPERATURA CON LA ACIDEZ.**

En la segunda mitad del siglo XIX, Svante Arrhenius (1859-1927) encontró que la velocidad de las reacciones catalizadas por ácidos es proporcional a la concentración de iones hidrógeno. Aunque luego resultó que esto es sólo un caso especial de un concepto más general de transferencia de protones, la concentración de iones de hidrógeno sigue siendo un aspecto importante en la catálisis ácida (Zeitsch, 2000).

En la práctica general de laboratorio, las catálisis ácidas se suelen llevar a cabo a temperaturas ligeramente elevadas. En tales condiciones, los ácidos minerales fuertes como el ácido clorhídrico y ácido sulfúrico se consideran generalmente como "completamente disociados". Esto en sí mismo es erróneo, y, peor aún, a cualquier concentración de ácido dada, la concentración de iones de hidrógeno disminuye al aumentar la temperatura, y este fenómeno varía de un ácido a otro. La razón de esto radica en el hecho de que la constante dieléctrica del agua, responsable de la disociación de los ácidos, disminuye fuertemente al aumentar la temperatura, como se muestra en la Figura 3-4 (Zeitsch, 2000).

Para una evaluación cinética de los procesos de furfural, que se realizan generalmente a temperaturas superiores a 150°C la disminución de la acidez con el aumento de la temperatura provoca un gran problema como en todos los estudios cinéticos realizados hasta la fecha de furfural, por razones de conveniencia, ha sido costumbre formular la velocidad de reacción como proporcional a la concentración de iones hidrógeno inicial medida antes de la reacción, a temperatura ambiente, aunque en realidad, a las temperaturas de reacción de interés, la acidez es muy diferente. En vista de que la dependencia de la acidez con la temperatura es diferente para distintos ácidos, cuando una formulación cinética con la concentración inicial de iones hidrógeno se deriva de los experimentos de reacciones con ácido clorhídrico, esta formulación no se puede aplicar al ácido sulfúrico, y viceversa, y es fundamentalmente inaceptable para enmarcar la dependencia de la temperatura de la velocidad de reacción en un solo término (el factor "exponencial" que contiene la energía de activación) cuando en realidad hay dos efectos diferentes y opuestos

del aumento de la temperatura, uno de ellos debido a la disminución dada de acidez, y el otro debido a la cada vez mayor de energía de las moléculas (Zeitsch, 2000).

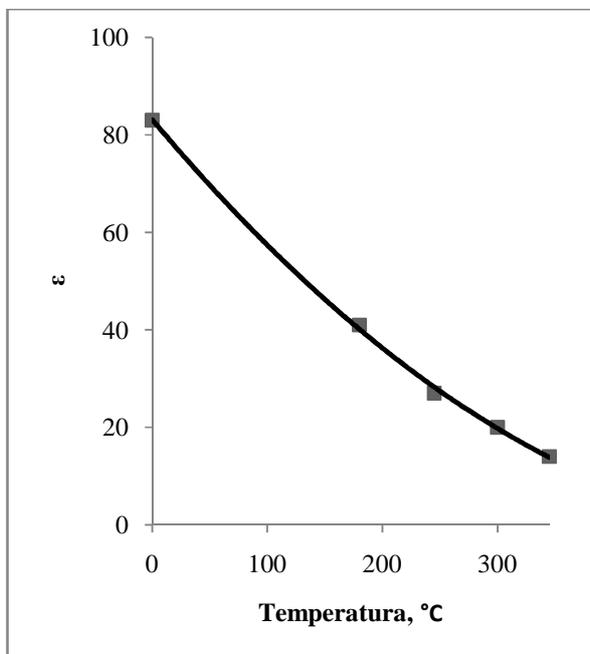


Figura 3-4. Constante dieléctrica del agua como función de la temperatura. (Zeitsch, 2000)

### 3.2.2.3 CINÉTICA DE LA FORMACIÓN DE PENTOSAS A PARTIR DE LAS PENTOSANAS.

La velocidad de formación de las pentosas a partir de las pentosanas es proporcional a la concentración de éstas, pero se ve disminuida por la reacción secuencial de las pentosas a furfural, de modo que:

$$d[\text{PENTOSA}]/dt = k_0[\text{PENTOSANA}] - k_1[\text{PENTOSA}]$$

Donde  $t$  es la coordenada del tiempo. A partir de mediciones hechas por Dunning y Lathrop (1945), refiriéndose a una digestión de mazorcas de maíz con ácido sulfúrico acuoso en dos concentraciones de ácido (1.9 y 4.4% en peso) y dos temperaturas (100 y 121 °C), el primer factor de proporcionalidad resulta ser:

$$k_0 = 7.832 \times 10^4 \text{ litro}/(\text{mol min}) \cdot C_H \cdot \exp(-5163 \text{ K}/T)$$

donde  $C_H$  es la concentración inicial de iones hidrógeno (mol/litro) a temperatura ambiente, y  $T$  es la temperatura absoluta (K) (Zeitsch, 2000).

Para una digestión en ácido sulfúrico, la velocidad de reacción de la xilosa para la formación de furfural se describe como:

$$-[dXY]/dt = 9.306 \times 10^{15} \text{ litro}/(\text{mol} \cdot \text{min}) \cdot C_H \cdot [XY] \cdot \exp(-16894 \text{ K}/T)$$

Donde el factor de proporcionalidad resulta ser:

$$k_1 = 9.306 \times 10^{15} \text{ litro}/(\text{mol} \cdot \text{min}) \cdot C_H \cdot \exp(-16894 \text{ K}/T)$$

donde  $C_H$  es la concentración inicial de iones hidrógeno (mol/litro) a temperatura ambiente, y  $T$  es la temperatura absoluta (K).

En la medida en que esta hidrólisis implica un sólido (pentosanas), es evidente que el grado de trituración de este sólido juega un papel importante y puede modificar  $k_0$  hasta cierto punto. Es igualmente probable que la naturaleza de la materia prima tenga algún efecto sobre  $k_0$  en el sentido de que las pentosanas arraigadas fuertemente en la celulosa o la resina van a reaccionar más lentamente que aquellas pentosanas fácilmente accesibles. Sin embargo, todos estos efectos son sólo de importancia secundaria, al igual que la concentración de iones hidrógeno, la hidrólisis de las pentosanas a pentosas es mucho más rápida que la deshidratación posterior de las pentosas a furfural. En consecuencia, en cualquier evaluación de los reactores de furfural el tiempo necesario para que la hidrólisis proceda no suele ser tomado en consideración (Zeitsch, 2000).

#### **3.2.2.4 REACCIONES DE PÉRDIDA DEL FURFURAL.**

No todas las pentosas consumidas necesariamente van a terminar como furfural, la razón es que, además de la deshidratación, pueden tener lugar dos reacciones de la pentosa en secuencia, involucrando ambas el producto furfural:

1. Una reacción de furfural con él mismo, comúnmente llamada "resinificación de furfural".

2. Una reacción de furfural con un intermedio en la conversión pentosa a furfural, reacción llamada comúnmente "condensación de furfural".

Las reacciones pueden o no tener lugar, dependiendo de si al furfural formado por la deshidratación de las pentosas se le permite permanecer disuelto en fase líquida. Las reacciones (1) y (2) representan "las reacciones de pérdida" debido a que consumen furfural y dan lugar a productos distintos de éste. Por lo tanto, cuando las reacciones (1) y (2) se evitan, entonces todas las pentosas se convierten en furfural. En este caso se obtiene con un rendimiento teórico. Por el contrario, cuando dichas reacciones se llevan a cabo, entonces la cantidad efectivamente producida será menor que el rendimiento teórico, y la magnitud de las pérdidas dependerá del tiempo en que al furfural se le permita permanecer y reaccionar en el medio de reacción líquido (Zeitsch, 2000).

Las "reacciones de pérdida" sólo son posibles en la fase líquida, mientras que no pueden tener lugar en la fase vapor en que éstas carecen de especies catalíticamente activas. Así, si el furfural es instantáneamente vaporizado al momento de producirse, las "reacciones de pérdida" no se producen, y el rendimiento será de 100 por ciento (Zeitsch, 2000).

Siempre que se permita que las pérdidas de furfural ocurran, dos afirmaciones son absolutamente ciertas:

1. La pérdida por condensación es mayor que la pérdida por resinificación.
2. La pérdida por condensación y la pérdida por resinificación disminuyen notoriamente al aumentar la temperatura, debido al "efecto de la entropía"; aumentando la temperatura se favorece la desintegración de las moléculas, de modo que se inhibe la acumulación de moléculas más grandes y contrarias (Zeitsch, 2000).

### **3.3 MATERIAS PRIMAS.**

La producción de furfural requiere materias primas ricas en pentosanas. El contenido de éstas en algunos materiales se da en la Tabla 3-1. A partir de estas cifras, es fácil entender por qué la mayoría de plantas productoras de furfural usa mazorcas de maíz. El bagazo,

utilizado ampliamente en los climas cálidos, no sólo contiene menos pentosanas, sino también posee una densidad aparente muy baja, de modo que las plantas que emplean esta materia prima inferior deben aceptar la desventaja de operar con menos masa por unidad de volumen del reactor (Zeitsch, 2000). Los rendimientos potenciales de pentosanas dependerán de la tecnología de extracción utilizados.

**Tabla 3-1. Contenido de pentosanas de varias materias primas en porcentaje (Base Seca).**

<b>MATERIAL</b>	<b>PENTOSANAS</b>
Mazorcas/Zuros de maíz	30 a 32%
Cascarilla de avena	29 a 32%
Cáscaras de almendra	30%
Cascarilla de semilla de algodón salvado	27 a 30%
Madera de abedul	27%
Bagazo de caña	25 a 27%
Cáscaras de girasol	25%
Madera de haya	24%
Agramizas de Lino	23%
Conchas de avellana	23%
Residuos de la extracción de oliva	21 a 23%
Madera de eucalipto	20%
Quebracho de madera después de la extracción de tanino	19%
Balsa	18%
Cascarilla de arroz	16 a 18%
Madera de abeto	11%
Madera de pino	7 a 9%
Madera de abeto Douglas	6%

Fuente: (Wondu Business and Technology Services, 2006)

El bagazo y mazorcas de maíz son los dos materiales más comunes utilizados en plantas de producción de furfural; el bagazo de caña de azúcar y mazorcas de maíz procedentes de la transformación agroindustrial, juntos representan más del 98% del total de furfural producido, esto significa que no hay costos elevados directos en la adquisición de materias primas, ya que estas se recolectan en puntos centrales con volúmenes relativamente grandes.

El contenido de pentosanas se mide mediante la conversión de éstas a furfural y una posterior cuantificación del producto obtenido, generalmente por precipitación con ácido barbitúrico. Cuando las condiciones experimentales empleadas son correctas, el rendimiento del furfural por este procedimiento ha comprobado que es del 100% (Zeitsch, 2000).

### **3.4 TECNOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO.**

En la actualidad se utilizan ambos métodos de procesamiento, por lotes y continuo, pero sobre todo el procesamiento por lotes es el que se utiliza comúnmente. Antiguos productores que utilizaron métodos continuos fueron las plantas Defibrator y Rosenlew (Suecia y Finlandia), Societa Italiana Furfurola (Italia), y Escher Wyss (Alemania), pero estos fabricantes ya han empezado a reducir o abandonar la producción del furfural. Las plantas por lotes están disponibles desde China y posiblemente hasta Sudáfrica. En cada uno de los métodos hay énfasis diferentes sobre el rendimiento y la recuperación de los subproductos, los insumos de materias primas y sus precios, tamaño de la planta y la inversión de capital y la calidad del producto (Wondu Business and Technology Services, 2006).

La industria de furfural tradicionalmente se ha reservado hasta el punto de aparecer envuelta en nubes de misterio, llegando al punto de la publicación de información totalmente errónea en uno de los procesos conocidos como Rosenlew. Esta atmósfera encubierta no ha sido propicia para el progreso como lo demuestra el hecho de que el primer proceso de furfural industrial, lanzado hace 88 años con equipo antiguo de una

planta de cereales desaparecida, todavía se utiliza en la actualidad aunque su rendimiento es pobre, sin que deba ser necesariamente así (Zeitsch, 2000).

La reciente publicación de estos procesos pretende despertar el interés y la inventiva de una nueva generación, hasta el fin de mover el campo de furfural y sus derivados al centro de atención que se merece.

### **3.4.1 PROCESOS DEL FUTURO.**

Como se ha indicado anteriormente, el aumento de la temperatura produce un aumento exponencial en la velocidad de desaparición de xilosa, lo que reduce drásticamente el tamaño del reactor. Un proceso que requiere un enorme aparato a 150°C no necesitará más de una tubería cuando se realiza por encima de 200°C. Además, en los actuales procesos se permiten pérdidas de furfural mediante el empleo de un medio de reacción sin ebullición, se aumenta el rendimiento al aumentar la temperatura, debido al "efecto de entropía" trabajando en contra de las reacciones de pérdida de construcción de moléculas más grandes, de modo que la obtención de mayores rendimientos es un segundo argumento en favor de los cada vez más altos niveles térmicos. En consecuencia, mientras que hasta el momento la temperatura más alta jamás utilizada en una planta de furfural industrial fue de 184°C durante el proceso continuo de Quaker Oats, todas las propuestas más recientes se centran en temperaturas superiores a 200°C con una preferencia particular por 230°C.

Por último, la comprensión de las razones causante de las pérdidas enormes en reactores industriales de furfural ha mostrado un camino hacia el rendimiento del 100% rutinariamente obtenido en el "proceso analítico del furfural".

Todas estas consideraciones dan una imagen colorida de nuevos procesos potencialmente revolucionarios. Aunque hasta el momento ninguno de estos procesos ha ido más allá de la escala de planta piloto, las cuales merecen especial atención, ya que son la clave para el progreso.

### 3.5 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS.

El furfural,  $C_4H_3OCHO$ , con peso molecular 96.03 g/mol, es un líquido claro como el agua cuando está recién destilado, pero se oscurece con el tiempo en contacto del aire. Es el más importante de los compuestos que contienen el anillo furánico de cinco miembros, caracterizado por un átomo de oxígeno. Es un aldehído (II) con el grupo  $-CHO$  en la posición 2 (ó  $\alpha$ ) (Othmer K. &., 2007).

En la tabla 3-2 se dan algunas de las propiedades físicas y químicas del furfural.

**Tabla 3-2. Propiedades Fisicoquímicas del Furfural grado técnico.**

PARÁMETRO	VALOR
<b>Nombre IUPAC</b>	2-Furaldehído
<b>Sinónimos</b>	2-Furancarboxaldehído, 2-formylfurano, furancarbondal.
<b>Fórmula</b>	$C_5H_4O_2$
<b>Peso molecular</b>	96.1 g/mol
<b>Aspecto</b>	Líquido claro, incoloro con un olor aceitoso como benzaldehído
<b>Punto de fusión</b>	-38.7 ° C
<b>Punto de ebullición</b>	161.7 ° C
<b>Punto de inflamación</b>	127 ° C
<b>Densidad</b>	1.16 g/ml @ 20°C
<b>Viscosidad</b>	0.0149 Pa*s
<b>Solubilidad en agua (20°C)</b>	7.81 g/ 100 ml
<b>Solubilidad en solventes (mg/L a 20°C)</b>	Alcohol (infinita) Éter (infinita) Miscible en octanol, acetona, xileno, acetato de etilo, cloruro metileno y metanol

(continuación) **Tabla 3-2. Propiedades Fisicoquímicas del Furfural grado técnico.**

<b>Presión de vapor</b>	2.6 mmHg (a 20°C)
<b>Constante de disociación (pK)</b>	No demuestra una constante de disociación entre pKa <sub>2</sub> y pKa <sub>10</sub> .
<b>Coefficiente de Partición Octanol/agua Log(K<sub>ow</sub>)</b>	0.35 a 20°C
<b>Absorción UV/Visible</b>	14591.3 cm <sup>2</sup> /mol (pH 7) 15324.2 cm <sup>2</sup> /mol (pH 1.94) 14584.8 cm <sup>2</sup> /mol (pH 10.12)

Fuente: (Wondu Business and Technology Services, 2006), (Zeitsch, 2000),

### 3.6 MÉTODO DE ANÁLISIS.

El furfural forma los derivados que dan los aldehídos, los cuales sirven para su identificación. Puede hacerse un rápido análisis cualitativo añadiendo unas cuantas gotas de solución de anilina en ácido acético glacial a una solución acuosa de furfural. Se produce enseguida un color rojo intenso si está presente el furfural. Esta reacción no es específica para el furfural, ya que la producen igualmente el 5-metilfurfural y el 5-hidroximetilfurfural.

Los procedimientos para el análisis cuantitativo se basan en las reacciones del grupo aldehído y en las de anillo. Otros métodos incluyen la utilización de equipos espectrofotométricos en el rango Ultravioleta/Visible (UV/Vis), Infrarrojo (IR) o análisis con Cromatografía de gases.

La medición se basa en el hecho de que el vapor furfural exhibe picos de absorción fuertes y afilados en una longitud de onda de 256 nm.

Igualmente estos valores están registrados en las bibliotecas de los espectros para esta sustancia, y en el caso del IR tenemos la lectura que se muestra en la Figura 3-5.

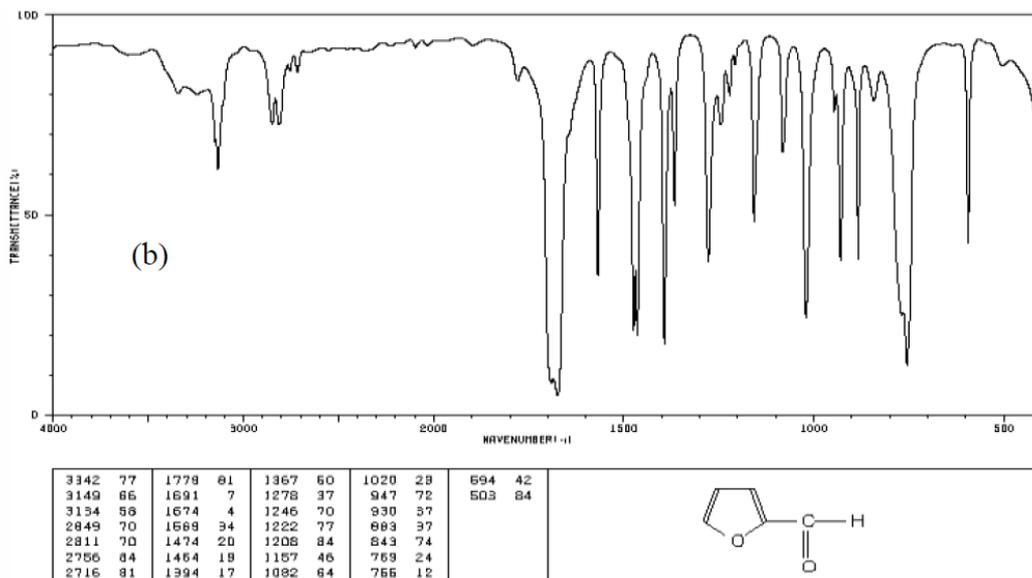


Figura 3-5. Espectro IR del furfural.

### 3.7 RELEVANCIA Y POTENCIALES BENEFICIOS.

La mayor ventaja del furfural es que proviene de recursos renovables. El furfural junto con el fenol y el etanol son los mayores productos comerciales o semicomerciales derivados de materiales hemicelulósicos. El furfural ha sido producido por casi unos 90 años o más, de manera que no es un producto nuevo, sin embargo emergen nuevas y más eficientes tecnologías de proceso, creando posibilidades de nuevos productos para una industria química preocupada de su dependencia en materia prima y energía proveniente de recursos no renovables.

#### 3.7.1 APLICACIONES Y USOS.

De las muchas aplicaciones reales y potenciales de furfural, su tratamiento se limita a unos pocos campos donde el furfural se utiliza de manera directa. Los casos en que el furfural se emplea como insumo para la síntesis de otras sustancias químicas sí son numerosos.

##### 3.7.1.1 ALCOHOL FURFURÍLICO.

El alcohol furfurílico es el derivado más importante del furfural. En la actualidad, aproximadamente el 65% de todo el furfural producido se convierte en alcohol furfurílico

ya que hay una buena demanda de este producto en la fabricación de resinas de fundición (Zeitsch, 2000).

Se fabrica mediante la hidrogenación (reducción catalítica) de furfural. Puede ser utilizado como disolvente, pero es más a menudo se utiliza como ingrediente en la fabricación de diversos productos químicos tales como:

1. Adhesivos.
2. Agentes humectantes.
3. Revestimiento anti-corrosión.
4. Solventes.
5. Diluyente.
6. Alcohol tetrahidrofurfurílico.
7. Resinas de furanos, en especial resinas de fundición.

### **3.7.1.2 ALCOHOL TETRAHIDROFURFURÍLICO.**

Es un disolvente químico intermedio para la industria química de especialidades farmacéuticas, la agricultura, la limpieza, revestimientos y formulaciones de pinturas.

### **3.7.1.3 THF (Tetrahidrofurano).**

Alrededor del 80% de THF se convierte en PTMEG (Politetrametileneterglicol). Se utiliza como disolvente en el cloruro de polivinilo (PVC), cementos, productos farmacéuticos y revestimientos.

### **3.7.1.4 PTMEG (Spandex).**

El Politetrametileneterglicol (PTMEG) se utiliza en la producción de termoplásticos como los elastómeros de poliuretano, spandex (también conocido como elastán Lycra ®), una fibra sintética más fuerte y más durable que la goma, conocido por su elasticidad excepcional, éter elastómeros-copoliéster y poliamidas.

### **3.7.1.5 FURFURAL COMO EXTRACTOR.**

La aplicación de furfural como extractor se basa en un fenómeno llamado "conjugación intermolecular". Esto significa que cuando las moléculas con dobles enlaces conjugados, como el furfural entran en contacto con otras moléculas que contienen dobles enlaces, forman un sistema conjugado ampliado de dobles enlaces, y esta ampliación libera la energía análoga a la formación de enlaces intramoleculares. En consecuencia, el furfural enlaza a las moléculas que contienen dobles enlaces, a la vez que "ignora" las moléculas sin dobles enlaces. Por esta razón, el furfural se utiliza

- a) para eliminar compuestos aromáticos a partir de aceites lubricantes para mejorar la relación entre la viscosidad y la temperatura;
- b) para eliminar compuestos aromáticos de los combustibles diesel a fin de mejorar las características de ignición; y
- c) para obtener compuestos no saturados (compuestos con dobles enlaces) a partir de aceites vegetales como el aceite de soja para que "los aceites secantes" adecuado para pinturas y barnices, ya que sólo los compuestos con doble enlace son capaces de realizar un "secado" por la oxidación con aire.

