

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA CARRERA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

Proyecto de investigación previo a la obtención del título de:

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

TEMA

**DISEÑO *IN SILICO* DEL PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA
OBTENCIÓN DE ETANOL CARBURANTE CON HIDRÓLISIS
ENZIMÁTICA DEL BAGAZO DE CAÑA EN LA PROVINCIA DE
PASTAZA.**

AUTORA

GLADYS MARÍA CASCO MÉNDEZ

DIRECTORES

AMAURY PÉREZ MARTÍNEZ

KAREL DIÉGUEZ SANTANA

PUYO-PASTAZA-ECUADOR

2018

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo Gladys María Casco Méndez, bajo juramento declaro que el trabajo aquí descrito es de mi total autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en el presente documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Universidad Estatal Amazónica de la provincia de Pastaza, según lo establecido en la ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y normativa Institucional vigente.

Gladys María Casco Méndez

C.I. 1003656517

CERTIFICADO DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

Por medio del presente, nosotros Amaury Pérez Martínez, con el número de cédula 175715076-6 y Karel Diéguez Santana, con número de cédula 175644412-9 de certificamos que la egresada Gladys María Casco Méndez, realizó el trabajo de investigación y desarrollo titulado “DISEÑO *IN SILICO* DEL PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL CARBURANTE CON HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DEL BAGAZO DE CAÑA EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”, previo a la obtención del Título de Ingeniero Agroindustrial bajo nuestra supervisión.

.....
Amaury Pérez Martínez
C.I. 175715076-6

.....
Karel Diéguez Santana
C.I. 175644412-9

DIRECTORES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**ESTE PROYECTO FUE REVISADO Y APROBADO POR EL SIGUIENTE TRIBUNAL
DE SUSTENTACIÓN O GRADO.**

.....
**Dr. Yasiel Arteaga Crespo
PRESIDENTE DE TRIBUNAL**

.....
**Dr. Luis Ramón Bravo Sánchez
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

.....
**Msc. Juan Elías González
MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

2017-2018

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanas que me inspiran a seguir adelante consiguiendo nuevas metas.

A mis familiares, amigos y demás personas que me brindaron su apoyo.

A mis tutores por sus valiosas orientación y paciencia durante el desarrollo de la
investigación.

A mis profesores y compañeros de estudios, gracias por sus valiosas enseñanzas, amistad y apoyo que me permitieron seguir adelante en mi formación profesional.

DEDICATORIA

A Dios, por ser el pilar fundamental en mi vida.

A mis padres Mariano y Lucinda por su amor, confianza y apoyo incondicional que me
brindaron durante la preparación universitaria.

A mis hermanas Tania y Marianita, porque son mi motivación para salir adelante.

---GC---

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES.

El aprovechamiento de los residuos generados de la fabricación artesanal de panela en la provincia de Pastaza requiere de distintos procesos tecnológicos para la obtención de nuevos productos que dinamicen la economía. Para ello, se realizó un estudio de las tecnologías conocidas en la obtención de biocombustible específicamente el etanol. Se seleccionó la tecnología más adecuada para la utilización del bagazo de caña el cual constituye la materia prima alternativa para el desarrollo del proceso tecnológico para la obtención de etanol carburante. Esto se pudo lograr diseñando un modelo computarizado del proceso tecnológico a diferentes capacidades de bagazo y aplicando el método de toma de decisiones a partir de la secuencia de pasos que conforma el diagrama heurístico. Se evaluó la factibilidad del proceso mediante el análisis de indicadores técnicos, económicos y ambientales. Se analizaron varias capacidades de bagazo y a partir de 36 t se reporta el VAN negativo por lo que es un proceso no rentable. Por lo tanto, se buscaron otras capacidades de producción siendo la capacidad de 144 t bagazo que presenta un mayor VAN \$32 333 000, una TIR del 31.3% y el tiempo de retribución es 2.38 años. La capacidad seleccionada es óptima según el análisis de los indicadores dinámicos económicos.

Palabras claves: bagazo de caña, etanol carburante, simulación.

ABSTRACT AND KEYWORDS

The use of the waste generated from the traditional production of panela in the province of Pastaza requires different technological processes to obtain new products that stimulate the economy. For this, a study of the technologies known in the obtaining of biofuel, specifically ethanol, was carried out. The most suitable technology for the use of cane bagasse was selected, which is the alternative raw material for the development of the technological process for obtaining fuel ethanol. This could be achieved by designing a computerized model of the technological process at different bagasse capacities and applying the decision making method based on the sequence of steps that make up the heuristic diagram. The feasibility of the process was evaluated through the analysis of technical, economic and environmental indicators. Several bagasse capacities were analyzed and from 36 t negative NPV is reported, making it a non-profitable process. Therefore, other production capacities were sought, with the capacity of 144 t bagasse, which has a higher NPV \$ 32 333 000, a TIR of 31.3% and the time of retribution is 2.38 years. The selected capacity is optimal according to the analysis of the economic dynamic indicators.

