

PRODUCCIÓN DE FURFURAL A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA

ALEXANDRA RIVERA MARÍN

Proyecto Integral de Grado para optar al título de:

INGENIERA QUÍMICA

Director

Francisco Andrés Triana Bodensiek

Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ D.C

2021

Nota de aceptación:

Bogotá D.C. Octubre de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas y la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A mi madre y a mi padre, a mis hermanos y primos porque si yo pude ellos también podrán, a mis amigos y compañeros quienes estuvieron apoyándome y dándome fuerzas, durante todo este tiempo, amor y respeto para ellos.

AGRADECIMIENTO

Antes que todo primero le agradezco a Dios porque sin él no estaría hoy aquí , ya que ha sido mi ayuda y fuerza. Agradezco a mis padres por su dedicación y por creer en mí y ayudarme a seguir en mis estudios y haber confiado siempre en cada paso que he dado . Los amo .

A mis hermanos y amigos por su amor incondicional , por haberme escuchado cuando tuve dudas y me aconsejaron ; por ser alegres, que, aunque no estaba con ánimo siempre me han sacado sonrisas.

También agradezco a mis directores , por guiarme como realizar el proyecto y por brindarme sus conocimientos para culminar esta carrera que me apasiona .

A mis docentes por ser esa imagen de cómo ser profesional , al verlos a ellos veo que se puede cumplir y conseguir lo que uno se propone en esta carrera ,gracias por brindarme sus conocimientos y a la vez duras lecciones pero que han valido la pena y hoy gracias a esto soy como soy y pude culminar .

A todas aquellas personas especiales que Dios ha puesto en mi vida , Gracias

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	18
1.MARCO REFERENCIAL	19
1.1 Materia prima (Biomasa)	19
1.1.1 <i>Biomasa en Colombia</i>	19
1.1.2 <i>Fuentes de generación de biomasa residual</i>	20
1.2 Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	20
1.2.1 <i>Residuos de la caña de azúcar</i>	21
1.2.2 <i>Bagazo de caña de azúcar</i>	22
1.2.3 <i>Degradación del bagazo de caña</i>	23
1.3 Furfural	23
1.3.1 <i>Síntesis de furfural</i>	25
1.4 Hemicelulosa	27
1.4.1 <i>Mecanismo para la hidrólisis de pentosas</i>	28
1.5 Procesos de producción de furfural	30
2.CARACTERÍSTICAS FISICOQUIMICAS DEL BAGAZO DE CAÑA	32
2.1 Antecedentes	32
2.1.1 <i>Comparación bibliográfica de la caracterización química</i>	32
2.1.2 <i>Comparación bibliográfica de la caracterización física</i>	36
2.2 Pretratamientos en base a caracterización físico-química de bagazo de caña	38
2.3 Discusión de resultados	41
3. PROCESOS PARA OBTENCIÓN DEL FURFURAL	43
3.1 Propuestas de procesos para obtención del furfural	43

3.1.1 <i>Procesos existentes</i>	44
3.2 Justificación de la elección del proceso	52
3.2.1 <i>Resumen de los procesos</i>	52
3.2.2 <i>Influencia de parámetros importantes</i>	53
3.3 Discusión de resultados	54
4. DISEÑO CONCEPTUAL	56
4.1 Descripción detallada del proceso de fabricación	57
4.1.1 <i>Diagrama PFD</i>	57
4.1.2 <i>Descripción</i>	57
4.1.3 <i>Servicios auxiliares</i>	59
4.1.4 <i>Equipos auxiliares</i>	59
4.2 Cinética	60
4.2.1 <i>Cinética de reacción en la producción de furfural</i>	60
4.3 Simulación	62
4.3.1 <i>Proceso de simulación</i>	63
4.3.2 <i>Especificaciones</i>	63
4.4 Azeótropo	69
4.5 Balance de materia	71
4.5.1 <i>Balance de materia por proceso</i>	71
4.6 Balance de energía	77
4.6.1 <i>Balance de energía por proceso</i>	78
4.7 Rendimiento	85
4.8 Discusión de resultados	85
5. COSTOS ASOCIADOS AL PROCESO	88
5.1 Cálculo de los costos	88

<i>5.1.1 Costos de inversión</i>	88
<i>5.1.2 Costos de producción</i>	88
<i>5.1.3 Gastos indirectos de fabricación</i>	89
<i>5.1.4 Costos de administración y comercialización</i>	90
5.2 Discusión de resultados	94
6. CONCLUSIONES	95
BIBLIOGRAFIA	96
GLOSARIO	100
ANEXOS	102

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Mecanismos de reacción	27
Figura 2. Productos químicos de valor añadido a partir de hemicelulosa.	28
Figura 3. Mecanismo de deshidratación del pentosano a furfural.	29
Figura 4. Clasificación de los pretratamientos	39
Figura 5. Configuración de referencia del proceso de quaker oats.	45
Figura 6. Esquema del proceso chino del furfural	46
Figura 7. Diagrama de flujo del proceso rosenlew	47
Figura 8. Esquema de proceso supratherm	49
Figura 9. Esquema de proceso suprayield	50
Figura 10. Esquema de proceso stake	52
Figura 11. Diagrama pfd proceso suprayield para la producción de furfural	57
Figura 12. Esquema de simulación para la producción de furfural a partir de bagazo de caña.	63
Figura 13. Diagrama t -xy furfural – agua	70
Figura 14. Diagrama PFD para la producción de furfural a partir de bagazo de caña - anexo	103
Figura 15. Ficha técnica del furfural	104
Figura 16. Presión atmosférica en cauca y valle del cauca	105
Figura 17. Costo del bagazo de caña - anexo	106
Figura 18. Costo del ácido fosfórico al 85% - anexo	106
Figura 19. Secador - anexo	107
Figura 20. Mezclador - anexo	108
Figura 21. Reactor - anexo	109

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Distribución de los cultivos de la caña de azúcar en Colombia para 2020	22
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del furfural	25
Tabla 3. Tipos de procesos de producción de furfural	31
Tabla 4. Composición química del bagazo de caña brasileño.	33
Tabla 5. Composición del bagazo de caña panelera colombiana.	34
Tabla 6. Composiciones químicas del bagazo venezolano.	35
Tabla 7. Caracterización de bagazo de caña en Colombia (Caldas).	36
Tabla 8. Caracterización de bagazo de caña en Colombia (Valle del Cauca)	37
Tabla 9. Propiedades del bagazo de caña brasileño	38
Tabla 10. Características fisicoquímicas del bagazo de caña	41
Tabla 11. Comparación de procesos industriales para la producción de furfural	53
Tabla 12. Reacciones usadas en el proceso de reacción para producción de furfural a partir de bagazo de caña.	62
Tabla 13. Balance de materia en el secador	71
Tabla 14. Balance de materia en el mezclador de tornillo	72
Tabla 15. Balance de materia en el reactor	73
Tabla 16. Balance de materia en la columna de destilación azeotrópica	74
Tabla 17. Balance de materia en el decantador	75
Tabla 18. Balance de materia en la columna de destilación	76
Tabla 19. Balance de materia en la columna de deshidratación	77
Tabla 20. Balance de energía en el secador	78
Tabla 21. Balance de energía en el mezclador.	79
Tabla 22. Balance de energía en el reactor	79

Tabla 23. Balance de energía en la columna de destilación azeotrópica.	81
Tabla 24. Balance de energía en el decantador	82
Tabla 25. Balance de energía en la columna de destilación	83
Tabla 26. Balance de energía en la columna de deshidratación.	84
Tabla 27. Costos del proceso	93

LISTA DE ABREVIATURAS

a: Actividad iónica en solución acuosa [mol l⁻¹]
Atm: Atmósfera
°C: Grados Celsius
C: Concentración [mol l⁻¹]
CH⁺: Concentración de iones de hidrógeno en la reacción
Ea: Energía de activación [kJ mol⁻¹]
ΔH: Entalpía de activación [kJ mol⁻¹]
I: Fuerza iónica [mol l⁻¹]
K: Grados Kelvin
k: Constante de velocidad de reacción [s⁻¹]
MPa: Mega pascales
min: Minutos
m: Flujo masico [kg/h, Ton/h]
ppm: Partes por millón
Q: Calor [MJ/h]
R: Constante universal de los gases [kJ mol⁻¹ K⁻¹]
r: Velocidad de reacción medida (s⁻¹)
t: Tiempo [min, h, año]
T: Temperatura [°C, K]
V: Volumen [l, ml]
W: Vatio [Kw]

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue evaluar la producción de furfural a partir del bagazo de caña que se obtiene como subproducto de la industria azucarera colombiana. El bagazo suele utilizarse como fuente de energía en las fábricas, sin embargo, este puede ser usado para producir productos de mayor valor agregado como el furfural. Considerando que el bagazo es una buena fuente de pentosano (alrededor del 25 al 27%).

El furfural es un importante producto químico orgánico, producido a partir de desechos y residuos agroindustriales que contienen carbohidratos, y se conoce como furfuraldehído. Es un producto químico básico, que puede ser utilizado en una variedad de industrias como la química, la industria de refinación de petróleo, principalmente.

Por lo que se evaluó el proceso que entrega un mejor rendimiento en cuanto a la producción del furfural donde la principal materia prima será el bagazo de caña. El presente trabajo de titulación se orienta a la implementación de métodos alternativos para la obtención de subproductos químicos a partir de los residuos agrícolas considerados como fuentes principales de reservas energéticas. De este modo se realiza un estudio comparativo del rendimiento de furfural obtenido a partir del bagazo de caña, para la obtención de la molécula de furfural considerada como el mayor producto derivado de material lignocelulósico en los países desarrollados y utilizada como base para la síntesis de otros productos químicos.

El bagazo de caña será utilizado como materia prima rica en pentosas, componentes fundamentales para la síntesis de furfural obtenido a través de una destilación simple para posteriormente ser sometidos a ensayos cualitativos, estas pruebas se fundamentan en que el furfural forma derivados al reaccionar con ciertos reactivos. Los estudios para la implementación de biomasa para obtener productos químicos, ayudará a poner en marcha nuevas biorrefinerías en el país, obtener furfural ayudará a las industrias a sintetizar productos para que sean utilizadas en otras industrias químicas.

PALABRA CLAVE: Furfural, bagazo de caña, hemicelulosa, rendimiento, biorrefinería

INTRODUCCIÓN

La investigación molecular inspirada en la biotecnología crea oportunidades al ingeniero químico para ir más allá de la mera sostenibilidad a través de la innovación. Permite la aplicación de herramientas que permitan analizar un proceso de manera sistemática e identificar áreas de oportunidad para el intercambio, reciclaje y combinación de corrientes de materia y energía que lleven a un aprovechamiento más eficiente de los recursos, buscando minimizar los residuos, las emisiones y su impacto ambiental. Así como también obtener productos competitivos frente a los derivados del petróleo, económica y ambientalmente, adaptándose a las condiciones de mercado dirigido a la diversificación de los productos químicos derivados de la biomasa.

Actualmente, la agroindustria es reconocida no solo por su producción e impacto económico mundial, sino también por los procesos que se implementan para disminuir el impacto ambiental que generan sus residuos.

En comparación a países de la Unión Europea donde se aprovecha el 67% de los residuos generados. Colombia con el 17% [1] aún tiene mucho camino por recorrer, y aunque existe una voluntad gubernamental en la cual se estima aumentar el aprovechamiento de residuos en Colombia, se requiere de la articulación del sector productivo y de investigación científica y tecnológico con los residuos y/o subproductos agroindustriales.

Es por ello que se pretende considerar el bagazo de caña de azúcar como materia prima para la producción de furfural, el cual es un producto que se puede obtener por biorrefinería lignocelulósica. Teniendo en cuenta lo anterior, el furfural posee importantes ventajas al utilizar la biomasa como material de partida, lo que podría disminuir la utilización de los productos químicos derivados del petróleo.

Como el furfural tiene propiedades únicas una serie de oportunidades están disponibles, por lo tanto, se encuentra un amplio mercado de furfural conforme los siguientes usos:

Sector Químico: como componente para la producción de resinas anticorrosivas para pisos en industrias plásticas. Además de la hidrogenación catalítica del grupo aldehído del furfural para su transformación en alcohol furfurílico y como componente en la síntesis

de acetaldehído para la producción de la esencia de manteca.

Refinerías de petróleo: como líquido de extracción para separar componentes parafínicos de no parafínicos del crudo en la producción de aceites lubricantes.

Sector petroquímico: como componente intermediario en la síntesis del butadieno para la obtención de goma sintética

Sector agroquímico: como componente en la fabricación de herbicidas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la viabilidad técnica de un proceso de producción de furfural a partir del bagazo de caña como residuo de la industria azucarera en Colombia.

Objetivos específicos

- ◆ Identificar características fisicoquímicas del bagazo de caña que se obtiene de la industria azucarera colombiana.
- ◆ Evaluar propuestas de procesos encontrados en diversas bases de datos para obtención del furfural.
- ◆ Proponer un diseño conceptual de los parámetros del proceso con mejor rendimiento.
- ◆ Determinar costos asociados al proceso seleccionado.

1. MARCO REFERENCIAL

Con el objetivo de proporcionar claridad en el documento, en este capítulo se presentan los términos y métodos que se utilizan en la producción de furfural.

1.1 Materia prima (Biomasa)

Biomasa es la materia viva presente en una capa muy fina de la superficie terrestre llamada biosfera, la cual representa un segmento muy pequeño de masa terrestre. Los residuos que se generan a partir del proceso de metamorfosis natural o artificial de la materia viva también se constituyen en biomasa.

La biomasa es un recurso muy variado debido a su producción y origen en los sistemas terrestres y acuáticos, lo que incluye directamente sobre sus características físicas y químicas.

La biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo de materia orgánica. Algunos ejemplos de biomasa son los residuos de las cosechas, los residuos de podas de zonas verdes urbanas, los efluentes ganaderos, los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y los residuos orgánicos de plazas de mercado [2].

1.1.1 *Biomasa en Colombia*

Colombia por su posición geográfica y variedad de climas, ofrece condiciones favorables para el desarrollo de las actividades agropecuarias. El país cuenta con una superficie continental de 114.174.800 hectáreas, de las cuales el 44,77% se estima que están destinadas a la actividad agropecuaria [3]. Esto evidencia que en Colombia el sector agropecuario es una fuente importante de biomasa residual.

En el 2005 el país reportó 4.058.170 hectáreas dedicadas al cultivo de especies permanentes y transitorias como la caña de azúcar, la palma de aceite, la caña panelera, el maíz, el café, el banano y el plátano [3]. Del proceso de corte y transformación de la cosecha se generan diferentes tipos de biomasa residual agrícola que se clasifica, según su origen, en residuos agrícolas y residuos agroindustriales.

1.1.2 Fuentes de generación de biomasa residual

La producción de bienes y servicios para la sociedad requiere de la transformación física y química de la materia e involucra algunos casos de biomasa residual. Existen dos fuentes de biomasa residual para la producción de energía: las actividades agroindustriales y las sociales de la comunidad. En el caso de la cadena agrícola se distinguen los residuos agrícolas de cosecha (RAC) y los residuos agrícolas industriales (RAI).

La agricultura es una actividad antropogénica que genera cantidades considerables de biomasa residual, el 75% del total de la biomasa producida en el campo corresponde a RAC, y el restante a RAI [2].

Un porcentaje de los RAC debe ser dejado en el campo para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos. El excedente recolectado de los residuos se aprovecha para diferentes propósitos. Por ejemplo, los residuos de caña de azúcar se emplean para la generación de vapor, como sustituyente de la leña para la cocción de alimentos, para la producción de compost y como alimento animal.

1.2 Caña de azúcar (*Saccharum officinarum*)

La caña de azúcar es un cultivo de zonas tropicales o subtropicales del mundo. Requiere agua y suelos adecuados para crecer bien. Es una especie de planta originaria del continente asiático que se expandió, primero a Europa a través de los árabes en territorio español y estos la introdujeron en el continente americano debido a las favorables condiciones de cultivos que se presentan en este territorio. Posee la característica de almacenar sacarosa disuelta en savia, a través de la extracción sólido líquido y posteriores procesos de esta sustancia se obtiene el azúcar. Estas plantas miden entre dos y seis metros de altura. El principal producto de la caña de azúcar es la sacarosa, que se acumula en los entrenudos del tallo. La sacarosa, extraída y purificada en plantas especializadas, se utiliza como materia prima en las industrias de alimentación humana o se fermenta para producir etanol. La caña de azúcar es el cultivo más grande del mundo [4]. Es una hierba que forma brotes laterales en la base para producir múltiples tallos, normalmente de unos cinco centímetros de diámetro. Los tallos crecen hasta que madura constituyendo aproximadamente el 75% de toda la planta. Un tallo maduro está

típicamente compuesto de 14-16% de fibra, 14-17% de azúcares solubles, 63-73% de agua y 2% de otros productos solubles [5]. Un cultivo de caña de azúcar es sensible al clima, tipo del suelo, riego, fertilizantes, insectos, control de enfermedades, variedades y período de cosecha, un cultivo eficiente puede producir entre 100 y 150 toneladas de caña por hectárea por año.

La caña de azúcar es un cultivo importante en muchos países, siendo una de las plantas con mayor eficiencia de bioconversión. El cultivo de caña de azúcar es capaz de fijar eficientemente la energía solar, produciendo unas 55 Ton de materia seca por hectárea de tierra anualmente. El procesamiento de caña de azúcar produce sacarosa y otros productos que incluyen melaza, torta de filtro y bagazo.

La industria azucarera es una de las más representativas en Colombia con 15 ingenios ubicados en el Valle del Cauca, los cuales siembran alrededor de 232.070 ha de caña de azúcar con una producción de 169,37 t/ha de caña. Durante el proceso de producción, se genera por tonelada de tallos 250 kg de bagazo, 30 kg de cachaza, 6 kg de cenizas y 45 kg de melaza [6]. De la caña panelera, se generan alrededor de 44.789 t/año de residuos, que de ser aprovechados tendrían un poder energético de 381,6 J/año. En el departamento del Meta, estos residuos están siendo utilizados para alimentación de cerdos, ganado y aves por su elevado contenido de azúcares.

1.2.1 Residuos de la caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta que además de tener usos alimenticios, posee usos en cuanto a la producción energética. Precisamente, existen cultivos dedicados a producir caña de azúcar para la generación de energía. No es de extrañar entonces que los residuos de caña sean una biomasa altamente utilizada para la producción de energía sin tener en cuenta que el cultivo de caña de azúcar es uno de los más extensos en el país.

Tabla 1.*Distribución de los cultivos de la caña de azúcar en Colombia para 2020*

Departamento	Área sembrada [ha]	Producción	Cantidad de residuo
		[t producto/año]	[t/año]
Caldas	3.007	36.315	223.263
Cauca	39.504	431.794	2.654.649
Meta	1.986	12.090	74.331
Quindío	1.110	11.532	70.901
Risaralda	3.115	42.452	260.994
Valle del Cauca	192.483	2.360.276	14.510.858
Total	241.205	2.894.460	17.794.995

Nota. La tabla 1 muestra la distribución de los cultivos de la caña de azúcar en Colombia junto con la generación de residuos para el año 2020. Tomado de: Asocaña, "Sector Agroindustrial De La Caña". Sector agroindustrial de la caña. [En Línea]. Disponible: <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>

1.2.2 *Bagazo de caña de azúcar*

El bagazo de caña se produce como consecuencia de la fabricación de azúcar. Después de la extracción de jugo de caña de azúcar en procesos de molienda y extracción, que recuperan la sacarosa, se obtiene como residuo fibroso el bagazo, el cual es un residuo heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene en el proceso de molienda de la caña. El bagazo es el combustible más común utilizado en la fabricación de azúcar de caña.

El bagazo fresco molido contiene 48-50% de agua, 2.5-3.5% de sólidos disueltos y 46-48% de fibra [4]. El bagazo se compone de aproximadamente 50% de celulosa, 25% de hemicelulosa y 25% de lignina. Químicamente el bagazo contiene aproximadamente 50% de celulosa, 30% de pentosanos y 2,4% de cenizas [8].

El bagazo consta de dos partes fundamentales:

- ♦ La fibra: Son fibras relativamente largas, derivadas principalmente de la corteza y otros haces de fibra del interior del tallo. La longitud media de las fibras del bagazo es de 1 a 4 milímetros, y su ancho varía entre 0.01 y 0.04 milímetros y constituye la materia celulósica insoluble de la caña de azúcar.

- ◆ La médula: se deriva del parénquima, parte de la planta donde se almacena el jugo que contiene el azúcar. El bagazo es una materia prima óptima y anualmente renovable para la producción de tableros aglomerados, papel, cartón, derivados de celulosa y productos químicos como el furfural o el xilitol.

Algunas de las aplicaciones del bagazo son:

- ◆ Como combustible para las calderas y los hornos.
- ◆ Para la producción de papel, productos de cartón y paneles de cartón reconstituidos.
- ◆ Como materia prima para la producción de productos químicos como el furfural.

El uso principal del bagazo es como fuente de combustible para las calderas en la generación de vapor de proceso en las plantas azucareras [9].

1.2.3 Degradación del bagazo de caña

La pared celular de los tejidos vegetales está constituida por lignina, una sustancia difícil de degradar y que los hongos descomponen debido a que poseen enzimas que rompen dicha molécula y dependiendo de cómo los hongos la ataquen, se clasifican en hongos de pudrición blanca y hongos de pudrición parda (o de color café). Estos hongos no pueden utilizar directamente lignina como su fuente de carbono y energía, por ello dependen de azúcares más digeribles como los monómeros precursores de fenilpropano. La función primaria de la ligninólisis es exponer estos monómeros al ataque del hongo con ayuda de diferentes tipos de enzimas. En la mayoría de los hongos se ha visto que la ligninólisis ocurre durante el metabolismo secundario, es decir bajo limitación de nutrientes, lo que permite que el hongo sólo sintetiza y secreta agentes ligninolíticos que comienzan a fragmentar el polímero [8].

1.3 Furfural

El furfural se ha destacado recientemente como uno de los productos químicos de mayor valor añadido derivados de la biomasa, siendo identificado como uno de los productos químicos claves producidos en las llamadas biorrefinerías lignocelulósicas. El furfural se produce a partir de fuentes agrícolas renovables ricas en pentosas como lo son el maíz, el bagazo de caña de azúcar, residuos de pulpa de papel, bambú, kenaf, cascarillas de cereales, trigo, paja de arroz, cáscaras de frutos secos, semillas de algodón y madera. Estos son residuos agrícolas ricos en pentosano. Los pentosanos son

hemicelulosas que están presentes dentro de la celulosa en muchos tejidos de plantas leñosas.

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, también es un disolvente de alto 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 coproductos químicos de mayor valor [10].