En las aplicaciones (a) y (b), el producto deseado (libre de compuestos aromáticos) es el refinado, mientras que en la aplicación (c) el producto deseado (rico en compuestos insaturados) se obtiene a partir del extracto (Zeitsch, 2000).

### **3.7.1.6 FURFURAL COMO FUNGICIDA.**

En 1923, se descubrió que el furfural es un fungicida muy eficaz. Se encontró que mientras altas concentraciones de formaldehído (10 a 15%) no impiden el crecimiento del moho *Penicillium*, uno de los hongos más comunes, poco furfural (0.5%) es suficiente para prevenir por completo el crecimiento de moho, incluso en cualesquiera otras condiciones más favorables. Se observó que el furfural es particularmente eficaz en la inhibición del crecimiento de carbón del trigo (*Tilletia foetens*), cuando el trigo se remoja durante 3 horas en una solución acuosa de furfural de 0.05%, mientras que con una solución de

formaldehído, de la misma fuerza química, después un plazo de 12 horas de remojo es necesario destruir el material (Zeitsch, 2000).

Por lo que se refiere a las semillas, se observó que el tratamiento con furfural no disminuye su poder de germinación de forma significativa, mientras que el tratamiento con la misma concentración de formaldehído ha demostrado ser masivamente tóxico (Zeitsch, 2000).

### **3.7.1.7 ÁCIDO FUROICO.**

El ácido furoico es derivado de primera línea en la oxidación de furfural. Tiene un mercado en el ámbito farmacéutico y agroquímico, donde se convierten con frecuencia a cloruro de furoyl para ser utilizados en la producción de medicamentos e insecticidas (Zeitsch, 2000).

### **3.7.1.8 USOS ADICIONALES.**

Producción de materiales sintéticos y plásticos, fabricación de productos farmacéuticos como antibióticos, anestésicos, bactericidas, solvente selectivo para concentración de la vitamina A en aceite de hígado de bacalao y como un aditivo en combustibles para cohetes.

El furfural y sus derivados son insumos para la fabricación de polímeros para concreto, y solventes de ésteres de celulosa.

Entre sus coproductos y derivados podemos mencionar de manera específica los ácidos carboxílicos como el ácido acético, el ácido fórmico, Ácido propiónico y Ácido butírico; Diacetilo y 2,3-pentanodiona; difurfural (5,5'-diformyl-2,2'-difuran); 2-dihydroxyfuranone-(5); Acetoína; Tirazinas; Tetrahydrofurano; Dolitetrahydrofurano; Resinas furánicas; Alcohol tetrahydrofurfurílico; Metilfurano; Ácido maléico; y para no extender aún más la lista, Vedernikov (2000) ha hecho un diagrama (Figura 3-6) donde agrupa las aplicaciones químicas industriales en las que se utiliza el furfural (Wondu Business and Technology Services, 2006).

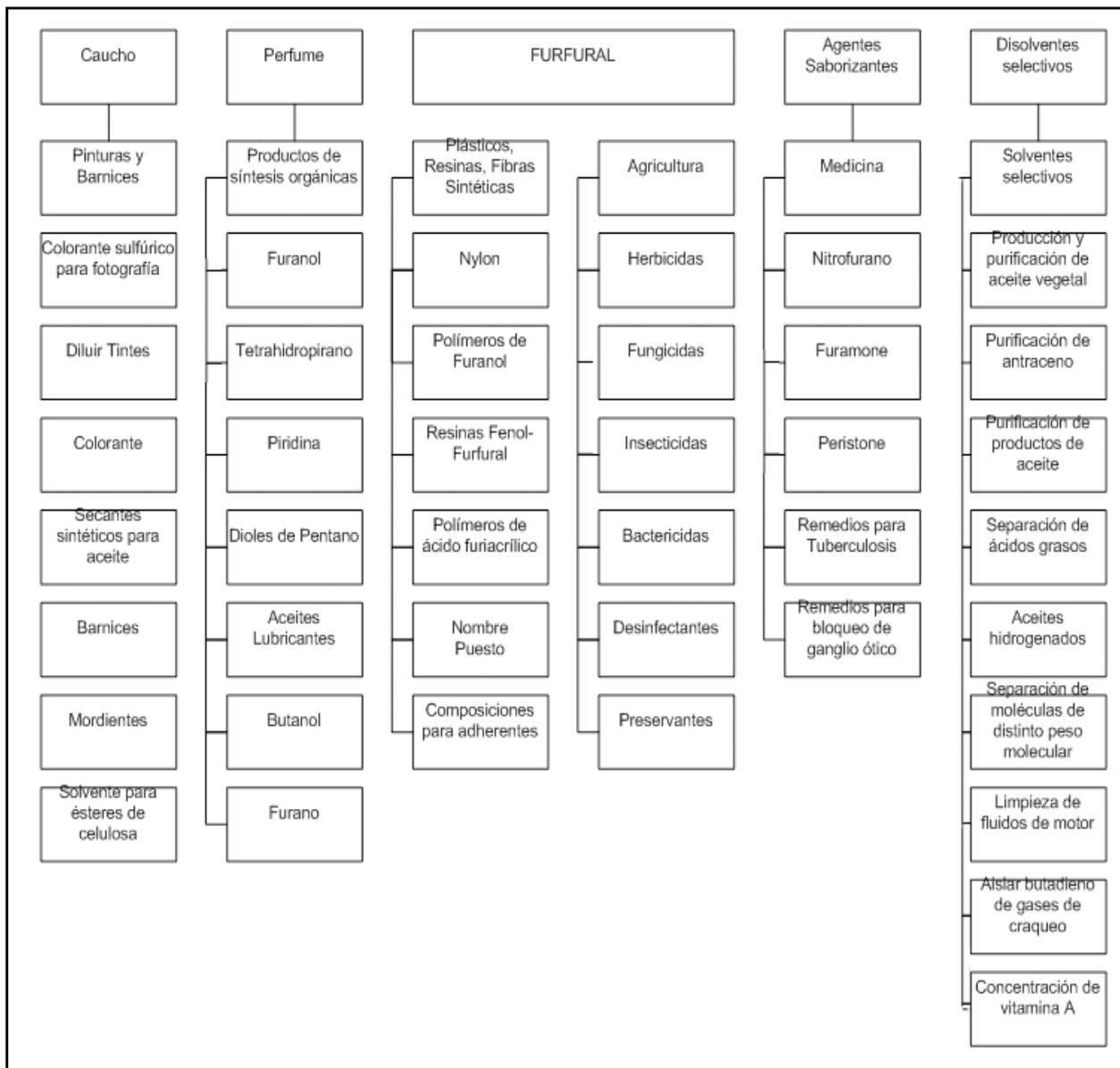


Figura 3-6. Esquema de Aplicaciones del furfural.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

---

En este capítulo se determinarán las condiciones y parámetros necesarios para el diseño del proceso óptimo para la producción de furfural a escala industrial, a partir del desarrollo a nivel de laboratorio del método utilizado en el trabajo titulado: “Polimerización del Furfural y Derivados, a partir de Desechos Agroindustriales” (Martínez, 1995).

Un enfoque fundamental para el diseño y desarrollo de productos y procesos se compone de tres fases: caracterización, control y optimización.

La caracterización es el proceso de descubrir las variables de proceso específicas que son responsables de la variabilidad en las respuestas de salida del sistema. Los sistemas (productos y procesos) se describen a menudo por muchas variables, sobre todo en las primeras etapas de diseño y desarrollo de trabajo, cuando el nivel de conocimiento científico y de ingeniería puede ser bajo. Así, la identificación de los factores más importantes es un principio fundamental para el éxito del desarrollo eventual del sistema. Sin una correcta caracterización, se produce una considerable cantidad de conjeturas acerca de qué variables son importantes y el efecto de varios factores sobre las respuestas de interés general. Esto contribuye a largos plazos de desarrollo experimental, que se genere el incumplimiento de entregas y la subsiguiente pérdida de ventaja competitiva (Montgomery, 1999).

Los diseños factoriales enteros y fraccionales son muy útiles en la caracterización de los sistemas. En particular, los diseños  $2^k$  y  $2^{k-p}$ , a veces aumentados con puntos centrales, son las elecciones típicas. Los estadísticos usualmente se refieren a muchas de las actividades que se realizan durante la caracterización y la detección de los factores. El uso de factores de dos niveles con puntos permiten tanto la estimación eficiente de los efectos como la protección contra la curvatura cuadrática pura (Montgomery, 1999).

Control, se refiere al proceso de estabilidad, es decir, a la obtención de un rendimiento constante del sistema. Una de las contribuciones importantes se debe a Taguchi (1997) con

su observación de que algunas variables del proceso pueden afectar a la media de la variable de respuesta, mientras que otros pueden afectar a la varianza de la misma. Estos son normalmente denominados como efectos de ubicación y efectos de dispersión, respectivamente (Montgomery, 1999).

La optimización es el proceso de manipulación de las variables más importantes a los niveles o los ajustes que resulten en el mejor conjunto de condiciones de funcionamiento para el sistema. En la mayoría de las industrias, no es inusual tener varias respuestas de procesos o productos que necesitan ser optimizados en forma conjunta. Por ejemplo, en un proceso químico puede ser necesario considerar las respuestas como el rendimiento de procesos, peso molecular de los productos, la viscosidad, la concentración y los parámetros ambientales (las consideraciones "verdes" de fabricación). Para ello se requiere la optimización simultánea de estas respuestas. El método de superficie de respuesta (RSM) es un marco muy útil para el modelamiento y optimización de los sistemas (Montgomery, 1999).

La estrategia de caracterización, control y optimización pone mucho énfasis en la experimentación secuencial en el que nos movemos de un estado de conocimiento relativamente bajo sobre el sistema a un estado de conocimientos avanzados. Los objetivos para determinar qué factores producen efectos importantes, el papel que desempeña cada factor en la conducción de la media o varianza de cada respuesta, y la determinación de las condiciones óptimas, se encuentran con mayor facilidad y eficiencia, a través de una serie de pequeños experimentos relacionados entre sí (Montgomery, 1999).

## **4 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA PRODUCCIÓN DE FURFURAL A PARTIR DE DESECHOS AGRÍCOLAS.**

---

Para llevar a cabo la caracterización, control y optimización de la producción de furfural a partir de desechos de maíz se requiere la evaluación de los factores que influyen en el proceso.

Un ensayo completo requeriría un gran número de repeticiones que resulta prohibitivo en cuestión de tiempo y de inversión necesaria; el desarrollo experimental constará por lo tanto de dos etapas principales:

### **PRIMERA ETAPA: DESARROLLO EXPERIMENTAL PRELIMINAR.**

#### **Parte 1: Pruebas Preliminares**

Se pondrá a prueba el buen funcionamiento del equipo montado así como la obtención de resultados confiables en la reacción de producción de furfural, determinando las variables que pueden ser manejadas para determinar un modelo experimental posterior.

#### **Parte 2: Cribado de variables**

Se considerará una cantidad de variables de proceso a estudiar en un número de experimentos determinados a través de un diseño factorial fraccional de dos niveles  $2^{k-p}$ .

#### **Parte 3: Análisis de Resultados**

Producto del diseño factorial se establecerán los niveles de los factores más significativos que permitan iniciar la etapa de optimización.

La detección de los efectos de estos factores en el valor, ubicación y dispersión de la variable respuesta, permitirán completar las etapas de caracterización y control del proceso.

## SEGUNDA ETAPA: DESARROLLO DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.

Mediante una metodología de superficies de respuesta (RSM) se logrará establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta.

### 4.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL PRELIMINAR.

#### 4.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

Entre los desperdicios agrícolas a procesar están los zuros (olotes) y hojas (tusa), recolectados en condiciones posteriores al desgrane del maíz, las mismas en las que se someterían al proceso de producción industrial.

Tabla 4-1. Caracterización de Materia Prima

Características	Propiedades
Humedad	10-25%
Composición Hoja/Zuro	0.81 hoja/zuro
Contenido teórico de pentosanas	30%

#### 4.1.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA HIDRÓLISIS DE PENTOSANAS Y PRODUCCIÓN DE FURFURAL.

El método experimental a seguir para la producción de furfural a partir de desechos agrícolas está basado en el método sugerido por Martínez (1995) y es el siguiente:

1. En un matraz fondo redondo (1 L) se colocan 50 gramos del desperdicio agrícola (zuros y hojas de maíz) secos y molidos.
2. Añadir 250 ml. de solución de ácido sulfúrico de una concentración de 6% ó 10% y 30 gramos de Cloruro de Sodio.
3. Dejar en maceración entre 2 a 5 horas.
4. Colocar el matraz en un equipo de destilación por arrastre continuo con adaptador tipo Dean Stark.

5. Calentar el balón mediante un baño de aceite, regulando el Hot Plate para elevar la temperatura del sistema entre 100°C y 175°C.
6. Purificar el furfural obtenido por destilación al vacío (Punto de destilación 65°C a 70°C a una presión de 17mmHg).

### 4.1.3 MONTAJE EXPERIMENTAL.

La reacción de deshidratación de pentosas para producir furfural se realiza en un aparato de destilación Dean-Stark como se muestra en la figura 4-1, el cual consta de una combinación con un condensador de reflujo, balón de fondo redondo como reactor y un colector con llave, para la eliminación continua del agua y extracción del furfural que se produce durante una reacción química realizada a la temperatura de reflujo.

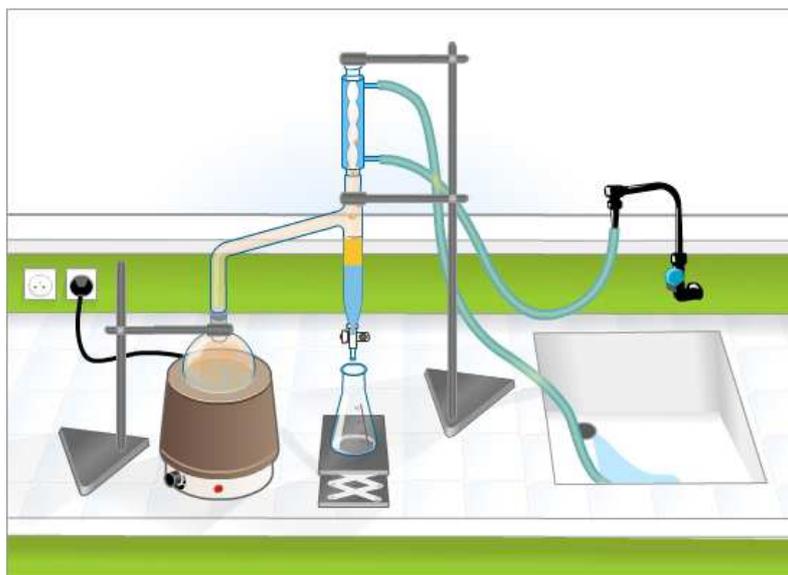


Figura 4-1. Aparato de destilación Dean Stark.

Durante la reacción los vapores que contienen el solvente reaccionante y el compuesto que se quiere remover viajan hacia el condensador y luego a la trampa de destilación, aquí los líquidos inmiscibles se separan en capas. Cuando la menos densa alcanza el nivel del brazo de unión puede fluir de regreso al reactor mientras que la capa inferior permanece en la trampa. La trampa está en su capacidad máxima cuando la capa inferior alcanza el brazo de unión de forma que también fluiría hacia el reactor.

El proceso de purificación del furfural se realiza en un sistema de destilación al vacío en el que se eliminan las impurezas del agua y coproductos generados en la reacción de hidrólisis de pentosanas. El sistema se muestra en la figura 4-2.



**Figura 4-2. Sistema de destilación a presión reducida.**

#### **4.1.4 PRUEBAS PRELIMINARES.**

El montaje experimental implementado inicialmente para llevar a cabo la hidrólisis de las pentosanas correspondiente a la primera etapa constaba de un balón de 3 vías y 500 ml de capacidad como reactor discontinuo, un condensador de vapores, un adaptador de 3 vías y un balón colector de 50 ml.

Se dispone de un adaptador para el termómetro que permite registrar la temperatura del proceso, se utiliza una manta de calentamiento para elevar la temperatura del sistema.

Las primeras pruebas sirven para familiarizarse con el método y comprobar el buen funcionamiento del equipo a las condiciones necesarias.

En las primeras dos pruebas no se obtiene una separación de fases (por no contar con el adaptador Dean Stark) que permita separar el furfural producido, quedando una solución acuosa como producto final.

Es de esta manera que se descarta el sistema de reflujo instalado con piezas de cristalería equivalentes y se opta por usar un adaptador del tipo Dean Stark para realizar las pruebas consecutivas.

#### **4.1.4.1 PRUEBAS VARIANDO TIEMPO DE MACERADO, TEMPERATURA DE TRABAJO Y DIÁMETRO DE PARTÍCULAS.**

Las pruebas preliminares incluyen experimentaciones variando condiciones de trabajo manipulables en el laboratorio en un rango de valores contempladas en el método propuesto por Martínez (1999).

En la tabla 4-2 se presenta un resumen de las condiciones de trabajo y observaciones más importantes.

**Tabla 4-2. Desarrollo Experimental Preliminar.**

<b>Prueba</b>	<b>Tiempo de macerado</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Diámetro de partícula</b>	<b>Volumen Destilado por Reflujo</b>	<b>Volumen Destilado al Vacío</b>	<b>Rendimiento</b>
1	5 h	120°C	Grueso	4.6 ml	2.7 ml	0.054 ml/gr
2	1 h	180°C	~1 mm	3 ml	1.6 ml	0.032 ml/gr

#### **4.1.4.2 CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO.**

La presencia de furfural en el producto obtenido se verifica mediante análisis espectroscópico de tipo Infrarrojo (IR), del cual no se cuenta una respuesta del equipo con un buen nivel de confianza por no contar con los valores del espectro del furfural en la biblioteca del espectrómetro.

## **4.2 CRIBADO DE VARIABLES.**

### **4.2.1 FACTORES EXPERIMENTALES.**

La obtención de un proceso óptimo para la obtención de furfural a partir de desechos agroindustriales de maíz depende de los efectos causados por los factores involucrados en la reacción y el proceso de producción.

La determinación de los posibles factores que pueden afectar el proceso de producción de furfural está basada en lo expuesto en el capítulo anterior, relacionada con el manejo de la materia prima y el equipo de laboratorio.

El tamaño de las partículas del zuro y hojas alimentadas a la reacción es importante para considerar el comportamiento de la materia prima dentro de un sistema industrial, así como la superficie de reacción del catalizador sobre el material.

La duración total en horas para la etapa de hidrólisis del material orgánico es un factor determinante para el rendimiento de la reacción y las condiciones de operación y producción de una planta.

La temperatura es la medida de energía térmica que debe lograrse en el sistema montado y que deberá trasladarse al diseño del equipo para ponerlo en operación.

La adición de una solución ácida cataliza la formación de furfural a partir de las pentosas mediante hidrólisis, las condiciones de operación pueden influir en la cantidad de ácido necesaria para obtener mayores rendimientos y disminuir los costos del catalizador. Para este estudio experimental se seleccionó como catalizador principal el ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$ , por ser el más económico y el más utilizado a nivel industrial.

### **4.2.2 ORGANIZACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS.**

Las combinaciones de condiciones para los ensayos a partir de este procedimiento y el diseño experimental mencionado, se presentan a continuación (Tabla 4-3):

**Tabla 4-3. Niveles de los factores experimentales.**

<b>Nivel</b>	<b>Tamaño de Partícula (A)</b>	<b>Tiempo de Maceración (B)</b>	<b>Temperatura de Destilación (C)</b>	<b>Concentración de Ácido (D)</b>
Mínimo (-)	Fino ( $\approx 1\text{mm}$ )	Corto ( $\leq 2\text{h}$ )	Baja ( $\approx 100^\circ\text{C}$ )	$\leq 6\%$
Máximo (+)	Grueso ( $\approx 10\text{mm}$ )	Largo ( $5\text{h}$ )	Alta ( $\approx 180^\circ\text{C}$ )	10%

Fuente: Los autores

Se desarrollan diferentes combinaciones al procedimiento de experimentación general, con el fin de poder lograr el mejor desarrollo de la reacción, encontrando un punto óptimo basado en un diseño experimental fraccionado.

Las cuatro variables o factores experimentales serán ordenadas bajo resolución de un diseño fraccional  $2^{4-1}$  con I = ABCD, el cual es de resolución IV ( $2_{IV}^{4-1}$ ), y cuyos valores se muestran en la Tabla 4-4 para cada una de las pruebas. El objetivo es determinar de una lista grande de factores cuáles son aquellos sobre los que se realizará un experimento posterior con un diseño experimental no fraccionado

**Tabla 4-4. Codificación de variables para cada prueba.**

<b>Nº de Prueba</b>	<b>Tamaño de Partícula (A)</b>	<b>Tiempo de Maceración (B)</b>	<b>Temperatura de Destilación (C)</b>	<b>Concentración de Ácido (D)</b>
1	-	-	-	-
2	+	-	-	+
3	-	+	-	+
4	+	+	-	-
5	-	-	+	+
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	+

Fuente: Los autores.

### 4.2.3 VARIABLE RESPUESTA.

La variable respuesta para cada una de las muestras será el rendimiento obtenido en la producción de furfural, siendo éste calculado como la relación del volumen de furfural producido entre la masa de desechos alimentada a la reacción.

### 4.2.4 CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO.

La presencia y la calidad del furfural obtenido se verifican mediante análisis espectroscópico de tipo Infrarrojo (IR) (Figura 4-3), tomado de los extractos purificados y cuya estructura corresponde exactamente al reportado en la literatura (Figura 3-6).