Keywords: sugarcane bagasse, fuel ethanol, simulation.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Problema de investigación	3
1.2. Hipótesis	5
1.3. Objetivos	5
1.4. Justificación	5
CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	7
2.1. Marco conceptual	7
2.2. Materias primas para la producción de bioetanol	9
2.3. Tecnologías para la obtención de etanol	14
2.4. Procedimientos para el diseño de procesos	27
2.5. Marco referencial	29
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	32
3.1. Localización	32
3.2. Tipo de investigación	32
3.3. Métodos de investigación	33
3.4. Fuentes de recopilación de la investigación	34
3.5. Diseño de investigación	34
3.6. Instrumentos de investigación	36
3.7. Tratamiento de datos	36
3.8. Recursos humanos y materiales	36
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Diseño de procesos	38
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
5.1. Conclusiones	57
5.2. Recomendaciones	58
CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA	59
CAPÍTULO VII. ANEXOS	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición física del bagazo.	11
Tabla 2. Composición del bagazo en base seca.	11
Tabla 3. Composición química del bagazo de caña (%).	12
Tabla 4. Pretratamientos para transformar la biomasa lignocelulósica.	16
Tabla 5. Especialidad de las enzimas para degradar la matriz lignocelulósica.	19
Tabla 6. Caracterización de la provincia de Pastaza.	32
Tabla 7. Instrumentos utilizados.	36
Tabla 8. Recursos humanos para el proyecto de investigación.	36
Tabla 9. Recursos materiales para el proyecto de investigación.	37
Tabla 10. Disponibilidad de bagazo.	45
Tabla 11. Indicadores Ambientales.	46
Tabla 12. Disponibilidad vs consumo de bagazo de caña.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de problema.	4
Figura 2. Esquema general de producción de bioetanol.	10
Figura 3. Bagazo de caña.	12
Figura 4. Estructura de los materiales lignocelulósicos.	13
Figura 5. Métodos para la obtención de etanol a partir de maíz, modificado para el bagazo de caña.	15
Figura 6. Reacción de fermentación para la transformación de bioetanol.	20
Figura 7. Separación de componentes.	22
Figura 8. Esquema de destilación.	23
Figura 9. Etapa de rectificación de alcohol.	24
Figura 10. Etapa de deshidratación de alcohol.	25
Figura 11. Condiciones para el proceso de separación.	27
Figura 12. Procedimiento secuencial para el diseño de procesos.	35
Figura 13. Países proveedores de etanol en el 2016.	39
Figura 14. Fuentes de obtención de Bioetanol.	40
Figura 15. Diagrama de Bloque seleccionado en la obtención de etanol carburante.	41
Figura 16. Diagrama de bloques del acondicionamiento de bagazo.	42
Figura 17. Diagrama de bloque para el pretratamiento del bagazo.	42
Figura 18. Diagrama de bloque de la tecnología de producción de Etanol.	43
Figura 19. Costo anual de eliminación de residuos.	48
Figura 20. Costos totales de adquisición de equipos.	51
Figura 21. Costos de operación anual vs las capacidades de bagazo.	53
Figura 22. Análisis del VAN vs las Capacidades de bagazo.	54
Figura 23. Cálculo de la capacidad de bagazo en la que el VAN es cero.	54

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Acondicionamiento de bagazo de caña.....	63
Anexo 2. Pretratamiento del bagazo.....	64
Anexo 3. Producción de Etanol.....	65
Anexo 4. Cantidad de materiales a granel.....	66
Anexo 5. Cantidad del consumo de utilidades.....	66
Anexo 6. Cantidad de residuales.....	67
Anexo 7. Dimensionamiento y Costo de equipos.....	68
Anexo 8. Costo de inversión.....	70
Anexo 9. Costo de operación anual.....	71
Anexo 10. Indicadores dinámicos económicos.....	72

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Estimación de la capacidad de bagazo de caña.....	44
--	----

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Diseñar <i>in silico</i> el proceso tecnológico para la obtención de etanol carburante con hidrólisis enzimática del bagazo de caña en la provincia de Pastaza.			
Autora:	Gladys María Casco Méndez			
Palabras clave:	Bagazo de caña	Etanol Carburante	Simulación	
Fecha de publicación:	21-Febrero-2018			
Editorial				
Resumen:	<p>El aprovechamiento de los residuos generados de la fabricación artesanal de panela en la provincia de Pastaza requiere de distintos procesos tecnológicos para la obtención de nuevos productos que dinamicen la economía. Para ello, se realizó un estudio de las tecnologías conocidas en la obtención de biocombustible específicamente el etanol. Se seleccionó la tecnología más adecuada para la utilización del bagazo de caña el cual constituye la materia prima alternativa para el desarrollo del proceso tecnológico para la obtención de etanol carburante. Esto se pudo lograr diseñando un modelo computarizado del proceso tecnológico a diferentes capacidades de bagazo y aplicando el método de toma de decisiones a partir de la secuencia de pasos que conforma el diagrama heurístico. Se evaluó la factibilidad del proceso mediante el análisis de indicadores técnicos, económicos y ambientales. Se analizaron varias capacidades de bagazo y a partir de 36 t se reporta el VAN negativo por lo que es un proceso no rentable. Por lo tanto, se buscaron otras capacidades de producción siendo la capacidad de 144 t bagazo que presenta un mayor VAN \$32 333 000, una TIR del 31.3% y el tiempo de retribución es 2.38 años. La capacidad seleccionada es óptima según el análisis de los indicadores dinámicos económicos.</p>			
Descripción:	87 hojas dimensiones. 29 x 21 cm + CD-ROM 6162			
URI:				

INTRODUCCIÓN

La abundancia y relativo bajo costo de los materiales lignocelulósicos no aprovechados de la industria azucarera y residuos agroindustriales hacen que estos puedan ser utilizados como materias primas, en la obtención de combustibles energía, eléctrica y otros productos no alimentarios como los biocombustibles de segunda generación, lo que ha motivado a los investigadores a buscar alternativas de pasar de la economía del petróleo al de las fuentes renovables (Llerena Pizarro, Silveira, Silva Paulino, & Galarza Galarza, 2015; Mesa Garriga, González Suárez, Cara Corpas, López Bello, & Castro Galiano, 2012; Ruiz Colorado et al., 2014).

Estudios realizados por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador (CINCAE) reportó que se cosechan anualmente unas 81 000 ha de caña para la producción de azúcar y etanol. Otras 50 000 ha se destinan para la producción de panela y alcohol artesanal (Castillo, 2012). En la provincia de Pastaza actualmente la caña de azúcar y sus derivados representa un rubro importante en la economía zonal, a través del cultivo, procesamiento, transportación y comercialización según datos de la Asociación de Cañicultores de Pastaza- ASOCAP.