El furfural es un producto químico peligroso, siendo a la vez tóxico e inflamable. Aunque los incidentes relacionados con el furfural son muy raros, probablemente se deba a su baja volatilidad, ya que tiene un punto de ebullición de 161°C. En pequeñas dosis el furfural no es un problema y todos tenemos un poco de furfural cada día en nuestra comida y bebida.

La fórmula química del furfural es $C_5H_4O_2$, en su estructura es un compuesto heterocíclico que consiste en un anillo de cuatro átomos de carbono y un átomo de oxígeno, más un grupo de aldehídos. El anillo de furano es común en la naturaleza, siendo un componente de la molécula de sacarosa.

El furfural es sólo parcialmente soluble en agua y con una densidad de 1160 kg/m³, por lo tanto, cuando se produce la separación de la capa de agua contiene 8.3wt% de furfural. [5] Se disuelve fácilmente en la mayoría de los disolventes orgánicos polares, pero sólo es ligeramente soluble en agua o alcanos. Otras de sus propiedades fisicoquímicas son definidas en la tabla 2.

Tabla 2.*Propiedades fisicoquímicas del furfural*

Parámetro	Valor
Nombre IUPAC	2-Furaldehído
Sinónimos	2-Furancarboxaldehído, 2-formylfurano, furancarbondal.
Fórmula molecular	C ₅ H ₄ O ₂
Masa molar	96.08 g/mol
Aspecto	Líquido claro, incoloro con un olor aceitoso almendrado
Punto de fusión	-37°C; -35°F; 236K
Punto de ebullición	162°C; 324°F; 435K
Punto de inflamación	127°C; 259°F; 399K
Densidad	1.16 g/ml (20°C)
Viscosidad	0.0149 Pa*s
Acidez	0.08 – 1 mol/L
Solubilidad en agua (20°C)	7.81 g/ 100 ml
Presión de vapor	2.6 mmHg (a 20°C)

Nota. En este cuadro se resumen las propiedades fisicoquímicas del Furfural grado teórico. Tomado de: R. E. Delgado, “Estudio de factibilidad técnico- económica-financiera para la industrialización del furfural como subproducto de la cosecha del maíz”, Tesis de pregrado, facultad de ingeniería y arquitectura, escuela de ingeniería química, U. salvador, San salvado, 2017 [En línea]. Disponible: <http://ri.ues.edu.sv/12918/>

1.3.1 Síntesis de furfural

La utilidad comercial del furfural fue descubierta por primera vez en 1922, por Quaker Oats Company, quienes tenían unas ollas a presión en desuso que se empleaban en un procesamiento de cereales discontinuados. Para hacer uso de este equipo y de cantidades masivas de cascarilla de avena que eran tratadas con ácido bajo presión, comenzaron la producción industrial de furfural [11], considerando que este proceso se dio de forma casual, muy experimental, el proceso de producción de furfural, y los procesos en relación con sus productos derivados, han sido sometidos a una considerable evolución.

Actualmente se produce principalmente por catálisis ácida acuosa de los azúcares

pentosanos presentes en la biomasa rica en celulosa o hemicelulosa, utilizando soluciones ácidas para romper los polisacáridos en azúcares, debido a que el pentosano se hidroliza para formar pentosa, y esta se deshidrata para formar furfural normalmente usando catalizadores ácidos homogéneos como lo son ácido sulfúrico y el ácido nítrico en soluciones acuosas [12]. Recientemente se han propuesto muchos tipos de modificaciones que se centran en gran medida en dos aspectos de la producción en cuanto a disolventes y catalizador.

El ácido mineral se utilizó en el primer proceso de producción de furfural y todavía se está optimizando para la producción de este [13] también se hace uso de zeolitas o materiales mesoporosos como catalizadores para la producción de furfural. En cuanto a disolventes los más comunes son el agua y disolventes orgánicos.

a. Mecanismos de reacción:

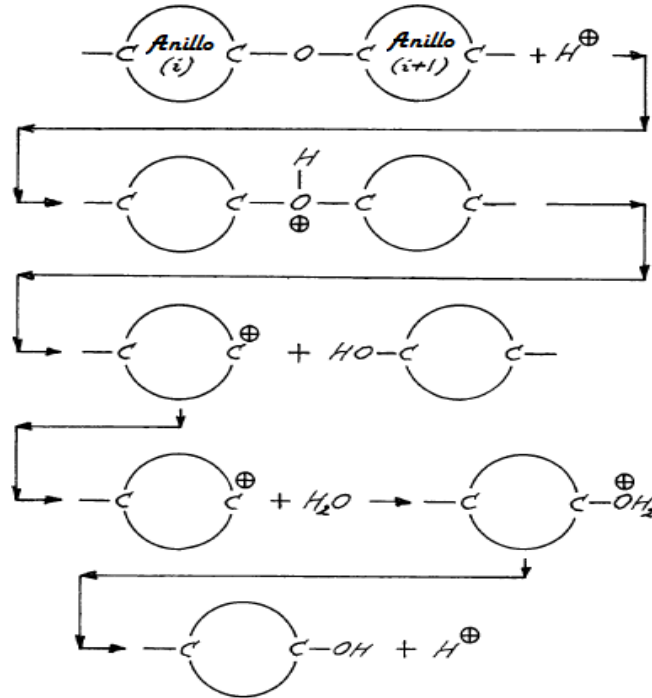
Los pentosanos se conforman predominantemente por anillos unidos por puentes de oxígeno. La estructura del pentosano representa un poliacetal, la hidrólisis ácida de pentosanos corresponde a la hidrólisis de acetales [11].

El mecanismo de la hidrólisis ácida de pentosanos se compone de los siguientes pasos:

- ◆ La protonación de un enlace de oxígeno, lo que conduce a oxígeno trivalente.
- ◆ 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.
- ◆ El carbocatión consume agua.
- ◆ El grupo resultante H_2O^+ libera un ion de hidrógeno, dejando detrás un grupo hidroxilo.

Figura 1.

Mecanismos de reacción



Nota. Esta figura representa gráficamente el paso a paso mencionado anteriormente Tomado de: K. J. Zeitsch. *The chemistry and technology of furfural and its many by-products*, vol.13, Elsevier Science, 2000. [En línea]. Disponible: e-book ISBN: 9780080528991 <https://www.elsevier.com/books/the-chemistry-and-technology-of-furfural-and-its-many-by-products/zeitsch/978-0-444-50351-0>

La posterior formación de furfural a partir de la pentosa implica la liberación de moléculas de agua por cada molécula de pentosa. Una transformación muy importante ya que la transformación de la molécula se hace por etapas [11].

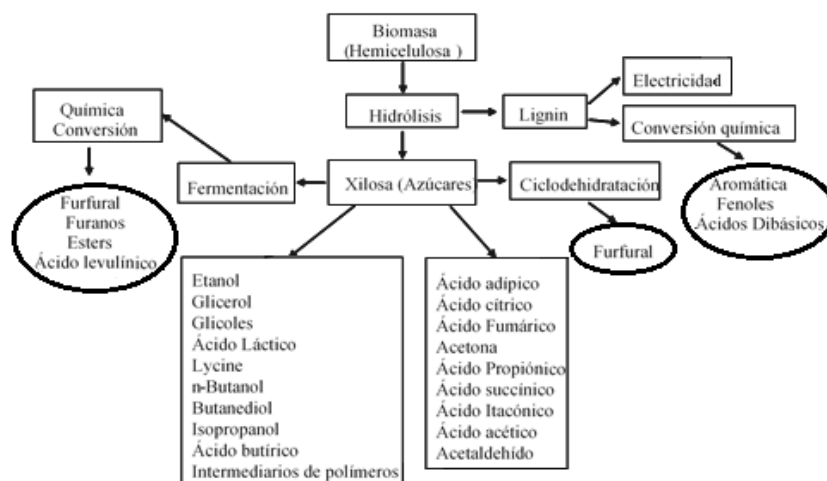
1.4 Hemicelulosa

Está compuesta de xilosa y glucosanos, depende del tipo de biomasa. La biomasa celulósica, cuya composición varía según el tipo de biomasa, está compuesta principalmente de celulosa (38-50%), hemicelulosa (23-32%) y lignina (15-25%) [14]. La

hemicelulosa, como la xilosa, es el segundo polisacárido más común disponible en la naturaleza. Esos polisacáridos, compuestos de numerosos monosacáridos, pueden utilizarse como materia prima básica, barata y accesible en toneladas para la síntesis de un gran número de productos químicos destinados a la industria química.

Figura 2.

Productos químicos de valor añadido a partir de hemicelulosa.



Nota. En esta figura se muestran algunos productos químicos de valor añadido derivados de la xilosa. Tomado de: J. Lee, Y. Kim, I. Hwang, N. Park, Y. Hwang, J. Chang y J. Hwang, "Furfural: Hemicelulose/xyloseederived biochemical", *Biofpr*, vol.2, No. 5, pg. 438-454, 2008. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1002/bbb.95>

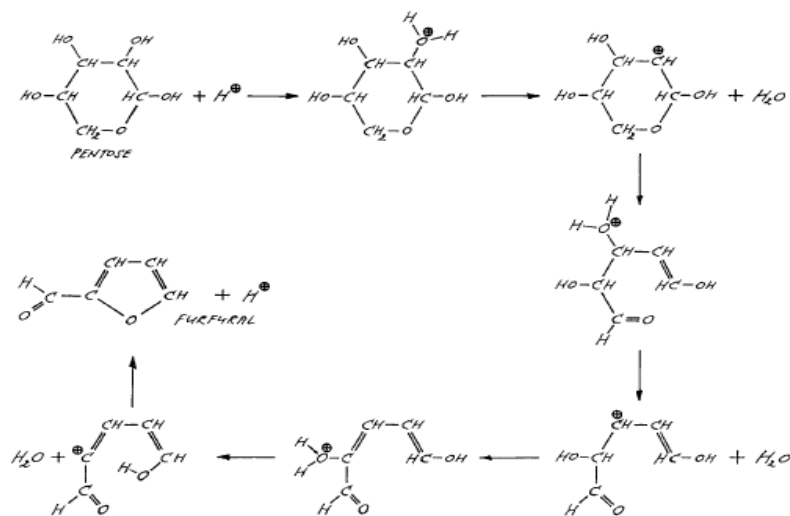
1.4.1 Mecanismo para la hidrólisis de pentosas

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, si no en etapas pausadas [14]. Un mecanismo aceptable como se ilustra en la figura 3.

Figura 3.

Mecanismo de deshidratación del pentosano a furfural.



Nota. Se ilustra un mecanismo en el que la pentosa inicial se muestra en su forma de anillo que representa un hemiacetal intramolecular. Tomado de: J. Lee, et al, "Furfural: Hemicellulose/xyloseederived biochemical", *Biofpr*, vol.2, No. 5, pg. 438-454, 2008. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1002/bbb.95>

La forma de cadena abierta del aldehído en equilibrio con el anillo se puede pasar por alto, ya que representa menos del uno por ciento de la pentosa total. Los pasos que se muestran en la transformación constan 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.

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.

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° (orbitales trigonales planos). Después de la eliminación en 1,4-, la expulsión de un ion de hidrógeno completa el proceso [14].

1.5 Procesos de producción de furfural

En la actualidad se utilizan métodos por lotes y continuo, siendo el método por lotes el que se utiliza comúnmente. 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 [14]

Tabla 3.*Tipos de procesos de producción de furfural*

Proceso	Continuo	materia prima	Condiciones
Quaker Oats*	No	Cáscaras de Avena	426 K, 5h, H ₂ SO ₄ 6 wt. %
Proceso usado en China	No	Resto de mazorca de maíz	Flujo de vapor de agua 7 bar, 5 h, H ₂ SO ₄ 1.5 wt. %
Agrifurane/petrole chimie	No	Fango Formado por biomasa y residuo acuoso ácido	Reactores en serie. Primer reactor 450 K, 9,35 bar. H ₂ SO ₄ 1 wt% El vapor pasa al siguiente reactor
Quaker Oats*	Si	Bagazo	Vapor de agua sobrecalentado (10 bar y 923 K), H ₂ SO ₄ , tiempo de residencia 1 h.
Escher Wyss*	Si	Alta sensibilidad al contenido de humedad	Reactor de lecho fluidizado, 443 K, tiempo residencia 54 min, H ₂ SO ₄ 3 wt%
Rosenlew	Si	Bagazo. Las partículas finas (hasta el 40%) se eliminan	Reactor de contracorriente. Vapor sobrecalentado a 10 bar, tiempo de residencia 129 min. Reacción auto catalizada
Supratherm	Si	Bagazo. Se mezcla con la fracción líquida recirculada	473-513 K por inyección de vapor de agua. La pulpa se separa en un ciclón: vapor rico en furfural y residuo.
Stake	Si	Madera, bagazo	Hidrosis a 503 K seguida de explosión de vapor de la biomasa, extracción de la xilosa. Reacción auto catalizada
Suprayield	Si	Bagazo	Temperaturas entre 513-453 K para temperaturas elevadas no se añade ácido.
Vendemikovs	-	Residuos de celulosa	Catalizador ácido y sales añadidas.
CIMV	-	Bálago, madera, bagazo	Procesado con disolvente orgánicos
Lignol	-	Licor obtenido del proceso órganos olv (apartado 1.2.3)	-
MTC (Multi Si Turbine Column)	Si	Bálago	Se burbujea el vapor de agua a contracorriente con la alimentación. El furfural formado pasa a la fase vapor por stripping.

Nota. Esta tabla representa un breve resumen de la producción de furfural. Tomado de: R. E. Delgado, “Estudio de factibilidad técnico- económica-financiera para la industrialización del furfural como subproducto de la cosecha del maíz”, Tesis de pregrado, facultad de ingeniería y arquitectura, escuela de ingeniería química, U. salvador, San salvado, 2017 [En línea]. Disponible: <http://ri.ues.edu.sv/12918/>

2. CARACTERÍSTICAS FISICOQUIMICAS DEL BAGAZO DE CAÑA

La transformación de bagazo a furfural requiere del desdoblamiento de la celulosa y hemicelulosa (principales componentes del bagazo) hasta azúcares, como la glucosa, la xilosa y la arabinosa. El diseño del proceso requiere la composición del bagazo, el cual está constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina. La composición del material lignocelulósico depende no solo del tipo de material, sino también del área donde fue cultivado y de las condiciones de cultivo y cosecha. No obstante, la caracterización permite establecer un aproximado de la composición de esta materia [16].

2.1 Antecedentes

Para la realización de la caracterización del bagazo de caña, se recomienda emplear las normas y procedimientos sugeridos por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) y la *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). La composición del bagazo puede hacerse más uniforme si se estandarizan las técnicas de recolección, secado de la muestra y almacenamiento [16]. Estas normas recomiendan realizar una preparación de la muestra, determinación de extractos, determinación de carbohidratos estructurales y determinación de cenizas, determinación de sólidos totales, determinación de humedad.

2.1.1 Comparación bibliográfica de la caracterización química

La caracterización química se basa en la determinación de carbohidratos, la celulosa, la hemicelulosa y la lignina constituyen la mayor porción de las muestras de biomasa. Los carbohidratos pueden ser estructurales. Los estructurales están enlazados en la matriz de la biomasa, mientras que los no estructurales pueden ser removidos.

Los extractivos son aquellas sustancias que se encuentran presentes en las diferentes fibras vegetales, pero que no son carbohidratos, tales como ácidos grasos, terpenos, fenoles y resinas. Muchos de estos compuestos son solubles en agua o disolventes orgánicos polares como el metanol, etanol o acetona, por lo que se eliminan rápidamente en procesos de extracción [16].

Las cenizas son el resultado de la combustión del material, son minerales que prevalecen después de la calcinación y generalmente están compuestos por potasio, calcio y magnesio [16].

Entre los resultados reportados en la literatura se consideraron los siguientes:

2.1.1.a. De acuerdo con la información recopilada por Larissa et al., 2012 [17], en la que se caracterizó un bagazo de caña de origen brasileño se encontraron las composiciones mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4.

Composición química del bagazo de caña brasileño.

Componente (%)	Pitalero ^{1*}	da Silva et al. ²	Canilha et al. ^{3*}	Rocha et al. ^{4*}	Brienzo et al. ⁵	Rabelo et al. ⁶	Promedio de resultados
Celulosa	41,1	38,8	45,0	45,5	42,4	38,4	41,9
Hemicelulosa	22,7	26,0	25,8	27	25,2	23,2	25,0
Lignina	31,4	32,4 [#]	19,1	21,1	19,6	25,0	23,2
Cenizas	2,4	2,8	1,0	2,2	1,6	1,5	1,9
Extraíbles	6,8	-	9,1	4,6	-	-	6,8

Nota. * Base libre de extraíbles, # lignina y otros, Solventes de extracción: 1 diclorometano, etanol: tolueno (1:2), etanol, y agua caliente; 2 ninguno; 3 agua y etanol; 4 etanol; 5 etanol; 6 ninguno. Tomado de: L. Canilha, et al, "Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation", JBB, Vol. 2012, 15 Pages, doi:10.1155/2012/989572.

El bagazo de caña del territorio brasileño está compuesto por un promedio de 41,9% de celulosa, 25% de hemicelulosa y 23,2% de lignina (Tabla 4). Los componentes no estructurales de la biomasa, a saber, las cenizas (1,9%) y los extractivos (6,8%) son las otras sustancias que integran la composición química del bagazo.

2.1.1.b. Aguilar et al. 2011, en la Tabla 5 muestra en resumen los resultados obtenidos para la composición del bagazo de caña panelera del departamento de Caldas [16]. Se presenta además un alto contenido de tejido muy rico en pentosas, y las proporciones de los constituyentes químicos que la integran varían en función del contenido de parénquima o médula.

Tabla 5:

Composición del bagazo de caña panelera colombiana.

Componente	(%)
Celulosa	35,7
Hemicelulosa	20,7
Lignina	17
Cenizas	3,13
% Extractos	23

Nota. Se resumen los resultados obtenidos para la composición del bagazo de caña panelera del departamento de Caldas, así como el % de extraíbles determinado. Tomado de: D. M. Aguilar. *Producción de etanol a partir de bagazo de caña panelera mediante un sistema híbrido de fermentación y pervaporación.* Tesis Magis. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2011. [En línea]

Disponible:

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7965>

Para los extractos, los cuales representan un 23% de este material, este porcentaje es significativamente más alto al reportado en otros estudios para bagazo de caña azucarera es debido a que la extracción del zumo de la caña panelera es menos eficiente que para la azucarera, por lo cual el 21% de azúcar presente en los extractos para este material es mayor (19%), haciendo que el porcentaje de extractos totales se vea incrementado [16].

2.1.1.c. J.R. Ferrer, et al. 2002, en la Tabla 6 muestra en resumen la composición de los resultados obtenidos para la composición del bagazo de caña de azúcar de San Felipe, estado Yaracuy, Venezuela. [18].

Tabla 6.

Composiciones químicas del bagazo venezolano.

Componente	(%)
Celulosa	52,25
Hemicelulosa	19,27
Lignina	12,86
Cenizas	9,53
% Extractos	0,91

Nota. Se resumen los resultados obtenidos para la composición del bagazo de caña de azúcar del estado de Yaracuy, Venezuela. Tomado de: J. R. Ferrer et al. "Cinética de la hidrólisis ácida de bagacillo de caña de azúcar". Fac. Agron., vol.19, n.1, pp.23-33, ene, 2002

Caracas, [En línea] Disponible:

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182002000100003&lng=es&nrm=iso

El análisis de la tabla 6. permite establecer que los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina del bagazo de caña de azúcar, se encuentran dentro de los rangos correspondientes a la composición de los materiales lignocelulósicos (40-60%; 20-40%; y 10-25%, para celulosa, hemicelulosa y lignina, respectivamente) reportados por otros investigadores [18]. Los autores establecen que el bagazo de caña de azúcar es un desecho agroindustrial con escaso valor para aprovecharlo como combustible o como alimento animal, el cual posee concentraciones adecuadas de celulosa 52,25 %, hemicelulosa 19,27 % y lignina 12,86, solo teniendo en cuenta el bajo no tratado.

2.1.2 Comparación bibliográfica de la caracterización física

Físicamente, las muestras de material lignocelulósico están compuestas principalmente por dos fracciones: los sólidos totales y la humedad. El porcentaje de humedad puede variar de acuerdo a las condiciones ambientales, haciendo que los resultados en las demás pruebas de caracterización se desvíen de su valor real. Es por este motivo, que es más adecuado determinar la composición del bagazo para materiales libres de humedad [16].

El bagazo se seca y posteriormente se somete a un proceso de molienda con el fin de reducir su tamaño para luego ser tamizado para el respectivo análisis de tamaño de partícula. Proceso que se lleva a cabo según la norma NERL.

Entre los resultados reportados en la literatura se consideraron los siguientes:

2.1.2.a. Aguilar et al. 2011, en la Tabla 7 muestra en resumen los resultados obtenidos para la composición del bagazo de caña panelera del departamento de Caldas [16].

Tabla 7.

Caracterización de bagazo de caña en Colombia (Caldas).

Característica	(%)
Humedad	24,6
Material volátil	94,4

Nota: Resultados de la caracterización física del bagazo de caña panelera del departamento de Caldas, así como el % de extraíbles determinado. Datos obtenidos de: D. M. Aguilar. *Producción de etanol a partir de bagazo de caña panelera mediante un sistema híbrido de fermentación y per vaporación*. Tesis Magis. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2011. [En línea]

Disponible:

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7965>

De manera resumida se presenta la caracterización física del bagazo natural de caña del departamento de Caldas [16].

2.1.2.b. De acuerdo con G. Cabrera, et al. 2012, en la Tabla 8 se indican las especificaciones físicas del bagazo de caña Valle del Cauca.

Tabla 8.

Caracterización de bagazo de caña en Colombia
(valle del cauca)

Característica	(%)
Humedad	16,03
Material volátil	69,71

Nota. Resumen de los resultados obtenidos para las especificaciones físicas del bagazo de caña de azúcar del Valle del Cauca, Colombia. Datos obtenidos de: G. Cabrera et al. "Caracterización del gas de síntesis obtenido a partir de algarrobo y bagazo de caña". BSAA, vol.10, n.1, pp.166-172, ene, 2012, [En línea] Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117721>

Los autores aclaran que la caracterización física del bagazo natural de caña de azúcar que inunda la geografía del Valle del Cauca lo que requiere realizar una gasificación. Para realizar los cálculos pertinentes al proceso se necesitó caracterizar la biomasa [19].

2.1.2.c. De acuerdo con L. Almeida, et al. 2017 en la Tabla 9 se indica las especificaciones físicas del bagazo de Paraná, Brasil

Tabla 9.