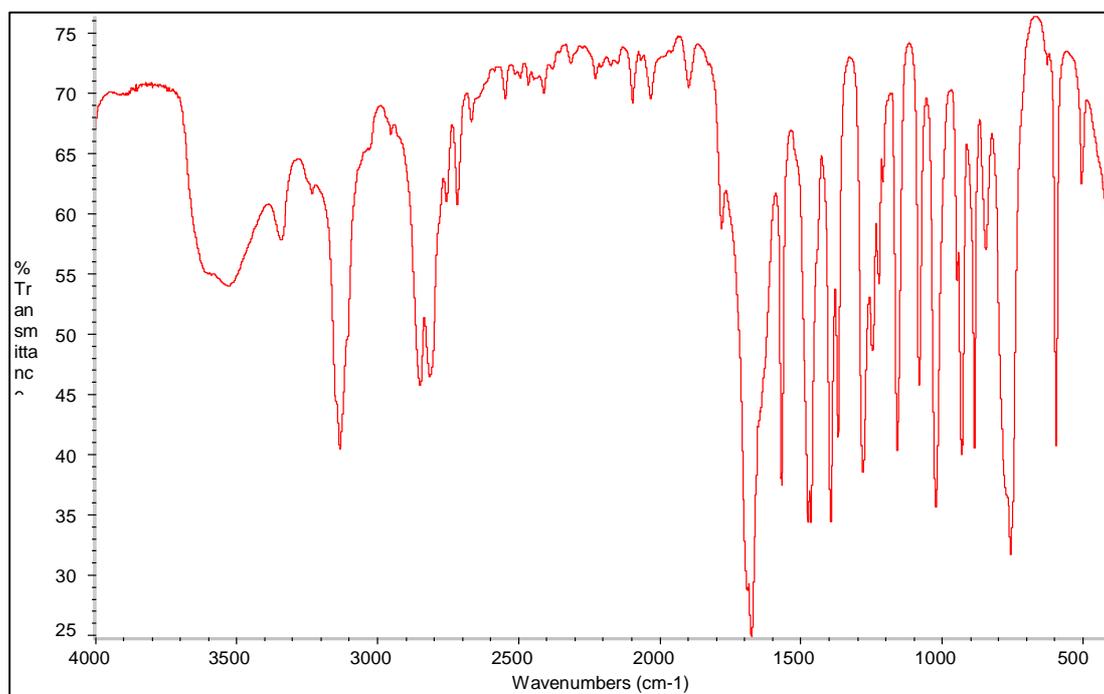


Figura 4-3. Espectro FTIR para Furfural

### 4.2.5 RESULTADOS OBTENIDOS.

El furfural potencial alimentado se evalúa multiplicando el peso en material orgánico alimentado por dos coeficientes: 0.30 (pentosanas contenidas en los desechos del maíz) y 0.727 (factor de conversión de pentosana a furfural).

El rendimiento teórico se calcula dividiendo la masa de furfural producida entre la de furfural alimentado únicamente, a diferencia de otros autores donde también suman el furfural recuperado del filtrado en la suspensión de residuo y sus lavados. El orden de cada una de las pruebas se determinó de manera aleatoria para los 8 ensayos, en la Tabla 4-5 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 4-5 Resultados Experimentales.**

No. Prueba	Tamaño de Muestra	Tiempo de Macerado (h)	Temperatura de Operación (°C)	Acidez (%)	Furfural Obtenido (ml)	Rendimiento (ml FF / gr Despr)	Rendimiento Teórico
1	Grueso	2	128 °C	10%	4.5	0.09	47.87
2	1 mm	5	128 °C	10%	4.2	0.084	44.68
3	1 mm	2	128 °C	6%	1.6	0.032	17.02
4	Grueso	5	128 °C	6%	3.1	0.062	32.98
5	Grueso	2	170 °C	6%	1	0.02	10.64
6	Grueso	5	170 °C	10%	3.3	0.066	35.10
7	1 mm	2	170 °C	10%	2.5	0.05	26.59
8	1 mm	5	170 °C	6%	3	0.06	31.91

Fuente: Los autores.

Analizar los resultados de un experimento factorial es igual que un análisis ANOVA multifactorial, por lo que podemos analizarlo como un ANOVA más.

#### **4.2.5.1 ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE LOS FACTORES SOBRE EL RENDIMIENTO DE REACCIÓN.**

Esta estimación se realiza mediante un programa estadístico comercial que nos proporciona las estimaciones de los efectos de cada factor obtenido para el modelo  $2_{IV}^{4-1}$ , mostrados en la Tabla 4-6:

**Tabla 4-6. Estimación de efectos.**

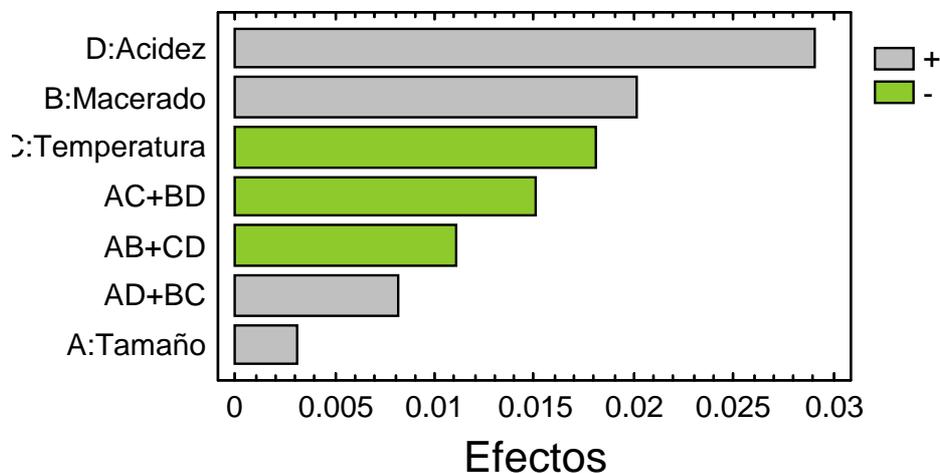
<b>Efecto</b>	<b>Estimación</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>
A:Tamaño	0.003	0.000018	0.000018
B:Macerado	0.02	0.0008	0.0008
C:Temperatura	-0.018	0.000648	0.000648
D:Acidez	0.029	0.001682	0.001682
AB+CD	-0.011	0.000242	0.000242
AC+BD	-0.015	0.00045	0.00045
AD+BC	0.008	0.000128	0.000128
<b>Promedio</b>	<b>0.058</b>		
<b>R Cuadrado</b>	100%		

Además, nos recuerda que en este experimento no hay datos suficientes para estimar todas las interacciones. Los efectos son el cambio en la media de la variable respuesta al pasar el factor (o interacción) de signo (-) a signo (+).

En primer lugar, y puesto que no tenemos grados de libertad para hacer contrastes, tendremos que reducir el número de efectos significativos mediante un análisis gráfico de Pareto (Fig. 4-4).

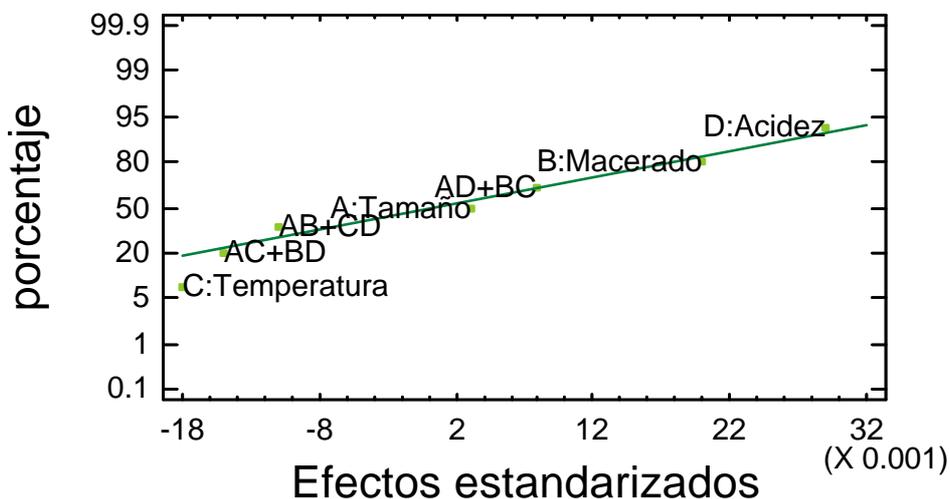
De este gráfico concluimos que los efectos que son mejores candidatos a ser eliminados son el Tamaño y la interacción AD+BC. Puesto que el Tamaño no parece significativo, será razonable esperar que tampoco contribuya en las interacciones. Por tanto, los efectos AC+BD y AB+CD, de ser importantes, serán en realidad BD y CD al ser AC y AB nulos.

Figura 4-4. Gráfico de Pareto para Rendimiento.



Otro gráfico que nos ayuda a discriminar entre efectos significativos y no significativos cuando no hay grados de libertad para hacer un test ANOVA es el gráfico probabilístico normal (Figura 4-5). Este gráfico está diseñado para que los efectos no significativos aparezcan alineados alrededor del 0 (cada efecto estimado está dividido por su desviación típica).

Figura 4-5. Gráfico de Probabilidad Normal para Rendimiento.



Según este gráfico, los efectos más distanciados de la recta que pasa por el 0, son los que pueden ser significativos. De acuerdo al gráfico, el efecto que parece ser significativo es el C. Y los menos relevantes, el tamaño de las partículas y el tiempo de macerado y las

interacciones AC+BD y AD+BC. Por tanto, lo primero por hacer será eliminar algún efecto del análisis y así empezar a tener grados de libertad para hacer el test de la tabla ANOVA.

Se elimina en primer lugar el efecto menos importante que es el Tamaño. Entonces la Variabilidad no Explicada (VNE) será 0.000018, con 1 grado de libertad, y la varianza residual será 0.000018. El F ratio será entonces la varianza de cada efecto (Mean Square) dividido por esta cantidad. También se eliminan las interacciones donde participe el tamaño. Esta eliminación no tendrá repercusiones en la tabla ANOVA, pues las interacciones de A están confundidas con las interacciones de otros pares de factores. Será sólo un cambio en el etiquetado presentado en la Tabla 4-6.

**Tabla 4-7. Análisis de la Varianza para Rendimiento**

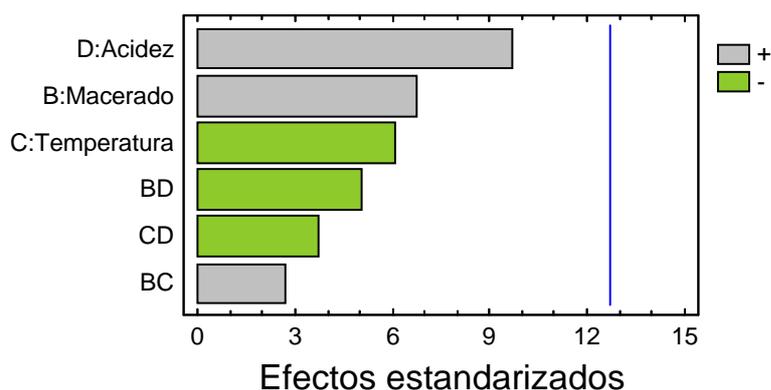
Fuente	Estimación de Efecto	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F-Ratio	P-Valor
B:Macerado	0.02 +/- 0.003	0.0008	0.0008	44.44	0.0948
C:Temperatura	-0.018 +/- 0.003	0.000648	0.000648	36.00	0.1051
D:Acidez	0.029 +/- 0.003	0.001682	0.001682	93.44	0.0656
BC	0.008 +/- 0.003	0.000128	0.000128	7.11	0.2284
BD	-0.015 +/- 0.003	0.00045	0.00045	25.00	0.1257
CD	-0.011 +/- 0.003	0.000242	0.000242	13.44	0.1695
Error Total		0.000018	0.000018		
R-cuadrado = 99.5464 por ciento R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 96.8246 por ciento Error Estándar de Est. = 0.00424264 Error absoluto de la media = 0.0015 Estadístico Durbin-Watson = 2.0					

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en Rendimiento en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Después prueba la significación estadística de cada efecto comparando la media al cuadrado contra una estimación del error experimental. En

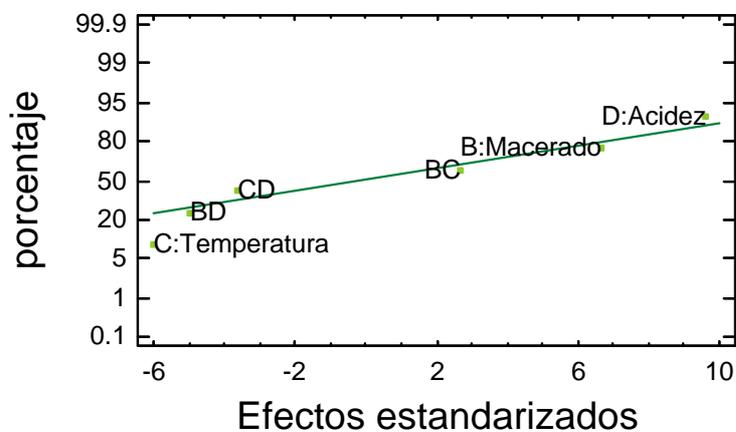
este caso, ninguno de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95.0% de nivel de confianza.

De nuevo se puede realizar un análisis de resultados mediante las gráficas de Pareto (Figura 4-6) y Probabilidad Normal (Figura 4-7).

**Figura 4-6. Gráfica de Pareto Estandarizada para Rendimiento.**

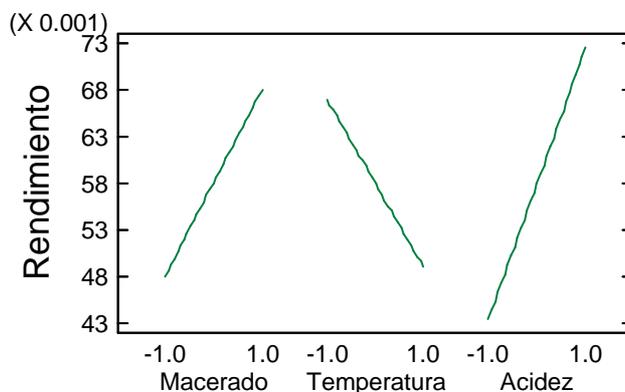


**Figura 4-7. Gráfica de Probabilidad Normal para Rendimiento**



La interpretación de los factores ha de hacerse de forma conjunta, ya que existe interacción entre ellos. Las opciones gráficas dan los gráficos siguientes (Figura 4-8) que ayudarán en la interpretación.

**Figura 4-8. Gráfico de Efectos Principales para Rendimiento.**



La acidez es el factor más importante, la mayor acidez produce un mejor rendimiento; una menor temperatura también mejora los resultados del rendimiento obtenido.

### 4.3 DESARROLLO DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN.

Considerando los factores cuyos efectos son más significativos sobre el rendimiento de la reacción, se aplicarán las técnicas estadísticas propias de un método de superficie de respuesta para optimizar las variables de interés; logrando así determinar las condiciones óptimas de operación del sistema.

Siendo la temperatura y la acidez las variables con mayor influencia en el rendimiento de la reacción y el costo de operación serán las dos que se manipularán en nuevo diseño factorial completo  $2^2$ , fijando los valores de las variables que resultaron de menor interés, según el detalle siguiente:

**Tabla 4-8. Factores y Dominio Experimental**

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
X1: Concentración de Ácido (%)	6	10
X2: Temperatura (°C)	120	135
X3: Tiempo de Macerado (hr)	3	
X4: Tamaño de Triturado (mm)	3	

Los valores de trabajo de la temperatura se fijan con base en la tendencia de los resultados previos de mejorar el rendimiento al disminuir la temperatura, y se busca disminuir este valor del rango normal de operación industrial tradicional y así obtener una economía en el proceso de calentamiento.

El diseño experimental completo consta de cuatro repeticiones, las cuales se realizarán por duplicado para lograr estimar el porcentaje de error y nivel de confianza de los resultados.

La Tabla 4-9 muestra la matriz de experimentos que se obtiene combinando los dos niveles de los dos factores.

**Tabla 4-9. Respuestas observadas.**

No.	Matriz de Experimentos		Plan de Experimentación		Volumen Destilado (ml)		Rendimiento (ml/gr)		Rendimiento Teórico (%)	
	X1	X2	Acidez (%)	Temperatura (°C)	Primera	Segunda	Primera	Segunda	Primera	Segunda
1	+	+	10	135	2.5	3.5	0.05	0.07	26.59	37.23
2	-	+	6	135	3.2	3.5	0.064	0.07	34.04	37.23
3	+	-	10	120	3.3	6.0	0.066	0.12	35.10	63.82
4	-	-	6	120	4.5	3.5	0.09	0.07	47.87	37.23

El análisis de superficie de respuesta, es realizado nuevamente utilizando un programa estadístico comercial, de donde se obtienen gráficas y tablas de análisis de resultados, considerando como variable de respuesta el rendimiento en la producción de furfural como una relación de volumen producido y masa de desperdicios alimentada.

La tabla de ANOVA divide la variabilidad del rendimiento en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Después prueba la significación estadística de cada efecto comparando la media al cuadrado contra una estimación del error experimental. En este caso, ninguno de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95.0% de nivel de confianza.

**Tabla 4-10. Análisis de Varianza para el Rendimiento.**

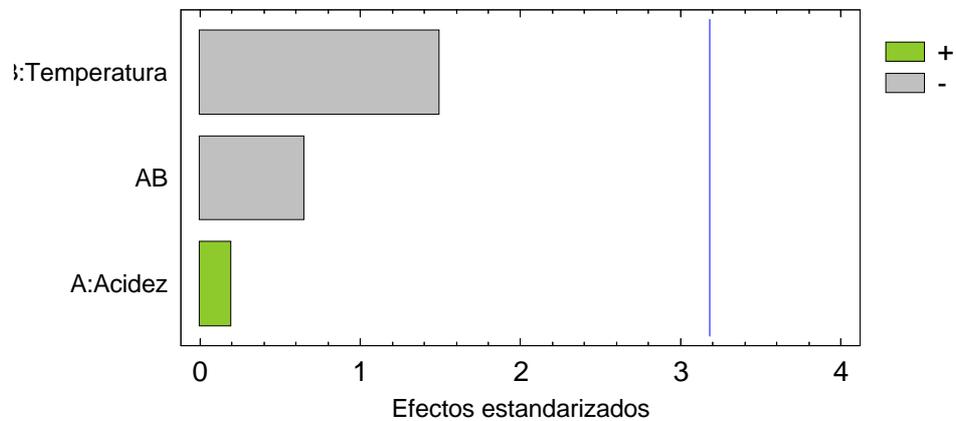
<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>GL</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F-Ratio</b>	<b>p-Valor</b>
A: Acidez	0.000018	1	0.000018	0.04	0.8581
B: Temperatura	0.001058	1	0.001058	2.23	0.2325
AB	0.0002	1	0.0002	0.42	0.5628
Bloques	0.00045	1	0.00045	0.95	0.4023
Error Total	0.001426	3	0.000475333		
<b>Total</b>	<b>0.003152</b>	<b>7</b>			

R-cuadrado = 54.7589 por ciento  
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 20.828 por ciento  
Error Estándar de Est. = 0.0218021  
Error absoluto de la media = 0.011  
Estadístico Durbin-Watson = 1.36115 (P=0.1576)

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 54.7589% de la variabilidad en Rendimiento. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 20.828%. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0.0218021. El error absoluto de la media (MAE) de 0.011 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0.05, no hay indicios de correlación de serie en los residuos.

La figura 4-9 muestra el diagrama de Pareto estandarizado del rendimiento de furfural obtenido.

**Figura 4-9. Gráfico de Pareto Estandarizado para Rendimiento.**



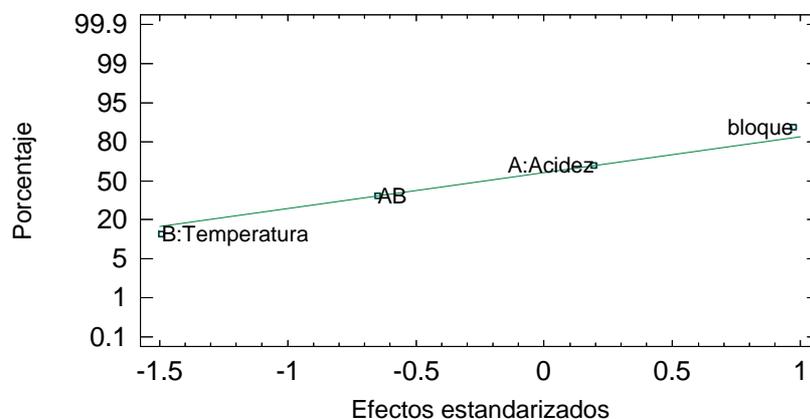
La tabla 4.11 muestra la trayectoria del ascenso más pronunciado (o de la pendiente).

**Tabla 4-11. Ruta ascendente para Rendimiento.**

Acidez	Temperatura	Rendimiento Pronosticado
0.0	0.0	0.075
1.0	-2.14199	0.111843
2.0	-3.38658	0.150812
3.0	-4.51714	0.199204
4.0	-5.6003	0.257409
5.0	-6.65841	0.325532
6.0	-7.70149	0.403612
7.0	-8.73478	0.491667
8.0	-9.76131	0.589707
9.0	-10.783	0.697738
10.0	-11.801	0.7815761

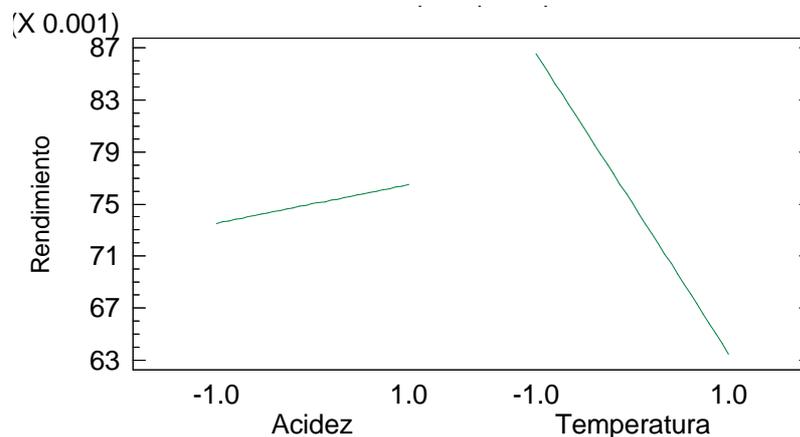
Este es el camino del centro de la región experimental actual a lo largo de la cual la respuesta estimada varía rápidamente con una variación mínima en los factores experimentales. Indica localizaciones buenas para ejecutar experimentos adicionales siendo el objetivo es aumentar o disminuir Rendimiento. Actualmente, se han generado 10 puntos cambiando la acidez en incrementos de 1.0.