La caña de azúcar es la materia prima esencial para el subsector panelero siendo una actividad de la economía donde se elabora panela y miel. La infraestructura, desde el punto de vista energético, es deficiente (Aguilar-Rivera, 2012; Lozano L, 2015). El bagazo constituye el mayor subproducto de la caña. Su utilización no se extiende más allá de ser picado y arrojado sobre el campo de siembra o callejones para su descomposición (Salcedo et al., 2013a). Muchas veces su almacenamiento es prolongado hasta su deterioro.

El etanol se obtiene a partir de la caña de azúcar en países con climas tropicales como Brasil, Colombia, Ecuador e India. En algunos países europeos como Francia se utiliza melazas de remolacha azucarera; en Estados Unidos la materia prima para la producción de etanol es el almidón de maíz (Amezquita Fonseca, 2007).

El bagazo posee polisacáridos de celulosa y hemicelulosa que no son directamente accesibles debido a la fuerte protección de lignina. Por ello se han desarrollado varios tratamientos para hacerlos más susceptibles a la sacarificación o bioconversión. Aplicando los tratamientos físicos, químicos o enzimáticos, por separado o conjuntamente, se posibilita la degradación a azúcares monosacáridos (glucosa, fructosa, xilosa). Que

pueden ser aprovechados en la producción de combustibles de segunda generación, como el bioetanol (Ferrer et al., 2002; Fonseca Santanilla, María, & Vargas, 2006; Ruiz Colorado et al., 2014).

Para la obtención de bioetanol es necesario realizar pre-tratamientos a la biomasa lignocelulósica, para mayor accesibilidad a la superficie celulósica. Estos pre-tratamientos pueden ser físicos, que involucran la reducción de tamaño y la explosión con vapor; químicos, en los que se altera la estructura de la biomasa con disolventes que promueven la degradación de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Biológicos, en los que se emplean determinadas enzimas o microorganismos para degradar las hemicelulosas y ligninas. (Ferrer et al., 2002; Mateus Fontecha, 2011).

A continuación del pretratamiento se aplica el proceso de fermentación de azúcares reductores que contiene principalmente glucosa producto de la degradación de la celulosa, así como xilosa y pentosas provenientes de la hidrólisis de la hemicelulosa. Estos azúcares son fermentados, empleando diferentes clases de microorganismos (bacterias, hongos) que pueden ser selectivos a uno o varios azúcares reductores. De este proceso se obtiene como productos: alcohol etílico y dióxido de carbono (Travaini, Barrado, & Bolado Rodríguez, 2016).

La etapa de destilación permite obtener vapor rico en el componente más volátil (etanol); este se vuelve a destilar y así sucesivamente, hasta que el líquido se va enriqueciendo. En el proceso de rectificación se utilizan columnas de platos para obtener flemas de 90 a 95° GL, es decir, próxima a la azetrópica, que contiene la mayor parte de las impurezas volátiles en el líquido fermentado. Finalmente, para obtener alcohol absoluto de 100 °GL es necesario romper el azeótropo, generalmente se emplea benceno u otros agentes de separación (zeolita, glicoles, gel de *sílice*, etc) para alterar la relación de la tensión de vapor del azeótropo. lo que resulta un proceso complejo (Barroso Casillas, 2010).

El etanol es un biocombustible que puede ser mezclado con gasolina o petróleo principalmente es utilizado como oxigenante para la gasolina. Esto permite una mayor combustión (reacciones de oxidación) de los hidrocarburos y disminuyen las emisiones contaminantes de hidrocarburos no oxidados completamente como el monóxido de carbono(CO) (Lauzurique Guerra, Zamalacárregui de Cárdenas, Pérez Ones, & Molina Rivero, 2017).

CAPÍTULO I. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

1.1.1. Planteamiento del problema.

El bagazo de caña de azúcar abundante en las paneleras de la provincia de Pastaza es la biomasa residual derivada del proceso de molienda de la caña. Para este residuo no existe un aprovechamiento total o parcial como generador de energía, biocombustibles u otros productos de interés industrial. Esto se debe a que no existen fábricas diseñadas para una gran capacidad de almacenamiento o equipos que permitan la conversión del bagazo. Sin embargo, son pocas las paneleras que emplean el bagazo de caña para la combustión, quedando sobrantes de bagazo que son arrojados a la intemperie. Muchas veces se pica y se esparce sobre el campo de siembra, se coloca sobre surcos o calles para su descomposición (Salcedo et al., 2013b) o su almacenamiento prolongado hasta su deterioro.

En el periodo de acumulación durante el almacenamiento, el bagazo no recibe ninguna clase de tratamiento físico o químico por lo que se convierte en un medio óptimo de proliferación de microorganismos de diferentes especies, como se detalla en el árbol de problema de la figura 1. Por este motivo, se ve la necesidad de reutilizar el bagazo para el proceso de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica aplicando pre-tratamiento de hidrólisis enzimática.