Propiedades del bagazo de caña brasileño

Especificación	(%)
Humedad	15,49
Material volátil	77,27

Nota. Resumen los resultados obtenidos para las especificaciones físicas del bagazo de caña de azúcar de Paraná, Brasil. Datos obtenidos de: I. Almeida et al. "Sugarcane bagasse pellets: Characterization and comparative analysis". Actascitechnol, vol.39, n.9, pp.461, sep, 2017, [En línea] Disponible: doi:10.4025/Actascitechnol.v39i4.30198

El contenido de humedad se midió de acuerdo con la norma NBR 7993 (Asociación Brasileña de Normas Técnicas [ABNT], 1983), para la determinación de materia volátil se evaluó de acuerdo con la norma brasileña NBR 8112 (Asociación Brasileña de Normas Técnicas [ABNT], 1986) [20]

2.2 Pretratamientos en base a caracterización físico-química de bagazo de caña

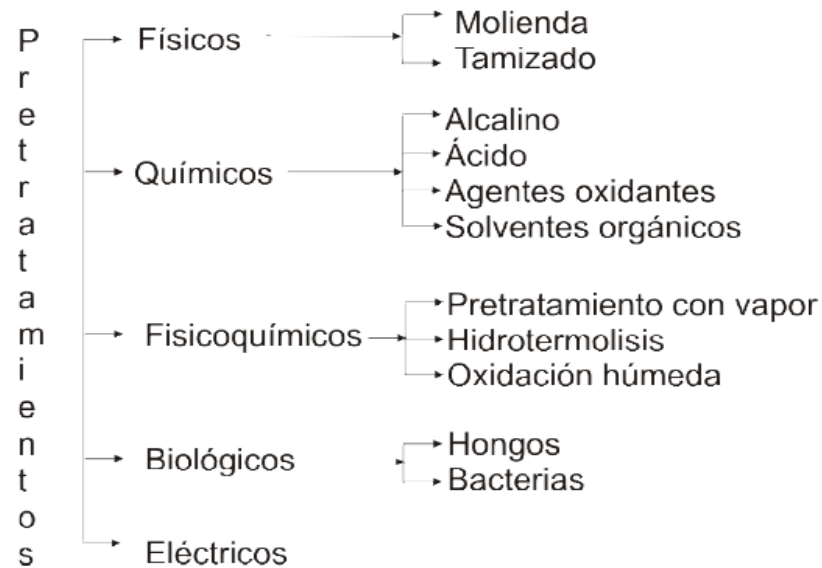
Los pretratamientos de la biomasa son necesarios para reducir el tamaño de la materia prima (y así facilitar los procesos siguientes), limitar la formación de productos de degradación que inhiben el crecimiento de microorganismos necesarios en los procesos biológicos, minimizar la demanda energética de las reacciones posteriores y, por tanto, limitar su costo. Consecuentemente, además de la buena separación de la fracción deseada, uno de los parámetros más importantes que definirán el proceso aplicado será el bajo costo del catalizador de pretratamiento o su posibilidad de reutilización [21].

El pretratamiento de la biomasa permite eliminar la lignina y extraer la fracción hemicelulósica. Esta etapa es importante ya que la lignina tiene una reactividad muy

diferente a la del resto de los componentes de la biomasa, y la consideración conjunta con la hemicelulosa y la celulosa daría lugar a reacciones secundarias y numerosos productos no deseados [16].

Figura 4.

Clasificación de los pretratamientos



Nota. Resumen de la clasificación en diferentes categorías de las técnicas de pretratamiento. Tomado de: D. M. Aguilar. *Producción de etanol a partir de bagazo de caña panelera mediante un sistema híbrido de fermentación y pervaporación*. Tesis Magis. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2011. [En línea] Disponible: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7965>

Los pretratamientos básicos son llevados a cabo a temperaturas bajas y a menor presión que los físicos. Tienen un tiempo de reacción mucho mayor, comprendido entre las horas y los días, frente a los minutos que dura el pretratamiento físico [21]

Los procesos químicos ácidos, por el contrario, se llevan a cabo con condiciones más selectivas y con tiempos más cortos, comprendidos entre 1 y 5 minutos.

Sin embargo, este tipo de procesos tiene numerosos inconvenientes, entre los que destacan problemas de corrosión, elevado consumo de productos químicos y problemas de neutralización.

Idealmente, el pretratamiento de la biomasa lignocelulósica debería:

- ◆ Aumentar la superficie accesible y des cristalizar la celulosa (2)
- ◆ Despolimerizar parcialmente la celulosa
- ◆ Solubilizar la hemicelulosa y/o la lignina
- ◆ Modificar la estructura de la lignina
- ◆ Maximizar la digestibilidad enzimática del material pretratado
- ◆ Minimizar la pérdida de azúcares
- ◆ Minimizar los costes de capital y de operación

Entre los pretratamientos encontrados se tienen:

Pretratamientos físicos:

- ◆ Molienda.
- ◆ Pirólisis
- ◆ Microondas.

Pretratamientos físico químicos:

- ◆ Explosión de vapor o hidrotermal
- ◆ Explosión de fibra de amoníaco (AFEX)
- ◆ Explosión de CO₂.
- ◆ Agua caliente

Pretratamientos químicos:

- ◆ Pretratamiento con ácido.
- ◆ Pretratamiento alcalino
- ◆ Deslignificación oxidativa
- ◆ Ozonólisis.
- ◆ Órganosolventes.
- ◆ Oxidación húmeda.

Pretratamiento biológico:

El pretratamiento biológico es la alternativa al pretratamiento químico para alterar la estructura de los materiales lignocelulósicos. Generalmente, en el pretratamiento biológico se emplean microorganismos degradadores de la madera como bacterias y hongos de podredumbre parda, podredumbre blanca y podredumbre blanda [17].

2.3 Discusión de resultados

El hecho de que la composición química varía para el mismo tipo de material no causa sorpresa porque las principales fracciones de los materiales lignocelulósicos dependen de muchos factores, incluida la genética de las plantas, el entorno de crecimiento y condiciones de procesamiento, así como métodos empleados para el análisis de composición [17]. Sin embargo, al tener información de territorios cercanos a Colombia y de las regiones del país que tienen valores relativamente cercanos entre sí, se tendrá en cuenta el promedio de dichas características para considerar como resultados más cercanos a los que se necesitan.

Considerando los valores de las características fisicoquímicas del bagazo de caña se obtuvo un promedio de estos valores recopilados en la tabla 10.

Tabla 10.

Características fisicoquímicas del bagazo de caña

Componente (%) Promedio	(%) Promedio
Celulosa	43,3
Hemicelulosa	21,7
Lignina	17,7
Cenizas	4,9
% Extractos	3,3
Humedad	18,7
Material volátil	80,5

Nota. Resultados obtenidos para la caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar para considerar. Elaboración propia.

Para el pretratamiento de la materia prima se considera emplear la molienda como pretratamiento físico, para este se emplea un molino de bolas con el fin de reducir el tamaño de las partículas, considerando que dicho molino al trabajar con mecanismos de impacto y abrasión llega a ser más eficiente, el bagazo es un material cuyo tamaño de partícula varía, por lo tanto, una cantidad considerable de partículas tiende a ser viscosas. Al tener una pulpa viscosa se garantiza que haya mayor fractura, debido a que el contacto con las bolas del molino es más lento, lo que genera una molienda más fina [31]. El agua caliente como pretratamiento fisicoquímico, emplea agua a una temperatura

de más o menos 25°C a alta presión con el fin de separar la celulosa de la hemicelulosa, el agua es un reactivo barato, respetuoso con el medio ambiente y fácil de recuperar. El ácido fosfórico como pretratamiento químico se utiliza a temperaturas entre 120–180 °C y en tiempos de residencia entre 15-60 min, con el fin de promover la descomposición de hemicelulosa en pentosas.

El pretratamiento se realiza con el fin de mejorar los resultados, evitar problemas de operación y exponer al máximo las fibras, para extraer la mayor cantidad posible de pentosas, el pretratamiento se puede considerar práctico y económico si se emplea en el inicio de la producción del furfural.

3. PROCESOS PARA OBTENCIÓN DEL FURFURAL

La mayor parte de la producción actual sigue basándose en versiones más o menos modificadas del proceso original de Quaker Oats (1922). Por razones que pueden estar relacionadas con su limitada evolución tecnológica, los procesos de producción que se utilizan hoy en día suelen dar bajos rendimientos (en torno al 50%), además de presentar importantes problemas económicos y medioambientales. Todas estas razones han dificultado la expansión y modernización de la industria del furfural por debajo de su potencial real [22]. La mayoría de las plantas de furfural se encuentran cerca de las materias primas disponibles. Pocos operan sobre una base de doce y veinticuatro meses, aunque la cosecha varía dependiendo del clima y variedad [23].

En las plantas modernas de furfural se utilizan grandes digestores para contener los residuos agrícolas para su conversión. Normalmente, se utiliza ácido sulfúrico como catalizador y se emplea vapor para calentar el digestor y extraer el furfural. Debido a la corrosividad del ácido sulfúrico y de los residuos resultantes, se necesitan metales inoxidables para la contención y el proceso no es atractivo desde el punto de vista medioambiental [24].

3.1 Propuestas de procesos para obtención del furfural.

El funcionamiento de los procesos de producción de furfural existentes, procesos empleados industrialmente en la actualidad no son muy diferentes del proceso original de Quaker Oats que se remonta a la década de 1920 [25].

Usando bagazo de la caña de azúcar como materia prima para la producción de furfural, el rendimiento de furfural se sitúa normalmente entre el 9 y el 10 % de la materia seca inicial. El uso de ácido sulfúrico es del 2,2 % en peso sobre la biomasa seca inicial, y por tanto del orden del 20 % en peso sobre la base de furfural recuperado [23].

A continuación, se presenta una serie de estrategias de producción de furfural lignocelulósico propuestas de procesos históricos de referencia. La principal base de información es el libro sobre la producción de furfural de Zeitsch [25] el cual describe muchas de las tecnologías más antiguas que sólo producen furfural.

3.1.1 Procesos existentes

Existe una gran variedad de procesos para la producción de furfural, las cuales varían en la forma de llevar a cabo el mismo proceso productivo, diferenciándose por el tipo de flujo de producción, los materiales y la complejidad de los equipos. Entre los métodos que cumplen con el requisito de emplear bagazo como materia prima según la tabla 3. podemos identificar:

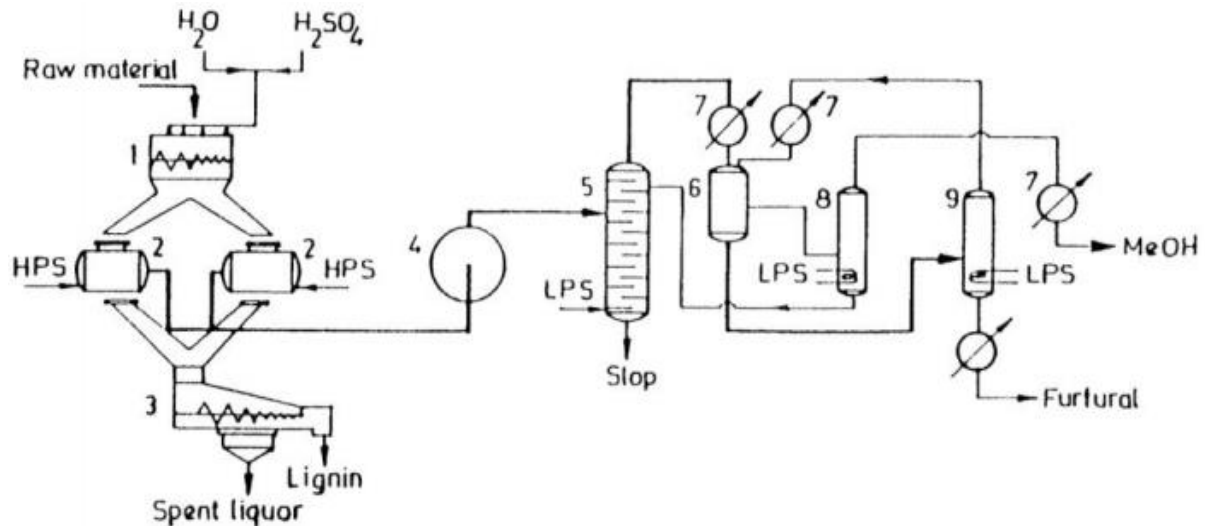
- ◆ Método Quaker Oats
- ◆ Método Westpro usado en China
- ◆ Método Rosenlew
- ◆ Método Supratherm
- ◆ Método Suprayield
- ◆ Método Stake

3.1.1.a Método Quaker Oats. El proceso por lotes de QUAKER OATS es la forma más antigua de hacer furfural. Este proceso fue concebido en 1922, empleando los digestores disponibles, anteriormente utilizados para la fabricación de un producto de cereal no rentable. La temperatura fue impuesta por la presión nominal de los digestores disponibles. Después de probar varios materiales, QUAKER OATS terminó revistiendo los digestores con ladrillos de carbono sellados por un cemento a prueba de ácidos. Este proceso utiliza como materia prima cascarilla de avena con un contenido de humedad del 6% y ácido sulfúrico acuoso como catalizador. A pesar de su venerable historia, el proceso por lotes de QUAKER OATS tiene desventajas significativas que se pueden resumir de la siguiente manera:

- ◆ Un largo tiempo de residencia debido a la baja temperatura.
- ◆ Un alto requerimiento de ácido sulfúrico para compensar un poco la baja temperatura.
- ◆ Medidas especiales contra la corrosión.
- ◆ Un residuo extremadamente ácido.
- ◆ Problemas en el procesamiento de partículas que tienden a ser expulsadas por el vapor debido al giro de la que genera tal efecto.
- ◆ La rotación del reactor requiere un diseño bastante complicado que apenas está justificado por su beneficio marginal para el proceso

Figura 5.

Configuración de referencia del proceso de Quaker Oats.



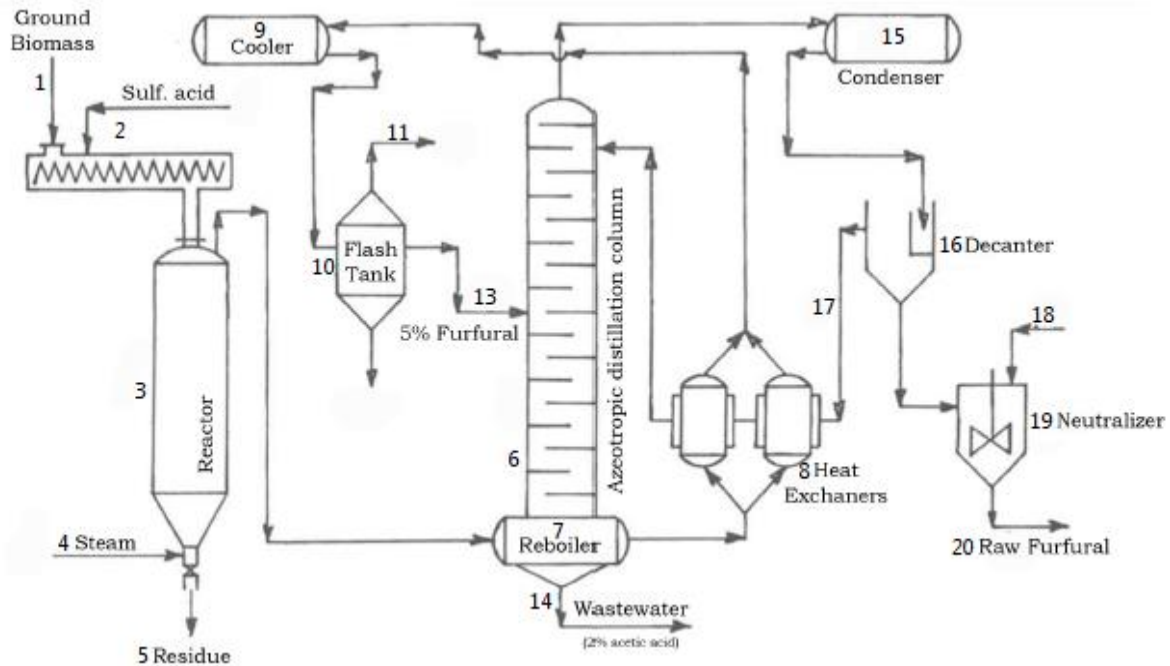
Nota. (1) Mezclador, (2) Reactores, (3) Prensa de tornillo, (4) Generador de vapor secundario, (5) Columna de destilación azeotrópica. (6) Decantador, (7) Condensador, (8) Columna de Recuperación para Calderas Bajas, (9) Columna de Deshidratación de Furfural. HPS=Vapor de alta presión, LPS=Vapor de baja presión. Tomado de: M. A. Suryawanshi et al., "preparación de furfural a partir de residuos agrícolas: revisión", JETIR, Vol. 7, núm 6, pp., 2020. [En línea] Disponible: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2006497.pdf>

3.1.1.b Método Westpro (Batch usado en China). Westpro es el método más común en la actualidad, ha adoptado esquemáticamente un proceso por lotes muy simple y económico, en el cual todos los reactores tienen el mismo diámetro y altura. La materia prima generalmente consiste en mazorcas de maíz molidas, el contenido de humedad inicial de la materia prima es del orden del 15%. En el tornillo de alimentación, se pulveriza ácido sulfúrico acuoso al 4% sobre las mazorcas de maíz en fase líquida. La materia prima acidificada se carga a través de una escotilla en la parte superior hasta que se llena aproximadamente el 75% del reactor. Tras el cierre de la escotilla, se pasa vapor, de abajo hacia arriba. Al utilizar un generador de vapor secundario, el proceso chino pasa al vapor del reactor directamente a través del hervidor de la columna de destilación azeotrópica, y en lugar de utilizar una columna de recuperación para el reboilers, la mayoría de estos vapores se transmiten a la atmósfera antes de que comience la destilación.

Emplea una temperatura de operación alrededor de 165°C, con un tiempo de 5 horas y un rendimiento del 50%

Figura 6.

Esquema del proceso chino del furfural



Nota. (1) Materia prima. (2) Ácido sulfúrico. (3) Reactor. (4) Vapor. (5) Residuo. (6) Columna de destilación azeotrópica. (7) Rebobinador. (8) Intercambiadores de calor. (9) Enfriador. (10) Tanque de flash. (11) Vapores no condensables. (12) Sólidos. (13) 5 % Furfural. (14) 2 % de ácido acético. (15) Condensador. (16) Decantador. (17) Fase acuosa. (18) 7 % de carbonato sódico acuoso carbonato sódico. (19) Neutralizador. (20) Furfural crudo a refinar. Tomado de: G. Marcotullio, *The Chemistry and Technology of Furfural Production in Modern Lignocellulose-Feedstock Biorefineries*, Tesis Doct, Facultad de ingeniería, Universidad Tecnológica de Delft, L'Aquila, Italia, 2011, [En línea] Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/254908764>

3.1.1.c Método Rosenlew. El método Rosenlew funciona con bagazo, en un reactor Rosenlew típico proceso continuo, seguido de una serie de columnas de destilación para purificación. En este reactor Rosenlew, el bagazo se inyecta en la parte superior de un reactor vertical y el material lignocelulósico procesado se retira en la parte inferior de forma intermitente, proporcionando calor a las reacciones y eliminando los productos formados [22].

La catálisis es promovida por los ácidos carboxílicos producidos durante la descomposición de la biomasa, principalmente ácido acético y fórmico. Los ácidos formados principalmente en la parte central del reactor son eliminados por el vapor. Sin embargo, cuando el bagazo más frío entra en el reactor, parte de este vapor ácido se

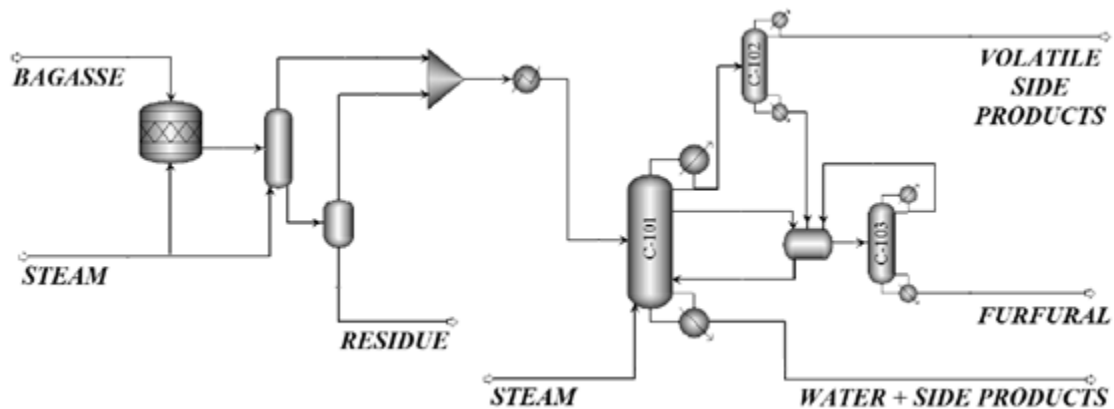
condensa en su superficie y promueve la hidrólisis para producir furfural y más ácidos carboxílicos.

La purificación del furfural no es sencilla porque el furfural y el agua forman un azeótropo, por lo que hay que emplear una serie de columnas [26], como se muestra en la figura 7. Una columna extrae el furfural de la solución, el furfural se extrae de la columna como una corriente lateral de vapor cercana a la concentración azeotrópica. Se alimenta a una segunda columna de destilación que elimina estos productos laterales y se introducen en un decantador, donde la fase acuosa vuelve a la primera columna y la fase orgánica se introduce en una tercera donde se produce furfural con una pureza del 98,5% en el fondo [26] y tiene un condensador de dos fases que devuelve la fase orgánica a la columna, mientras que la fase acuosa se envía al decantador.

Este proceso opera a una temperatura de 180°C, con un tiempo de operación de 2 horas, además del pretratamiento, además de un rendimiento del 50%.

Figura 7.

Diagrama de flujo del proceso Rosenlew



Nota. Modelo Rosenlew de Illovo Sugar ubicada en Sezela, Sudáfrica. Tomado de: J. F. L. Silva et al. "Integrated furfural and first generation bioethanol production: process simulation and techno-economic analysis", *RBIQ*, vol. 34, núm. 3, pp. 623-634, 2017. [En línea] Disponible: [Doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20150643](https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20150643)

3.1.1.d Método Supratherm. El proceso Supratherm desarrollado por KRUPP es una hidrólisis continua en la que se utiliza una alta temperatura entre 200 y 240 °C [25]. En la figura 8 se muestra un esquema del proceso en su forma original, se creía imprescindible utilizar ácido sulfúrico para que la reacción fuera lo suficientemente rápida, muchos años después se usó catálisis ácida, proceso que hace uso de ácidos carboxílicos que proporciona la materia prima.