**Figura 4-10. Gráfico de Probabilidad Normal para Rendimiento**



La figura 4-10 muestra los efectos principales e indica que los mejores rendimientos se trabajan a niveles medios de acidez y bajos de temperatura, sin embargo hay que tomar en cuenta la pendiente de cada una de las curvas, ya que indica la significancia de los efectos, es decir, que el que posea pendiente más inclinada, define que ese efecto es más sensible para que aumente la conversión, que en este caso es la temperatura (Figura 4-11); factor que recibirá mayor atención en el diseño del equipo de producción final.

**Figura 4-11. Gráfico de efectos principales para rendimiento.**



Las figuras 4-12 y 4-13 muestran la superficie de respuesta estimada y su contorno, donde el rendimiento aumenta al disminuir en el rango de temperaturas desde 1 a -1 y al aumentar el porcentaje de acidez de la solución de macerado.

Figura 4-12. Superficie de Respuesta Estimada

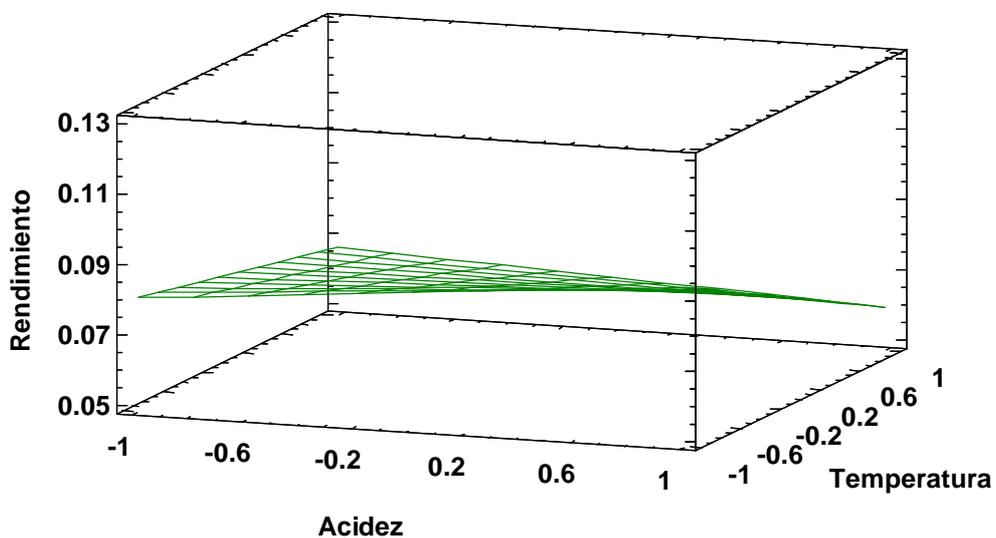
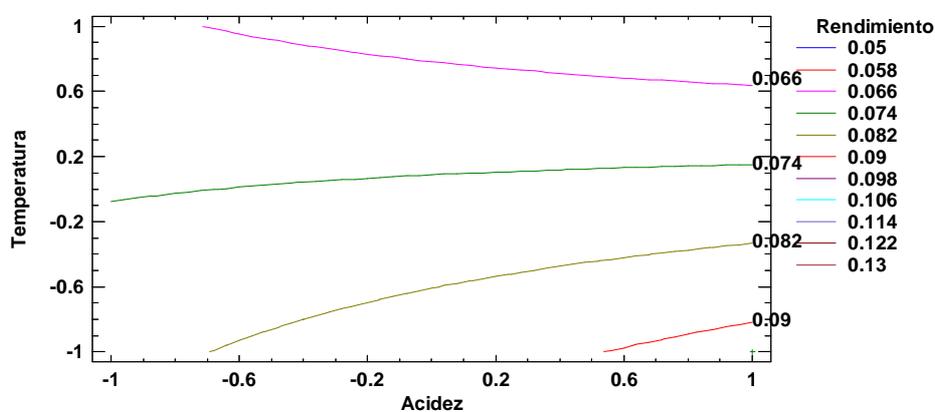


Figura 4-13. Contornos de la superficie de respuesta estimada.



### 4.3.1 OPTIMIZACIÓN DE LA RESPUESTA.

El programa estadístico genera el valor del punto óptimo de operación para las ecuaciones y el comportamiento predicho que es, Valor Óptimo = 0.093, es decir, un rendimiento teórico del 49.46% en la corriente de furfural condensado, es este valor el que se compara con el mejor valor experimental.

La tabla 4-12 muestra la combinación de niveles de factores que maximizan el rendimiento.

**Tabla 4-12. Factores óptimos de operación.**

<b>Factor</b>	<b>Inferior</b>	<b>Mayor</b>	<b>Óptimo</b>
Acidez	-1.0	1.0	1.0
Temperatura	-1.0	1.0	-1.0

Esta tabla muestra la combinación de niveles de factores que maximiza el rendimiento por encima de la región indicada.

La prueba número 8 resultó ser de mejor rendimiento de furfural, con una relación de 0.12 ml FF/g; sin embargo es un valor alejado en 0.045 unidades del promedio de 0.075 ml FF/g. Descartando esta prueba, el mayor valor de rendimiento generado experimentalmente es de 0.09; comparando las condiciones del punto óptimo estimado, con los resultados experimentales obtenidos, que es de 0.093 ml FF/gr, se puede decir que el valor generado por el análisis estadístico es ligeramente mejor que el generado experimentalmente, y que los resultados experimentales se aproximaron en un 96.77% al valor óptimo estimado.

#### **4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

Antes de plantear un plan experimental, se realizó un extenso estudio bibliográfico a fin de recopilar datos sobre las condiciones de operación y los máximos rendimientos de furfural obtenidos durante los últimos años.

Estos datos abarcan desde investigaciones universitarias a nivel de laboratorio y planta piloto, hasta procesos industriales de pequeña y gran escala, de los tipos continuos y por lotes. Cada uno con etapas en común, tales como realizar los experimentos con agua o con vapor, o realizar la hidrólisis en una única etapa. A pesar de las convergencias que pudieran mostrar la mayoría de los procedimientos, cada uno mostraba una etapa de divergencia en

la que esperaban con alto grado de seguridad radicaba el factor determinante para la obtención de un mayor rendimiento de reacción.

Cada uno de los procesos conocidos y utilizados para el análisis de resultados se plantean en los anexos; en este intervalo de condiciones de operación, el rango de rendimiento en furfural, generalmente se sitúa entre el 40 y 60% respecto al teórico cuando el furfural producido se mantenía en el medio de reacción, método por el cual se partió para las pruebas teniendo como referencia el trabajo de Martínez (1995).

En procesos industriales como Quaker Oats, Savo-Rosenlew y Agrifurane se obtienen rendimientos del 49, 47 y 65% respectivamente (Carrasco, 1996).

Estos resultados sirven de parámetro para buscar optimizar los resultados de los experimentos realizados en el laboratorio en la etapa de cribado de variables, en donde se obtuvieron resultados de 10.64 a 47.87% de rendimiento; etapa en la cual las variables de mayor influencia sobre el rendimiento resultaron ser el tiempo de macerado, la temperatura y la acidez de la solución de alimentación.

El rango de operación de esta etapa experimental incluía la temperatura de 170°C incluyendo así las tendencias actuales de elevar la temperatura para disminuir el tiempo de operación total de una planta de producción de furfural; sin embargo, los rendimientos a esta temperatura resultaron ser los más bajos en un rango de 10.64 al 35.10% con respecto al teórico, lo que confirma el porqué la mayoría de estas etapas muestra resultados inconsistentes y distintos de un autor con otro y constituye una razón de peso para que estas tecnologías no avancen de investigaciones en plantas pilotos a plantas de producción industrial.

Con base en los resultados experimentales, el rendimiento se ve favorecido al mantener una temperatura baja, por lo que se propone un rango de temperaturas de 120 a 135°C, temperaturas levemente más bajas que los métodos tradicionales de Quaker Oats y China.

La concentración de ácido en la solución de alimentación se mantiene en un 10% v/v, la cual disminuye su concentración a medida que la reacción de deshidratación de las pentosas produce furfural en el sistema.

Las variables de menor influencia y fácil manejo como el tamaño de las partículas de rastrojos y el tiempo de macerado se fijan en valores 1-3 mm y 3 horas respectivamente.

Las condiciones de operación y resultados de la etapa de optimización se muestran en la tabla 4-9, representando valores de rendimiento que varían del 26.59 al 63.82% de rendimiento con respecto al teórico, estos resultados concuerdan con los resultados de los experimentos consultados, puesto que el furfural producido en la unidad de destilación Dean-Stark descrita en el presente trabajo permanecía en el reactor una vez formado, los rendimientos en furfural para este caso deberían oscilar, en las mejores condiciones entre el 40 y el 60%.

Experimentalmente, el rendimiento de 63.82% con respecto al teórico representaría el máximo alcanzado en la etapa de optimización, y estaría por alcanzar el mismo rendimiento del proceso Agrifurane, el cual representa el máximo alcanzado en un proceso industrial.

Sin embargo, cada prueba de la etapa de optimización se realizó por duplicado, lo que nos permite estimar un máximo óptimo de operación, considerando la influencia de cada una de las variables manipuladas y cierto grado de error en los resultados obtenidos de una repetición y la otra. Estadísticamente, el punto óptimo de operación alcanza un 49.46% de rendimiento con respecto al teórico, a condiciones de  $\pm 120^{\circ}\text{C}$ , una solución de alimentación de ácido sulfúrico al 10% v/v, 3 horas de maceración de los rastrojos a utilizar con un tamaño de  $\pm 3\text{mm}$  incluyendo partículas finas.

El rendimiento óptimo de 49.46% representa una elevación de 18.46% en el rendimiento promedio alcanzado en la primera etapa experimental, y para ampliar la evaluación de este resultado, se extraen los parámetros de operación de los procesos estudiados y los resultados obtenidos, mostrándose de manera comparativa en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13. Comparación de rendimientos y parámetros de operación.

Investigación	Rendimiento	Horas de Operación	Concentración de Ácido Utilizado	Temperatura de Operación	Presencia en el Mercado
Agrifurane	65%	N/D	1%	177°C	Descontinuado debido a la cantidad de reactores en serie que requiere
China	50%	5	4%	165°C	El más común en la actualidad
<i>Punto Óptimo Calculado</i>	<b>49.46%</b>	<b>4</b>	<b>10%</b>	<b>120°C</b>	<b>Escala de Laboratorio</b>
Quaker Oats	49%	5	10%	153°C	Aún presente desde 1921
Carrasco	48.7%	N/D	10%	230°C	Investigación a escala de Planta Piloto
Rosenlew	47%	Proceso continuo con 2h de pretratamiento	-	180°C	N/D (Inconveniente al desechar 40% de desechos en tamaños finos)
Martínez (Zuro)	44.56%	6	10%	N/D	Investigación a escala de Laboratorio
García	3.42%	N/D	10%	N/D	Investigación a escala de Laboratorio, inconveniente extracción con éter

Fuente, Zeist (2000), Carrasco (1996), los autores.

Comparando los resultados obtenidos con los métodos estudiados según su categoría, se puede observar que el rendimiento alcanzado en el presente trabajo es superior desde un 4.9% hasta un 46.04% alcanzado en investigaciones de grado universitario a nivel de laboratorio, en condiciones similares de parámetros de operación para el caso de Martínez, y condiciones de operación más amigables con el ambiente en el caso de García.

El rendimiento obtenido es superior por cerca de un 1% al rendimiento obtenido por Carrasco a nivel de planta piloto, sin embargo, el gasto energético en nuestra investigación es considerablemente menor, tomando en cuenta que la temperatura utilizada fue de 120°C contrarrestando los 230°C utilizados por el autor.

A nivel industrial, el rendimiento óptimo calculado iguala los resultados con los procesos industriales más conocidos. En el caso del proceso por lotes de China, se logra reducir el tiempo de operación en una hora, y el valor de la temperatura en un rango de 45°C. En el caso de Agrifurane, no se logran igualar o mejorar los resultados, este fue un proceso atractivo que opera a temperaturas de 177°C y tiene poca necesidad de agregar ácido catalizador gracias a su recuperación mediante un filtro prensa; sin embargo, cabe mencionar que este se trata de un proceso considerado obsoleto y casi abandonado por su complejo sistema de 6 reactores en serie, el costoso sistema de tratamiento a la torta de desechos y su elevada inversión inicial. Otro factor a considerar al hacer esta evaluación es que muchos métodos toman en cuenta el porcentaje de furfural contenido en la corriente de desechos del reactor al totalizar su rendimiento, en este caso no se toma en cuenta, pues la recuperación de este bajo porcentaje eleva los costos del producto de manera tal que lo vuelve poco rentable.

Los resultados estadísticos no arrojan una variable de operación claramente determinante para mejorar los resultados, lo que concuerda con la variedad de procesos industriales que varían temperatura, acidez de los catalizadores, tiempos de operación en rangos considerablemente amplios. Podemos determinar, sin embargo, que mantener la temperatura en niveles alrededor de los 120 a 135° y una solución de catalizador ácido de

10% v/v, iguala los rendimientos industriales actuales, disminuyendo considerablemente la demanda energética de operación.

## **5 DISEÑO BÁSICO PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FURFURAL.**

---

La agroindustria produce diversos residuos que, en principio son reutilizables, pero que no se aprovechan por razones técnico/económicas. El aprovechamiento de estos residuos debe significar un valor agregado a la cadena productiva de determinado bien y debe asegurarse que se beneficien desde los grandes inversionistas hasta los agricultores que trabajan la tierra.

Para lograr una adecuada distribución de beneficios, la propuesta de una nueva planta para la producción de furfural a nivel industrial debe integrar un modelo de prácticas agrícolas que genere la materia prima necesaria, y que retribuya a los agricultores de manera tal que los impulse a integrarse al proyecto, asegurando el desarrollo de una agricultura sostenible.

La producción de furfural a nivel mundial ha migrado de los países industrializados hacia los países en vías de desarrollo desde la década de 1990. Disminuyendo la producción en Europa de manera significativa a medida que se aumentaba en países como China y República Dominicana; siendo este el país latinoamericano que hasta la fecha ha aprovechado en mayor medida este comportamiento, demostrando la oportunidad que tienen los países de la zona para competir en el mercado mundial.

Es importante que esta migración de tecnologías hacia países en vías de desarrollo se realice desde la perspectiva del desarrollo sustentable, minimizando el uso de sustancias auxiliares y el consumo de energía y utilizando materia prima renovable en lugar de recursos agotables y minimizando la emisión de contaminantes, porque solo así podrá lograrse un verdadero beneficio y un crecimiento significativo a estas sociedades.

### **5.1 DISEÑO DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE FURFURAL.**

El diseño de procesos limpios y sostenibles debe basarse en las herramientas clásicas de la ingeniería, para concebir el esquema de producción, que considere tanto los aspectos

técnico-económicos como los ambientales, especialmente en el caso del furfural, cuyas plantas se localizan en comunidades agrícolas donde relativamente se facilita el abastecimiento de materia prima.

### 5.1.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN.

Se fijará el volumen de producción de la planta teniendo en cuenta factores como el consumo internacional de furfural y el tamaño habitual de una planta con este tipo de tecnologías.

**Tabla 5-1. Ventas internacionales por consumo de furfural.**

<b>Países / Región</b>	<b>Consumo (Ton/año)</b>
China / Taiwán / Suramérica	5000
Australia / Sudáfrica	2000
Estados Unidos	8000

Fuente: Tin (2005)

Considerando que el consumo promedio en países como Estados Unidos y la región suramericana, quienes conforman nuestro potencial mercado objetivo, es de 5,000 Ton/año de furfural y teniendo como referencia el tamaño típico de una planta que oscila entre las 500 a 6,000 Ton/año de Furfural (Tin, 2005), ha de considerarse construir una planta de tamaño intermedio con capacidad de 2,500 Ton/año de Furfural.

La capacidad de abastecimiento de materia prima se demuestra, cuando, aún tomando en consideración la zona del país con el porcentaje más bajo en rendimiento de producción de maíz y menor número de agricultores interesados en comercializar los residuos del cultivo de maíz, se obtiene una base de materia prima para una planta con capacidad de producción de más de 5,000 Ton/año de Furfural (Tablas 5-2 y 5-3).

La instalación de una planta en la Región IV compuesta por los departamentos de Usulután, San Miguel, Morazán y La Unión facilitaría el acceso a una renovada salida de exportación,

gracias a la cercanía del Puerto de Cutuco en La Unión, además de sumarse a las iniciativas que contribuirán con el desarrollo económico de la región.

**Tabla 5-2. Superficie, Producción y Rendimiento de Producción del Cultivo del Maíz en la Región IV**

<b>Año Agrícola</b>	<b>Superficie (MZ)</b>	<b>Producción (QQ)</b>	<b>Rendimiento (QQ/MZ)</b>
<b>2009/2010</b>	106,074	3,575,699	33.7

**Tabla 5-3. Cantidad de Residuos Generados y Utilizables como materia prima a partir del cultivo de maíz en la Región IV. (Toneladas)**

<b>Año Agrícola</b>	<b>CRT</b>	<b>CRO</b>	<b>CRHC</b>	<b>CRTOTAL</b>
<b>2009/2010</b>	31,528.8	39,232.06	148,707.26	219,468.33
<b>Porcentaje de residuos sin utilizar</b> 59.9%				
<b>Interés en comercialización de residuos de maíz</b> 36.67%				
<b>Desechos utilizables como materia prima</b>			<b>CRTOTAL</b>	48,206.94

Con una alimentación de furfural teórico de 10,513 toneladas al año, y para un rendimiento de producción del 49.46%, la capacidad de producción de la planta de furfural podría ser de hasta 5,246.45 toneladas al año, más del doble de la producción que se plantea.

De acuerdo a la producción proyectada de 2,500 Ton/año FF se espera un ingreso por ventas de \$2,500,000 anuales a un precio que se mantiene estable a \$1000/Ton (Tin, 2005) aproximadamente.

## **5.2 DETALLES DE OPERACIÓN.**

La secuencia de etapas que conforman la producción de furfural se muestra en la Figura 5-3, la cual se describe con detalle posteriormente.

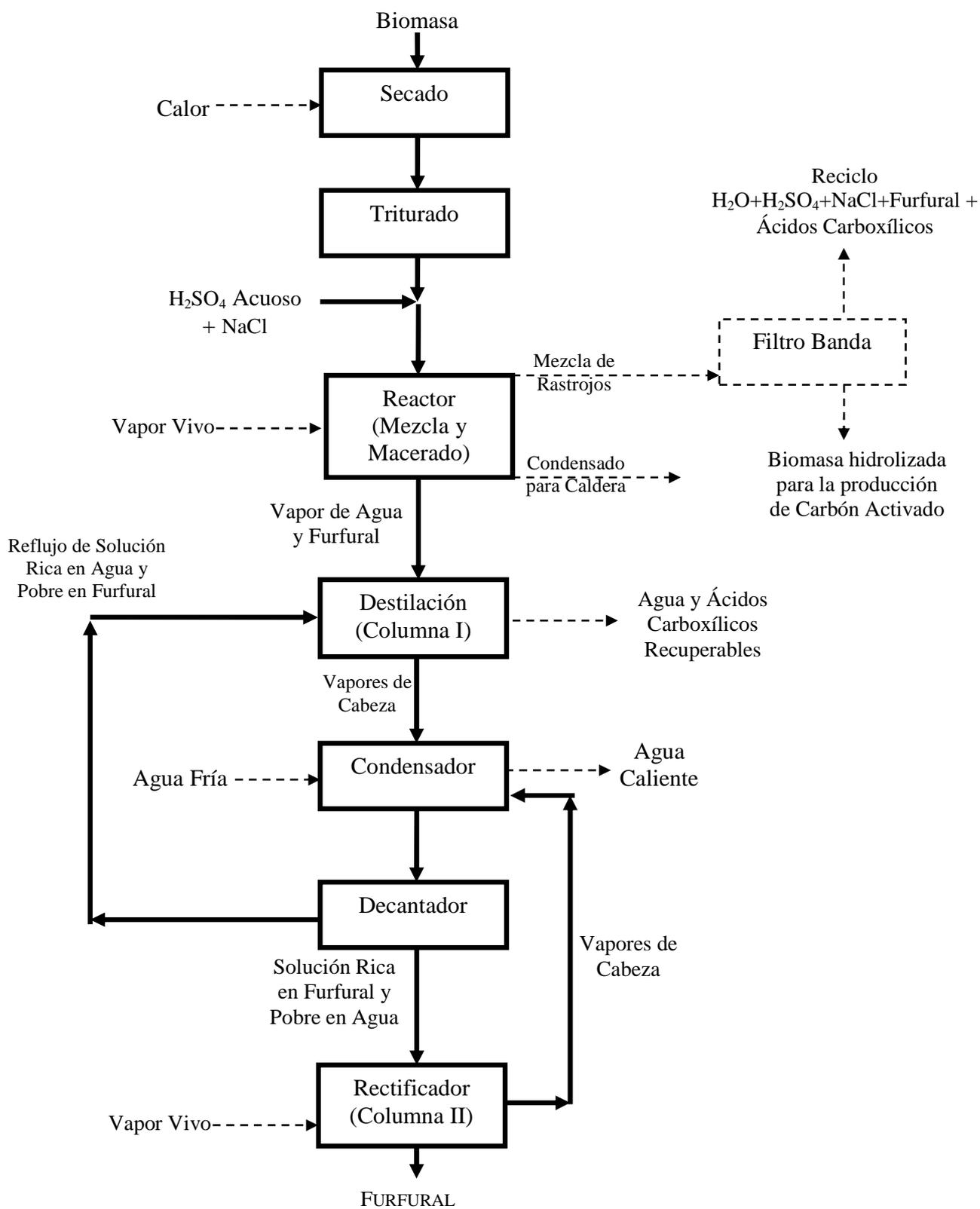


Figura 5-1. Diagrama de Bloques de Proceso

Se utilizan hojas, zuros o incluso tallos de maíz secos con un contenido de humedad del 10 al 30%, como material de partida, estas provienen secas cuando se tratan de cultivos para granos maduros y secos, sin embargo, cuando se tratan desechos de mazorcas verdes, pueden realizarse procesos de secado solar o un proceso de tambor de secado integrado a la trituradora de biomasa, la cual tritura los desechos para alcanzar tamaños de 3 a 10 mm.