1.1.1.1. Diagnóstico.

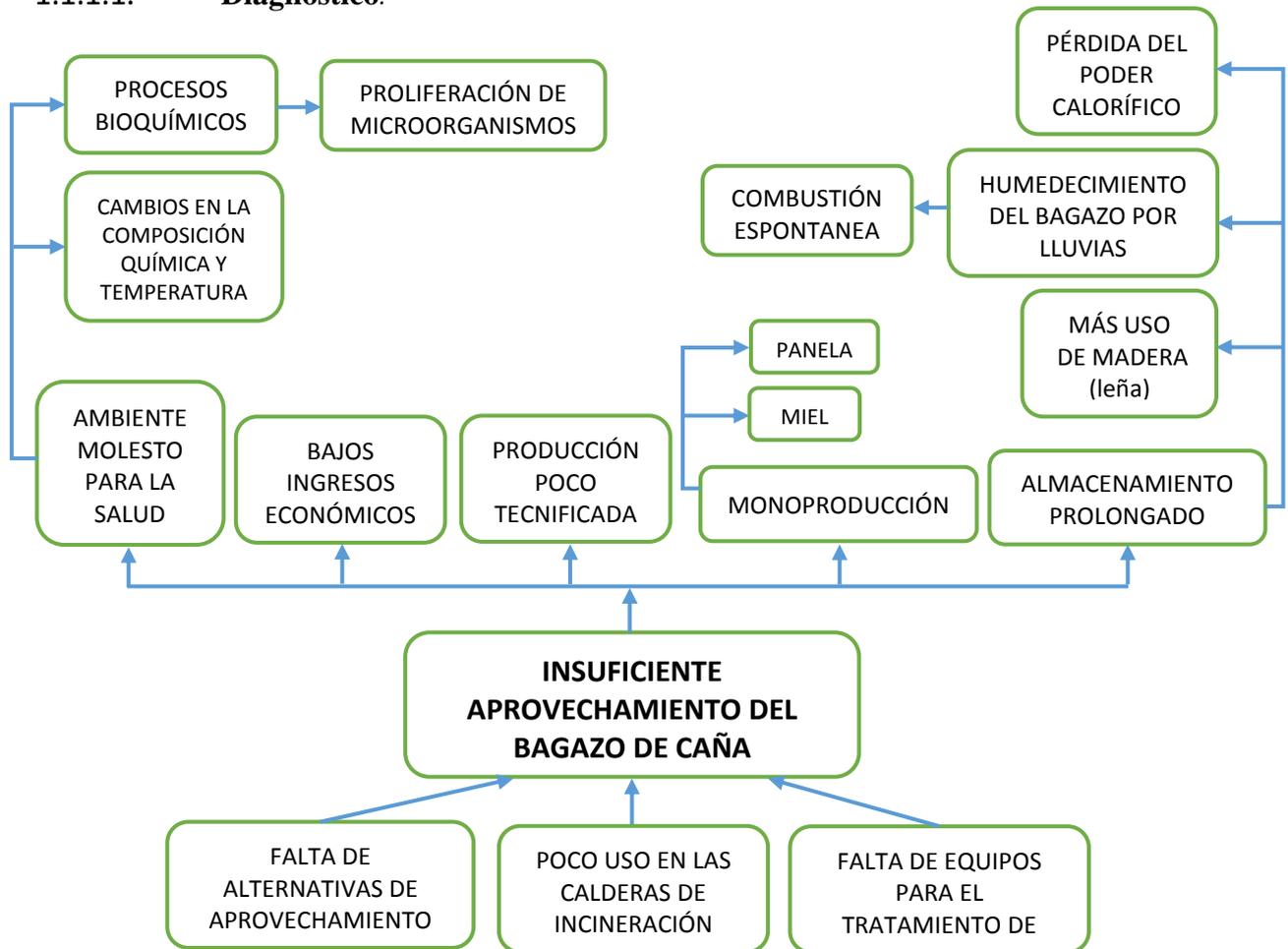


Figura 1. Árbol de problema.

Fuente: Elaboración propia.

1.1.2. Formulación del problema.

¿Cómo se puede aprovechar el bagazo de caña en la obtención de nuevos productos capaces de dinamizar la economía y disminuir el impacto ambiental?

1.1.3. Sistematización del problema

Aprovechar los residuos generados en las paneleras de la provincia requiere del acondicionamiento de la infraestructura y un proceso tecnológico alternativo para la obtención de nuevos productos, factible para su desarrollo tanto económico y ambiental.

¿Cuáles son las alternativas de aprovechamiento del bagazo de caña?

¿Será factible desarrollar procesos tecnológicos alternativos en las paneleras de la provincia?

¿Será factible económico y ambientalmente el proceso tecnológico de obtención de etanol carburante?

1.2. HIPÓTESIS.

¿Es posible aprovechar el bagazo de caña de azúcar para la obtención de etanol carburante en el contexto de Pastaza?

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. Objetivo general.

Diseñar *in silico* el proceso tecnológico para la obtención de etanol carburante con hidrólisis enzimática del bagazo de caña en la provincia de Pastaza.

1.3.2. Objetivos específicos.

1. Caracterizar los procesos de pretratamientos para la hidrólisis del bagazo y la obtención de etanol carburante.
2. Seleccionar la tecnología para la obtención de etanol carburante.
3. Realizar la evaluación técnico-económica y ambiental del diseño *in silico* del proceso tecnológico de obtención de etanol carburante.

1.4. JUSTIFICACIÓN.

El cambio de matriz productiva y energética que impulsa el gobierno actual exige a la academia un nuevo enfoque, basado en obtener productos propios y no sólo exportar materias primas. Bajo esta visión de mercado, se plantea el diseño del proceso tecnológico para la obtención de bioetanol carburante con pretratamiento de hidrólisis ácida, básica y enzimática del bagazo, para que este proyecto en un futuro próximo sea usado principalmente en el aprovechamiento del bagazo generado en las paneleras de la provincia. La diversificación de la agroindustria azucarera comprende el uso alternativo de la caña de azúcar para obtener sacarosa, etanol, entre otros y el aprovechamiento de los subproductos (bagacillo, cachaza, vinazas, otros). En las industrias azucareras el bagazo es usado como combustible en las calderas de los ingenios, para generar electricidad como materia prima en la industria de papel; también para obtener productos de alto valor agregado como productos químicos, metabolitos y etanol celulósico.

Sin embargo, en la provincia de Pastaza actualmente existen fábricas dedicadas a la producción de panela (monoproducción) y destilación de alcohol, actividad que produce gran cantidad de bagazo de caña. Este residuo no es aprovechado en la obtención de nuevos productos que generen un rédito económico adicional a los trabajadores. Tomando en cuenta estos aspectos se podrán determinar los factores necesarios, en el diseño del proceso productivo del etanol proveniente del bagazo para ser usado como biocombustible.