En comparación con las plantas de furfural convencionales, el proceso Supratherm presenta las siguientes ventajas:

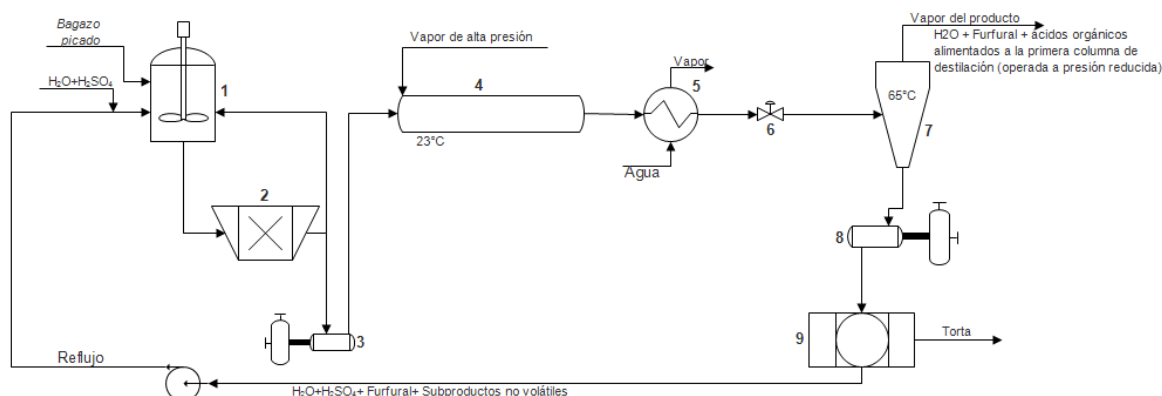
- ◆ Un modo de funcionamiento verdaderamente continuo, sin problemas de compuertas.
- ◆ Un tiempo de residencia muy corto que permite un volumen de reactor extremadamente pequeño.
- ◆ Una alta temperatura de reacción que reduce las pérdidas por resinificación y condensación, aumentando así el rendimiento.
- ◆ Liberación explosiva del furfural por cavitación azeotrópica dentro de las partículas de la materia prima, con el efecto de un aumento adicional del rendimiento.
- ◆ Una alta concentración de furfural en el vapor del producto.
- ◆ Un vapor de producto absolutamente libre de partículas, evitando así los problemas de incrustación.
- ◆ Amplia recuperación y reutilización del ácido del reactor.
- ◆ Extraordinaria simplicidad. Puesta en marcha en cuestión de segundos.

La única desventaja es el elevado coste de la inversión y el mantenimiento del filtro prensa de banda y de un secador para quemar la torta.

Si el tamaño del reactor por unidad de rendimiento se mantiene constante, la omisión del ácido sulfúrico puede compensarse con una temperatura ligeramente superior, e inversamente, si la temperatura se mantiene constante, la omisión del ácido sulfúrico puede compensarse con un volumen de reactor algo mayor.

Figura 8.

Esquema de proceso Supratherm



Nota. (1) Tanque. (2) Máquina de trituración rotor-estator de alta velocidad. (3) Bomba helicoidal excéntrica. (4) Reactor de flujo. (5) Enfriador. (6) Válvula de control de presión. (7) Ciclón. (8) Bomba helicoidal excéntrica. (9) Filtro prensa de banda. Modificado de: K. J. Zeitsch. *The chemistry and technology of furfural and its many by-products*, vol.13, Elsevier Science, 2000. [En línea]. Disponible: eBook ISBN: 9780080528991

3.1.1.e Método Suprayield. El proceso Supratherm, comercializado por Bosch projects de Durban, Sudáfrica, en el que se aplica el proceso analítico de furfural, el cual consiste en una determinación cuantitativa de pentosano añadiendo un 12% de ácido clorhídrico acuoso saturado de cloruro de sodio, utilizando este último para elevar el punto de ebullición, logrando así mantiene el medio de reacción en un estado de ebullición, por lo que cualquier furfural generado en la fase líquida se "rechaza" instantáneamente en la fase vapor. Logrando así un rendimiento probado del 100%, por este motivo, en el proceso Suprayield se requiere que el hervido del medio de reacción se realice de una manera diferente.

La reacción se lleva a cabo bajo elevada presión, en la cual el punto de ebullición pueda alcanzarse y mantenerse en dicho estado, disminuyendo gradualmente la presión para mantenerla por debajo de la presión de vapor.

Para un proceso de furfural destinado a trabajar con un medio de reacción en ebullición, este proceso llamado descompresión retardada, tiene la ventaja de que el calentamiento inicial puede efectuarse rápidamente por condensación de vapor sin problemas de ensuciamiento. En el proceso Suprayield, la descompresión retardada es una degeneración del proceso de flasheo, haciendo que sea más lento por un período

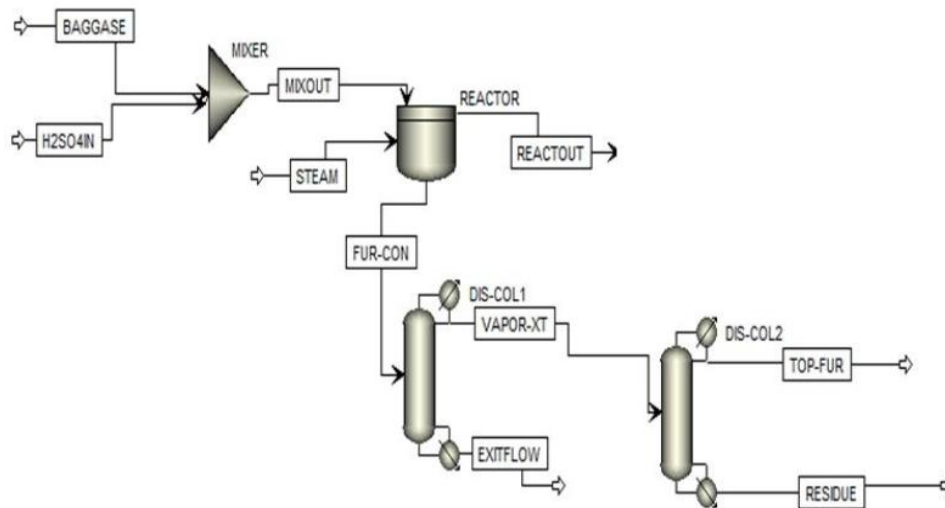
de tiempo para pasar de un nivel primario de alta presión a una presión secundaria más baja corresponde al tiempo de reacción necesario para la conversión deseada de pentosano a furfural.

Después de calentar el reactor a la temperatura primaria, la presión en el recipiente es alta, la descompresión retardada se puede realizar y controlar fácilmente mediante una válvula de escape. En casos especiales, cuando la temperatura primaria está limitada por la presión de vapor disponible, se puede aplicar más de una descompresión retardada para determinar la conversión completa del pentosano a furfural. Es importante que el calentamiento hasta la temperatura primaria sea un flash inverso, lo más rápido posible.

El ácido elegido es el ácido ortofosfórico, ya que no causa ninguna reacción secundaria, el mismo no es un ácido fuerte, pero es suficientemente fuerte para el propósito dado.

Figura 9.

Esquema de proceso Suprayield



Nota. Diagrama de flujo del proceso Suprayield con el que se produce un 94% de furfural. Tomado de: M. Aravindhan et al., "Production of furfural from sugarcane bagasse & experimental studies on microchannel reactor", Tesis tec., departamento de ingeniería química, escuela de ingeniería de kongu, Perundurair, India, 2017. [En línea] Disponible: <https://www.researchgate.net/publication/315733185>

3.1.1.f Método Stake. Desde hace varias décadas, una empresa canadiense llamada Stake technology en Norval, Ontario, ha estado construyendo plantas capaces de convertir la madera, el bagazo y otras materias primas lignocelulósicas en celulosa, lignina y jarabe de xilosa, este proceso ha demostrado que a 230°C trabaja solo con ácidos innatos producidos por la materia prima, requiere de un tiempo de residencia de 6,3 minutos.

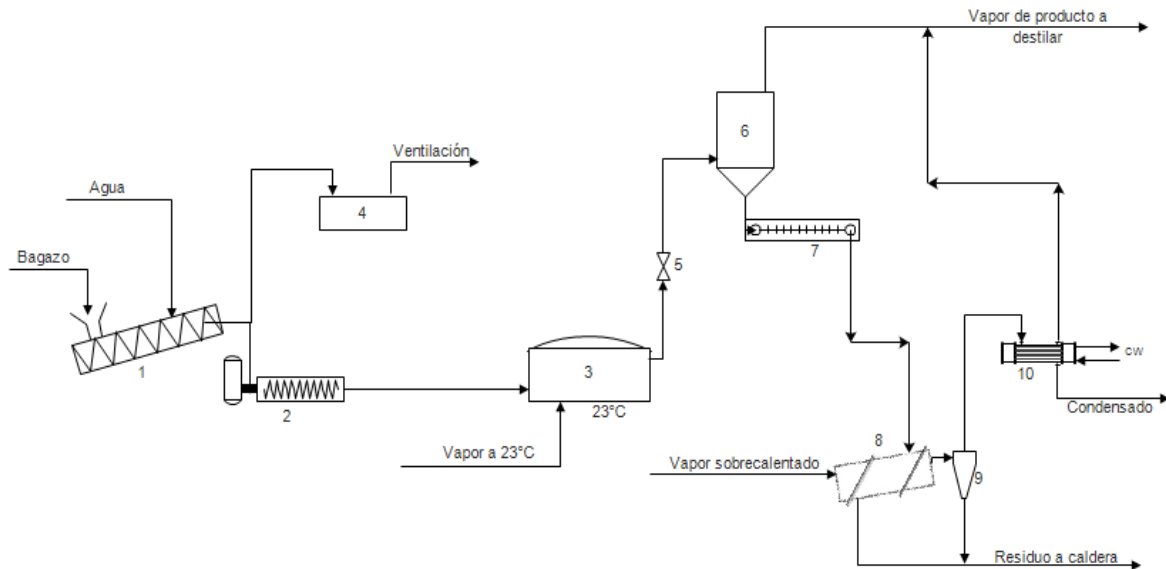
Este proceso, denominado "Staketech Biomass Conversion" (SBC), consta de tres etapas:

- ◆ Una hidrólisis a alta temperatura y presión de la materia prima sin la adición de ningún producto químico. Esta hidrólisis va seguida de un flasheo a presión atmosférica.
- ◆ Una extracción con agua de la materia prima hidrolizada para producir una solución cruda de xilosexilano.
- ◆ Una extracción con álcali diluido para eliminar la lignina y dejar la celulosa. Originalmente, el objetivo principal de este proceso era la fabricación de celulosa, pero se ha visto que la hidrólisis es muy adecuada para fabricar furfural.

La enorme ventaja del alimentador Stake radica en que puede manejar materia prima casi seca. Para la fabricación de furfural, el agua sólo es necesaria para hidrolizar el pentosano en pentosa y para disolver esta pentosa. La posterior conversión de la pentosa en furfural en realidad crea agua. Por lo tanto, cualquier exceso de agua de entrada es indeseable, ya que diluye el catalizador ácido y reduce el beneficio de la combustión calórica del residuo. En este contexto, un proceso de furfural [25]. El rendimiento de furfural de este esquema se calculó en el orden del 66%.

Figura 10.

Esquema de proceso Stake



Nota. (1) transportador de tornillo, (2) pistola alimentadora, (3) digestor, (4) depósito intermedio, (5) válvula, (6) depósito de soplado, (7) transportador de tornillo, (8) secador rotativo, (9) ciclón, (10) condensador parcial. Modificado de: K. J. Zeitsch. *The chemistry and technology of furfural and its many by-products*, vol.13, Elsevier Science, 2000. [En línea]. Disponible en: e-book ISBN: 9780080528991.

3.2 Justificación de la elección del proceso

3.2.1 Resumen de los procesos

La tabla 11 muestra los distintos procesos de producción de furfural que actualmente se realizan en desarrollo a escala industrial identificados en este trabajo.

Tabla 11.*Comparación de procesos industriales para la producción de furfural*

Proceso	Continuo	Temperatura	Presión	Tiempo de residencia	Catalizador	Rendimiento (% teórico)	Equipos empleados
Quaker Oats	No	153 °C	Normal	5 horas	H ₂ SO ₄	52,30%	9
Westpro	No	180-240 °C	1 a 7 atm	4- 5 horas	H ₂ SO ₄	50%	10
Rosenlew	Si	265 °C	10 atm	2 horas	Ácidos innatos	98,50%	9
Supratherm	Si	200-240 °C	Alta	1 hora	H ₂ SO ₄ / Ácidos innatos	97%	9
Suprayield	Si	230°C-180°C	21 atm	30 min	H ₃ PO ₄	99,9%	8
Stake	Si	230°C	27,7 atm	6,3 min	Ácidos innatos	66%	10

Nota. La presente tabla presenta un resumen de las características de los principales procesos industriales utilizados para la producción de furfural. Elaboración propia.

3.2.2 Influencia de parámetros importantes

Para considerar algunos de los criterios es importante conocer su influencia sobre el proceso es por eso que se deben tener en consideración:

3.2.2.a Temperatura: una alta temperatura de reacción reduce las pérdidas por formación de resinas y condensación, lo que conduce a un rendimiento de furfural sustancialmente mayor, según lo expresa Zeitsch [25].

3.2.2.b Presión: La presión debe ser gradual para mantenerla por debajo de la presión de vapor, así puede ser mantenida la fase requerida o el estado de ebullición, según la literatura [25,27] es mejor una presión alta ya que conduce a un rendimiento de furfural más alto.

3.2.2.c Tiempo de residencia: Un tiempo de residencia corto, evita las reacciones secundarias no deseadas y la pérdida de furfural. Aunque un tiempo de residencia muy corto que permite un volumen de reactor extremadamente pequeño.

3.2.2.d Catalizador: Son sustancia que incrementa la velocidad de reacción sin modificar el cambio de energía estándar de Gibbs de la reacción. Además de cumplir la función de promover la transformación de materias primas en productos, reducir el uso de energía de fuentes externas y minimizar la producción de coproductos contaminantes [28]. Para la producción de furfural se conducen entre mucho los siguientes, como las más usados:

- ◆ **Catalizador innato:** Es una mezcla de ácido acético ($C_2H_4O_2$), ácido fórmico (CH_2O_2), y pequeñas cantidades de ácidos carboxílicos ($-CO_2H$) formados a partir de la materia prima. Con la desventaja de que la puesta en marcha es muy lenta ya que se basa en el efecto del agua para catalizar la formación de pequeñas cantidades de ácidos carboxílicos, que a su vez mejoran la catálisis, haciendo así más ácidos carboxílicos, y así sucesivamente, hasta que se alcanza el estado estable, por lo tanto, puede tomar días.
- ◆ **Catalizadores homogéneos ácidos:** suelen ser compuestos inorgánicos, ya que son baratos, fáciles de sintetizar, estables a altas temperaturas y presiones, presentan una alta estabilidad a lo largo del tiempo y su regeneración es fácil. Los ácidos sulfúrico, clorhídrico, fosfórico y organosulfónico son algunos de los catalizadores ácidos más frecuentes en la bibliografía [25,] El más común empleado en el proceso de obtención de furfural es el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el cual es no volátil por lo que no puede ser despojado por vapor, y como es tan fuerte la contribución catalítica de los "ácidos innatos" es generalmente insignificante, por lo que la acidez puede ser considerada uniforme durante toda la carga del reactor. Pero cuenta con la desventaja de provocar algunas pérdidas por sulfonación.

Por otro lado, el ácido fosfórico (H_3PO_4) es superior al ácido sulfúrico como catalizador en determinadas reacciones orgánicas de hidrólisis, deshidratación e isomerización. Sus principales ventajas se revelan en su menor tendencia a provoca reacciones secundarias, por lo que estos procesos pueden conseguir mayores rendimientos de los productos deseados. Además, el ácido fosfórico puede recuperarse de las mezclas de reacción prácticamente puro para su uso repetido [25]. No es un ácido fuerte, pero es lo suficientemente fuerte para el propósito dado.

3.3 Discusión de resultados

Considerando que el presente capítulo tiene como finalidad conocer el proceso con mejor rendimiento se le da mayor relevancia, sin embargo, también se tienen en cuenta la influencia de algunos de los parámetros más importantes .

Tomando en cuenta los resultados obtenidos con el proceso Suprayield se podría conseguir 99,9% de la producción de furfural considerando que es el parámetro más

importante en relación al cumplimiento del objetivo del proceso con mejor rendimiento. Como ya se mencionó el proceso requiere mantener un medio de reacción en un estado continuo de ebullición de manera que el furfural generado en la fase líquida al instante, sea transferido a la fase vapor. En el proceso Suprayield la ebullición del medio de reacción se lleva a cabo de un modo diferente que consiste en trabajar a presión elevada en principio disminuyendo lentamente, para que la fase líquida esté continuamente hirviendo a las temperaturas de reacción. Por lo que será necesario emplear temperaturas altas, presiones elevadas, un tiempo de residencia relativamente corto y catalizador homogéneo ácido para llevar a cabo el proceso y obtener el mejor rendimiento.

4. DISEÑO CONCEPTUAL

En esta parte del trabajo se describe un concepto de proceso que tiene como objetivo la producción de furfural a partir de bagazo de caña como biomasa. Para evaluar el rendimiento del proceso tanto en términos de rendimiento de furfural como de balances de masa y energía, se creó un modelo utilizando el software comercial de simulación de procesos Aspen plus® V11 de Aspen Technology Inc. La cinética de reacción relativa a la formación de furfural a partir de hemicelulosa, así como las reacciones secundarias y las reacciones de pérdida de furfural. El uso programas que simulan los procesos químicos industriales permiten anticipar fallos y corregirlos con el objetivo de minimizar riesgos y pérdidas económicas, a la par de aportar con los valores cercanos a los reales de los parámetros de control [28].

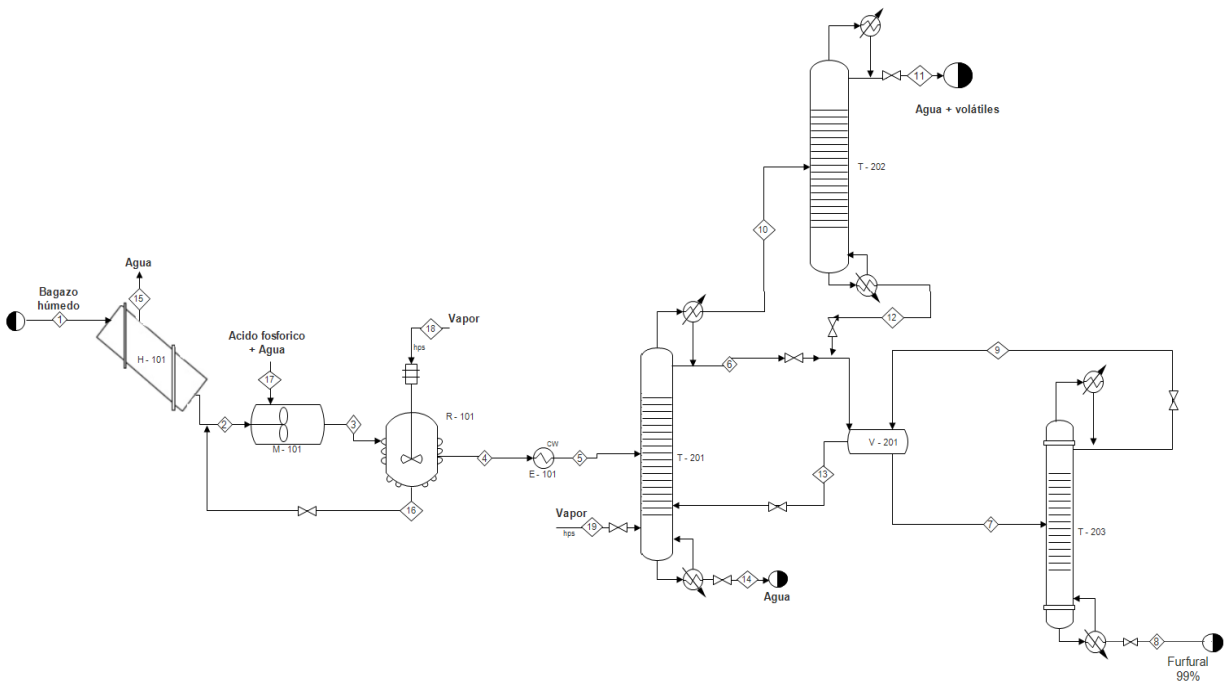
El comportamiento altamente no ideal de la mezcla binaria de furfural– agua requiere una evaluación cuidadosa de los modelos a emplear para las simulaciones. Especialmente cuando se modela la precompresión del vapor, los resultados de la simulación dependen particularmente de la estimación precisa de la temperatura en la burbuja y del punto de rocío de la mezcla, además de los coeficientes de partición vapor-líquido del furfural. En la literatura se han sugerido recientemente modelos termodinámicos adecuados. Para estimar los coeficientes de actividad en fase líquida se eligió el modelo NRTL, mientras que se utilizó la ecuación de estado de Redlich-Kwong para la estimación de los coeficientes de fugacidad en fase vapor [22].

4.1 Descripción detallada del proceso de fabricación

4.1.1 Diagrama PFD

Figura 11.

Diagrama PFD proceso Suprayield para la producción de furfural



Nota. Se recomienda revisar el anexo 1, donde se encuentra el diagrama completo y según la norma. Elaboración propia.

4.1.2 Descripción

4.1.2.a Secado. El bagazo que queda como residuo en la industria azucarera normalmente ya viene molido desde el proceso de la azúcar y/o panela. De este modo, la materia prima sólo debe ser secada para disminuir su humedad.

4.1.2.b Mezclado. La materia prima se mezcla con la solución de ácido fosfórico en un mezclador de tornillo, con el fin de alimentar una mezcla lo más homogénea posible al reactor. Dicha solución actúa como catalizador de reacción y se utiliza favoreciendo la formación de furfural.

4.1.2.c Reacción de deshidrogenación de pentosas. La mezcla ingresa al reactor, en el cual se calienta la carga a una temperatura de 290°C introduciendo vapor presurizado a través de una válvula de entrada de vapor. Una vez alcanzada dicha temperatura, se cierra la válvula de entrada de vapor y se somete la carga a una despresurización gradual, reduciendo la presión en el reactor hasta que se alcanza una temperatura de 176°C. En este punto, se analiza si la carga todavía tiene la capacidad para producir furfural; si es el caso, se la vuelve a someter a un calentamiento y a una descompresión gradual. La despresurización se realiza a una velocidad suficiente como para mantener la fase líquida dentro del reactor en un estado de constante ebullición [29].