Se agrega cloruro de sodio como agente separador y ácido sulfúrico acuoso que actúa como catalizador.

La materia prima seca se mezcla con los catalizadores al introducirse a través de una compuerta de alimentación en el tanque del reactor, que después de cerrado, inicia la agitación para homogeneizar la mezcla. Tras un tiempo de mezcla de 3 horas, el calentamiento inicia al abrir el paso al vapor de agua en la carcasa del reactor para alcanzar una temperatura de 120°C. El condensado obtenido en la carcasa se utiliza de manera cíclica para alimentar el servicio de vapor.

El furfural en el destilado obtenido ronda el 50% del rendimiento teórico. El contenido final de humedad (agua + furfural + derivados volátiles) después de las 5 horas de tratamiento aumenta con respecto al contenido de agua inicial. El furfural obtenido en la corriente de salida del reactor, que es la única cantidad furfural considerada para la producción, tiene un 6% de contenido aproximado en la corriente de vapor (Zeist, 2000).

La descarga del tanque es entregada a un filtro de banda, dando una torta deshidratada y un filtrado, que consiste esencialmente de agua, pero cargado de pequeñas concentraciones de ácido sulfúrico, furfural, y subproductos como ácidos carboxílicos. Este filtrado se recicla al tanque para la preparación del material de alimentación. Debido a este retorno, la mayor parte del ácido sulfúrico se recupera y reutiliza, la única pérdida es la cantidad que se va en la torta. Esta pérdida se sustituye en el tanque. Igualmente, el agua que sale del sistema con el vapor del rectificador y la torta también se repone en el tanque, de modo que el balance de masa global se satisfaga.

Evitando condensar la mezcla de vapor y furfural a la salida del reactor, el proceso pasa esta corriente bicomponente directamente a través de la columna de destilación azeotrópica.

Para la destilación del furfural en la mezcla con vapor de agua, se vencerá el efecto de la formación del azeótropo del sistema utilizando 2 rectificadores; para obtener como producto una corriente de furfural tan pura como se desee. El vapor de la sección de enriquecimiento de la primera columna formará 2 líquidos insolubles, una fase rica en agua y otra fase rica en furfural. La capa que está más rica en agua se regresa al plato superior de la columna I como reflujo. La capa rica en furfural en el decantador se manda al plato superior del fraccionador II, que contiene sólo una sección de agotamiento, con un producto de composición tan puro como se desee.

El furfural destilado tiene una concentración del 49.46% del rendimiento teórico, y la presencia de furfural en el residuo no es contabilizada, este sin embargo, será retornado al reactor luego de secar el desecho carbonizado en un filtro prensa. Por lo tanto, el rendimiento global aumentará a medida que se sume la corriente de reciclaje y se alcance un estado estable.

El furfural destilado está listo para ser envasado y distribuido para su comercialización.

Esta sección muestra una descripción de las características de los principales equipos involucrados en el proceso de producción, como también las bases de diseño utilizadas en su adopción y el cálculo de alguno de ellos.

## 5.2.1 DIAGRAMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FURFURAL.

En la Figura 5-2 se presenta el diagrama convencional del diseño de planta.

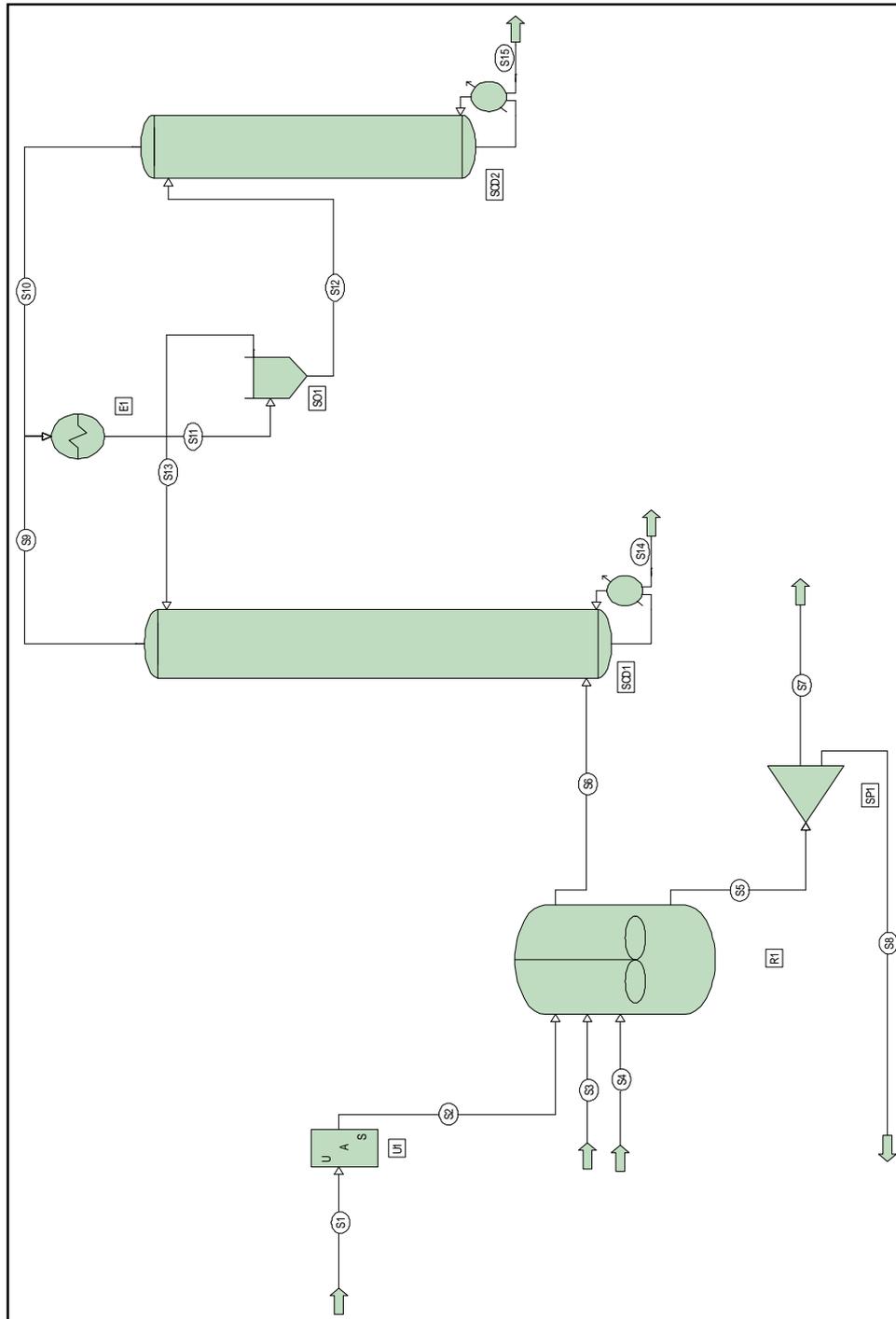


Figura 5-2. Diagrama de Proceso de Producción de Furfural

## 5.2.2 BALANCE GLOBAL DEL PROCESO.

Un lote de producción como el descrito se puede caracterizar de la siguiente manera: la trituradora para biomasa reduce el tamaño de los desechos de maíz a partículas de 10 mm de diámetro.

La entrada se compone por:

6 Toneladas de desechos de maíz al 15% de humedad.....	5.1 Ton de sólidos secos 0.9 Ton H <sub>2</sub> O
19 m <sup>3</sup> de solución acuosa al 10% de ácido sulfúrico.....	3.42 Ton H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 17.1Ton H <sub>2</sub> O
3.26 Ton NaCl.....	3.09 Ton NaCl 0.17 Ton H <sub>2</sub> O

Haciendo una suma de:

5.1 Ton de sólidos secos
3.09 Ton NaCl
18.17 Ton H <sub>2</sub> O
3.42 Ton H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

**Total: 29.78 Ton**

La porción líquida del lote es de 18.17 toneladas de agua, lo que corresponde al 68.9% en peso. La concentración inicial del ácido alimentado es del 10% en volumen y el 20% en peso. Este es el ácido al inicio del proceso, ya que con el calentamiento de la mezcla se da la producción de agua, por estequiometría de la reacción, más la contenida en la materia sólida lo cual reduce la acidez de la mezcla, situación que se compensa con la presencia de NaCl que actúa como equilibrante del medio ácido.

Los calores específicos de los componentes del lote son:

Sólidos....	2.0 kJ/ Kg K
NaCl.....	0.88 kJ/Kg K

H<sub>2</sub>O..... 4.18 kJ/Kg K

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.... 1.42 kJ/Kg K

El calentamiento de carga de 25° a 120°C requiere de la siguiente energía por componente:

Sólidos.... 969000 kJ

NaCl..... 258324 kJ

H<sub>2</sub>O..... 7215307 kJ

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.... 461358 kJ

**Resultando un requerimiento energético total de 8,903,989 kJ**

La energía de condensación del vapor a 120°C es de 2202 kJ/Kg, por lo tanto el calentamiento de la mezcla hasta la temperatura de reacción genera una cantidad de condensado de  $\Delta W = 4043.6$  Kg. Este condensado de calentamiento estaría ocupándose en la chaqueta de calentamiento del reactor.

El contenido de pentosanas en los desechos de maíz es del 30%, por lo que la entrada de estas al reactor es de:  $5.1 \times 0.3$  Ton= 1.53 Ton de pentosanas.

La cantidad teórica de furfural a producir es de  $1.53$  Ton  $\times 0.727 = 1.11$  Ton de furfural.

El consumo de agua de la reacción de hidrólisis de pentosanas a pentosas es:

$$1.53 \text{ Ton} \times (18.01/132.114) = 0.208 \text{ Ton de Agua}$$

El agua producida por la conversión global de pentosanas a furfural es de:

$$1.53 \text{ Ton} \times 0.2727 = 0.4172 \text{ Ton de Agua}$$

Contenido teórico de agua en el residuo de la reacción:

$$18.17 + 0.4172 = 18.58 \text{ Ton de Agua}$$

La cantidad teórica de sólidos secos en el residuo es:

$$5.1 \text{ Ton} - 1.53 \text{ Ton} = 3.57 \text{ Ton de Sólidos}$$

El tiempo de digestión es de 5 horas, en el cual se produce una corriente de vapor con un contenido de furfural que oscila en torno al 6% en peso.

Con un rendimiento de furfural del 49.46% se produce una cantidad de 0.55 Ton de Furfural.

A la concentración de 6% de furfural en el destilado, se obtiene una corriente de 9.15 ton de vapor, por lo que el consumo de vapor durante la destilación es de 8.6 Ton de Vapor por Ton de Furfural.

### 5.2.3 ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS Y CORRIENTES.

En esta sección se describen las especificaciones de la mayoría de los equipos, incluyendo material y dimensiones y se presenta el diseño de los más importantes.

De acuerdo con la figura 5-2 los equipos expuestos son:

**Tabla 5-4. Listado de los equipos de proceso**

<b>Denominación</b>	<b>Descripción-Función Principal</b>
U1	Trituradora de Biomasa
R1	Reactor de Tanque Agitado
SP1	Filtro de Banda para desechos del reactor
SCD1	Columna de Destilación Azeotrópica
E1	Intercambiador de calor
SO1	Decantador para reflujo de columnas de destilación
SCD2	Rectificador para Destilación. Columna 2

Denominación: U1

Descripción: *Trituradora de para biomasa*

---

Material: Acero al carbón

Parámetros Característicos: Rodillo de Martillos, Protección contra la emisión de partículas volátiles.

Dimensiones Principales: Ancho 5'9''; Diámetro con martillos 3'7'', Peso 2500 kg, Rotación 1000 rpm, 36 martillos

Consideraciones: Las trituradoras de biomasa sirven para moler el material de entrada en trozos de menor tamaño, los cuales serán alimentados al reactor químico para llevar a cabo la reacción química.

Un rotor de trituración con un sistema de martillos es especialmente adecuado para triturar este tipo de desechos.

Ejemplo de imagen:



Figura 5-3. Trituradora de Martillo para biomasa.

Denominación: R1

Descripción: *Reactor de Tanque Agitado con Carcasa para Calentamiento externo*

---

Material: Acero inoxidable

Parámetros Característicos y Dimensiones Principales:

Temperatura de reacción: 120°C

Masa por lote: 6 Ton de desechos sólidos

Diámetro: 2.41

Altura: 7.23 m

(Consultar cálculos de diseño en Anexo II)

Tipo de Agitadores: Un agitador helicoidal ubicado en la parte superior del eje y un agitador de paletas planas en la parte baja del tanque. (Hojas cortas de  $\frac{1}{4}$  D y 4 placas deflectoras de  $\frac{1}{12}$  D)

Consideraciones: Al considerar la etapa de reacción química se analizan las ventajas y desventajas de dos estrategias de reacción promisorias: Reactor de tanque agitado de operación discontinua y un Reactor de lecho fijo de operación semicontinua.

Debido a que es una reacción heterogénea, con reactantes sólidos y líquidos y es importante extraer el producto en forma de vapor; la complejidad que conlleva el paso de un reactante sólido a través del reactor empacado, hace que la opción de operación por lotes sea la más favorecida. Por lo tanto, la operación discontinua en reactor de tanque agitado es la modalidad elegida.

Los rastrojos son mezclados con la solución acuosa de ácido sulfúrico desde que salen de la trituradora y entran al reactor, tiempo en el que inicia la cuenta para el período de macerado.

Se inyecta vapor vivo a 120kPa revestimiento del reactor, el cual permite alcanzar una temperatura de 120°C en un corto tiempo.



**Figura 5-4. Reactor de tanque vertical**

Denominación: SP1

Descripción: *Filtro de Banda*

---

Material: Rodillos de Acero Inoxidable y bandas de polipropileno

Dimensiones Principales: Peso 6670 Kg, Longitud 5.54 m, Altura 2.60 m, Humedad en torta filtrada del 66 al 85%

Parámetros a considerar: Un filtro de bandas es un deshidratador de biosólidos que aplica una presión mecánica a una mezcla químicamente tratada, que se intercala entre dos correas de tensión, pasando las cintas a través de un serpentín con una disminución de diámetro de los rollos.

Este tipo de filtro resulta ser el indicado gracias la disponibilidad de bandas resistentes a las altas temperaturas y a la concentración de ácido en la mezcla a la salida del reactor, además de proveer una mejor consistencia en los sólidos deshidratados.

Ilustración:

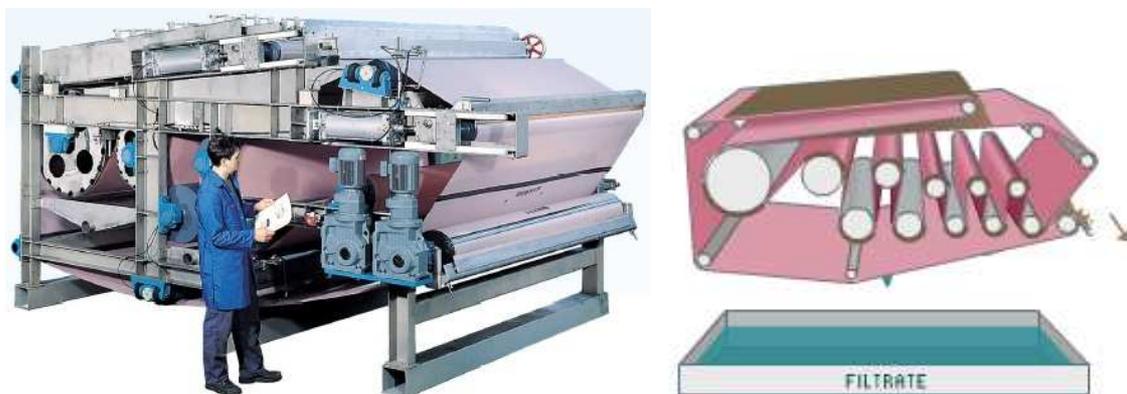


Figura 5-5. Ilustración de un filtro de bandas.

Denominación: SCD1

Descripción: *Columna de destilación azeotrópica*

---

Material: Acero Inoxidable

Dimensiones Principales: Platos

Perforados con Rehervidor de fondos

Bases de Diseño: 6 Platos Perforados +

Rehervidor ( $\epsilon=0.5$ ), 80 in entre platos,

H=6.1 m, D=2.95m

(Consultar Diagrama de Destilación en

Anexos III)

Consideraciones: El objetivo de esta etapa del proceso es eliminar la mayor cantidad de agua de la corriente de vapor a la salida del reactor. Aunque

el furfural y el agua son una mezcla azeotrópica, es fácil separarlos por completo siempre y cuando se utilicen dos fraccionadores en la etapa de destilación; esto es porque se forman dos soluciones acuosas en lados opuestos de la mezcla azeotrópica.

El proceso resulta más económico al inyectar directamente la corriente de vapor de agua y furfural en el rehervidor de la torre de destilación; ahorrando así un paso de condensación.

El vapor a la salida de la primera columna, cuando esté totalmente condensado en su punto de ebullición, forma dos líquidos insolubles que pueden decantarse. La capa más rica en agua se regresa al plato superior de la columna I como un reflujo. La capa rica en furfural del decantador se manda al plato superior del rectificador, que contiene solo una sección de agotamiento. El vapor principal de la de la columna II cuando se condensa totalmente, produce los mismos dos líquidos insolubles que el primer destilado. En consecuencia, se puede utilizar un mismo condensador para las dos torres. La composición del producto



**Figura 5-6. Ilustración de Torres de destilación**

residual puede ser el furfural tan puro como se desee y el producto de la primera torre estará compuesto por agua y ácidos carboxílicos como el ácido acético el cual puede ser recuperado mediante tratamientos posteriores.

Denominación: SC2

Descripción: *Rectificador para Destilación. Columna 2*

---

Material: Acero Inoxidable

Dimensiones Principales: Platos Perforados con Rehervidor de fondos

Bases de Diseño: 7 Platos Perforados,  $\epsilon=0.5$ , 80 in entre platos, H= 7.1 m, D=2.95

Denominación: E1

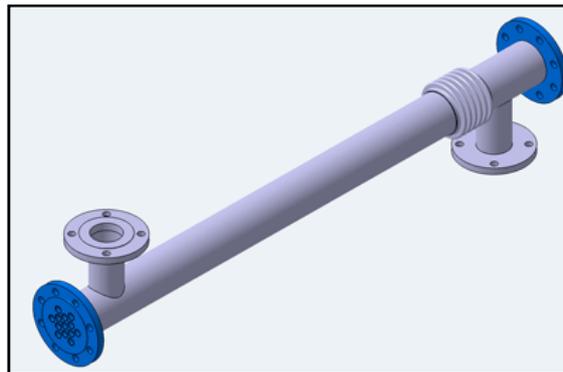
Descripción: *Intercambiador de Calor*

---

Material: Acero Inoxidable

Tipo: Multitubular

Fluido Refrigerante: Agua a 10°C



**Figura 5-7. Intercambiador de tubos**

Denominación: SO1

Descripción: *Decantador Gravitatorio de Productos de Destilación*

---

Material: Acero Inoxidable

Dimensiones Principales: Volumen 2 m<sup>3</sup>

Bases de Diseño: Decantador gravitacional cilíndrico vertical; tiempo de Residencia de 30 minutos.



**Figura 5-8. Decantador Vertical**

### **5.2.3.1 SERVICIOS AUXILIARES**

Los servicios auxiliares requeridos por el proceso de obtención y rectificación de furfural se pueden dividir en servicios de vapor, servicio de agua (fría y natural en circuito cerrado) y servicio de energía eléctrica.

#### **Servicio de Vapor**

---

Los requerimientos de vapor de la planta provienen en su totalidad del consumo del reactor y los hervidores de las columnas de destilación. El sistema de provisión de agua de caldera será un circuito cerrado.

Debido a la temperatura de operación del reactor y los hervidores, se necesitarán 4 Ton de vapor saturado a 1.5 atm de presión.

El suministro de vapor se realizará mediante una caldera que puede utilizar el carbón a la salida del filtro de bandas como combustible.



**Figura 5-9. Caldera**

Material: Acero Inoxidable

Parámetros Principales: Caldera de tubos capacidad de 1000-5000 kgh, Vapor saturado con temperatura de has 175°C, hasta 9 bar de presión.

### **Servicio de Agua**

---

Para cubrir las necesidades de la reacción y de refrigeración del proceso, se utilizará un sistema cerrado de agua.

El agua que se alimenta al reactor es recuperada a la salida del filtro de banda instalado, y es insertada al ciclo de alimentación del tanque.

La temperatura del agua de enfriamiento será de 10°C.

Dimensiones Principales: Platos Perforados con Rehervidor de fondos

La provisión de agua de consumo se realizará a través de un tanque de 100,000 L el cual no utilizará cisterna pues debe garantizarse la provisión de agua en el área de instalación de la planta.

Para abastecer el consumo de agua a 10°C se dispondrá de un ciclo de refrigeración por compresión de una sola etapa. El sistema de refrigeración constará de un compresor, un evaporador de fluido refrigerante y un condensador de placas de fluido refrigerante.

Un programa general de ahorro de agua incluirá:

- El uso de cepillos y raspadores de goma, para todas las operaciones de limpieza de pisos en lugar del chorro de agua de una manguera, que solo debe usarse para el lavado final.
- La dosificación correcta del volumen de agua requerido en las operaciones de producción y en los lavados.
- La captación de aguas lluvias para su aprovechamiento en operaciones de limpieza y riego.
- Evitar pérdidas de agua por fugas.
- Instalar equipos ahorradores de agua en grifos, mangueras, válvulas, etc.