La producción de biocombustibles conlleva a buscar alternativas renovables que reduzcan la dependencia del petróleo. Con el programa “Ecopaís”, desarrollado por el Gobierno nacional, se pretende la sustitución de la gasolina por el etanol carburante. Las ventajas del etanol carburante es que disminuye las emisiones contaminantes (monóxido de carbono y otros gases) normalmente generados por el uso de combustibles fósiles. La obtención de etanol a partir de bagazo servirá como guía para que otras paneleras de la región puedan aplicar un plan para el aprovechamiento del bagazo y disminuir la contaminación ambiental, de esta forma mejorar la calidad de vida.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.

2.1. MARCO CONCEPTUAL.

2.1.1. Caracterización de la industria de etanol en Ecuador.

En el Ecuador los biocombustibles se han definido como un sector estratégico en la nueva matriz productiva del país. La producción de biocombustibles despliega interesantes perspectivas para el desarrollo de la agroindustria con efectos multiplicadores sobre la economía estatal. Esto ha despertado interés y preocupación en sectores de la ciudadanía así como expectativas en grandes y pequeños agricultores (Trávez, 2011).

La cadena energética se acopla a la cadena de productos de origen en la biomasa caña de azúcar, entre otros, se ha identificado el eje agroindustrial que produce jugos de caña, azúcar y destilación de alcohol. Estas actividades están ligadas a los ingenios azucareros y a la industria del alcohol que se promueven a través de centros de investigación (Figuroa de la Vega & Altamonte, 2008).

En el Ecuador existen 110.000 ha de caña de azúcar; 74.100 ha que están destinadas a la producción de azúcar y el resto para la producción de panela. El 20 % se destina a la fabricación de panela y el 80% del área total sembrada en el Ecuador está destinada para la producción de azúcar y alcohol etílico (GADPPz, 2017). La región amazónica representa una producción de 8 272 ha de caña de azúcar; en Pastaza el área cultivada es de 4.500 ha. La producción nacional de panela se estima en rendimientos que van desde el 10 al 15 % (Trávez, 2011).

La producción ecuatoriana de etanol proveniente de caña de azúcar se estima en el orden de 150.000 litros por día. Si el etanol se extrae directamente del jugo de caña de azúcar el rendimiento se estima de 70 litros por tonelada de caña, mientras que la productividad de la caña de azúcar en Ecuador es de 78 toneladas por hectárea de caña. El producto entre el rendimiento y productividad de la caña de azúcar daría un rendimiento de etanol de 5 460 litros por hectárea de caña. La melaza tiene un rendimiento menor de 20 litros por tonelada de caña equivalente a un rendimiento de 1 560 litros por hectárea de caña (Figuroa de la Vega & Altamonte, 2008).

El proyecto nacional de producción de etanol grado carburante es ambicioso ya que busca incorporar 66 000 ha de caña para la producción de etanol y destinar al menos 80 000 ha de caña de azúcar para la producción de alcohol (PROECUADOR, 2013). En el país las

mayores plantas productoras de alcohol son: SODERAL S.A. (producción de etanol anhidro de 99,7° utilizando el sistema de filtros moleculares), CODANA S.A. (produce alcohol etílico extra neutro de 96°) y PRODUCARGO S.A. (producción de alcohol anhidro) que producen 120 000 litros/día (Figueroa de la Vega & Altamonte, 2008).

A partir del año 2010 se implementó en Guayaquil el plan estratégico para la distribución del combustible denominado ‘‘Ecopaís’’. Este es mezclado con gasolina ‘‘Extra’’ (en relación de 95% gasolina extra y 5 % etanol) y en relación al 10% de etanol anhidro objetivos establecidos para los años 2014 a 2018. Las expectativas para el año 2020 es remplazar ‘‘Ecopaís’’ en un 15% de etanol y finalmente reemplazar en su totalidad a la gasolina ‘‘Extra’’. Para alcanzar estos objetivos se requiere contar con 800 a 900 millones de litros de etanol (Decreto Ejecutivo 675, 2015; PROECUADOR, 2013).

En Ecuador no existen leyes o reglamentos que se opongan a la instalación de plantas que puedan procesar biomasa, sean públicas o privadas. Prueba de ello es la existencia de empresas privadas productoras de azúcares, melazas y etanol a partir de la caña de azúcar o de aceites para consumo doméstico provenientes de especies oleaginosas.

2.1.2. Caracterización en Pastaza.

En la Provincia de Pastaza actualmente la caña de azúcar es el principal producto cultivado, en la parroquia Tarqui se localiza la mayor producción de caña con 198.75 ha, seguido por Puyo con 131.35 ha, San José con 91.9 ha y Fátima con 80.35 ha. Se registran cerca de 684 productores dedicados a este cultivo con variedades criollas(GADPPz, 2012). La caña de azúcar participa en las actividades comerciales, con un 30% al mercado del consumo de caña en tallo fresco para los turistas, el 40% se destina a la venta para la producción de Panela y 30% para Aguardiente; de la producción total el 90% de la caña de azúcar es aprovechable y el 10 % corresponde a desperdicios, por falta de vías de comunicación, plagas y enfermedades (Sablón Cossío, Pérez Quintana, Acevedo Suárez, Chacón Guerra, & Villalba Pozo, 2016).

La producción se hace en pequeñas fincas y generalmente está asociada con otros cultivos, hasta el año 2012 en la provincia se reportaban 78 paneleras, localizadas en las parroquias con mayor superficie de producción de caña. Son cincuenta paneleras aproximadamente que forman parte de las asociaciones ASOCAP, APALA y Teniente Hugo Ortiz, para las dos primeras se registró producciones de 162 t/año de panela granulada y 71,82 t de panela en ladrillo y la asociación Teniente Hugo Ortiz produjo alrededor de 43,63 t/año de panela

granulada y ladrillo. También las paneleras comunitarias en diferentes sectores presentaron producciones de panela estimada en 38,2 t/año (GADPPz, 2012).