El reactor cuenta con una salida de vapor, por la cual se extrae continuamente el furfural generado, ya que el mismo se produce en la fase líquida al estar la carga en ebullición.

4.1.2.d Destilación. El vapor que se produce en el reactor contiene una mezcla de furfural menor al 10% y de agua mayor al 90%. Esta corriente se alimenta a una columna de destilación azeotrópica, la cual funciona con el azeótropo furfural-agua.

De la columna, se extrae una fracción del azeótropo como corriente líquida y se alimenta un decantador; donde se separa en una fase liviana rica en agua y una fase pesada rica en furfural. La fase liviana se devuelve como reflujo a la columna.

El destilado de la columna suele tener una mezcla de varios compuestos además de una pequeña cantidad de agua y furfural. Esta mezcla se envía a una columna empacada donde el furfural y el agua se separan para luego alimentar el decantador. La corriente de fondo suele estar compuesta en su mayoría por agua, esta se descarga y se envía a la planta de tratamiento para su disposición final.

4.1.2.e Destilación en columna empacada. Esta columna se alimenta con el destilado de la columna anterior, que contiene una composición relativamente baja de furfural, y se procede a separar por la parte superior los componentes volátiles y por el fondo de esta columna se separa una corriente con una composición de furfural mayor del 90%. Esta última corriente se convierte en una de las alimentaciones del decantador.

4.1.2.f Decantación. En el decantador se separan dos fases, una fase liviana rica en agua que se devuelve a la primera columna de destilación y otra pesada con composición de furfural cercana al 50%.

4.1.2.g Deshidratación. En esta columna el furfural se libera de su contenido de agua. La fracción destilada contiene una mezcla del azeótropo agua-furfural. Esta corriente se condensa y envía la fase liviana se envía al decantador para eliminar el agua de la columna y la fase pesada se devuelve como reflujo a la columna. Debajo de la cabeza de la columna, se extrae una corriente de furfural en estado de vapor. Su condensado es el producto que queremos obtener, furfural con un 98,9% de pureza.

4.1.3 Servicios auxiliares

De acuerdo con Fernández A. et al. [29], los servicios auxiliares que se utilizan en el proceso de producción de furfural son:

- ◆ Agua: necesaria para la producción de vapor, enfriamiento y calentamiento, red contra incendios y para agua de uso sanitario.
- ◆ Vapor: Se utiliza para la reacción de producción de furfural, generación de energía y para los reboilers de las torres de destilación.
- ◆ Combustibles: Utilizados en la producción de vapor de agua y para el funcionamiento del secador de bagazo.
- ◆ Energía eléctrica: indispensable para el funcionamiento de todos los equipos eléctricos, electrónicos y de la iluminación en general.
- ◆ Tratamiento de efluentes: consiste en la adecuación de los efluentes generados durante el proceso productivo para que sean aptos para su vertido según las normativas vigentes.

4.1.4 Equipos auxiliares

- ◆ Caldera
- ◆ Torre de enfriamiento
- ◆ Almacenamiento del bagazo seco
- ◆ Almacenamiento de reactivos
- ◆ Almacenamiento de producto terminado

- ◆ Almacenamiento para recepción de bagazo húmedo
- ◆ Almacenamiento de agua
- ◆ Equipos para movimiento de fluidos y cañerías

4.2 Cinética

La cinética química, se encarga de estudiar la velocidad de las reacciones y se empeña por conocer sus mecanismos; es decir, como son las etapas desde que son reactivos hasta que se convierten a productos, incluyendo los posibles intermediarios que pueden formarse durante la reacción, así como también conocer los factores que intervienen y controlan la velocidad del proceso [27].

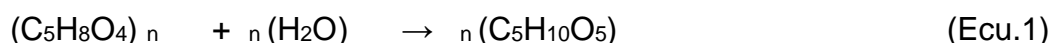
4.2.1 *Cinética de reacción en la producción de furfural*

La hemicelulosa, principalmente pentosanos, después de la hidrólisis ácida, produce sacárido en forma oligomérica o monomérica. En condiciones de reacción más severas, la xilosa se somete a deshidratación y ciclización para producir furfural. La cinética de la hidrólisis de la biomasa hemicelulósica en presencia de catalizadores ácidos muestra que la hidrólisis en sacáridos es más rápida que su deshidratación posterior [30].

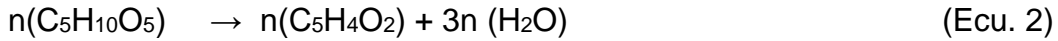
El primer mecanismo posible para la formación de furfural a partir de pentosas implica la reacción a través de una formación de 1,2-enodiol y una triple deshidratación posterior, el segundo mecanismo posible pasa por un aldehído insaturado 2,3- (α , β), y un tercer mecanismo asume la formación de furfural a partir de la forma de piranosa de las pentosas y posteriormente debido al ataque ácido conduce a una primera deshidratación y reformulación estructural para formar un anillo de furanos, seguida de una posterior deshidratación a furfural [30].

4.2.1.a Mecanismo de Formación Directa de Furfural. La reacción de formación de furfural es básicamente una reacción de dos pasos, que incluye la hidrólisis del componente xileno de la biomasa lignocelulósica a xilosa y la posterior deshidratación de la xilosa a furfural [31].

Reacción de hidrólisis del xileno.



Reacción de deshidratación de la xilosa:

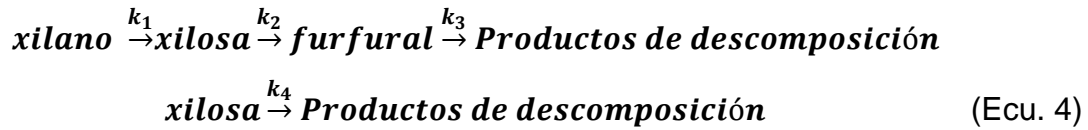


La hidrólisis del xileno a xilosa de forma diferente. Se ha demostrado que es:

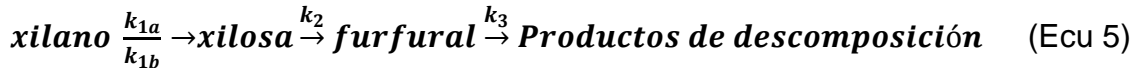
- 1) una reacción de un solo paso sin ninguna reacción de descomposición lateral, hidrólisis simplificada de un paso a xilosa.



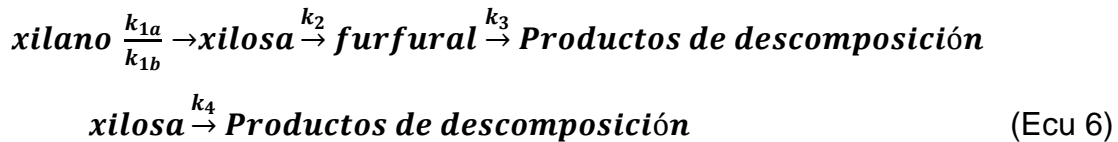
- 2) un solo paso con un término de degradación lateral en la xilosa.



- 3) una reacción de dos pasos, hidrólisis de dos pasos a xilosa (pasos rápidos y lentos)



- 4) una hidrólisis de dos pasos más un término de degradación de la xilosa



Por lo que el paso de hidrólisis ocurre realmente en un solo paso (paso rápido) mientras que el efecto del paso lento se ignora cinéticamente. Al hacer uso de agua líquida a alta temperatura y de catalizadores ácidos débiles da lugar a una reacción lenta y hace posible y relevante la caracterización de los productos intermedios, mientras que los ácidos fuertes aceleran las reacciones, por lo que las recuperaciones del rendimiento intermedio son bajas y menos relevantes [31].

4.2.1.b Velocidad de reacción. La cinética de la formación de furfural elabora la tasa de reacción y la influencia de las condiciones de funcionamiento. Se describe generalmente como una reacción pseudo homogénea, irreversible y de primer orden [30].

Las ecuaciones generales de la tasa se describen con respecto a la concentración de pentosa

$$r_A = kC_A \quad (\text{Ecu. 7})$$

La ecuación de Arrhenius adaptada se utiliza para estimar los parámetros cinéticos

$$k = Ae^{\frac{-E}{RT}} C_H^+ \quad (\text{Ecu. 8})$$

Donde k , es la constante de velocidad (s^{-1}), A es el factor pre exponencial ($m^3/mol*s$), E es la energía de activación (kJ/mol), R es la constante universal de los gases ($kJ/mol*K$), T es la temperatura (K), C_{H^+} es la concentración de iones hidrógeno en la reacción (M).

La dependencia de la velocidad de las condiciones de reacción (temperatura, carga de sólidos y concentración de ácido) se utiliza para modelar el comportamiento de la reacción mediante la cinética [31]

4.2.1.c Reacciones empleadas

Tabla 12.

Reacciones usadas en el proceso de reacción para producción de furfural a partir de bagazo de caña.

Estequiometría	Conversión
Xilenos + H ₂ O → Xilosa	0,99
Xilosa → Furfural + 3 H ₂ O	0,99
Arabina + H ₂ O → Arabinos	0,99
Arabinos → Furfural + 3 H ₂ O	0,99
Galactanos + H ₂ O → Galactosa	0,99
Glucosa → Volátiles + 3 H ₂ O	0,7

Nota. Para la conversión fue necesario ajustarlo, debido a la falta de información. Elaboración propia.

4.3 Simulación

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema [32].

Simuladores como Aspen plus están concebidos para analizar programas de la industria petroquímica y sus derivados, dicha simulación nos mostrará como es el comportamiento de las variables y los parámetros a tener en cuenta, la cuantificación de los Balances de Masa y Energía y nos da una visión un tanto acertada sobre cómo funciona el proceso.

Debido a que el programa exige introducir una serie de propiedades al declarar los componentes o sustancias involucradas en el proceso, que para este caso se tuvieron que especificar algunas como componentes hipotéticos sólidos, fue necesario incluir peso molecular y densidad de estos, además de unas condiciones específicas de entrada, como lo es temperatura y presión a condiciones ambientales, además de los flujos y composiciones de las corrientes.

Acto seguido se procede a plantear las reacciones para el reactor empleado, estas reacciones se exponen en la tabla 12 anteriormente realizada.

Para el proceso de purificación se emplearon las tres columnas de destilación respectivas (expuestas en la sección 4.1.2), en las cuales se usó la configuración de condensador y rehervidor.

Este simulador puede trabajar con errores paramétricos claves del proceso y brindar resultados de los cálculos [32].

Para la realización de la simulación se consideró las siguientes configuraciones con respecto a cada equipo empleado:

4.3.2.a Secado (B-01). Se considero un modo de funcionamiento continuo, secador de acceso directo, a una presión de 1 atm, temperatura de 40 °C, con sólidos húmedos correspondiente al contenido de humedad del flujo de salida, en fase líquido - vapor y parámetros de convergencia flash con 30 iteraciones como máximo.

4.3.2.b Mezclador (MIX-02). El mezclador de tornillo trabaja sin presión, en fase líquido - vapor y parámetros de convergencia con 30 iteraciones como máximo.

4.3.2.c Reactor (R-01). Se empleo un reactor estequiométrico ya que este trabaja con la estequiometria y conversiones de las reacciones, estas expresadas en la tabla 12 anteriormente descrita. El reactor opera a 1,2 atm de presión, 180°C de temperatura y alrededor de 235 m³ de volumen, funcionando de manera isobárica, en fase liquido – vapor. En este caso no se informa el calor de reacción calculado y se mantiene la distribución del tamaño de las partículas.

Estequiometría de las reacciones y sus respectivas conversiones:

- 1) Xileno (Sólido) + H₂O --> Xilosa (Mezcla) Con conversión de 0,99 de Xileno
- 2) Xilosa (Mezcla) --> Furfural(Mezcla) + 3 H₂O (Mezcla) Con conversión de 0,99 de xilosa

- 3) Arabina (Sólido) + H₂O --> Arabinos (Mezcla) Con conversión de 0,99 de Arabina
- 4) Arabinos (Mezcla) --> Furfural (Mezcla) + 3 H₂O (Mezcla) Con conversión de 0,99 de Arabinos
- 5) Galactanos (Sólido) + H₂O --> Galactosa (Mezcla) Con conversión de 0,99 de Galactanos
- 6) Glucosa (Sólido) --> Volátiles (Mezcla) + 3 H₂O (Mezcla) Con conversión de 0,7 de Glucosa

4.3.2.d Destilación (C-201). Se dispone de una columna en configuración RadFrac, cuyo cálculo se elabora en equilibrio, 33 etapas, condensador total, hervidor, en fase líquido – vapor y convergencia estándar.

Especificaciones de funcionamiento

Tasa de destilación: 240 kmol/hr

Relación de reflujo: 8 moles

Corrientes de alimentación:

Etapa 15 alimentación

Etapa 2 alimentación de reflujo

Etapa 3 alimentación de reflujo

Corrientes de productos

Etapa 1 líquido

Etapa 2 líquido con 9400 kmol/h

Etapa 33 líquido

Presión

Destilado / Fondos

Etapa 1 / Presión del condensador a 1,1 atm

* Condensador

Tanto el reflujo como el destilado líquido están subenfriados

Opción de transferencia de calor: Trabajo constante

Especificación de la transferencia de calor:

Temperatura del medio: 20 °C

Aproximación a la temperatura 10 K

Capacidad térmica: 1,00315 cal/gm-K

Calor latente específico del medio: 542,18 cal/gm

Rendimiento de la etapa superior:

Tasa de destilado: 240 kmol/hr

Tasa de reflujo: 1920 kmol/hr

Relación de reflujo: 8

* Reboiler

Rehervidor de termosifón

Circulación sin deflector

Opción de transferencia de calor: Trabajo constante

Especificación de la transferencia de calor:

Temperatura media: 130°C

Aproximación de temperatura: 10 K

Capacidad calorífica: 1,00315 cal/gm-K

Calor latente específico del medio: 542,18 cal/gm

Retención del medio

Recipiente vertical con cabezal elíptico

Rendimiento de la etapa inferior

Temperatura: 101,803 °C

Trabajo térmico: $6,0255 \times 10^6$ cal/seg

Tasa de fondo: 8612,16 kmol/hr

Tasa de ebullición: 2230,16 kmol/hr

Relación de ebullición: 0,2589

Otras configuraciones:

Factor de condición de transferencia: 0,5

Factor de condición de reacción: 0,5

Opción de discretización de la película: geométrica

Relación de discretización de la película: 2

Factor de condición del modelo de flujo (superior): 0,5

Factor de condición del modelo de flujo (inferior): 0,5

Factor de transición del modelo de flujo: 0,2

Convergencia

Número máximo de iteraciones: 25

Parámetro de continuación/homotopía: 1

Cambio máximo de temperatura: 15

4.3.2.e Destilación en columna empacada (C-202). Se dispone de una columna en configuración DSTWU cuyo cálculo se elabora en equilibrio, 20 etapas, condensador total, hervidor y en fase líquido – vapor.

Su configuración se resume en :

Relación de reflujo 0,1

Recuperación de componentes clave ligeros 0,35

Recuperación de componentes clave pesados 0,34

Relación mínima de reflujo: 0,0208

Relación de reflujo real: 0,0404

Número mínimo de etapas: 3

Número de etapas reales: 20

Etapas de alimentación: 7

Número de etapas reales por encima de la alimentación: 6

Temperatura del destilado: 100,45 °C

Temperatura del fondo: 171,04 °C

Fracción de destilado a alimentación: 0,9415

4.3.2.f Decantación (D-201). Su configuración se resume en :

Presión: 1,1atm

Temperatura: 98 °C

Carga térmica calculada / Trabajo neto: -175493,664 cal/seg

Primer líquido / líquido total 0,9846

4.3.2.g Deshidratación (C-203). Se dispone de una columna en configuración RadFrac, cuyo cálculo se elabora en equilibrio, 27 etapas, condensador total, hervidor, en fase líquido – vapor y convergencia estándar.

Especificaciones de funcionamiento

Tasa de destilación: 80 kmol/hr

Relación de reflujo: 3,3 moles

Corrientes de alimentación:

Etapa 9 alimentación

Corrientes de productos

Etapa 1 líquido

Etapa 27 líquido

Presión

Destilado / Fondos

Etapa 1 / Presión del condensador a 1,1 atm

* Condensador

Tanto el reflujo como el destilado líquido están subenfriados

Opción de transferencia de calor: Trabajo constante

Especificación de la transferencia de calor:

Temperatura del medio: 20 °C

Aproximación a la temperatura 10 K

Capacidad térmica: 1,00315 cal/gm-K

Calor latente específico del medio: 542,18 cal/gm

Rendimiento de la etapa superior:

Tasa de destilado: 80 kmol/hr

Tasa de reflujo: 264 kmol/hr

Relación de reflujo: 3,3

* Reboiler

Rehervidor de termosifón

Circulación sin deflector

Opción de transferencia de calor: Trabajo constante

Especificación de la transferencia de calor:

Temperatura media: 130°C

Aproximación de temperatura: 10 K

Capacidad calorífica: 1,00315 cal/gm-K

Calor latente específico del medio: 542,18 cal/gm

Retención del medio

Recipiente vertical con cabezal elíptico

Rendimiento de la etapa inferior

Temperatura: 165,161 °C

Trabajo térmico: 982299 cal/seg

Tasa de fondo: 65,6662kmol/hr

Tasa de ebullición: 356,47 kmol/hr

Relación de ebullición: 5,4285

Otras configuraciones:

Factor de condición de transferencia: 0,5

Factor de condición de reacción: 0,5

Opción de discretización de la película: geométrica

Relación de discretización de la película: 2

Factor de condición del modelo de flujo (superior): 0,5

Factor de condición del modelo de flujo (inferior): 0,5

Factor de transición del modelo de flujo: 0,2

Convergencia

Número máximo de iteraciones: 25

Parámetro de continuación/homotopía: 1

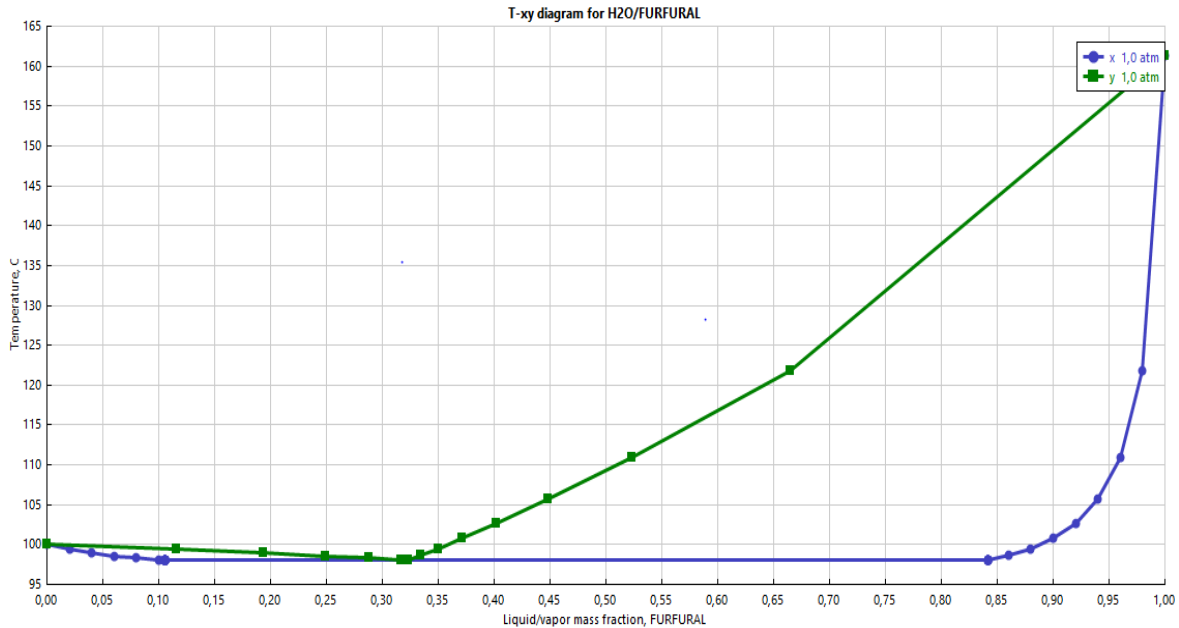
Cambio máximo de temperatura: 15

4.4 Azeótropo

El conocimiento de la termodinámica del sistema binario furfural-agua es también crítico para que la modelación sea satisfactoria, y para ello se realizó un estudio bibliográfico para evaluar los mejores modelos disponibles realizado en el capítulo 3. El sistema furfural-agua es bien conocido, y los datos experimentales para el equilibrio vapor-líquido han sido reportados por varios autores, especialmente en el rango de temperatura entre 40 y 170°C. La solubilidad mutua del furfural y el agua también es bien conocida a 1.

Figura 13.

Diagrama T -xy Furfural – Agua



Nota. Diagrama T – xy Furfural – Agua obtenida de la simulación para análisis. Elaboración propia, simulador Aspen Plus v.11.

La temperatura del azeótropo está ligeramente subestimada a las presiones más altas, pero no representa un problema para los alcances de este trabajo ya que la incertidumbre es del orden de 0,5 °C. Por otro lado, el coeficiente de partición vapor-líquido del furfural está razonablemente bien descrito, especialmente dentro de la región de solubilidad (8,3 wt% de furfural a 20°C), que es la región de interés para la destilación furfural-agua.

En este caso se hizo uso del modelo de propiedad física NRTL ya que es un modelo basado en el coeficiente de actividad, además de funcionar en caso de mezclas azeotrópicas según lo indica el centro de ayudas de Aspen plus. La fase empleada es de vapor – líquido, la mezcla investigada de azeótropos se realiza a una presión de 1 atm.

El nodo estable de agua se encuentra a los 100°C y nodo estable de furfural a 161,28°C. La temperatura del punto azeotrópico se da a 97,64°C, en una mezcla homogénea con nodo inestable, donde la composición de agua corresponde a 0,9023 base molar y 0,6340 base de másica, para furfural corresponde a 0,0977 base molar y 0,3660 base másica.

4.5 Balance de materia

La ecuación de balance de materiales sin acumulación es:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} = 0 \quad (\text{Ecu. 9})$$

4.5.1 Balance de materia por proceso

Para los cálculos pertinentes se tendrá una base de cálculo de 100000 kg/h.

4.5.1.a Secado. Se considera que la materia prima se recibe con un 78% de humedad y se desea acondicionarla a un 10% de humedad.

Tabla 13.