### **Servicio de Energía Eléctrica**

---

Por el consumo energético del proceso, la planta puede comprar energía de la red y producir su propia electricidad mediante la incineración del carbón residual del reactor que se obtiene del filtro de bandas.

Deberá implementarse un programa de eficiencia energética empleando la menor cantidad de energía posible en la planta. Además de reducir costos de producción, esta medida disminuiría los niveles de contaminación ambiental desde la fuente primaria de energía hasta el punto final de consumo.

Es posible generar energía eléctrica y energía térmica, a partir de fuentes renovables. La gran ventaja radica en que el uso de algunas de ellas tiene, en general, un impacto bajo sobre el medio ambiente.

La energía eléctrica puede ser generada a través de módulos fotovoltaicos. La energía térmica puede ser generada con calentadores solares. La ventaja de su utilización es que, pese a la inversión inicial puede ser un poco mayor a la de un sistema convencional de combustibles fósiles, y los costos de operación son bajos.

La energía solar en el campo de energía térmica tiene entre otras aplicaciones industriales, el:

- Precalentamiento de agua, y
- Deshidratación y secado de productos agrícola.

También es posible usar energía solar para iluminación, mediante paneles fotovoltaicos. Además la iluminación natural puede reemplazar, en muchos casos, a la iluminación artificial; de esta manera, se disminuye el consumo de energía eléctrica.

Otra fuente de energía renovable para la generación de calor será la biomasa.

### **Programa de Buenas Prácticas Operativas**

---

Algunas de las medidas importantes relacionadas con buenas prácticas operativas son:

1. Establecer un programa de mantenimiento preventivo de la maquinaria.
2. Establecer un control de inventarios y registros de insumos, residuos y producto acabado.
3. Solicitar a los proveedores hojas técnicas y hojas de seguridad de los productos químicos.
4. Establecer un control de consumos específicos.
5. Establecer un sistema de recolección de derrames y su disposición adecuada.
6. Contar con pisos planos y lisos en todos los ambientes de la planta, para facilitar la limpieza.
7. Cubrir las canaletas y los tanques a ras de piso para evitar accidentes.
8. Reducir pérdidas de energía por falta de aislamientos adecuados.
9. Programar un mantenimiento semestral de la caldera de vapor.
10. Recuperar todos los condensados y garantizar un sistema cerrado de uso de agua y vapor.
11. Considerar la cogeneración de energía.

**Tabla 5-5. Denominación de las corrientes de proceso**

<b>Denominación</b>	<b>Descripción-Función Principal</b>
S1	Alimentación de desechos de maíz gruesos
S2	Triturado de desechos de maíz
S3	Solución acuosa de ácido sulfúrico al 10%
S4	Cloruro de Sodio
S5	Mezcla de biomasa agotada, desecho del reactor
S6	Vapor Agua/Furfural Producto del Reactor
S7	Torta de carbón de biomasa
S8	Solución acuosa de ácido sulfúrico, cloruro de sodio, furfural y ácidos carboxílicos como subproductos
S9	Vapor de cabeza de columna de destilación I
S10	Vapor de cabeza de columna de destilación II
S11	Condensado de cabezas de destilación
S12	Condensado rico en furfural
S13	Condensado rico en agua
S14	Agua y ácidos carboxílicos
S15	Furfural

#### **5.2.4 PROPUESTA PARA LA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS Y DESECHOS.**

El proceso productivo del furfural es considerado como un proceso limpio, en el cual se obtienen corrientes de subproductos con valor comercial o desechos con valor energético para ser utilizados como combustible o ser comercializados.

La mayoría de las plantas de furfural extraen ácidos carboxílicos y derivados no volátiles del proceso de destilación, los cuales procesan y obtienen ácido acético, acetona y alcohol

metílico; sin embargo, muy pocos investigadores reportan información sobre la utilización de la materia orgánica residual como base para la producción de carbón activado.

En el presente trabajo se realizaron mediciones cuantitativas de adsorción a la biomasa residual procedente del reactor, para determinar la capacidad adsorptiva y así poder demostrar que este residuo puede ser utilizado como carbón activado.

El estudio cuantitativo del fenómeno de adsorción es posible mediante el conocimiento de la *isoterma de adsorción*, resultante de graficar la concentración adsorbida por gramo de adsorbente contra la concentración de soluto en equilibrio, a temperatura constante.

Se tomó como referencia la práctica establecida en el Curso de Fisicoquímica Experimental (Daniels, 1970) con ligeras modificaciones debido a la disponibilidad del residuo. Previo a la realización de la práctica se neutralizó la biomasa y posteriormente se pirolizó en una mufla calentada eléctricamente a una temperatura de 500°C alrededor de una hora.

La pirólisis directa de los residuos sin tratar reducen la cantidad de agua consumida cuando se neutraliza el carbón resultante, esto coincide con los procesos conocidos de activación de carbón empleando ácido fosfórico, previo a la pirólisis; en este caso es el ácido sulfúrico el que realiza tal acción.

Los resultados fueron:

Concentraciones reales:      Ácido acético 0.4193 M

  Hidróxido de sodio 0.1025 M.

  Temperatura: 22 °C

La Tabla 5-6 registra los valores de concentración de ácido sulfúrico en equilibrio, valorado con hidróxido de sodio, lo cual permitirá determinar la cantidad de ácido adsorbido por el carbón obtenido, y con ello demostrando su comportamiento como carbón activo.

**Tabla 5-6. Datos experimentales para pruebas de Carbón**

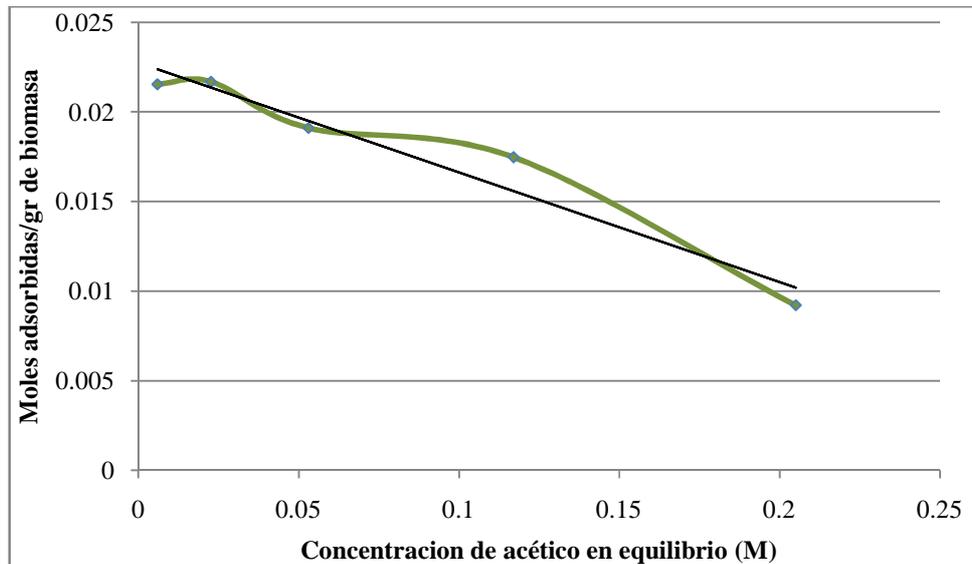
<b>Biomasa (gr)</b>	<b>Ácido Acético adicionado (ml)</b>	<b>Alícuota de solución de Ácido Acético (ml)</b>	<b>NaOH Gastado (ml)</b>
0.5046	12.5	5	10
0.5047	7.5	8.5	9.7
0.5148	3.75	8.5	4.4
0.5021	2	19	4.2
0.5030	1	19	1.1

Los datos anteriores permiten obtener las concentraciones de ácido sulfúrico y las moles de éste adsorbidas por el carbón (Tabla 5-7).

**Tabla 5-7. Resultados en pruebas de adsorción**

<b>Concentración de acético en la solución (M)</b>	<b>Concentración de ácido en equilibrio (M)</b>	<b>Moles adsorbidos/gr de biomasa.</b>
0.20965	0.205	0.00921522
0.12579	0.11697059	0.01747456
0.062895	0.05305882	0.01910679
0.033544	0.02265789	0.02168115
0.016772	0.00593421	0.0215463

Con los datos anteriores es posible obtener la isoterma de adsorción de Langmuir, representada en la Figura 5-10.



**Figura 5-10. Línea Isoterma de Adsorción**

La ecuación de regresión es:

$$\frac{c}{x} = 0.022 - 0.061c, \text{ con un } r^2 = 0.947$$

El número de moles de soluto por gramo de adsorbente necesario para cubrir totalmente la superficie (N) es:

$$\frac{1}{N} = 0.061 \quad N = 16.36$$

El coeficiente adsorción (b):

$$\frac{1}{Nb} = 0.022 \quad b = 2.78$$

Puede verse en la gráfica (Figura 5-10) y en la diferencia de concentraciones de ácido acético (moles absorbidas) que efectivamente la biomasa residual tiene capacidad adsorptiva, esto implica una línea de investigación derivada de la producción de furfural, con el objeto de caracterizar el carbón obtenido, solucionando además la disposición final de la biomasa y generando un valor agregado al proceso.

Retomando los cálculos asociados a la síntesis de furfural y la comercialización del carbón activo obtenido, con un precio de mercado aproximado de \$1,500/Ton, de las 3.57 Ton de Sólidos Secos a la salida de cada lote se obtienen \$5,355 en ventas.

Las 23,000 Ton de desechos sólidos de maíz que se procesarían anualmente en el diseño propuesto, estarían valoradas en \$20,527,500 de ventas anuales como carbón activo en el mercado internacional.

## **6 FURFURAL: FUENTE DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y COMBUSTIBLES DEL FUTURO.**

---

La producción mundial de furfural se realiza totalmente a partir de residuos agroindustriales disponibles en abundancia en muchos países en desarrollo y que a menudo son subutilizados.

Los desechos utilizados comúnmente son los provenientes del maíz, de algodón o caña de azúcar, por su alto contenido de pentosanas.

El Salvador es un país agrícola con una producción de maíz anual promedio de 15,135,030 quintales de maíz (686,513 toneladas) que representan 929,145 toneladas de residuos de hojas, zuros y cañas de maíz con un alto potencial para ser aprovechados como recursos renovables para la producción de químicos y energía, provenientes únicamente de este cultivo.

Una gran ventaja del furfural es que este puede ser producido a partir de los residuos agrícolas y no de los materiales de calidad de alimenticia como se utilizan en el biodiesel y el etanol combustible; poniéndolo en armonía con el fomento al cultivo del maíz sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país.

### **6.1 RECUPERACIÓN DE SUBPRODUCTOS.**

Muchas tecnologías de producción se han desarrollado para adaptarse a los distintos tipos de materias primas que se encuentran según los cultivos y producción agrícola de cada país.

La economía de la fabricación de furfural recientemente se ha ido recuperando gracias a la recuperación de subproductos como el ácido acético y el ácido fórmico, lo que aumenta el rendimiento global con una considerable reducción de la contaminación.

La generación del vapor que requiere la planta puede satisfacerse mediante la incineración de material residual de proceso, el cual consiste en material orgánico quemado; otro destino económicamente rentable para este subproducto es la producción de carbón activado.

Para lograr operaciones más económicas, las plantas de furfural pueden formar sistemas integrados en una operación industrial existente, tales como proveedores de semilla de maíz, ingenio de azúcar o molino de arroz.

Estos sistemas de producción integrados no deben beneficiar solamente a la agricultura empresarial, sino también deben representar una oportunidad para organizar la agricultura campesina para que formen parte beneficiada en este tipo de agroindustrias y negocios, empatando así los beneficios que reciban los pequeños agricultores.

## **6.2 USO DE DERIVADOS.**

El furfural ha recuperado la atención como una alternativa de base biológica para la producción de casi todo, desde los antiácidos y los fertilizantes hasta los plásticos y pinturas; éste es un químico clave que encuentra una amplia aplicación en diversas industrias para el cual no hay una ruta sintética para su producción.

En 2002, la Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable de los Estados Unidos reorganizó y combinó programas que solían estar separados como el de biocombustibles, el de bioenergía y los programas de productos de base biológica en un único Programa de Biomasa. De acá nace la promoción de las biorefinerías que fabrican productos variados, incluidos los productos químicos de alto valor, así como los combustibles y la energía.

Esta reorganización incluye la identificación de las mejores oportunidades para la síntesis de productos químicos de valor añadido a partir de biomasa, que complementarían económica y técnicamente la producción de combustibles y energía, en una biorrefinería integrada e identificar los desafíos comunes y las barreras de las tecnologías de producción asociados.

De la lista inicial de más de 300 químicos, se reducen a un grupo más pequeño con criterios de selección para esta primera ronda que incluyen la materia prima, los costos estimados de procesamiento, el precio de venta, la complejidad técnica relacionada con el mejor tratamiento disponible y el potencial de mercado para cada uno de los bloques de construcción.

Al eliminar los que no cumplen los criterios mencionados, se produjo una lista de los 30 mejores candidatos de cada bloque, los cuales exhiben múltiples funcionalidades y son más propicios para la conversión de derivados, ellos pueden ser producidos a partir de lignocelulosa y almidón, con monómeros de 1 a 6 carbonos, quienes no son compuestos aromáticos derivados de la lignina, y no constituyen productos químicos de valor agregado; estos se muestran en la Tabla 6-1.

**Tabla 6-1. Resultados para los primeros 30 químicos de mayor interés.**

<b>Número de Carbonos</b>	<b>Mejores 30</b>
1	Syngas (Monóxido de carbón e hidrógeno)
2	Ninguno
3	Glicerol, ácido 3 hidroxipropiónico, ácido láctico, ácido malónico, ácido propiónico, serina
4	Acetoína, ácido fumárico, 3-hidroxibutirolactona, ácido málico, ácido succínico, treonina
5	Furfural, arabinitol, ácido glutámico, ácido levunílico, prolina, xilitol, ácido xilónico
6	Ácido cítrico, ácido aconítico, ácido 2,5 furan dicarboxílico, ácido glucárico, lisina, levoglucosan, sorbitol

Fuente: US DOE, 2004

Estos productos químicos organizados en bloques tienen un potencial de transformación a nuevas familias de moléculas útiles. El uso de estos productos químicos derivados de la biomasa representa amplias posibilidades de Investigación y Desarrollo (I+D) de una plataforma tecnológica basada en materias primas renovables, en el caso particular del furfural, es bien conocido de la literatura que los azúcares como la D-xilosa se convierten

cuantitativamente a furfural en condiciones ácidas, pero muchos aspectos de la reacción aún no se han despejado; usualmente faltan datos sobre la cinética de la reacción o presentan inconsistencias entre diferentes trabajos, haciendo más importante el desarrollo de investigaciones para satisfacer la acentuada necesidad de desarrollar un proceso que carezca de todos los defectos asociados con el proceso convencional.

Las mejoras e innovaciones a los actuales procesamientos biológico y químico de los azúcares proporcionarán la oportunidad para la producción de productos químicos de alto valor y una menor dependencia de los productos derivados petroquímicos.

### **6.3 COMERCIO INTERNACIONAL.**

Los bajos precios del petróleo en la última parte del siglo 20 llevaron la producción de furfural a un verdadero declive, los precios de exportación del furfural y alcohol furfurílico se redujeron en un 40%, y el precio del furfural llegó a bajar hasta los \$500/Ton, dando un fuerte impacto a la eficiencia empresarial.

Ahora, el suministro de fuentes de energía en el mundo enfrenta la demanda de los países desarrollados y la creciente demanda de los países en desarrollo ante una subida casi constante de los precios del petróleo registrados durante la última década.

Esta alza en los precios del petróleo estabiliza el volumen de producción y exportaciones del furfural y vuelve más competitivos el alcohol furfurílico y las resinas de furano en el mercado internacional.

La situación de las exportaciones es gratificante para los productos destinados principalmente a Japón, Corea del Sur, Estados Unidos, Bélgica, Tailandia, Jordania, Irán, Turquía y Taiwán.

Actualmetne alrededor del 90 por ciento de la capacidad de producción de furfural se ha instalado en tres países: China, Sudáfrica y la República Dominicana, según SRI Consulting (SRI,2007)

Sin embargo, en este contexto de altos precios del petróleo sin precedentes, el interés en la producción de furfural en los Estados Unidos está creciendo y países en vías de desarrollo están sumándose también a esta línea de producción.

La producción mundial actual de furfural es de aproximadamente 250,000 TPA, y el precio suele mantenerse estable en \$1,000/Ton. Los valores de producción registrados por SRI Consulting en 2007 se muestran en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2. Producción anual de furfural.**

<b>País</b>	<b>Fuente Principal</b>	<b>Producción (TPA)</b>
China	Desechos de Maíz	200,000
Tailandia	Desechos de Maíz	8,500
República Dominicana	Bagazo de Caña	32,000
Sudáfrica	Bagazo de Caña	20,000
España	Desechos de Maíz	6,000
Otros (Incluidos India y Sur América)	Desechos de Maíz/ Bagazo de Caña	<15,000
<b>Total</b>		<b>&lt;261,500</b>

Fuente: SRI Consulting 2007

Mientras que el consumo de furfural y uno de sus derivados se muestra en la Tabla 6-3.

**Tabla 6-3. Demanda mundial de Furfural**

<b>País/Región</b>	<b>Ventas (TPA)</b>		
	<b>Furfural</b>	<b>Derivados PTMEG y otros</b>	<b>Alcohol Furfurílico</b>
Europa	12,000		7,000
Estados Unidos	8,000	20,000	20,000
Medio Oriente	7,000		
Japón	6,000		15,000
Taiwan	5,000		5,000
Sur América	5,000		10,000
China	5,000		6,000
Australia/Sudáfrica	2,000		6,000
Reino Unido			12,000
Alemania			18,000
Otros	<50,000		31,000
<b>Total</b>	<b>250,000</b>		

La demanda internacional del furfural y el alcohol furfurílico como su derivado de mayor venta alcanza las 250,000 toneladas anuales, demanda que se satisface por las 261,500 toneladas de furfural producidas anualmente, puede concluirse que la demanda está satisfecha, pero no saturada debido a la gran cantidad de derivados que no se contabilizan en este reporte.

Considerando el aumento en los precios del petróleo y la creciente demanda de derivados del furfural como syngas, THF y nylon, entre otros químicos y aditivos para combustibles, la Universidad Tecnológica de Delft (Holanda) estima un crecimiento realista para 2020 de hasta diez veces la demanda de furfural registrada por ellos a nivel mundial en 2009.

Aunque puede ser demasiado pronto para hacer predicciones sobre el futuro del furfural en una economía de base biológica, es claro que los productores se están diversificando y que la producción de químicos especializados se expande en diferentes industrias.

El furfural es por tanto, un producto químico clave para las biorrefinerías del futuro y su producción es potencialmente muy competitiva con los procesos de producción basados en combustibles fósiles.

## **6.4 INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO.**

Tanto en la Unión Europea y en Estados Unidos, durante los últimos años, las políticas han sido promovidas para la reducción de las emisiones y la explotación de los recursos renovables, conducentes hacia un uso más eficiente de la energía y la búsqueda de soluciones alternativas.

La investigación y el desarrollo tecnológico son una cuestión clave para el logro de un uso más eficiente de la energía y la creciente participación de fuentes renovables en su producción por las compañías generadoras de energía, productos químicos y materiales.

La biomasa es sin duda una de las fuentes más prometedoras, al ser portadora de carbono potencialmente apto para la producción de combustibles y productos químicos intermedios que puede ser considerada como un recurso renovable y sostenible.

La meta es lograr un desarrollo sólido técnico y económico de la producción integrada de productos químicos, combustibles para el transporte y la energía. Este tipo de proyectos son fundamentales para el establecimiento de las instalaciones previstas para la generación integrada de grandes cantidades de éstos a partir de una amplia gama de materias primas de biomasa.

Los países en desarrollo tienen el potencial de participar en la expansión de la bioeconomía mundial a través de la producción de materias primas y su procesamiento. Esta es una innovación que será dirigida por el mercado permitiendo desarrollar una base industrial, el comercio y la producción agrícola. El desarrollo de esta última y su procesamiento, en los países en desarrollo, tiene el potencial de ofrecer la creación de riqueza y el acceso al comercio.

La importancia del sector de la agricultura en los países en desarrollo significa que la expansión del sector agro-industrial traería una oportunidad para reducir la pobreza de manera sostenible. Las biorefinerías y la producción de productos biológicos en estas naciones podrían fácilmente producir beneficios sociales y económicos, mediante la producción de biocombustibles y la energía para uso local, integrada con productos bioquímicos para la exportación.

Estas actividades productivas, basadas en la innovación impulsada por el mercado, el desarrollo de la tecnología y la innovación, establecen el acceso a nuevos mercados. La reducción de la pobreza se vería favorecida a través de la revitalización del sector agro-industrial, con el resultado tangible de la producción de materias primas y el desarrollo de productos biológicos en los países en desarrollo.

## **6.5 POTENCIALES IMPACTOS AMBIENTALES.**

La instalación de las plantas de furfural, en sistemas integrados en una operación industrial existente no solo trae beneficios económicos sino también un beneficio potencial en la reducción del impacto causado al medio ambiente.

Los sistemas de producción integrados consisten de procesos limpios y sostenibles que utilizan sus desechos como materia prima para la producción de otros, reduciendo así la emisión de contaminantes al ambiente.

## 7 CONCLUSIONES.

---

1. La agricultura ha empezado a desempeñar roles no tradicionales, como aquellos vinculados con la generación de energía y productos químicos, debido a lo cual se pueden reevaluar algunas actividades agrícolas estratégicas, como la producción de granos básicos, en la que participan miles de pequeños productores; promoviendo una agricultura sostenible, moderna, competitiva y equitativa con capacidad de adaptarse a nuevos roles y oportunidades.
2. El uso de los desechos del cultivo del maíz para la producción de químicos intermedios está estrechamente relacionado con la seguridad alimentaria al promover el cultivo de granos básicos sin comprometer el uso del material con valor alimenticio, brindando la oportunidad a los pequeños agricultores de mejorar sus ganancias al comercializar los residuos de sus cultivos.
3. Estudios previos sobre la cinética de reacción de la deshidratación de pentosanas a furfural datan de aproximadamente un siglo atrás, actualmente los conocimientos sobre el mecanismo de formación de furfural y sus modelos cinéticos están incompletos o muestran inconsistencias entre distintos autores, mientras que las biorefinerías de nueva generación ha retomado el interés en la producción de furfural, volviéndolo un derivado químico de gran importancia y un tema de investigación de gran relevancia.
4. Es posible optimizar la reacción de hidrólisis de las pentosanas para la producción de furfural manejando variables como el porcentaje de humedad de la biomasa procesada y su grado de trituración, la adición de ácidos catalizadores, el efecto de una sal en la separación de fases y disminución del punto de ebullición, la presión y temperatura de operación.
5. El rendimiento promedio en la primera etapa experimental fue de 30.85% y el máximo valor generado fue de 47.87%, resultando los factores de mayor influencia en el rendimiento la acidez del catalizador, el tiempo de macerado de la biomasa en la

solución ácida, la temperatura de reacción y el tamaño de trituración de la biomasa alimentada.