En la provincia, las variedades de caña que se cultivan son: limeña, pauteña, cubana y puerto rico. La cosecha se realiza permanentemente, debido al continuo cultivo de caña. Generalmente, el acopio de la caña lo realizan en cada finca. El sistema de operación de las paneleras en el procesamiento de la caña, de los cuales se ocupa tres días a la semana para su procesamiento de la panela, dedicándose entre 12 a 16 horas al día. Para producir la panela, el jugo de caña es concentrado a altas temperaturas hasta formar una melaza bastante espesa esta se pasa a los moldes en forma de cubos en los cuales se solidifica (GADPPz, 2017).

En la provincia, a través de las fábricas de panela y 23 destilerías, la transformación de la caña de azúcar permite dar valor agregado con la comercialización como fruta pelada, panela, dulces, jugo de caña y aguardiente. El aguardiente obtenido es de 60°, con un costo de \$ 1.50 a \$ 2.0 y como combustible a un costo de \$0,60 (GADPPz, 2017).

La conversión de la caña después de la molienda para la extracción del jugo permite obtener un residuo fibroso; es el principal residuo presente en las paneleras que se almacenan en la mayoría de los casos a la intemperie. Este tiene una densidad de 200 kg/m³ si esta apilado y 112 kg/m³ suelto, debido a que el bagazo se obtiene con alto porcentaje de humedad en promedio del 50% (Moreno, Rojas L., & Pinto P., 1981).

2.2. MATERIAS PRIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL.

2.2.1. Materias primas convencionales.

El bioetanol se obtiene de forma convencional a partir de dos fuentes principales de materia prima: el maíz y la caña de azúcar (Aburto, Martínez, & Murrieta, 2008). En la producción de bioetanol, la caña de azúcar tiene un rendimiento mucho más alto que el maíz. También se puede producir etanol a partir de cultivos como la papa, la remolacha, la yuca y el sorgo ya que estos contienen carbohidratos que se fermentan y se transforman en alcohol, pero muestran menores rendimientos y muchos de esos cultivos entran en la controversia alimentaria (Figuroa de la Vega & Altamonte, 2008). En la figura 2, se presentan las diversas materias primas que se utilizan en la producción de bioetanol.

En las dos últimas décadas se han llevado a cabo extensas investigaciones respecto a la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos. Principalmente por ser fuentes renovables de bajo costo y abundantemente disponibles. En estos residuos se incluyen los residuos de cosecha (paja de arroz, paja de trigo, paja de maíz, otros), subproductos

agroindustriales (bagazo de caña), hierbas, aserrín, astillas de madera, entre otros (Sarkar, Kumar Ghosh, Bannerjee, & Kaustav, 2012). A través de diversas investigaciones se presentan avances en la evaluación técnico-económica de la producción biotecnológica de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, en particular, del bagazo de caña (Reyes Valadez, Quintana Hernández, Coronado Velasco, & Castro Montoya, 2016).

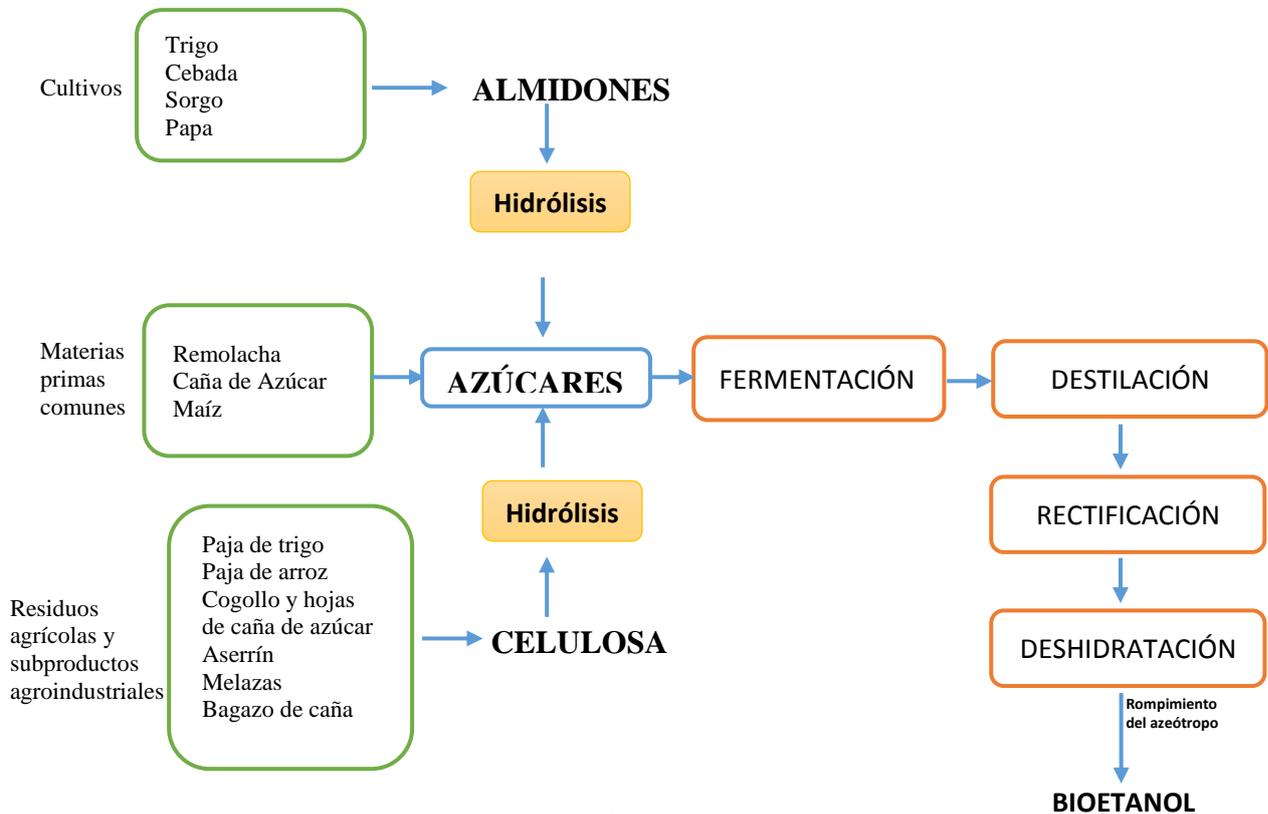


Figura 2. Esquema general de producción de bioetanol.