Balance de materia en el secador



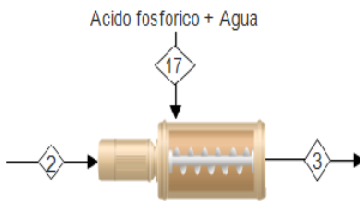
Entrada			Salida		
Masa kg/h	Composición (Corriente 1)		Masa kg/h	Composición (Corriente 2)	
100000	Bagazo	0,5	50000	Bagazo	1,0
	Agua	0,5		Agua	0,0
Masa kg/h	Composición (Corriente 15)		50000		
				Bagazo	0,0
			Agua	1,0	

Nota. Resultados obtenidos de la simulación desarrollada y mencionada previamente, acompañada de su representación gráfica. Elaboración propia.

4.5.1.b Mezclado. Para el mezclado se agrega solución acidificada al 2,5% de Ácido fosfórico en una proporción de 328 Kg de solución por cada 100000 Kg de bagazo.

Tabla 14.

Balace de materia en el mezclador de tornillo

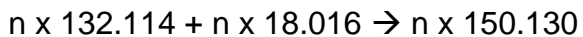
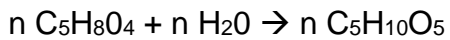


Entrada			Salida		
Masa kg/h	Composición (Corriente 2)		Masa kg/h	Composición (Corriente 3)	
50000	Bagazo	1	52625	Bagazo	0,95
	Agua	0		Agua	0,044
				Ácido fosfórico	0,006
Masa kg/h	Composición (Corriente 17)				
2625	Ácido fosfórico	0,125			
	Agua	0,875			

Nota. Resultados obtenidos de la simulación desarrollada y mencionada previamente, acompañada de su representación gráfica. Elaboración propia.

4.5.1.c Reacción. Para analizar la reacción se consideró un rendimiento de conversión de pentosanos en furfural de un 70% provisto por Zeitsch [25], además de las composiciones de los componentes generados en menor medida como Ácido acético y alcohol furfuralico.

Hidrólisis de pentosanos.



Deshidratación de Pentosas

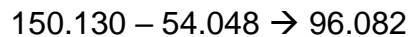
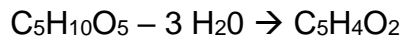
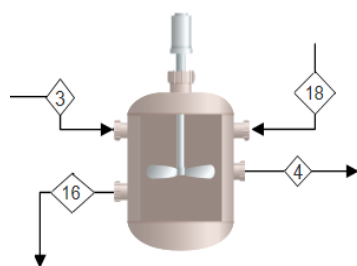


Tabla 15.

Balace de materia en el reactor



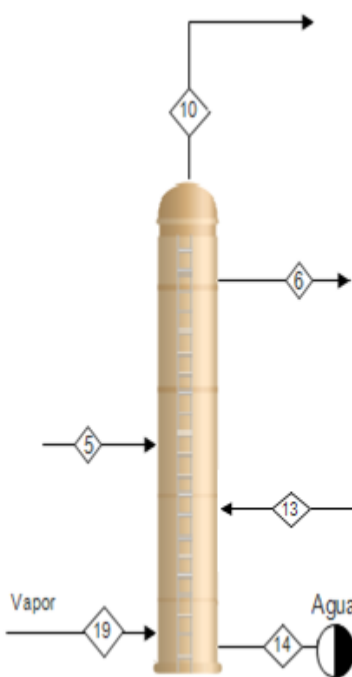
Entrada			Salida		
Masa kg/h	Composición (Corriente 3)		Masa kg/h	Composición (Corriente 4)	
52625	Bagazo	0,95	169801	Furfural	0,073
	Agua	0,044		Agua	0,925
	H ₃ PO ₄	0,006		Ácido fosfórico	0,000
				Volátiles	0,002
Masa kg/h	Composición (Corriente 18)		Masa kg/h	Composición (Corriente 16)	
150000	Agua	1,00	32824,3	Pentosanos	0,977
				Agua	0,000
				Inertes	0,013
				Ácido fosfórico	0,010

Nota. Resultados obtenidos de la simulación desarrollada y mencionada previamente, acompañada de su representación gráfica. Elaboración propia.

4.5.1.d Destilación 1. En la columna de destilación 1 se considera la alimentación proveniente del reactor, además de una corriente que vuelve de la etapa de Decantación 1, posterior a esta destilación. También se agrega una corriente de vapor vivo que favorece la destilación. En las corrientes de salida, además del destilado y fondo, se considera una corriente de salida lateral de la columna, por la cual sale la mayor parte del furfural y que sigue la línea de proceso para su posterior purificación

Tabla 16.

Balance de materia en la columna de destilación azeotrópica



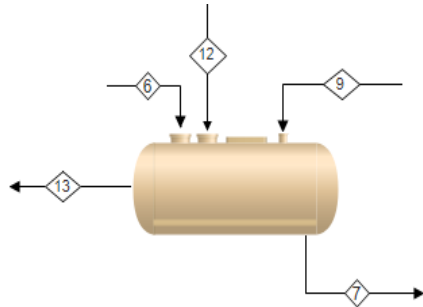
Entrada			Salida		
Masa kg/h	Composición (Corriente 5)		Masa kg/h	Composición (Corriente 6)	
169801	Furfural	0,073	189238	Furfural	0,127
	Agua	0,925		Agua	0,871
	Ácido fosfórico	0,000		Volátiles	0,002
	Volátiles	0,002			
Masa kg/h	Composición (Corriente 13)		Masa kg/h	Composición (Corriente 10)	
184254	Furfural	0,104	5982,79	Furfural	0,341
	Agua	0,894		Agua	0,659
	Volátiles	0,001		Volátiles	0,000
Masa kg/h	Composición (Corriente 19)		Masa kg/h	Composición (Corriente 14)	
1000	Vapor	1,000	159834	Furfural	0,034
				Agua	0,964
				Volátiles	0,002

Nota. Resultados obtenidos de la simulación desarrollada y mencionada previamente, acompañada de su representación gráfica. Elaboración propia.

4.5.1.e Decantación . En la decantación, se aprovecha la diferencia de solubilidad entre el agua y el furfural para obtener una fase pesada rica en dicho componente con una composición de 51% en peso y una fase liviana rica en agua con una composición cercana al 2 % en peso de furfural.

Tabla 17.

Balance de materia en el decantador



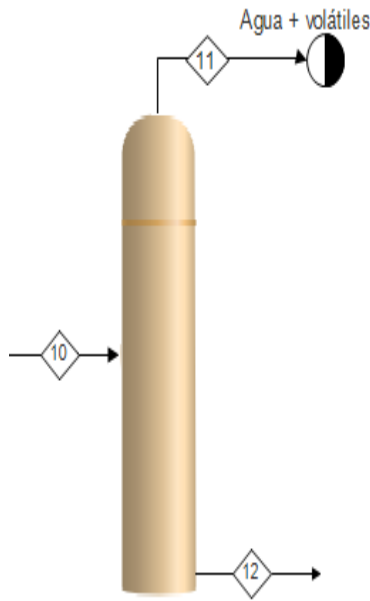
Entrada			Salida		
Masa kg/h	Composición (Corriente 6)		Masa kg/h	Composición (Corriente 7)	
189238	Furfural	0,127	8244,45	Furfural	0,827
	Agua	0,871		Agua	0,162
	Volátiles	0,002		Volátiles	0,011
Masa kg/h	Composición (Corriente 9)		Masa kg/h	Composición (Corriente 13)	
1913,37	Furfural	0,304	184254	Furfural	0,104
	Agua	0,696		Agua	0,894
				Volátiles	0,001
Masa kg/h	Composición (Corriente 12)				
1347,7	Furfural	1,000			

Nota. Resultados obtenidos de la simulación desarrollada y mencionada previamente, acompañada de su representación gráfica. Elaboración propia.

4.5.1.f Destilación 2. La columna de destilación 2 se utiliza para la separación de los compuestos volátiles de la corriente de cabeza de Destilación 1, por lo cual la corriente de destilado obtenida no se reprocesa. La corriente de fondo vuelve a la línea de proceso incorporándose en el decantador 1.

Tabla 18.

Balance de materia en la columna de destilación



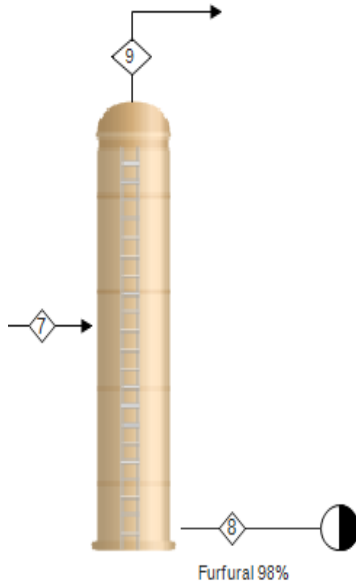
Entrada			Salida		
Masa kg/h	Composición (Corriente 10)		Masa kg/h	Composición (Corriente 11)	
5982,79	Furfural	0,341	4635,09	Furfural	0,150
	Agua	0,659		Agua	0,850
	Volátiles	0,000		Volátiles	0,000
			Masa kg/h	Composición (Corriente 12)	
			1347,7	Furfural	1,000
				Agua	0,000
				Volátiles	0,000

Nota. Resultados obtenidos de la simulación desarrollada y mencionada previamente, acompañada de su representación gráfica. Elaboración propia.

4.5.1.g Destilación 3. En la destilación 3 se alimenta la columna con la corriente de furfural neutralizada, junto con una corriente que retorna de la segunda decantación y una corriente de vapor vivo que favorece la destilación. La corriente de destilado alimenta luego a la segunda decantación y la corriente de fondos se purga debido a la presencia de polímeros obtenidos. El furfural listo para comercializar se obtiene de una corriente lateral de la columna.

Tabla 19.

Balance de materia en la columna de deshidratación



Entrada			Salida		
Masa kg/h	Composición (Corriente 7)		Masa kg/h	Composición (Corriente 9)	
8244,45	Furfural	0,827	1913,37	Furfural	0,304
	Agua	0,162		Agua	0,696
	Volátiles	0,011			
			Masa kg/h	Composición (Corriente 8)	
			6331,08	Furfural	0,986
				Volátiles	0,014

Nota. Resultados obtenidos de la simulación desarrollada y mencionada previamente, acompañada de su representación gráfica. Elaboración propia.

4.6 Balance de energía

La ecuación de energía es:

$$\text{Calor del reactivo} + \text{Calor suministrado} = \text{Calor de la reacción} + \text{Calor del producto} \quad (\text{Ecu.10})$$

Ecuación de calor:

$$Q = mC_p\Delta T \quad (\text{Ecu.11})$$

Ecuación para calor de reacción:

$$\Delta H = \sum \Delta H^{\circ}_{\text{productos}} - \sum \Delta H^{\circ}_{\text{Reactivos}} \quad (\text{Ecu.12})$$

Ecuación para calor de reacción:

$$\text{Calor suministrado} = (\text{Calor de la reacción}) + (\text{Calor del producto}) - (\text{Calor del reactivo}) \quad (\text{Ecu.13})$$

Ecuación para calor en columnas de destilación:

$$\text{Calor del reactivo} = \text{Calor de la reacción} + \text{Calor del condensador} + \text{Calor del reboiler} \quad (\text{Ecu.14})$$

4.6.1 Balance de energía por proceso

4.6.1.a Secado

Temperatura de referencia = 273,15 K

Temperatura del secador = 313,15 K

Tabla 20.

Balance de energía en el secador

Entrada					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
1	Bagazo	50.000	-6,646	20,6	-13.292.600
	Agua	50.000	-6,646	20,6	-13.292.600
Calor de reactivos					-26.585.200
Salida					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
2	Bagazo	50.000	-6,646	40	-13.292.600
	Agua	0	0	40	0
15	Bagazo	0	0	40	0
	Agua	50.000	-6,646	40	-13.292.600
Calor de productos					-26.585.200

Nota. Resultados obtenidos en el balance de energía correspondiente a la entrada y salida de los compuestos. Elaboración propia.

4.6.1.b Mezclado

Temperatura de referencia = 273,15 K

Temperatura del mezclador = 323,15

Tabla 21.*Balance de energía en el mezclador.*

Entrada					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
2	Bagazo	50.000	-17,402	50	-43.504.735
	Agua	0	0,000	50	0
17	Ácido fosfórico	328	-1,420	50	-23.301
	Agua	2.297	-9,942	50	-1.141.748
Calor de reactivos					-44.669.784
Salida					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
3	Bagazo	50.000	-17,402	50	-43.504.735
	Agua	2.297	-9,942	50	-1.141.748
	Ácido fosfórico	328	-1,420	50	-23.301
Calor de productos					-44.669.784

Nota. Resultados obtenidos en el balance de energía correspondiente a la entrada y salida de los compuestos. Elaboración propia.

4.6.1.c Reacción

Temperatura de referencia = 438,15 K

Temperatura del reactor = 453,15 K

Tabla 22.*Balance de energía en el reactor*

Entrada					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
3	Bagazo	50.000	-16,245	15	-12.183.600
	Agua	2.297	-0,746	15	-25.685
	Ácido fosfórico	328	-0,107	15	-524
18	Agua	150.000	-2,941	15	-6.618.293
Calor de reactivos					-18.828.102

Salida					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
4	Furfural	12.339	-0,123	15	-22.840
	Agua	157.041	-1,570	15	-3.697.129
	Volátiles	421	-0,004	15	-27
16	Pentosanos	32.060	-25,003	15	-12.024.052
	Agua	9	-0,007	15	-1
	Inertes	427	-0,333	15	-2.130
	Ácido fosfórico	328	-0,256	15	-1.260
Calor de productos					-15.747.438

Nota. Resultados obtenidos en el balance de energía correspondiente a la entrada y salida de los compuestos. Elaboración propia.

Calor de reacción:

Reactivos	Productos
$\Delta H_{\text{Bagazo,R}} = -394.365 \text{ MJ/h}$	$\Delta H_{\text{Furfural,P}} = -151.241 \text{ MJ/h}$
$\Delta H_{\text{Agua,R}} = -18.099 \text{ MJ/h}$	$\Delta H_{\text{Agua,P}} = -1.924.915 \text{ MJ/h}$
$\Delta H_{\text{Ácido fosfórico,R}} = -2586 \text{ MJ/h}$	$\Delta H_{\text{Volátiles,P}} = -5.158 \text{ MJ/h}$
$\Delta H_{\text{Vapor,R}} = -1.937.069 \text{ MJ/h}$	$\Delta H_{\text{Pentosanos,P}} = -264.640 \text{ MJ/h}$
	$\Delta H_{\text{Inertes,P}} = -3.522 \text{ MJ/h}$
	$\Delta H_{\text{Ácido fosfórico,P}} = -2.710 \text{ MJ/h}$

$$\Delta H = -4.704.305 \text{ MJ/h}$$

Calor suministrado: $Q_{\text{in}} + Q_{\text{out}} - \Delta H$

$$(-18.828.102 \text{ MJ/h}) + (-15.747.438 \text{ MJ/h}) - (-4.704.305 \text{ MJ/h}) = -1.623.641 \text{ MJ/h}$$

Balance:

Haciendo uso de la ecuación 10.

$$Q_{\text{reactivos}} + Q_{\text{suministrado}} = Q_{\text{productos}} + Q_{\text{reacción}}$$

$$(-18.828.102 \text{ MJ/h}) + (-1.623.641 \text{ MJ/h}) = (-15.747.438 \text{ MJ/h}) - (-4.704.305 \text{ MJ/h})$$

$$-20.451.743 \text{ MJ/h} = -20.451.743 \text{ MJ/h}$$

4.6.1.d Destilado 1

Temperatura de alimentación = 422,15 K

Temperatura del destilado = 373,45 K

Temperatura de intermedios = 373,45 K

Temperatura de fondos = 374,95 K

Temperatura de referencia = 273,15 K

Tabla 23.

Balace de energía en la columna de destilación azeotrópica.

Entrada					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
5	Furfural	12.339	-0,557	149,0	-1.024.933
	Agua	157.041	-7,095	149,0	-166.013.047
	Ácido fosfórico	0	0,000	149,0	0
	Volátiles	421	-0,019	149,0	-1.192
13	Furfural	19.205	-0,782	149,0	-2.237.656
	Agua	164.773	-6,709	149,0	-164.711.674
	Volátiles	276	-0,011	149,0	-462
19	Vapor	1.000	-6,355	149,0	-946.941
Calor de alimentación					-334.935.904
Salida					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
6	Furfural	24.099	-0,934	100,3	-2.258.163
	Agua	164.773	-6,388	100,3	-105.570.662
	Volátiles	366	-0,014	100,3	-521
Calor de destilado					-107.829.346
10	Furfural	2.042	-2,092	100,3	-428.491
	Agua	3.941	-4,038	100,3	-1.595.983
	Volátiles	0,032	0,000	100,3	0
Calor de intermedios					-2.024.475
14	Furfural	5.404	-0,266	101,8	-146.422
	Agua	154.100	-7,590	101,8	-119.064.986
	Volátiles	330	-0,016	101,8	-548
Calor de fondo					-119.211.955

Nota. Resultados obtenidos en el balance de energía correspondiente a la entrada y salida de los compuestos. Elaboración propia.

Calor del condensador:

-74.109.090 MJ/h

Calor de reboiler:

-31.761.039 MJ/h

Balance:

Haciendo uso de la ecuación 14.

$$Q_{\text{reactivos}} = Q_{\text{productos}} + Q_{\text{Condensador}} + Q_{\text{Reboiler}}$$

$$-334.935.904 \text{ MJ/h} = (-229.065.776 \text{ MJ/h}) + (-74.109.090 \text{ MJ/h}) + (-31.761.039 \text{ MJ/h})$$

$$-334.935.904 \text{ MJ/h} = -334.935.904 \text{ MJ/h}$$

4.6.1.e Decantación

Temperatura de referencia = 273,15 K

Temperatura del secador = 371,15 K

Tabla 24.

Balance de energía en el decantador

Entrada					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
6	Furfural	24.099	-0,934	98	-2.206.380
	Agua	164.773	-6,388	98	-103.149.799
	Volátiles	366	-0,014	98	-509
9	Furfural	581	-1,926	98	-109.679
	Agua	1.332	-4,416	98	-576.520
12	Furfural	1.348	-2,185	98	-288.537
Calor de alimentación					-106.331.425
Salida					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
7	Furfural	6.822	-2,809	98	-1.877.833
	Agua	1.332	-0,515	98	-67.188
	Volátiles	90	-0,037	98	-329
13	Furfural	19.205	-0,782	98	-1.471.747
	Agua	164.773	-6,709	98	-102.914.024
	Volátiles	276	-0,011	98	-304
Calor de productos					-106.331.425

Nota. Resultados obtenidos en el balance de energía correspondiente a la entrada y salida de los compuestos. Elaboración propia.

4.6.1.f Destilación 2

Temperatura de alimentación = 373,45 K

Temperatura del destilado = 373,60 K

Temperatura de fondos = 444,19 K

Temperatura de referencia = 273,15 K

Tabla 25.

Balance de energía en la columna de destilación

Entrada					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
10	Furfural	2.042	-2,092	100,3	-428.504
	Agua	3.941	-4,038	100,3	-1.596.029
	Volátiles	0,032	0,000	100,3	0
Calor de alimentación					-108.355.958
Salida					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
11	Furfural	694	-1,081	102,45	-76.899
	Agua	3.941	-6,137	102,45	-2.477.705
	Volátiles	0	0,000	102,45	0
Calor de destilado					-2.554.604
12	Furfural	1.348	-2,185	171,04	-503.586
Calor de fondo					-3.058.190

Nota. Resultados obtenidos en el balance de energía correspondiente a la entrada y salida de los compuestos. Elaboración propia.

Calor del condensador:

$$-55.481.308 \text{ MJ/h}$$

Calor de reboiler:

$$-47,261.855 \text{ MJ/h}$$

Balance:

Haciendo uso de la ecuación 14.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{reactivos}} &= Q_{\text{productos}} + Q_{\text{Condensador}} + Q_{\text{Reboiler}} \\
 -108.355.958 \text{ MJ/h} &= (-5.612,794 \text{ MJ/h}) + (-55.481.308 \text{ MJ/h}) + (-47,261.855 \\
 &\quad \text{MJ/h}) \\
 -334.935.904 \text{ MJ/h} &= -334.935.904 \text{ MJ/h}
 \end{aligned}$$

4.6.1.g Destilación 3

Temperatura de alimentación = 371,15 K

Temperatura del destilado = 373,44 K

Temperatura de fondos = 338,31 K

Temperatura de referencia = 273,15 K

Tabla 26.

Balance de energía en la columna de deshidratación.

Entrada					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
7	Furfural	6.822	-2,809	98	-1.877.833
	Agua	1.332	-0,549	98	-71.620
	Volátiles	90	-0,037	98	-329
Calor de alimentación					-1.949.782
Salida					
Corriente	Componentes	Peso (kg/h)	Cp. (kJ/kg*K)	ΔT (K)	Q (MJ/h)
9	Furfural	581	-1,926	100	-112.242
	Agua	1.332	-3,147	100	-420.526
Calor de destilado					-532.768
8	Furfural	6.241	-0,913	65,16	-371.365
	Volátiles	90	-0,013	65,16	-77
Calor de fondo					-904.210

Nota. Resultados obtenidos en el balance de energía correspondiente a la entrada y salida de los compuestos. Elaboración propia.

Calor del condensador:

$$-307.682 \text{ MJ/h}$$

Calor de reboiler:

$$-205.122 \text{ MJ/h}$$

Balance:

Haciendo uso de la ecuación 14.

$$Q_{\text{reactivos}} = Q_{\text{productos}} + C_{\text{Condensador}} + R_{\text{Reboiler}}$$

$$-1.949.782 \text{ MJ/h} = (-904.210 \text{ MJ/h}) + (-307.682 \text{ MJ/h}) + (-205.122 \text{ MJ/h})$$

$$-1.949.782 \text{ MJ/h} = -1.949.782 \text{ MJ/h}$$

4.7 Rendimiento

El rendimiento es el que se obtiene después de un proceso de reacción y que se ve afectado por todas aquellas variables que afectan dicho proceso, por lo anteriormente mencionando solo se tendrá en cuenta el reactor, considerando que es el quipo en el que se lleva a cabo las correspondientes reacciones, es por ello que el rendimiento se calcula con la ecuación 15.

$$\text{Rendimiento} = \left(\frac{\text{moles de producto deseado}}{\text{moles de reactante alimentado}} * \text{factor estequiométrico} \right) * 100 \quad (\text{Ecu. 15})$$
$$\left(\frac{131 \text{ kmol/h}}{133 \text{ kmol/h}} * 1 \right) * 100 = 99\% \text{ de rendimiento}$$

4.8 Discusión de resultados

En este capítulo se usó como base el proceso Suprayield, según lo evaluado en el capítulo 3 dicho proceso presenta el mejor rendimiento siendo esta la variable de mayor interés, sin dejar de lado algunas otras variables que favorecen el proceso, también fue necesario recopilar información que es relevante en el procesó como lo es la cinética de la que solo fue necesario conocer las reacciones de formación del furfural, la estequiometria y conversión de la reacción para llevar a cabo la simulación del proceso, información encontrada en numerosas fuentes de información, razón por la cual se hace uso de un reactor estequiométrico y no se necesita conocer el factor preexponencial, energía de activación o unidades.