6. El valor del máximo rendimiento alcanzado en la segunda etapa fue de 63.82% y un valor generado como punto óptimo de 49.46%; teniendo que la disminución de la temperatura y el aumento en la acidez del catalizador son los factores de mayor influencia sobre la reacción.
7. El análisis estadístico de los datos experimentales demuestra que las condiciones óptimas de operación para el proceso propuesto son:
  - a. Temperatura: 120°C
  - b. Concentración de ácido en la mezcla de maceración: 10% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
  - c. Tiempo de macerado en solución ácida: 3 horas
  - d. Tamaño partículas trituradas: 1 a 3 mm de diámetro
8. El rendimiento óptimo calculado se encuentra dentro del rango registrado para las mejores condiciones de operaciones industriales, lo que valida los resultados obtenidos.
9. El cultivo de maíz en El Salvador produce en promedio 686,513 toneladas de maíz que representan 929,145 toneladas de residuos de hojas, zuros y cañas de maíz con un contenido de pentosanas suficiente para producir más de 100,000 toneladas de furfural a un rendimiento del 49.46%.
10. La capacidad adsortiva encontrada en la biomasa residual calcinada es determinante para su aprovechamiento en la generación de carbón activado, agregando mayor valor ambiental y económico al proceso de producción de furfural.
11. La producción de furfural es un proceso industrial de bajo impacto ambiental y de aprovechamiento de residuos para la producción de derivados de valor agregado para la conformación de un sistema integrado de producción de granos básicos y productos químicos de exportación.

## 8 RECOMENDACIONES.

---

1. Es importante desarrollar estructuras y cadenas productivas complementarias entre sí, aprovechando oportunidades de negocio como la producción de químicos de base biológica.
2. Se debe reposicionar al sector agrícola para que este sector de la economía se vea como una actividad moderna, competitiva, generadora de riqueza y atractiva para las poblaciones rurales, evitando la migración rural y revitalizando la agroindustria salvadoreña.
3. Promover alianzas estratégicas entre los sectores público y privado, involucrando asociaciones de productores, cooperativas agrícolas e instituciones públicas, para la ejecución de proyectos de investigación y generación de valor agregado para las actividades de producción tradicionales.
4. Es necesario revisar y armonizar normativas comerciales y tratados de libre comercio que El Salvador haya suscrito o pudiera establecer con países comercializadores de furfural y sus múltiples derivados.
5. Aprovechar la estrategia para el desarrollo de agrobiotecnologías con que cuenta la región a fin de definir proyectos de modernización que incorporen estas tecnologías de forma segura.
6. Reducir la demanda energética global de las operaciones de una biorrefinería, al maximizar el uso de todos los componentes de las materias primas, subproductos y corrientes de desechos para lograr un aumento de la productividad y la eficiencia.

## 9 BIBLIOGRAFÍA.

---

1. Arias Peñate, S. (1991). Campos y Perspectivas de la Biotecnología: Una Estrategia para su Introducción en el Istmo Centroamericano. Panamá: IICA-CADESCA.
2. Benavides, Henry y Cafferata, Julio. (2008). Evolución de los precios de los productos agrícolas: posible impacto en la agricultura de Latino América y el Caribe (IICA)
3. Bermejo, R. (2005). La gran transición hacia la sostenibilidad: Principios y estrategias de economía sostenible. Madrid: Catarata.
4. Berríos y Castro. (1997). Evaluación del potencial energético de residuos agrícolas vegetales en El Salvador parte I: residuos de caña de azúcar y maíz.
5. Borbón, R. A., & al, e. (13 de Diciembre de 2009). Producción Sostenible I. ECOLOGITO (5) . Huila, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
6. Chimbo, C. y Malatay, F. (2001).Control del gusano *Heliothis zea* y *Euxesta eluta* con aceite vegetal Basados en la Investigación de Campo.
7. CNPMLTA . (n.d.). Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales de Colombia. Recuperado el 16 de Marzo de 2010, de [http://www.cnpml.org/html/que\\_es\\_pml.asp](http://www.cnpml.org/html/que_es_pml.asp)
8. Crespo, S. (1999). Guía de cultivos del Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Quito – Ecuador.
9. Daniels, F., Alberty, R. A., Williams, J. W., Cornwell, C. D., Bender, P., Harriman, J. E., Curso de Físicoquímica Experimental, 52 Adsorción desde una solución, pp 368 - 372, Libros Mc Graw - Hill de México, S. A., Traducción de 7a Edición, Colombia, 1970.

10. DIRECCIÓN GENERAL DE ECONOMÍA AGROPECUARIA DEL MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA (MAG-DGEA). (2010). Fichas y perfiles de productos de Mercado
11. Fernández, J. (1999). Efectos de la Ubicación de un Fertilizante.
12. Garcés, N. (1987). Cultivos de la Sierra, Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agronómicas. Quito.
13. Gubler, R. (Marzo de 2008). SRI Consulting. Recuperado el 20 de Abril de 2010, de <http://www.sriconsulting.com/CEH/Public/Reports/660.5000/>
14. IICA. (1995). El desarrollo sostenible: un desafío a la política económica agroalimentaria (1ª ed.). San José, Costa Rica: Editorial Departamento Ecuménico de Investigaciones.
15. Islas, R. M. (2007). La agroindustria y sus coproductos: oportunidad interdisciplinaria. *La Ciencia y el Hombre* , XX (3).
16. March, J. (1992). *Advanced Organic Chemistry*. Nueva York: John Wiley & Sons.
17. Parsons, D. (1998). *Manual para la Educación Agropecuaria*.
18. Reyes, R. (1985). *Fitogenotécnica Básica y Aplicada*, México.
19. ONU. (1987). Reporte Brundtland "Our Common Future" para la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo. Oxford.
20. Othmer, K. &. (2007). *Encyclopedia of Chemical Technology* (5º ed., Vol. 12). Wiley.
21. Rosemberg, A. (11 de Junio de 2008). Buenos Aires Produce Más Limpio. Recuperado el 6 de Abril de 2010, de <http://www.buepmasl.com.ar/home.htm>
22. Tin Win, David. (2005). *Furfural – Gold from Garbage*. Bangkok, Tailandia: Assumption University.

23. US Department of Energy. (2004). Top Value Added Chemicals From Biomass. Volume I: Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas.
24. UTN. (2008). Programa Buenos Aires Produce Más Limpio. Recuperado el 6 de Abril de 2010, de <http://www.buepmasl.com.ar/home.htm>
25. Wondu Business and Technology Services. (2006). Furfural chemicals and biofuels from Agriculture. Sidney, Australia: Rural Industries Research and Development Corporation.
26. Xercavins, J., Cayuela, D., Cervantes, G., & Sabater, A. (2005). Desarrollo sostenible. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL.
27. Zeitsch, K. J. (2000). The chemistry and technology of furfural and its many by-products. Amsterdam: Elsevier Science B.V.

## **ANEXOS**



## ANEXO I

### TECNOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO

Con el interés de abordar el diseño de un proceso por lotes, que son del tipo industrial más utilizado, reportamos los procedimientos que Zeitsch (2000) publica en su obra:

#### TECNOLOGÍA QUAKER OATS

La materia prima se mezcla con ácido sulfúrico se introduce a través de una boca de inspección, y después de cerrarla, se rota la olla y el paso de vapor de agua para dar 153°C aplicados durante 5 horas. La temperatura de 153°C se impuso por la capacidad de presión de las ollas disponibles. Después de probar varios materiales, Quaker Oats terminó forrando las ollas con ladrillos de carbón sellados por un cemento a prueba de ácidos. Este es el proceso que se sigue utilizando hoy en día.

Se utilizan de cascarilla de avena seca con un contenido de humedad del 6%, como material de partida, y el ácido sulfúrico acuoso como el catalizador, Brownlee (1948) estudió el efecto del contenido de agua inicial en el rendimiento de furfural. La cantidad de ácido sulfúrico por unidad de peso de materia seca se mantuvo constante a 2.246 kg por cada 100 kg de rastrojos, pero añadiendo cantidades crecientes de agua a la dilución inicial del ácido, variando entre 12.338% al 13.500% del contenido de agua inicial a 2.819% ó 43.092 % de contenido de agua inicial. El furfural en el destilado obtenido varió de 40.271 a 52.262%% del rendimiento teórico, y el furfural perdido en los residuos varió de 1.25% a 3.80% del rendimiento teórico. El contenido final de humedad (agua + furfural + derivados volátiles) después de 5 horas de tratamiento aumentó de 28.7% como el menor contenido de agua inicial hasta un 53.5% en el mayor contenido de agua inicial.

Como puede verse, el furfural obtenido en el destilado, que es la única cantidad furfural considerada para la producción, tiene un máximo en 25.4% de contenido de agua inicial.

Para las condiciones óptimas en 25,4% de contenido de agua inicial de Brownlee, la concentración inicial de ácido sulfúrico fue 6.05% en peso, el furfural en el destilado fue

del 52.3% del rendimiento teórico, y la presencia de furfural en el residuo fue de 9.9% del rendimiento teórico. Por lo tanto, el rendimiento global fue  $(52.3 + 9.9)\% = 62.2\%$ , y el furfural perdido en los residuos asciende a 15.9 por ciento del total de furfural formado. Por supuesto, cierto furfural se podría haber recuperado de los residuos si la separación con vapor hubiera sido continuada, pero el beneficio respectivo no justificaba el coste del vapor generado.

A pesar de su venerable historia, el proceso por lotes de Quaker Oats tiene desventajas significativas que se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) El tiempo de residencia es largo debido a la baja temperatura.
- b) Un alto consumo de ácido sulfúrico para compensar un poco la temperatura baja.
- c) Medidas especiales contra la corrosión (ladrillos de carbono).
- d) Un residuo extremadamente ácido.
- e) Problemas en el procesamiento de fibras finas que tienden a ser arrojadas por el vapor al momento de introducir la carga de materia prima.
- f) La rotación del reactor requiere de un diseño bastante complicado apenas justificado por su beneficio marginal de extracción.

#### EL PROCESO POR LOTES USADOS EN CHINA

Todos los reactores tienen un diámetro de 1.5m y una altura de 8m. Por más extraño que parezca, están hechos de acero al carbono y tienen un espesor de pared enorme de 50 mm para combatir la corrosión.

No hay revestimientos, pero la pared interior se recubre, y hasta cierto grado se protege gracias a los polímeros de furfural formados de manera natural en el proceso. La materia prima consiste generalmente en sacos de zuros y mazorcas molidos a los que se les fueron retiradas pequeñas partículas mediante tamizado. El tamaño de partícula varía entre 20 y 30 mm., y el contenido inicial de humedad de la materia prima es del orden de 15 por ciento.

En el tornillo de alimentación, de acero inoxidable, se rocía solución acuosa de ácido sulfúrico al 4% sobre las mazorcas de maíz entrante para dar 1.5 kg de ácido por cada 100

kg de la fase líquida. El material acidificadas primas se carga a través de una escotilla en la parte superior hasta el 75% del reactor se llena.

Después del cierre de la escotilla, se pasan de 1 a 1.5 toneladas/h de vapor a 6 ó 7 atm. a través de la carga, desde el fondo hasta la parte superior por un período de 4 a 5 horas. Después de este tiempo, el residuo se descarga mediante la apertura de una válvula en la parte inferior. De esta manera, el reactor se vacía en 20 segundos.

En lugar de utilizar un generador de vapor secundario, el proceso chino pasa el vapor del reactor directamente a través de la rehervidor de la columna de destilación azeotrópica, y en lugar de utilizar una columna de recuperación para las calderas de baja, la mayoría de éstos se despiden a la atmósfera antes de iniciar la destilación.

Como en el caso del proceso por lotes de Quaker Oats, el rendimiento del furfural en el destilado es del orden de 50 por ciento.

### EL PROCESO POR LOTES DE AGRIFURANE

El proceso AGRIFURANE, también conocido como proceso de PETROLE CHIMIE, utiliza varios reactores de proceso por lotes que operan en serie.

La materia prima se mezcla con el filtrado extraído de un filtro prensa que deshidrata los residuos. Esto conduce a una mezcla con una relación sólido a líquido de 1:6 en peso.

El primer reactor obtiene una mezcla de vapor primera y segunda para alcanzar 177°C (9.35 bar). El vapor de este primer reactor se alimenta en el segundo reactor, pero además de este vapor, el segundo reactor también recibe un poco de vapor de primera para compensar en parte la pérdida de presión en el primer reactor. Análogamente, el vapor del segundo reactor se introduce en el reactor de tercera, y así sucesivamente. Como debe haber una caída de presión de reactor a reactor para determinar el flujo, el último reactor tiene sólo 161°C (6.34 bar), pero por un intrincado sistema de tuberías y válvulas de proceso, el período de cada lote se divide de tal manera que cada reactor es puesto en operación para

cada una de las diferentes temperaturas durante un intervalo de tiempo igual, de modo que cada carga es tratada por igual.

El último proceso de AGRIFURANE utiliza el ácido sulfúrico al 1% como catalizador en la carga líquida, pero el consumo de este ácido se reduce por el hecho de que en la deshidratación del residuo mediante un filtro prensa de banda la mayor parte del ácido se recupera en el filtrado, y este filtrado se recicla para ser mezclado con la materia prima entrante para formar la mezcla antes mencionada.

La idea detrás de usar una pasta en lugar de materias primas sueltas era permitir el procesamiento de partículas finas, y la razón para el funcionamiento de los reactores en serie, obviamente, el deseo de reducir el consumo de vapor. Sin embargo, el proceso AGRIFURANE tiene serios inconvenientes:

- a) Un sistema de válvulas de control costosas para permitir la "conmutación" entre reactores con el propósito de dar a cada lote el mismo tratamiento.
- b) Una prensa de filtro de banda extremadamente costosa para la deshidratación del residuo.
- c) Un secador para hacer de la torta de filtro un combustible.

Debido a su alto costo de inversión, este proceso puede ser considerado como obsoleto.

## EL PROCESO DE SUPRATHERM

El proceso desarrollado SUPRATHERM por Krupp es una hidrólisis continua donde mediante el uso de una alta temperatura entre 200 y 240°C, el reactor se reduce a un simple tubo.

El bagazo de caña picada o partículas finas, se introducen en el tanque cuando se mezcla con un líquido de reciclaje y un poco de ácido sulfúrico muy diluido para obtener una pasta fluida. Este último se distribuye a través de una máquina de trituración de alta velocidad para convertir la pasta a una pulpa suave. Desde este circuito de trituración, se retira una corriente lateral mediante una bomba excéntrica y desemboca en un reactor de flujo

continuo. En la región de entrada de este reactor, se inyecta vapor de alta presión a la pasta para calentarla a 230°C por lo que se lleva a cabo rápidamente la hidrólisis deseada. La pulpa que reacciona se pasa por un enfriador y una válvula reguladora de presión antes de que entre un ciclón. En el ciclón, que opera a una presión reducida, la pulpa se separa en una fracción de vapor rica en furfural y un refinado que representa la mezcla residual. Debido a la descompresión súbita en la válvula, el furfural formado en las partículas se libera de forma explosiva por cavitación azeotrópica. De esta manera, el furfural se libera de las partículas en forma mucho más completa que en el proceso de extracción convencional basada en el transporte por difusión. Además, la alta temperatura de reacción reduce las pérdidas por resinificación y condensación, lo que conduce a un rendimiento sustancialmente mayor de furfural. Cabe señalar que en cuestión de fenómenos este proceso corresponde al "proceso de ampolla cerrada", en el que durante el tiempo de residencia en el reactor no hay absolutamente ninguna eliminación de furfural.

El enfriador y la reducción de la presión en el ciclón, ambos sirven para aumentar la concentración de furfural en la fracción de vapor. Este último entra en la primera columna de destilación sin presentar condensación intermedia, conservando así su alta entalpía. Contrariamente al tratamiento convencional, este vapor es completamente libre de partículas, de modo que los problemas de incrustación, una plaga conocida de las plantas ortodoxas de furfural, se evitan de forma fiable.

El desbordamiento del ciclón es retirado por la bomba excéntrica y entregado a un filtro prensa de banda dando una torta muy deshidratada y un filtrado, que consiste esencialmente de agua, pero cargado de pequeñas concentraciones de ácido sulfúrico, el furfural, y los subproductos. Este filtrado se recicla al tanque para la preparación de la pasta del material de alimentación. Debido a este esquema, la mayor parte del ácido sulfúrico se recupera y reutiliza, la única pérdida es la cantidad que figura en la torta. Esta pérdida se sustituye en el tanque. Análogamente, el agua que sale del sistema con el vapor del ciclón y la torta también se repone en el tanque, de modo que el balance de masa global sea satisfecho.

Debido al sistema de reciclaje, muy poco del furfural se pierde, y la concentración de furfural en el vapor del ciclón aumenta hasta que se alcanza el límite del estado estacionario.

En comparación con las plantas tradicionales de furfural, el proceso SUPRATHERM ofrece las siguientes ventajas:

1. Un modo realmente continuo de operación, exento de problemas de entradas.
2. Un tiempo de residencia muy corto que permite un volumen de reactor extremadamente pequeño.
3. Una alta temperatura de reacción que reduce tanto las pérdidas, la condensación y la resinificación, aumentando así el rendimiento.
4. La liberación explosiva de furfural por cavitación azeotrópica dentro de las partículas de la materia prima, con el efecto de un aumento en el rendimiento posterior.
5. Una alta concentración de furfural en el vapor de producto.
6. Un vapor producto absolutamente libre de partículas, evitando así los problemas de incrustación.
7. La recuperación y reutilización extensiva del ácido reactor.
8. Simplicidad excepcional. Tiempo de arranque consume pocos segundos.

La única desventaja es el alto costo de la inversión y el mantenimiento del filtro prensa de banda, y un secador para hacer de la torta un material combustible. Cuando el proceso de SUPRATHERM fue concebido y probado en 1988, se creía imprescindible el uso de ácido sulfúrico para hacer que la reacción ocurriera lo suficientemente rápida. Esto implicaba que la prensa de filtro banda tuvo que soportar este ácido. Aunque esto no es un problema fundamental, como lo demuestra el proceso de AGRIFURANE, es un factor de costos. Por lo tanto, se puede señalar que muchos años después, en vista de las conclusiones sobre la eficacia alta de "catálisis ácida general" como los ofrecidos por los ácidos carboxílicos generados a partir de la materia prima, se calculó que el proceso de SUPRATHERM podría realizarse sin el ácido sulfúrico, siempre que se inicia con un poco de ácido suficiente para iniciar la generación de ácido "innata" de la materia prima. Si este concepto se demuestra

correctamente, aumentaría enormemente la capacidad de atracción al proceso siendo que la corrosión en la banda del filtro prensa sería mucho menos grave, y la torta sería libre de ácido sulfúrico para que cualquier caldera pueda quemarlo.

## EL PROCESO STAKE

Desde hace varias décadas, una empresa canadiense llamado STAKE TECHNOLOGY en Norval, Ontario, se ha dedicado a la construcción de plantas capaces de convertir la madera, el bagazo, y otros materiales lignocelulósicos en celulosa, la lignina y un jarabe de xilosa. Este proceso, llamado " Conversión de Biomasa StakeTech" (SBC por sus siglas en inglés), comprende tres etapas:

1. Hidrólisis de la materia prima a temperatura y presión alta, sin la adición de ningún producto químico. Esta hidrólisis, que normalmente se llevan a cabo a 230°C es seguida por flasheo a presión atmosférica ("explosión de vapor").
2. Extracción de agua de la materia prima hidrolizada para producir una solución xylosexylan cruda.
3. Extracción alcalina diluida para eliminar la lignina, dejando atrás la celulosa.

Originalmente, el objetivo principal de este proceso fue la producción de celulosa, pero se observa que el primer paso, es perfectamente utilizable para producir furfural.

El activo principal de la STAKE TECHNOLOGY es un sistema patentado "pistola de alimentación"; un transportador de tornillo que toma la materia prima triturada en una cámara cilíndrica coaxial. En el lado izquierdo, esta cámara dispone de un pistón accionado hidráulicamente a una frecuencia de 120 golpes por minuto para formar un tapón de material comprimido que actúa como un bloqueo de presión entre la atmósfera ambiental y el reactor de hidrólisis. Debido a su alta frecuencia de operación, este alimentador se asemeja a una ametralladora. Por el lado de la derecha, la cámara cuenta con un estrangulador que aplica una presión ajustable en la entrada de la materia prima, y en parte la apertura de la cámara permite que el material de alimentación pase al reactor de hidrólisis.

La enorme ventaja del alimentador STAKE radica en el hecho de que puede manejar la materia prima casi seca. Para la fabricación de furfural, el agua es necesaria sólo en la medida en que sea necesaria para la hidrólisis de las pentosanas a pentosas, y para la disolución de esta pentosa. La posterior conversión de las pentosas a furfural en realidad crea agua. Por lo tanto, cualquier exceso de agua de entrada no es deseable, ya que diluye el catalizador ácido y reduce el beneficio de la combustión del residuo. En este contexto, un proceso de furfural que utiliza un alimentador del tipo STAKE tiene ventajas inherentes a esto.

El rendimiento de furfural de este régimen de se estableció en el orden del 66 por ciento.