Fuente:(Rocha Meneses, Raud, Orupöld, & Kikas, 2017).

2.2.2. Subproductos agroindustriales: Bagazo de caña.

En el proceso de molienda se busca separar los dos constituyentes principales de la caña de azúcar: el jugo o guarapo y la fibra (bagazo). La extracción del jugo lleva a cabo mediante un solo paso del tallo en un trapiche artesanal con una eficiencia de hasta el 66% (proporción de los azúcares totales extraídos) o en la molienda industrial al ser pasado el tallo por cuatro o cinco molinos y adicionándose agua de imbibición, se logra aumentar el grado de extracción de los azúcares hasta una proporción del 97 % (Campués Tulcán & Tarupí Rosero, 2011). Usualmente, los molinos están compuestos por tres o cuatro cilindros, mazas horizontales cuyos centros unidos forman un triángulo isósceles (Morales, Kafarov, Ruiz, & Castillo, 2010). En la provincia de Pastaza se realiza la molienda de la caña en trapiche artesanal con una eficacia alrededor de 58% de jugo de caña y 42% de bagazo.

2.2.2.1. Caracterización física del bagazo.

El bagazo de caña de azúcar es un material lignocelulósico obtenido en las centrales azucareras como desecho, representando el 25% del total de la caña de azúcar procesada (Domínguez Domínguez et al., 2011). La granulometría del bagazo depende fundamentalmente del trabajo de los equipos de preparación de la caña y en menor categoría del diseño de los molinos del tándem y de la variedad cañera. En la tabla 1, se muestra que desde el punto de vista físico el bagazo está constituido por cuatro fracciones.

Tabla 1. Composición física del bagazo.

Fracciones	%
Fibra de bagazo	48
Sólidos insolubles	2-3
Sólidos Solubles	2-3
Agua	50

Fuente:(ICIDCA, 2000).

Este residuo está constituido por las fibras de la corteza y fibras cortas del interior del tallo en una sola fracción denominada fibra verdadera o útil, la segunda fracción está formada por la médula o falsa fibra que se ubican en la zona central del tallo y la tercera fracción se compone por finos, tierra y solubles (Vargas Radillo et al., 2015). Para determinar el contenido de fibra y medula del bagazo en la tabla 2, se ha establecido que a la salida del tándem los parámetros son:

Tabla 2. Composición del bagazo en base seca.

Fracción	%
Fibra de bagazo	55 – 60
Medula	30 - 35
Finos tierras y solubles	10 - 15

Fuente: (Melgar, Meneses, Orozco, Pérez, & Espinosa, 2012).

Actualmente, el bagazo es usado parcialmente como fuente para satisfacer las necesidades de energía calórica de las fábricas de panela (Ver figura 3). Sin embargo, se ha demostrado que con mejoras tecnológicas en las calderas es posible satisfacer los requerimientos energéticos de los ingenios con la mitad del bagazo producido. El exceso de bagazo puede ser usado en diferentes aplicaciones, incluyendo la producción de etanol celulósico (Fraguela, Laucerica, Moraes Rocha, Barbosa Soares, & Martín, 2013).



Figura 3. Bagazo de caña.

Fuente: Asociación de Cañicultores de Pastaza 2017.

2.2.2.2. Caracterización química de bagazo de caña.

Las propiedades químicas de un material lignocelulósico como la fibra de caña es una mezcla de celulosa, hemicelulosa y lignina. En la tabla 3, se muestra el porcentaje de cada componente reportado por varios autores. Este porcentaje en el tallo es variable y depende de la variedad de caña, tipo de cultivo, su edad y condiciones de crecimiento, entre otros factores.

Tabla 3. Composición química del bagazo de caña (%).

Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Autor
30 – 50	15 – 35	10 - 20	(Muñoz Muñoz, Pantoja Matta, & Cuatin Guarín, 2014)
38 – 50	17 – 32	15 - 30	(Chandler et al., 2012)
42,8 – 45,0	22 – 35	26 - 32	(Chandel et al., 2012)
45, 5	27	21,1	(Fraguela et al., 2013)
40 – 60	20 – 40	10 - 25	(Rocha Meneses et al., 2017)

Fuente: Elaboración propia.

En los materiales lignocelulósicos, la celulosa y las ligninas están íntimamente ligadas, porque la hemicelulosa actúa como pegamento entre aquellas fracciones (Chandel et al., 2012). En la Figura 4, se representa la estructura compleja y difícil accesibilidad a los componentes que forman a los materiales lignocelulósicos.

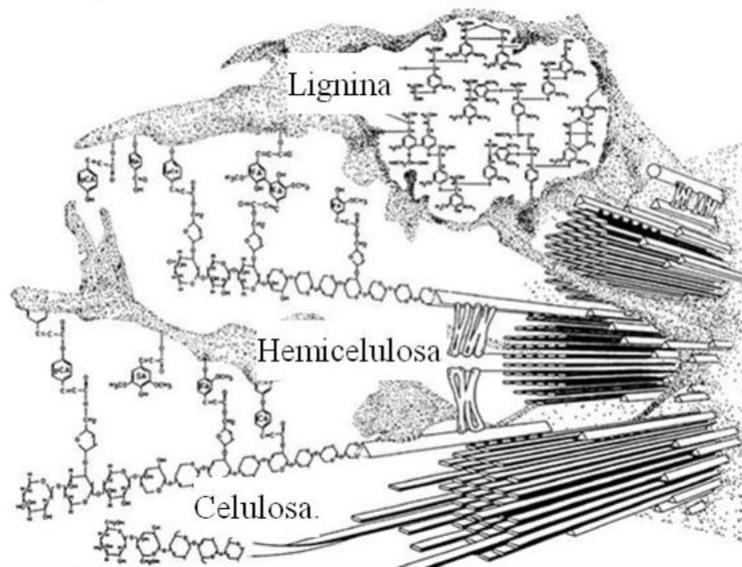


Figura 4. Estructura de los materiales lignocelulósicos.