Es importante conocer el comportamiento del furfural y el agua debido al azeótropo que estas sustancias forman, además de ser una herramienta importante en la toma de decisiones en cuanto a las temperaturas y presiones a emplear durante la simulación. Teniendo en cuenta que la mayor parte de bagazo de caña que se cosecha en Colombia viene del cauca o del valle del cauca, se considera factible considerar realizar el montaje de la planta en esta región, considerando los resultados expresados en el anexo c esta región cuenta con una presión de 1 atm o muy cercana a ella, por lo que cumple en cabalidad con lo requerido por la simulación.

Con lo anteriormente mencionado se llegó a la decisión de trabajar con presiones

moderadas, que contrario a lo que manifiesta Zeitsch y expuesto en el capítulo 3, no fue necesario emplear presiones altas si no por el contrario, se emplearon presiones no mayores a 1,5 atm. En el caso de la temperatura no supera los 180 °C en operación, lo cual es común según otros autores.

En el trabajo de Fernandez Blazich y compañeros (29) que, a pesar de trabajar con bagazo de malta, la cual cuenta con propiedades muy similares a el bagazo de caña, deciden trabajar en base al proceso Suprayield, con la discrepancia en cuanto a condiciones de operación debido a que trabaja con temperaturas superiores a los 200°C, con una composición inicial de 22 ton/h de materia vegetal, con la obtienen 0,85 ton/h de furfural con una pureza de 98%.

En el trabajo de Aravindhan M y compañeros (34), quienes también realizaron simulación en Aspen para la obtención de furfural a partir de bagazo de caña, con la implementación del reactor de micro canales, también basado proceso Suprayield con la diferencia de solo emplear dos torres de destilación sin decantación, otras de las discrepancias en cuanto a condiciones de operación corresponden a temperaturas superiores a 250°C y presiones elevadas de alrededor de 60 atm, con una composición inicial de 29,27 ton/h de materia vegetal, con la que se obtiene 0,09 ton/h de furfural con una pureza de 94%.

Por otro lado, en el trabajo de R. E. Delgado (15), quien también se baso en el proceso Suprayield empleando como materia prima residuos de maíz, en cuanto a condiciones iniciales a 120°C, con una composición inicial de 60 ton/h de material vegetal, con la que se obtiene 0,55 ton/h de furfural.

La simulación entregó la información necesaria para realizar los respectivos balances de materia y energía, considerando que se hace uso de 55 ton/h de material vegetal, con los que se logra obtener alrededor de 7 ton/h de furfural con pureza del 99% y - 869,8x10⁶ MJ/h de energía necesaria para el proceso de producción de furfural. Considerando los resultados suministrados por los autores anteriormente mencionados, se demuestra la validez del proceso desarrollado, considerando que son trabajos muy similares al realizado desde el proceso de base y las materias primas que corresponden a al mismo bagazo de caña o materias muy similares en cuanto a su composición, sin embargo, el proceso realizado en el presente trabajo entrega mejores resultados, con

condiciones de operación más favorables considerando que estas se reflejan en costos futuros en la producción.

En lo que respecta al rendimiento en este intervalo de condiciones de operación efectivamente cumple con el rango de rendimiento teórico de furfural, según los datos recopilados en la literatura, logrando así un 99% de rendimiento, este resultado se atribuye a que el reactor cuenta con una corriente de recirculación evitando pérdidas de producto.

5. COSTOS ASOCIADOS AL PROCESO

5.1 Cálculo de los costos

En el presente cálculo se realizó un estudio de los costos previstos a un año, para el desarrollo de este se averiguaron los precios del mercado, y aquellos que no pudieron ser presupuestados fueron estimados.

5.1.1 Costos de inversión

Se consideran todos los bienes empleados en el proceso. Los precios de los mismos se obtuvieron de catálogos y revistas especializadas, los costos de instalación, ingeniería y supervisión.

5.1.1.a Equipos/Maquinaria. Las inversiones en maquinaria se consideran teniendo en cuenta lo presupuestado por los fabricantes el cual será de 1.005.869 USD, se considera el costo de instalación como el 20% del valor del equipo.

5.1.1.b Muebles y enseres. Representa el valor de todo el mobiliario necesario para el desarrollo de las actividades dentro de la fábrica estimado en 4.867 UDS.

5.1.1.c Equipos e instalaciones auxiliares. Son las inversiones realizadas en la compra de los equipos auxiliares (caldera, torre de enfriamiento, tanques de reactivos y productos, etc.), además del costo que representa la disposición de las instalaciones auxiliares (gas, agua de red y de incendios, etc.), estimado en 848.376 USD.

5.1.1.d Instrumentación y control. Se considera un 10% del costo de los equipos, y abarca las inversiones necesarias para la compra de instrumental e instalaciones de control automático.

5.1.1.e Ingeniería y supervisión. Incluye los gastos para el diseño, construcción, ingeniería, preparación de planos, compras, etc. Se estima como el 10% del total de los costos directos (los mencionados anteriormente).

5.1.2 Costos de producción

Son aquellos involucrados en el proceso productivo, están compuestos por los siguientes.

5.1.2.a Materia prima e insumos. Las materias primas del proceso son el bagazo de caña y el ácido fosfórico al 85%, sus precios son 78,3 USD/tn y 60 USD/gal, respectivamente, se recomienda revisar el anexo C. Por lo que se necesitarán alrededor de 440 ton diarias de bagazo y 1 ton diaria de ácido fosfórico, considerando un turno de producción de ocho horas. Por lo que corresponde a 56232 USD anuales correspondiente a materia prima empleada en el proceso de producción de furfural. El uso de ácido fosfórico al 85% es el componente con mayor pureza que se puede comercializar.

5.1.2.b. Mano de obra directa. La determinación de los salarios de los trabajadores está basada en la disposición legal (Ley 278 de 1996) según lo estipule la Comisión Permanente de Concertación de Políticas Salariales y Laborales. Para este ítem se requieren seis operarios con salarios básicos + recargos para el turno diario.

Los operarios realizan servicios generales de producción, administración y/o mantenimiento en varias áreas de la compañía siguiendo instrucciones predeterminadas y con actividades bajo supervisión directa.

5.1.3 Gastos indirectos de fabricación

5.1.3.a. Mano de obra indirecta (personal). Dentro de esta categoría se incluyen a todos los demás trabajadores que, si bien pertenecen a producción, no intervienen directamente en el proceso.

Para ello se requieren:

- ◆ 1 jefe de producción encargado de producción encargado de supervisar las actividades de producción de una o más líneas; controlar la producción, costos, volumen y calidad y la ejecución del trabajo según la programación de producción; promueve el uso efectivo de equipos, recursos, instalaciones y materiales. Intervenir en la resolución de problemas y mejora del proceso de producción. Por su labor tendría dos salarios mínimos y medio más prestaciones respectivas.
- ◆ 1 jefe de mantenimiento encargado de supervisar y controlar las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo y la conexión de maquinarias, instalaciones eléctricas, electrónicas, edificios y equipos de fabricación; supervisar la ejecución y cumplimiento del cronograma de mantenimiento preventivo para evitar perjudicar la

operatoria normal de trabajo; controlar el trabajo realizado por terceros. Por su labor tendría dos salarios mínimos más prestaciones respectivas.

- ◆ 2 técnicos de mantenimiento encargados de realizar las tareas técnicas de mantenimiento preventivo y correctivo en máquinas y equipos mecánicos, hidráulicos, neumáticos, eléctricos, electrónicos, identificar fallas, reemplazar y/o reparar las piezas y componentes necesarios. Trabajar bajo supervisión directa. Poseer conocimientos para resolver problemas simples en el área. Por su labor tendrían un salario mínimo y medio más prestaciones respectivas.
- ◆ 3 técnicos de laboratorio encargados de brindar asistencia y apoyo al encargado del área. Preparar material, poner a punto y llevar a cabo ensayos, tomar mediciones e informar sobre los resultados. Asesorar de forma técnica en procedimientos, documentación, control del cumplimiento de normas internas y demás actividades que este requiera. Por su labor tendrían 1,8 salarios mínimos más prestaciones respectivas.

5.1.3.b Energía eléctrica, combustible y agua. Estos costos tienen un componente fijo (iluminación, calefacción, etc.) y otro variable que está directamente relacionado con el nivel de producción. Para esto se registra que la energía eléctrica tiene un valor de 120 USD por 1 MWh, el galón de combustible tiene un valor de 2,25 USD y por consumo mayor a 20 m³ al menos tiene un valor de 0,16 USD.

5.1.3.c Mantenimiento. Se considera el 2% del valor total de los equipos.

5.1.3.d Imprevistos y varios. Corresponde un 0,01% del total de materiales y mano de obra directa, es un cargo fijo.

5.1.4 Costos de administración y comercialización

5.1.4 a Mano de Obra (personal). En esta categoría se contemplan los sueldos de los empleados del sector de administración y comercialización.

En este caso se requieren:

- ◆ 1 gerente general que es el encargado de la gestión estratégica, dirigiendo y coordinando a las distintas áreas para asegurar la rentabilidad, competitividad, continuidad y sustentabilidad de la empresa, cumpliendo con los lineamientos

estratégicos del directorio y las normativas y reglamentos vigentes. Por su labor tendría cuatro salarios mínimos más prestaciones respectivas.

- ◆ 1 jefe de administración, finanzas y recursos humanos, el cual tendrá la función de radicar en organizar y supervisar la ejecución de las tareas administrativas y las operaciones financieras de la compañía. También es el encargado de desarrollar y administrar las actividades de Recursos Humanos tales como reclutamiento, selección, programas de capacitación y desarrollo del personal, compensaciones y beneficios, relaciones laborales y administración de personal. Representa a la compañía ante el Ministerio de Trabajo, los gremios, los tribunales laborales y otras entidades oficiales. Por su labor tendría dos salarios mínimos y medio más prestaciones respectivas.
- ◆ 2 administradores cuya responsabilidad será realizar actividades administrativas, como separación y clasificación de documentos, correspondencia, transcripción de información y registros y proveer información y organizar archivos de acuerdo con los procesos y rutinas. Por su labor tendrían un salario mínimo y medio más prestaciones respectivas.
- ◆ 6 encargados de seguridad los cuales serán responsables de llevar el registro de las personas/transporte que ingresa y egresa de la planta. Además, deben asegurar la seguridad y el resguardo de las instalaciones, en caso de alguna situación fuera de lo normal debe informar a su superior. Por su labor tendría un salario mínimo más prestaciones respectivas.
- ◆ 2 jefe de ventas y logística cuya responsabilidad será planificar, coordinar y controlar las actividades de ventas para optimizar el volumen vendido y desarrollar el potencial del mercado. Busca cumplir con las metas de ventas establecidas por la compañía. Además, planificar, coordinar y gestionar las actividades de abastecimiento y logística, incluyendo materiales, almacenamiento, niveles de inventario y compras, suministrando en tiempo y forma los insumos requeridos y distribución de los productos elaborados por la compañía, bajo condiciones de calidad, costo y entregas óptimas. Por su labor tendría dos salarios mínimos y medio más prestaciones respectivas.

- ◆ 2 auxiliar de ventas cuya función será brindar asistencia al gerente de ventas y logística, colaborando en todas las tareas adjudicadas a estos, como la administración de información del área, registros de inventarios, insumos, productos. Por su labor tendría un salario mínimo más prestaciones respectivas.

5.1.4 b Gastos de comercialización. Se estiman como un 20% de los gastos de mano de obra.

5.1.4 c Gastos de comunicación. Abarca los costos de telefonía e internet de la planta con un valor de 33,25 USD junto con los gastos de telefonía del personal jerárquico con un valor de 15,96 USD.

5.1.4.d Seguros. Se considera un 0,5% los equipos cuyo valor corresponde a 1.005.869 USD.

Tabla 27.*Costos del proceso*

Concepto	Costo fijo	Costos variables	Costo total
	\$ col	\$ col	\$ col
COSTO DE INVERSIÓN			
Maquinaria + instalación	4.537.755.360		4.537.755.360
Muebles y enseres	19.466.039		19.466.039
Equipos auxiliares	3.165.583.478		3.165.583.478
Instrumentación y control	378.146.280		378.146.280
Ingeniería y supervisión	60.503.996		60.503.996
TOTAL	8.161.455.153		8.161.455.153
COSTO DE PRODUCCIÓN			
Materia primas e insumos		215.537.256	215.537.256
Mano de obra directa		86.346.311	86.346.311
Gastos de fabricación			
Mano de obra indirecta	205.595.800		205.595.800
Energía eléctrica	3.629	1.302.877	1.306.506
Combustibles	8.500	6.111.500	6.120.000
Agua	12.347	14.470.933	14.483.280
Mantenimiento	75.629.256		75.629.256
Imprevistos y varios	21.554		21.554
TOTAL	281.271.085	323.768.877	605.039.962
COSTOS ADMINISTRATIVO Y COMERCIALIZACIÓN			
Personal	70.974.051		70.974.051
Gastos de comercialización	17.269.262		17.269.262
Comunicaciones	1.860.000		1.860.000
Seguros	18.907.314		18.907.314
TOTAL	109.010.627		109.010.627
TOTAL	8.551.736.866	323.768.877	8.875.505.743

Nota. En la presente tabla se evidencia los costos asociados a la producción de furfural a partir de bagazo de caña y sus respectivos valores. Elaboración propia.

5.2 Discusión de resultados

Generalmente, por Contabilidad de Costos se entiende cualquier técnica o mecánica contable que permita calcular lo que cuesta fabricar un producto o prestar un servicio. Se le considera un subsistema de la contabilidad general, al que le corresponde la manipulación detallada de la información pertinente a la fabricación de un producto, para la determinación de su costo final.

En el análisis de costos de este capítulo se hizo uso del trabajo de Fernandez Blazich y compañeros (29), el cual sirvió de base para el cálculo de estos, por lo que de este se toman las heurísticas que emplean en su respectivo cálculo de costos. Los cambios que se realizaron corresponden a valores analizados e investigaciones realizadas y adaptadas al peso colombiano.

Para el desarrollo de este capítulo se realizó una exhaustiva revisión a proveedores para establecer los precios correspondientes a los equipos, muebles, equipos auxiliares y materia prima. Además de otros datos necesarios como servicios públicos y servicios indirectos como instalaciones, estudios de ingeniería.

Entre lo mencionado también se realizó un análisis de la organización de la empresa en cuanto a áreas, departamentos y funciones con el fin de tener una idea más aterrizada en cuanto al personal necesario. Para este análisis se consideran tres turnos de ocho horas, completando veinticuatro horas por seis días de la semana.

Con lo anteriormente mencionado se estima que el costo para el montaje de la planta y su funcionamiento será de ocho mil, ochocientos setenta y cinco millones, quinientos cinco mil setecientos cuarenta y tres pesos colombianos (\$ 8.875.505.743Col) aproximadamente.

6. CONCLUSIONES

Luego de realizar el presente trabajo la planta de producción de furfural a partir de bagazo de caña de azúcar es factible tanto desde el punto de vista técnico y operacional.

El furfural pertenece a un mercado con una demanda en crecimiento, sobre todo en el mercado internacional. También es de reconocer que al utilizarse como materia prima el bagazo de caña el cual es un desecho de una industria de gran tamaño, no solo se genera un beneficio medioambiental al darle un uso, sino que también su costo es considerablemente menor que el de una materia prima.

Con el diseño conceptual se determinó la factibilidad técnica de elaborar furfural en Colombia, desde la simulación de los procesos nos permite recrear escenas de trabajo de la vida cotidiana en los procesos y ver la ocurrencia de fenómenos, el comportamiento de las variables del proceso y así trazarnos políticas para su solución. Con lo anterior se logra obtener un rendimiento del 99%, correspondiendo con el rendimiento teórico, lo que confirma que el proceso muestra resultados consistentes y similares con los autores de referencia.

Se logró establecer requerimientos de maquinarias, equipos, mano de obra, aspectos organizacionales y demás consideraciones pertinentes bajo un enfoque ingenieril. Así se obtuvo, por ejemplo, como resultado de la simulación se determinó una capacidad instala de 41.328 toneladas/año de furfural, considerando que se obtienen alrededor de 7 toneladas/hora, se trabajaría 24 horas diarias, durante los 246 días laborales teniendo en cuenta que es un proceso semi batch.

En lo referente a los procesos productivos, se verificaron las mejores posibilidades de lograr ventajas que contribuyen a su vez a ser eficientes y lograr un aceptable desempeño del proceso de producción técnicamente hablando.

Las maquinarias y equipos en relación con los procesos seleccionados fueron ajustados y acomodados de acuerdo a las necesidades que representaron los procesos mismos, diversas alternativas fueron evaluadas para seleccionar por último la que rindiera mejores resultados con relación a la simulación.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L.V. Peñaranda, S. P. Montero y P. A. Giraldo “Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia”, *rev.investig.agrar.ambient.*, vol. 8, no. 2, pp. 141 - 150, jun. 2017.
- [2] H. Hernández, J.Orduz, H. Zapata, M. Cardona y M. Ortega “Atlas del potencial energético de la Biomasa residual en Colombia” SIAME, Anexo A, 2008.
- [3]] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corporativo Colombia Internacional CCI,2006.http://www.cci.org.co/cci/cci_x/scripts/home.php?men=8&con=60&idHm=2&opc=99.
- [4] H. Gebre, K. Fisha, T. Kindeya y T. Gebremichal, “Synthesis of furfural from bagasse”, *rev. ILCPA*, Vol.5, pp. 72-84, 2015.
- [5] G. Vargas, “cultivo de caña de azúcar”, Informe, Instituto de educación superior tecnológico Chocope, 2015.
- [6] R. K Cury, M. Y. Aguas, M. A. Martinez, V, R. Olivero y L. Chams, “Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento”, *RECIA*, vol.9, No. S1, pg.122 -132, 2017.
- [7] Asocaña, “Sector Agroindustrial De La Caña”. Sector agroindustrial de la caña .[En Línea]. Disponible: <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>
- [8] A. P Becerra . Evaluación de la sustentabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar en el Valle del Cauca Colombia a partir del Análisis de Ciclo Vida, tesis Maes. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, 2016.
- [9] Asocaña, El Sector Azucarero Colombiano En La Actualidad, [Online]. Available: <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>
- [10] F. R. Amaya y O. D. Flores. *Estudio de ingeniería sostenible para la obtención de furfural como subproducto de la agroindustria del maíz*”, Tesis de pre, facultad de ingeniería y arquitectura, escuela de ingeniería química, U. salvador, San salvado, 2011.
- [11] R. Mariscal, P. Maireles, M. Ojeda, I. Sadaba y M. López,” Furfural: A renewable and versatile platform molecule for the synthesis of chemicals and fuels” *Energy Environ. Sci*, vol.9, No. 4, pg. 1144-1189, 2016.

- [12] R. Karinen, K. Vilonen, M. Niemelä, “Biorefining: heterogeneously catalyzed reactions of carbohydrates for the production of furfural and hydroxymethylfurfural”, *ChemSusChem*, vol.4, No.8, pg.1002–1016, 2011.
- [13] I. Agirrezabal-Telleria, A. Larreategui, J. Requies, M.B. Güemez y P.L.Arias, “Furfural production from xylose using sulfonic ion-exchange resins (Amberlyst) and simultaneous stripping with nitrogen”, *Bioresour. Technol*, vol.102, No.16, pg.7478–7485, 2011.
- [14] J. Lee, Y. Kim, I. Hwang, N. Park, Y. Hwang, J. Chang y J. Hwang, “Furfural: Hemicellulose/xylose-derived biochemical”, *Biofpr*, vol.2, No. 5, pg. 438-454, 2008.
- [15] R. E. Delgado. *Estudio de factibilidad técnico- económica- financiera para la industrialización del furfural como subproducto de la cosecha del maíz*. Tesis de pre. Facultad de ingeniería y arquitectura, escuela de ingeniería química, U. salvador, San salvador, 2017.
- [16] D. M. Aguilar. *Producción de etanol a partir de bagazo de caña panelera mediante un sistema híbrido de fermentación y pervaporación*. Tesis Magis. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2011.
- [17] L. Canilha, A. K. Chandel, T. S. dos Santos, F. A. Fernandes, W. L. da Costa, M. das Gracias y S. da Silva, “Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation”, *JBB*, Vol. 2012, 15 pages, doi:10.1155/2012/989572.
- [18] J. R. Ferrer et al. “Cinética de la hidrólisis ácida de bagacillo de caña de azúcar”. *Fac. Agron.*, vol.19, n.1, pp.23-33, ene, 2002 Caracas, [En línea] Disponible: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182002000100003&lng=es&nrm=iso
- [19] G. Cabrera et al. “Caracterización del gas de síntesis obtenido a partir de algarrobo y bagazo de caña”. *BSAA*, vol.10, n.1, pp.166-172, ene, 2012, [En línea] Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117721>
- [20] I. Almeida et al. “Sugarcane bagasse pellets: Characterization and comparative analysis”. *actascitechnol*, vol.39, n.9, pp.461, sep, 2017, [En línea] Disponible: doi:10.4025/actascitechnol.v39i4.30198
- [21] L. Faba, E. Diaz y S. Ordóñez,” Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación”, *Madera y Bosques*, vol. 20, núm. 3, pp. 11-24, 2014. [En línea] Disponible: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61732732002>

- [22] G. Marcotullio, *The Chemistry and Technology of Furfural Production in Modern Lignocellulose-Feedstock Biorefineries*, Tesis Doct, Facultad de ingeniería, Universidad Tecnológica de Delft, L'Aquila, Italia, 2011.
- [23] J. M. Rubio, *Valorización de biomasa mediante catálisis heterogénea: producción de biodiésel y furfural*, Tesis Doct, Facultad de ciencias, Universidad de Malaga, Malaga, España, 2014.
- [24] C. M. Cai et al, "Integrated furfural production as a renewable fuel and chemical platform from lignocellulosic biomass", *SCI*, vol. 89, núm. 1, pp. 2-10, 2013, DOI 10.1002/jctb.4168.
- [25] K. J. Zeitsch. *The chemistry and technology of furfural and its many by-products*, volume 13 of Sugar Series. Elsevier, 2000.
- [26] J. F. L. Silva et al. "Integrated furfural and first generation bioethanol production: process simulation and technoeconomic análisis", *RBIQ*, vol. 34, núm. 3, pp. 623-634, 2017, Doi.org/10.1590/0104-6632.20170343s20150643
- [27] L. Žilnik et al. "Study of the influence of pey process parameters on Furfural production", *ACS*, vol, 63, núm. 2, pp. 298–308, 2016, DOI: 10.17344/acsi.2016.2232
- [28] A. S. Antón y A. G. Torres, *Determinación de la cinética de reacción del proceso de obtención de furfural a partir de cascarilla de arroz mediante aspen plus*, Tesis pre, facultad de ingeniería química, Universidad de guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2020.
- [29] A. Fernández, V. Pastore, F. Rodríguez, *Producción de furfural*, Proyecto final, facultad regional resistencia de ingeniería química, Universidad tecnológica nacional, Resistencia, Argentina, 2019.
- [30] Z. Fang, R. L. Smith, X, Qi. *Production of Platform Chemicals from Sustainable Resources*, volumen 7 of *Biofuels and Biorefineries*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2017.
- [31] I. N. Odarley, *Comparative kinetic analysis of furfural production from xylan and xylose*, Tesis Mas, Facultad de ingeniería, Universidad de Stellenbosch, Sudáfrica, 2019.
- [32] O. Gómez. *Simulación del proceso tecnológico de obtención de etanol a partir de bagazo de caña utilizando el software Hysys*, Tesis pre, Facultad química - farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Cuba, 2009.