En un transportador de tornillo, el bagazo de la entrada es humedecido por una pequeña cantidad de agua para darle "lubricación". Entonces la pistola de alimentación inyecta el bagazo en un digestor que lo calienta a 230°C por medio de vapor. En correspondencia con esta temperatura, la presión en el digestor es 27.7 atm. Si debido a la falta de materia prima suficiente, la pistola de alimentación no sellara el sistema, habrá un "blow-back" (reflujo) de las partículas y el vapor en un recipiente amortiguador hasta que el sello sea restaurado.

En el digestor, la materia prima sufre una hidrólisis para convertirse en furfural, y luego se pasa por la válvula en una bandeja de golpes y vibración que separa los residuos de un producto rico en vapor de furfural. Un transportador de tornillo toma el residuo en un secador rotatorio energizado por el vapor sobrecalentado. El vapor que sale es liberado de las partículas arrastradas por el ciclón y entra en un condensador parcial, el producto es un efluente acuoso y una fracción de vapor que contiene algunas pequeñas trazas de furfural.

La fracción de este último se agrega a la de vapor de productos de la bandeja de golpes. Las partículas que salen del secador tienen un bajo contenido de humedad suficiente para permitir su combustión en la caldera.

## EL PROCESO DE SUPRAYIELD

El proceso SUPRATHERM y el proceso STAKE explotan ambos el potencial de rendimiento de las altas temperaturas, pero no hacen nada sobre la causa fundamental de las

reacciones de pérdida, que es un medio de reacción sin ebullición. Por el contrario, un concepto más reciente llamado proceso convergente SUPRAYIELD, comercializado por BOSCH PROJECTS de Durban, Sudáfrica, aspira a duplicar el rendimiento del 100% habitualmente obtenido en el “proceso analítico de producción de furfural”.

El “proceso analítico” da un rendimiento del 100% comprobado, ya que mantiene el medio de reacción en un estado de ebullición para que de acuerdo con el diagrama de fase correspondiente cualquier furfural generados en la fase líquida sea “rechazado” instantáneamente hacia la fase de vapor. Esto no puede lograrse mediante la inyección de vapor, a cualquier presión, puesto que el vapor en condensación es termodinámicamente incapaz de llevar una solución acuosa de pentosas a ebullición, debido a la elevación del punto de ebullición causada por la pentosa. Por lo tanto, la calefacción y la extracción con vapor de agua que se utiliza en todos los procesos industriales de furfural a la fecha se están enfocando y re-direccionando hacia un medio de reacción sin ebullición, con lo que se deja temporalmente disuelto el furfural generado en la fase líquida, donde puede experimentar reacciones de pérdida consigo mismo y con intermediarios de la conversión pentosa-a -furfural. Estas reacciones de pérdida se puede evitar, como en el “proceso analítico”, mediante la aplicación de una fuente de calor, excepto los de condensación de vapor en el medio de reacción, pero en la producción de furfural cualquier calentamiento indirecto por un intercambiador de calor debe ser descartado ya que las superficies de intercambio de calor que tienden a ensuciarse. Por esta razón, en el proceso SUPRAYIELD la ebullición del medio de reacción se lleva a cabo de una manera diferente.

Un reactor bien aislado térmicamente es cargado de materia prima, pre-acidificada o no, se calienta a una temperatura T1 al admitir vapor a través de la válvula, mientras que las válvulas se cierran. Durante el corto proceso de calentamiento, el vapor se condensa, lo que aumenta el contenido de humedad de la carga. Luego, la válvula se cierra y la válvula de escape se abre con el fin de producir por descompresión gradual un pequeño flujo constante de vapor de producto. Esto provoca una disminución lenta de la temperatura. Cuando de esta manera se alcanza una temperatura T2 convenientemente elegida, la válvula de escape se cierra al terminar la primer “descompresión gradual”. Si al final de este período no se

obtuvo más furfural, la digestión se completa con la apertura de la válvula de descarga. Sin embargo, si se ha obtenido todavía más furfural, el reactor es recalentado y sometido a otra “descompresión retardada”. Este procedimiento puede repetirse arbitrariamente. Todas las operaciones de la válvula se rigen por una unidad de control automática.

Dependiendo de la temperatura inicial, el proceso se puede ejecutar con o sin ácido adicional. Cuanto mayor sea la temperatura inicial, menor será la necesidad de adicionar un ácido. Si se utiliza un ácido, no debe ser ácido sulfúrico que este se sabe que causa algunas pérdidas por sulfonación. A causa de este efecto, el “proceso analítico”, con un rendimiento del 100 por ciento con ácido clorhídrico, no da este rendimiento teórico cuando se ejecuta con el ácido sulfúrico. Al igual que en las operaciones técnicas, un uso del ácido clorhídrico sería inadecuado debido a la corrosión, y el ácido nítrico queda fuera de lugar debido a la filtración, el ácido de elección es el ácido ortofosfórico, ya que no provoca ninguna reacción paralela. No es un ácido fuerte, pero es lo suficientemente fuerte para el fin determinado.

## ANEXO II

### BASES PARA EL DISEÑO DE UN REACTOR DE MEZCLA COMPLETA

La manera más fácil de determinar en la formación de furfural es la desaparición de xilosa. Aunque no necesariamente toda la xilosa consumida se transforma en el furfural, el proceso de desaparición xilosa es de vital importancia para el diseño de los reactores de furfural, ya que permite determinar el tiempo de residencia de la materia prima en el reactor. Obviamente, no tendría sentido continuar con el proceso cuando prácticamente todos los de la pentosa se ha consumido.

La desaparición de xilosa como una medida para la determinación del tiempo de residencia es un procedimiento válido, ya que se estableció fuera de toda duda que la tasa de desaparición de xilosa no se ve afectada por las reacciones de la pérdida de furfural. En otras palabras, independientemente de si se producen reacciones de pérdida o no (que depende del diseño del reactor), la tasa de desaparición de xilosa es el mismo.

La velocidad de formación de las pentosas a partir de las pentosanas es proporcional a la concentración de éstas, pero se ve disminuida por la reacción secuencial de las pentosas a furfural, de modo que:

$$d[\text{PENTOSA}]/dt = k_0[\text{PENTOSANA}] - k_1[\text{PENTOSA}]$$

Donde  $t$  es la coordenada del tiempo. A partir de mediciones hechas por Dunning y Lathrop (1945), refiriéndose a una digestión de mazorcas de maíz con ácido sulfúrico acuoso en dos concentraciones de ácido (1.9 y 4.4% en peso) y dos temperaturas (100 y 121 °C), el primer factor de proporcionalidad resulta ser:

$$k_0 = 7.832 \times 10^4 \text{ litro}/(\text{mol min}) \cdot C_H \cdot \exp(-5163 \text{ K}/T)$$

donde  $C_H$  es la concentración inicial de iones hidrógeno (mol/litro) a temperatura ambiente, y  $T$  es la temperatura absoluta (K) (Zeitsch, 2000).

Para una digestión en ácido sulfúrico la velocidad de reacción de la xilosa para la formación de furfural se describe como:

$$-d[XY]/dt = 9.306 \times 10^{15} \text{ litro}/(\text{mol} \cdot \text{min}) \cdot C_H \cdot [XY] \cdot \exp(-16894 \text{ K}/T)$$

Donde el factor de proporcionalidad resulta ser:

$$k_1 = 9.306 \times 10^{15} \text{ litro}/(\text{mol} \cdot \text{min}) \cdot C_H \cdot \exp(-16894 \text{ K}/T)$$

donde  $C_H$  es la concentración inicial de iones hidrógeno (mol/litro) a temperatura ambiente, y  $T$  es la temperatura absoluta (K).

La ecuación de funcionamiento para un reactor discontinuo, viene dada por:

$$t = C_{P0} \int_0^{X_P} \frac{dX_P}{-r_P}$$

Donde el subíndice P se refiere al material orgánico. Por balance de masa para reacción pueden expresarse las concentraciones como función de la fracción de conversión de P, de la siguiente forma:

$$C_P = C_{P0} (1 - X_P)$$

La hidrólisis de las pentosanas a pentosas es mucho más rápida que la deshidratación posterior de las pentosas a furfural. En consecuencia, en cualquier evaluación de los reactores de furfural el tiempo necesario para que la hidrólisis proceda no suele ser tomado en consideración, por lo que al reescribir la ecuación de funcionamiento se tiene:

$$t = C_{P0} \int_0^{X_P} \frac{dX_P}{-r_P} = C_{P0} \int_0^{X_P} \frac{dX_P}{k_1 C_P}$$

$$t = C_{P0} \int_0^{0.99} \frac{dX_P}{k_1 C_{P0} (1 - X_P)}$$

$$t = C_{Po} \times \frac{4.60517}{C_{Po} * k_1}$$

$$t = \tau = \frac{4.60517}{k_1}$$

La concentración de ácido sulfúrico al 10% corresponde a una concentración de iones hidrógeno de 0.417 mol / litro, después de calentar.

La constante de desaparición de las pentosas se encuentra con este dato y a las condiciones de operación de:

$$k_1 = 0.01527 \text{ min}^{-1}$$

Lo que conduce a un requerimiento mínimo en tiempo de residencia de:

$$\tau = 4.60517/k_1 = 301.56 \text{ minutos} = 5.02 \text{ horas}$$

La dilución del catalizador ácido por el condensado formado en el proceso de calentamiento y en el mantenimiento de la temperatura de reacción hace hincapié en la importancia de contar con el reactor térmicamente bien aislado. En este contexto, hay que tener en cuenta que un buen aislamiento térmico, que cuesta muy poco:

1. Reduce el consumo de ácido o el período de procesamiento, y
2. Conduce a un residuo seco, lo que aumenta su valor calórico.

El tiempo total de ciclo viene dado por la suma del tiempo de residencia, el macerado, y el tiempo de calentamiento, se puede despreciar los tiempos de llenado y vaciado que son más rápidos que los demás tiempos considerados:

$$\text{Tiempo de ciclo} = 5.02 + 3 + 1 = 9.02 \text{ h}$$

Para procesar un lote de 29 toneladas como se ha propuesto, se requiere que el peso de la carga alimentada sea igual al volumen del reactor:

$$V_r = \frac{29780 \text{ Kg/Lote}}{1079.74 \text{ Kg/m}^3} = 27.58 \text{ m}^3$$

Para un reactor que trabaja a presiones menores a los 250 psi la relación  $L/D = 3$ . Para obtener las dimensiones del reactor procedemos de la siguiente forma:

$$L/D=3, \quad L=3D, \quad V_c=27.58 \text{ m}^3$$

$$V = V_{\text{carga}} + V_{\text{vapor}}$$

El volumen tendrá que incluir una fracción adicional de manera que el vapor producido por la reacción heterogénea tenga espacio por el cual circular en dirección a la torre de destilación sin arrastrar líquido de la reacción con él. Fijamos como una fracción del 20% de espacio adicional y calculamos el diámetro del reactor.

$$V_r = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

$$V_r = \frac{\pi}{4} D^2 (3D)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{4(27.58 * 1.2)}{3 * \pi}}$$

$$\mathbf{D=2.41m \quad \therefore \quad L=7.23m}$$

# ANEXO III

## RECTIFICACIÓN DE MEZCLAS PARCIALMENTE MISCIBLES

La destilación de la mezcla de furfural con agua, la cual forma un heteroazeótropo a condiciones de 65% de agua en la mezcla, la cual es posible destilar a los porcentajes de pureza deseados, mediante el uso de 2 torres de destilación como se muestra en el diagrama de flujo de proceso correspondiente.

Las condiciones de operación son las siguientes:

Alimentación  $F=1.83$  Ton/h al  $Z_F= 2\%$  mol de Furfural

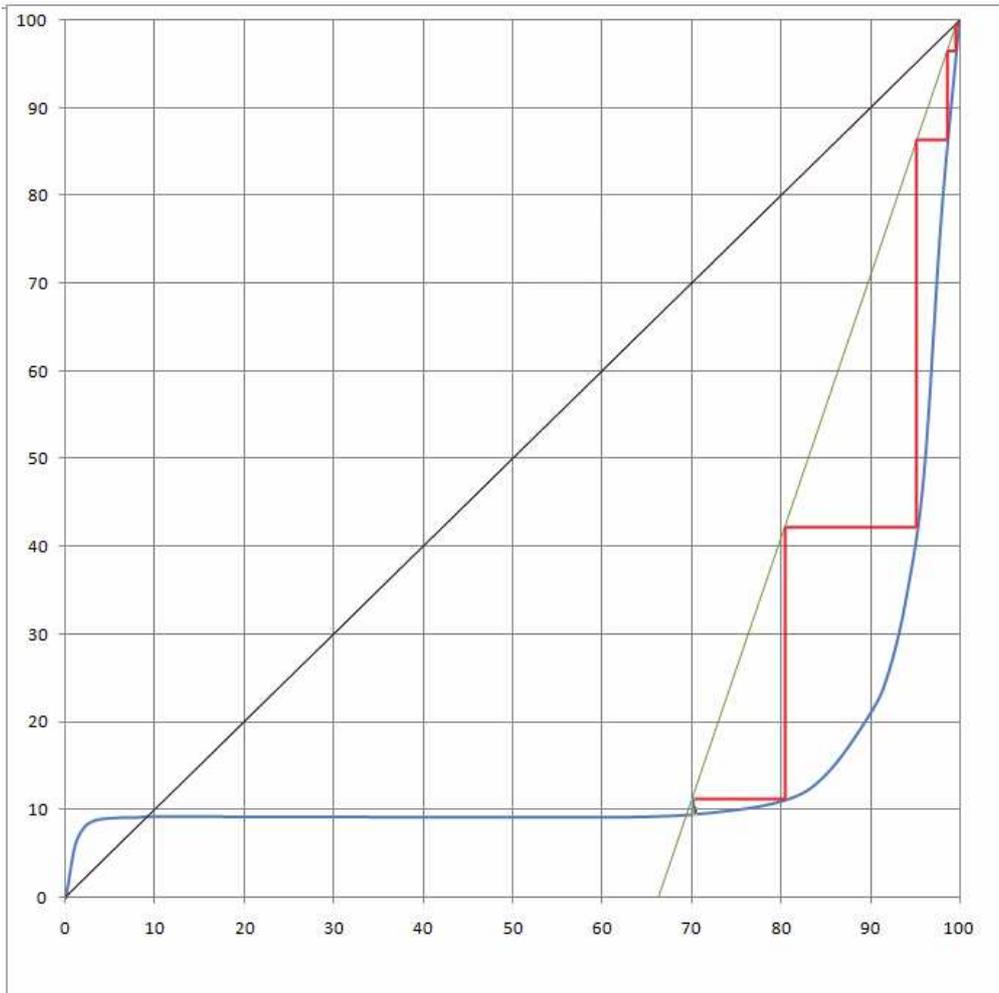
Destilado  $D=3.42$  kmol/h al  $X_D=99.8\%$  mol de Furfural

Desecho= $480$  kmol/h al  $X_W=0.03\%$  mol de Furfural

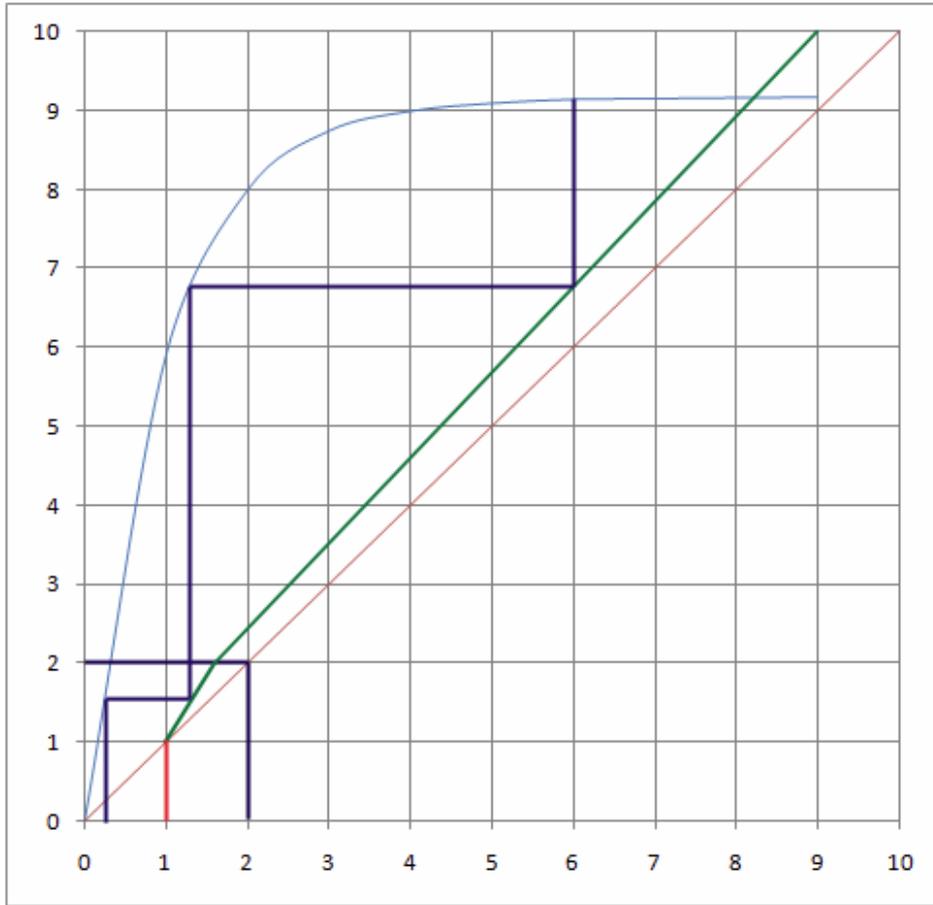
Corrientes de Vapor de Cabeza  $Y_{DI}=9\%$  mol y  $Y_{DII}=11\%$  mol

Corrientes de Reflujo Condensado:  $X_{RI}= 6\%$  mol;  $X_{RII}= 70\%$

El diagrama de equilibrio con los platos teóricos para las condiciones indicadas se muestra como sigue:



**Diagrama de Platos de McCabe Thiele para la destilación del sistema Furfural Agua**



**Detalle de la zona del 1 al 10% mol del diagrama de Platos de McCabe Thiele para la destilación del sistema Furfural Agua**

## ANEXO IV

### ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

#### TEORIA

Una de las primeras derivaciones teóricas del fenómeno de adsorción fue desarrollada por I. Langmuir. Sus consideraciones se basan en que la superficie del adsorbente contiene un número fijo de lugares de adsorción, cada lugar puede absorber una sola molécula, no hay interacción entre las moléculas adsorbidas y el calor de adsorción es igual para todos los lugares y no depende de la fracción de superficie cubierta ( $\theta$ ) la fracción de superficie no ocupada está dada por  $1 - \theta$ .

La ecuación de adsorción de Langmuir se obtiene considerando que el proceso de adsorción resulta de dos acciones opuestas: condensación de moléculas de soluto en la superficie del sólido y desorción de las mismas de la superficie a la solución:

Velocidad de condensación =  $k_a (1 - \theta) c$

Velocidad de desorción =  $k_d \theta$

Aquí  $c$  representa la concentración del soluto en la solución en equilibrio con adsorbente,  $k_a$  y  $k_d$  son constantes de proporcionalidad. En equilibrio:

$$k_a(1 - \theta)c = k_d \theta$$

$$\theta = \frac{bc}{1 + bc}$$

donde  $b = \frac{k_a}{k_d}$  y se le llama coeficiente de adsorción

Debido a que  $\theta = \frac{x}{N}$ , donde  $x$  es el número de moles de soluto adsorbido por gramo para cubrir totalmente y  $N$  el número de moles de soluto por gramo para cubrir totalmente la superficie. La ecuación queda, después de arreglarla:

$$\frac{c}{X} = \frac{1}{N b} + \frac{c}{N}$$

Al graficar  $\frac{c}{X}$  vs.  $c$ , se obtiene una recta cuya pendiente es  $\frac{1}{N}$  y la intersección  $\frac{1}{N b}$

El área superficial del absorbente (A) se puede calcular si se conoce el área del soluto adsorbido ( $\sigma$ ) y si se supone que sus moléculas están muy cerca una de la otra formando una moléculas están muy cerca una de la otra formando una monocapa:

$$A = N \times N_0 \times \sigma \times 10^{-20}$$

Aquí A esta dada en  $\frac{m^2}{g}$  y  $\sigma$  en  $A^2$ , No representa el numero de avogadro.

En esta práctica se estudia la adsorción de ácido acético en carbón y se determina el área superficial del carbón activado aplicando la isoterma de adsorción de Langmuir.

### APARATOS Y REACTIVOS

Bureta de 50 ml (1), embudos(6), erlenmeyer de 125 ml (12), matraz volumétrico de 50 ml (1), papel filtro, pinzas para bureta (1) pipeta volumétrica de 10 ml (1), soporte (1), soporte especial para embudos (1), tapones de hule (6).

Carbón activado (Norit A), ácido acético 0.4M, hidróxido de sodio 0.1M fenolftaleína.

### PROCEDIMIENTO

Pese 1 gramo de carbón activado (con una exactitud de  $\pm 1$ mg) en cada uno de los 6 m erlenmeyers. Agregue a cada matraz 50 ml de una solución de acético preparada en el matraz volumétrico, como sigue: al primero una solución de 0.4M de acético, al segundo 25ml de acético y agua, al tercero 15 ml de acético y agua, al cuarto 7.5 ml y agua, al quinto 4 ml de acético y agua y al sexto 2 ml de acético y agua. El matraz volumétrico debe enjuagarse con agua cada vez. Los erlenmeyer se tapan y agitan frecuentemente por 1 hora.

Las soluciones se filtran y los filtrados se analizan con hidróxido de sodio 0.1M utilizando fenolftaleína como indicador. Se toman 10 ml de acético de las primeras 2 soluciones, 20 ml de la tercera y cuarta, 40 ml de la quinta y sexta, las primeras 4 soluciones se titulan por duplicado.

Anotar la temperatura ambiente.

### CÁLCULOS

- 1) Calcular la concentración (c) de acético en equilibrio con el carbón, en moles/litro.
- 2) Calcule el numero de moles de acético adsorbido por gramo de adsorbente (X).
- 3) Grafique  $\frac{c}{X}$  vs. c. determine el numero de moles de soluto por gramo de adsorbente necesario para cubrir totalmente la superficie, y el coeficiente de adsorción.
- 4) Calcule el área específica del adsorbente, considerando que el área del acético es igual a  $21 A^2$