- [33] Dr. Ángel Delgadillo. (05 de noviembre de 2019). Fundamentos y modelado de molienda en molinos de bolas. [Archivo de Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=aGLc0kU2P9E>
- [34] M. Aravindhhan et al. *Production of furfural from sugarcane bagasse & experimental studies on microchannel reactor*. Tesis tec, Departamento de ingeniería química, Escuela de ingeniería de Kongu, India, 2017
- [35] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021 [PDF].

GLOSARIO

Agroindustria: es la actividad económica que comprende la producción, industrialización y comercialización de productos agropecuarios, forestales y biológicos. Esta rama de industrias se divide en dos categorías, alimentaria y no alimentaria, la primera se encarga de la transformación de los productos de la agricultura, ganadería, pesca, en productos de elaboración para el consumo alimenticio, en esta transformación se incluye los procesos de selección de calidad, clasificación (por tamaño), embalaje-empaque y almacenamiento de la producción agrícola, a pesar que no haya transformación en sí y también las transformaciones posteriores de los productos y subproductos obtenidos de la primera transformación de la materia prima agrícola. La rama no-alimentaria es la encargada de la parte de transformación de estos productos que sirven como materias primas, utilizando sus recursos naturales para realizar diferentes productos industriales.

Aldehído: los aldehídos son compuestos orgánicos caracterizados por poseer el grupo funcional -CHO (formilo). Un grupo formilo es el que se obtiene separando un átomo de hidrógeno del formaldehído. Como tal no tiene existencia libre, aunque puede considerarse que todos los aldehídos poseen un grupo terminal formilo. Los aldehídos se denominan como los alcoholes correspondientes, cambiando la terminación -ol por -al. Etimológicamente, la palabra aldehído proviene del latín científico alcohol dehydrogenatum (alcohol deshidrogenado).

Bagazo: residuo de materia después de extraído su jugo.

Biomasa: la biomasa es la utilización de la materia orgánica como fuente energética. Por su amplia definición, la biomasa abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.

Destilación: es una técnica de separación de sustancias que permite separar los distintos componentes de una mezcla.

Estequiometría: «la estequiometría es la ciencia que mide las proporciones cuantitativas o relaciones de masa de los elementos químicos que están implicados (en una reacción química)».

Furfural: el compuesto químico furfural es un aldehído industrial derivado de varios subproductos de la agricultura, maíz, avena, trigo, aleurona, aserrín.

Hemicelulosas: son heteropolisacáridos (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero), formado, en este caso un tanto especial, por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces β (1-4)(fundamentalmente xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa y ácido glucurónico) , que forman una cadena lineal ramificada. Entre estos monosacáridos destacan más: la glucosa, la galactosa o la fructosa. Forma parte de las paredes de las células vegetales, recubriendo la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo el enlace de pectina.

Pentosanos: cualquiera de los compuestos que, por hidrólisis, proceden de las pentosas.

Pentosas: las pentosas son monosacáridos (glúcidos simples) formados por una cadena de cinco átomos de carbono que cumplen una función estructural. Como los demás monosacáridos aparecen en su estructura grupos hidroxilo (OH). Además, también pueden llevar grupos cetónicos o aldehídicos. La fórmula general de las pentosas es $C_5H_{10}O_5$.

Reactor químico: es un equipo en cuyo interior tiene lugar una reacción química, estando éste diseñado para maximizar la conversión y selectividad de la misma con el menor coste posible. Si la reacción química es catalizada por una enzima purificada o por el organismo que la contiene, hablamos de biorreactores. El diseño de un reactor químico requiere conocimientos de termodinámica, cinética química, transferencia de masa y energía, así como de mecánica de fluidos; Balances de materia y energía son necesarios. Por lo general se busca conocer el tamaño y tipo de reactor, así como el método de operación, además en base a los parámetros de diseño se espera poder predecir con cierta certidumbre la conducta de un reactor ante ciertas condiciones.

Xileno: es un polisacárido constituido por una cadena lineal de residuos de xilosa y diversas ramificaciones y sustituciones; además es el polisacárido más abundante después de la celulosa.

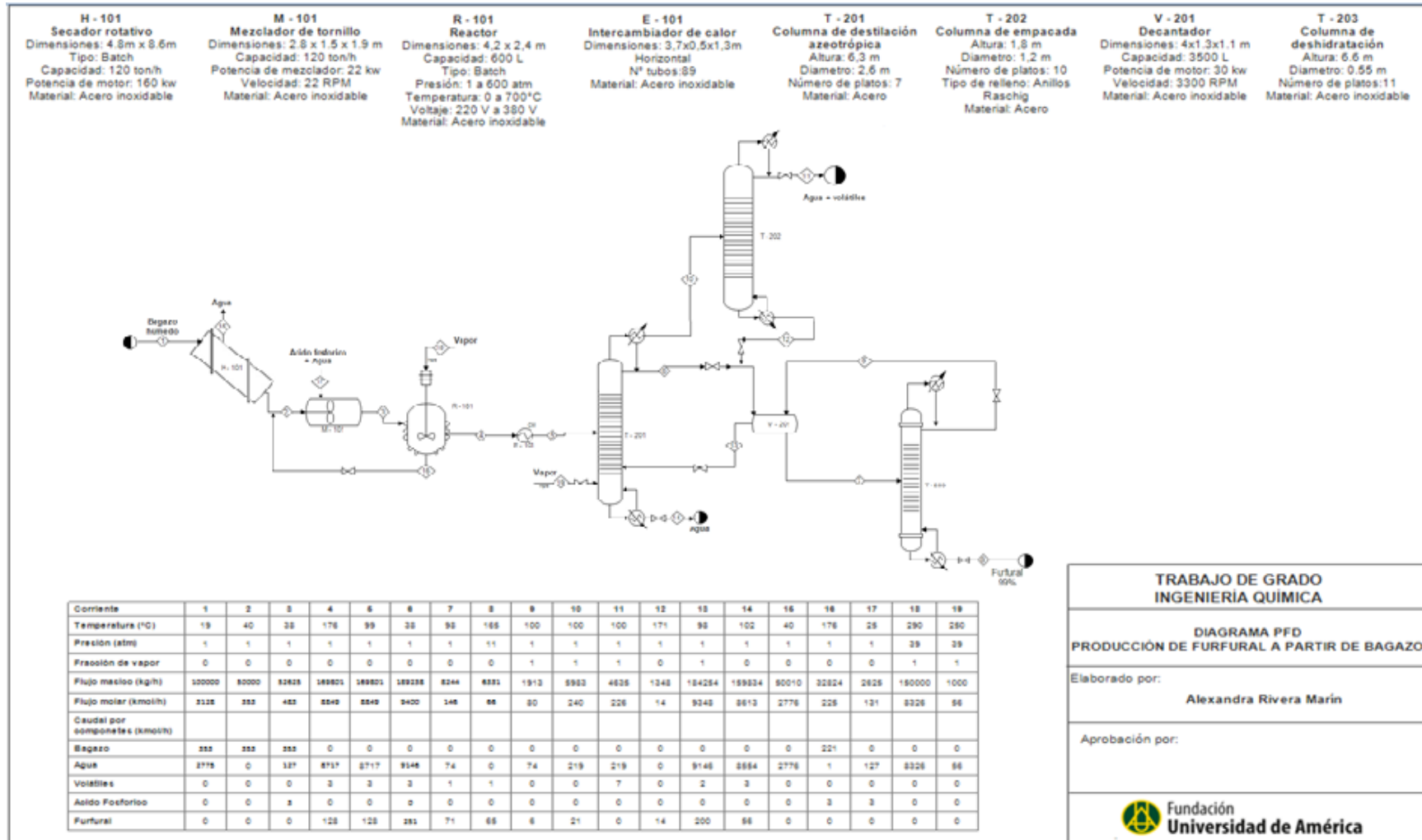
Xilosa: es un monosacárido de cinco átomos de carbono que posee un grupo funcional aldehído, por lo que se clasifica, junto con otros azúcares relacionados como la ribosa y la arabinosa, dentro del grupo de las aldopentosas.

ANEXOS

ANEXO 1

Figura 14.

Diagrama PFD para la producción de furfural a partir de bagazo de caña - Anexo



Nota. Representación gráfica de la simulación de la planta de producción de furfural con normas de diagrama PFD.

ANEXO 2

Figura 15.

Ficha técnica del furfural

IDENTIFICACION DE LA SUSTANCIA O DEL PREPARADO	
SINONIMOS	2-FURALDEHIDO
No. CAS	98-01-1
No. Índice CE	605-010-00-4
No.EINECS	202-627-7
No.RTECS	LT7000000
CODIGO NFPA	3-2-0
Masa molecular	96.09
Formula química	C ₅ H ₄ O ₂
USO DE LA SUSTANCIA O PREPARADO	
AGENTE DE AROMATIZACION COMBUSTIBLE: ADITIVO PRODUCTO FARMACEUTICO: MATERIA PRIMA MATERIA PRIMA QUIMICA AGENTE DE IMPREGNACION SOLVENTE	
IDENTIFICACION DE LOS PELIGROS	
NOCIVO EN CONTANTO CON LA PIEL TOXICO POR INHALACION Y POR INGESTION IRRITA LOS OJOS Y LAS VIAS RESPIRATORIAS POSIBLES EFECTOS CANCERIGENOS	
MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO	
MANIPULACION	-EVITAR/LIMITAR LA EXPOSICION Y/O EL CONTACTO -CONEXIÓN A TIERRA DE APARATOS - NO TIRAR LOS RESIDUOS A LA ALCANTARILLA - RETIRAR DE INMEDIATO DE ROPA CONTAMINADA - LIMPIAR LA ROPA CONTAMINADA
ALMACENAMIENTO	-MANTENER EL RECIPIENTE BIEN CERRADO - CONSERVAR PROTEGIDO DE LA LUZ - VENTILACION A NIVEL DEL SUELO - SE NECESITA UNA CUBETA PARA RECOGER DERRAMES LIQUIDOS - CONSERVAR ALEJADO DE: FUENTES DE CALOR, MATERIALES COMBUSTIBLES, AGENTES DE OXIDACION, ACIDOS, BASES
Temperatura de almacenamiento	20 °C
TIEMPO LIMITE DE ALMACENAMIENTO	N.E.
RECIPIENTE (SELECCIÓN DEL MATERIAL)	-APROPIADO: acero, acero inoxidable, aluminio, hierro -A EVITAR: MATERIA SINTETICA
ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD	
CONDICIONES QUE DEBEN EVITARSE/REACTIVIDAD:	- Inestable en exposición a la luz - Inestable al aire
MATERIAS QUE DEBEN EVITARSE	- Conservar alejado de: Fuentes de calor, materias combustibles, agentes de oxidación, ácidos, bases, materia sintética.

Nota. Ficha técnica del furfural en la que se especifican a detalle características y/o funciones de este producto. Tomado de: R. E. Delgado. *Estudio de factibilidad técnico- económica- financiera para la industrialización del furfural como subproducto de la cosecha del maíz.* Tesis de pre. Facultad de ingeniería y arquitectura, escuela de ingeniería química, U. salvador, San salvado, 2017. [En Línea] <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12918/>

ANEXO 3

Figura 16.

Presión atmosférica en Cauca y Valle del cauca


CodigoEst...	CodigoSe...	FechaObs...	ValorObse...	NombreEs...	Departame...	Municipio	ZonaHidro...	Latitud	Longitud	Descripcio...	UnidadMe...
0054077210	0255	2006 Jan 03 03...	1.014,8	JUANCHACO -...	VALLE DEL CA...	BUENAVENTU...	SAN JUÁN	3,925147222	-77,34900556	Presión Atmosf...	HPa
0053045040	0255	2011 May 19 0...	1.011,7	AEROPUERTO...	CAUCA	GUAPI	TAPAJE - DAG...	2,574416667	-77,89475	Presión Atmosf...	HPa
0053045040	0255	2006 Jan 05 01...	1.011,4	AEROPUERTO...	CAUCA	GUAPI	TAPAJE - DAG...	2,574416667	-77,89475	Presión Atmosf...	HPa
0053045040	0255	2018 Feb 06 11...	1.010,8	AEROPUERTO...	CAUCA	GUAPI	TAPAJE - DAG...	2,574416667	-77,89475	Presión Atmosf...	HPa
0057025020	0255	2016 Jun 22 03...	1.016,3	GORGONA GU...	CAUCA	GUAPI	GUAVIARE	2,963	-78,174	Presión Atmosf...	HPa
0026075150	0255	2015 Jan 28 04...	907,3	APTO ALFONS...	VALLE DEL CA...	PALMIRA	CAUCA	3,533	-76,382	Presión Atmosf...	HPa
0057025020	0255	2007 Aug 28 01...	1.010,1	GORGONA GU...	CAUCA	GUAPI	GUAVIARE	2,963	-78,174	Presión Atmosf...	HPa
0026095320	0255	2018 Nov 14 0...	905,2	EL VINCULO - ...	VALLE DEL CA...	BUGA	CAUCA	3,834805556	-76,30000556	Presión Atmosf...	HPa

Nota. Tabla con información de presiones atmosféricas en el valle del cauca, estas fueron necesarias para asignar presiones en el procesó. Tomado de: Portal Único del Estado Colombiano, Datos abiertos Colombia (GOV.CO). “Presión atmosférica”, [En línea]. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Presi-n-Atmosf-rica/62tk-nxj5/data>

ANEXO 4

Figura 17.

Costo del bagazo de caña - Anexo



Precio estimado de celulosa de bagazo de caña de azúcar 3000 COP / Kilogramos
para 0 0 / Única vez. Condiciones: manizales, Colombia
Un usuario de QuimiNet.com Fecha de validez: 05-May-2021 a 05-Ago-2021

Nota. Valor comercial del bagazo de caña de azúcar por kilo. Tomado de: QuimeNet.com “Proveedores de venta de bagazo de caña de azúcar”. [en línea]: <https://www.quiminet.com/productos/venta-de-bagazo-de-cana-de-azucar-152353123407/proveedores.htm>

Figura 18.

Costo del Ácido fosfórico al 85% - Anexo

Referencia: **PHAL1000-1GAL**

Ácido fosfórico, grado de laboratorio, 85%, 1 galón. Requiere tarifa de materiales peligrosos.

\$60.00

Cantidad: 1

Añadir a Carrito

 **\$57.00** (Ahorre 5% con autoenvío)

Nota. Valor comercial de Ácido fosfórico por galón. Tomado de: Lab Alley Essential Chemicals. “Ácido fosfórico, grado de laboratorio , 85%. [En línea]: <https://es.laballey.com/productos/%C3%A1cido-fosf%C3%B3rico-85-lab>

ANEXO 5

Figura 19.

Secador - Anexo

Horno rotatorio de pequeña escala de residuos de neumáticos planta de pirólisis de la india

58.000,00 US\$ / Set 1 Set (Pedido mínimo)

Detalles rápidos

Lugar del origen:	Henan, China	Marca:	HUAYIN
Tipo:	Máquina de neumáticos	Condición:	Nuevo
Tipo de máquina d...:	Máquina de reciclaje de neumáticos	Voltaje:	380 V
Dimensión (L*W*H):	2800 MM * 6600 MM	Certificación:	CE ISO SGS
Año:	2019	Garantía:	1 año
Servicio postventa ...:	La instalación de campo y puesta en marcha de la formación	Energía (W):	20KW
Peso:	38TON	Raw material:	Waste Rubber Waste Tire
Final product:	fuel oil ,carbon black , steel wire	Fuels Choice:	Coal Gas Wood Oil
Type:	Batch Model	Cooling model:	Circulating Water
Application:	pyrolysis to crude oil equipment	Work Pressure:	Slightly Negative Pressure
Product name:	Tube furnace rotary kiln small scale waste tire pyrolysis plant ...	Capacity:	5-12T/day
Oil yield:	40~45%		

Nota. Horno rotatorio de uso industrial, con sus respectivas especificaciones técnicas y valor aproximado. Tomado de: Alibaba.com. “Small scale tyre pyrolysis to diesel waste tire pyrolysis plant india”. [En línea] <https://spanish.alibaba.com/product-detail/tube-furnace-rotary-kiln-small-scale-waste-tire-pyrolysis-plant-india-62001019620.html>

ANEXO 6

Figura 20.

Mezclador - Anexo

Mezcladores horizontales de tornillo están diseñados para mezclar los productos alimenticios y productos químicamente activos por el método de la mezcla de paletas forzada. Se utilizan principalmente para mezclar los productos fuertemente mezclados.

Especificaciones técnicas

Modelo del mezclador SGSH	120	280	500	1000	1500	2000
Volumen de la tolva, litros (completo)	120	280	500	1000	1500	2000
Volumen de carga, litros (máx)	40-70	150-200	200-350	350-600	500-1000	750-1200
Rotaciones del mezclador, RPM	28	26,5	24	24	24	22
Tensión, V / Hz.	3-fases 380V 50Hz					
Clases de protección	IP 54 (estándar)					
Potencia de accionamiento del mezclador, kW	2,2-3	4,0-7,5	7,5-11	11-15	15-18	18-22
Largo (mm)	1100	1260	1600	2200	2480	2800
Ancho(mm)	650	800	950	1100	1360	1500
Alto (mm)	1280	1450	1600	1700	1820	1950
Peso (kg)	340	560	840	1520	1840	3240

Modelo del mezclador SGSH	3500	5000	7000	10000
Volumen de la tolva, litros (completo)	3500	5000	7000	10000
Volumen de carga, litros (máx)	1500-2500	1800-3000	3000-4800	3500-7000
Rotaciones del mezclador, RPM	22	22	19,2	22
Tensión, V / Hz.	3-fases 380V 50Hz			
Clases de protección	IP 54 (estándar)			
Potencia de accionamiento del mezclador, kW	22-30	37-45	45-55	55-75
Largo (mm)	3040	3200	3600	3900
Ancho(mm)	1680	1870	1880	1920
Alto (mm)	2150	2260	2480	2840
Peso (kg)	3800	5200	6400	8200

Nota. Mezclador horizontal de tornillo de uso industrial, con sus respectivas especificaciones técnicas. Tomado de: Ele Mash . “Mezclador horizontal de tornillo SGSH” . [En línea]: <https://www.elemash.es/equipo-de-mezclado/mezclador-horizontal-de-tornillo-SGSH>

ANEXO 7

Figura 21.

Reactor - Anexo

Reactor de hidrogenación Tubular Furfural, fabricante personalizado

Precio de referencia FOB: [Obtenga el último precio](#)

8.000,00 US \$ - 30.000,00 US \$ / Juego | 1 Juego / Juegos (Pedido mínimo)

Detalles rápidos

Capacidad :	100ml ~ 70m3	Grado automático :	Semiautomática
Tipo :	Caldera de reacción	Condición :	Nuevo
Video saliente de in...	Si	: Informe de prueba :	Siempre
Tipo de marketing :	Nuevo Producto 2020	Garantía de los co...	1 año
Los componentes ...	PLC, Rodamiento, Caja de cambios, Motor, Recipiente de presi...	Lugar del origen :	Shandong, China
Marca :	Borui	Voltaje :	220V / 380V
Energía (W) :	Personalizado	Dimensión (L * W * ...)	Personalizado
Peso :	Diseño	Certificación :	CE ISO
Garantía :	1 año	Servicio postventa ...	Libre de españa, La instalación de campo y puesta en march...
Clave de puntos de ...	Larga vida de servicio	Industrias aplicable...	Material de construcción de tiendas, Planta de fabricación, Ali...
Después de servici...	Video de apoyo técnico, Apoyo en línea, España, Campo de m...	Servicio Local ubic...	Ninguno
Exposición de ubic...	Ninguno	Categoría :	Reactor hervidor de agua
Orden mínima :	1 juego	Certificado de Prod...	ISO CE
Fábrica :	OEM y ODM	Material :	Acero inoxidable hastelloy titanio y níquel inconel tantalio
Presión :	-0.1MPa a 60MPa	Temperatura :	0 °C a 700 °C
Método de calefac...	Calentador eléctrico chaqueta de calefacción de vapor de cal...	Se encuentra :	Weihai, Shandong, China
Nombre del produc...	Fabricante de Furfural Tubular hidrogenación del Reactor		

Nota. Reactor tubular de uso industrial, con sus respectivas especificaciones técnicas y valores aproximados. Tomado de: Tomado de: Alibaba.com. "Reactor de hidrogenación Tubular Furfural, fabricante personalizado". [En línea] https://spanish.alibaba.com/product-detail/manufacture-custom-furfural-tubular-hydrogenation-reactor-1600253063868.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.29c9617cDGBv3n

ANEXO 8

RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar pruebas experimentales preliminares para obtener resultados confiables en la reacción de producción de furfural y realizar un diseño de planta detallado y completo con el fin de obtener información más concreta y relevante para una futura estructuración de la planta de furfural.

Se recomienda realizar un estudio de investigación encaminado al aprovechamiento de otras materias primas alternativas

Se recomienda hacer un plan de implementación para determinar la posibilidad de implementar la planta de furfural en Colombia .

En lo referente a las maquinarias y equipos seleccionados, mismos que surgieron en base a los requerimientos de los procesos productivos, se menciona que estas a bien podrían ser utilizadas para la elaboración de otros tipos de productos (alcohol furfurilico). Esto en relación de que además aprovechar óptimamente tales activos.