Fuente: (Bidlack, Malonge, & Benson, 1992).

➤ **Celulosa.**

La celulosa es el polisacárido más común en la naturaleza y consiste en la repetición de unidades de celobiosa. Es un polímero de glucano de unidades de D-glucopiranososa que están unidas por enlaces β (1→4) glucosídicos (Chandel et al., 2012).

En la celulosa, de fórmula genérica $(C_6H_{10}O_5)_n$, es el constituyente estructural principal de las paredes celulares de las plantas. Es cristalina, muy fibrosa y rígida, debido a las interacciones por parte del hidrógeno entre sus moléculas. La celulosa es químicamente estable y mecánicamente robusta, por lo que es insoluble en agua y más resistente a la despolimerización. El alto contenido de celulosa en el material lignocelulósico es una condición prometedora para la producción de biocombustibles (Rocha Meneses et al., 2017).

➤ **Hemicelulosas.**

En general, la fracción de hemicelulosas son polímeros que se compone de varios azúcares diferentes como D-glucosa, D-manosa, D-galactosa, D-xilosa, L-arabinosa, L-ramnosa, etc (Chandel et al., 2012).

Las hemicelulosas de fórmula genérica $(C_5H_8O_4)_n$, es el segundo polímero más abundante de las paredes celulares de las plantas y está compuesto principalmente por xilano y manano (Rocha Meneses et al., 2017). Comparada con la celulosa, la hemicelulosa tiene un menor grado de polimerización es químicamente heterogénea y tiene una estructura aleatoria y amorfa. Como la hemicelulosa se envuelve alrededor de las fibrillas de celulosa, es necesario eliminarla para aumentar la digestibilidad de la celulosa. La hemicelulosa de madera blanda

está dominada por glucomananos, mientras que las hemicelulosas de madera dura y los residuos agrícolas están dominados por el xilano. Sin embargo, el grado de acetilación en las hemicelulosas de madera dura es mayor que en las hemicelulosas de madera blanda (Ishola, 2014).

➤ **Ligninas.**

Las ligninas son polímeros complejos que consisten en unidades de fenilpropano, unidas por enlaces de éter o carbono-carbono. Representadas aproximadamente entre el 20 y 35 % de la materia seca en fibras madereras y entre 10-25 % en fibras no-madereras. La composición química consiste de en tres tipos de unidades: guaiacil (G), siringuil (S) y cumaril (H) que se derivan de los denominados monolignoles, los alcoholes p-cumárico (4-hidroxicinamílico), coniferílico (4-hidroxi-3-metoxicinamílico) y sinapílico (4-hidroxi-3,5-dimetoxicinamílico). Las ligninas se pueden clasificar de varias maneras, entre las que se distinguen son de las gimnospermas (*'softwoods'* o coníferas) se constituyen principalmente de unidades G, las angiospermas (*'hardwoods'* o frondosas) constituidas de unidades G y S y las herbáceas (*'non-woody'*) contienen las tres unidades G,S,H en proporciones muy variables (Chandel et al., 2012; Prinsen, Gutiérrez, & del Río, 2010).

Es el tercer biopolímero más abundante de biomasa lignocelulósica, proporciona soporte estructural a las plantas, contribuye a la impermeabilidad y resistencia contra el ataque microbiano. Este compuesto une todos los componentes de la biomasa lignocelulósica, por lo que es insoluble en agua y más difícil de degradar (Rocha Meneses et al., 2017).

2.3. TECNOLOGÍAS PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL.

La obtención de etanol se realiza a partir de distintas materias primas, como se menciona en los temas anteriores, los principales son la melaza de caña y almidón de maíz para producir los biocombustibles de primera generación (1G). La producción de biocombustibles de segunda generación (2G) está basada en la utilización de los azúcares contenidos en la biomasa lignocelulósica de residuos de la cosecha y subproductos agroindustriales como el bagazo de caña. El bagazo de caña será la materia prima esencial en el desarrollo del presente estudio principalmente por su alta disponibilidad en la provincia de Pastaza.

El proceso industrial de bioetanol como se muestra en la figura 5, comprende la aplicación de uno o varios métodos, sean estos combinados simultáneamente o en una sola línea de proceso. Los procesos de obtención de bioetanol, aplicados en melazas, remolacha azucarera, granos de maíz y residuos lignocelulósicos, varían en las operaciones unitarias de

acondicionamiento de la materia prima (secado, triturado, tamizado, otros), mientras que las otras etapas se aplicarán conforme se obtengan los mejores rendimientos.

Es indispensable el acondicionamiento de la materia prima y el empleo de los pretratamientos (físicos, químicos y biológicos) para la bioconversión de la lignocelulosa a azúcares fermentables, continuando con la fermentación los azúcares contenidos en los jugos y las mieles de los cultivos que se transforman en alcohol con la ayuda de microorganismos degradadores de azúcares. Después, el alcohol fermentado pasa a unas columnas de destilación en donde, a través de un proceso de evaporación, se separan los compuestos y se obtiene el alcohol más puro, cercano al 96 % y la vinaza. La etapa final es la deshidratación, donde se retira el agua del alcohol y se obtiene el etanol o alcohol anhidro a una concentración del 99,95%. El etanol obtenido es un compuesto inflamable que no tiene color y con un olor característico de los alcoholes (PROECUADOR, 2013).

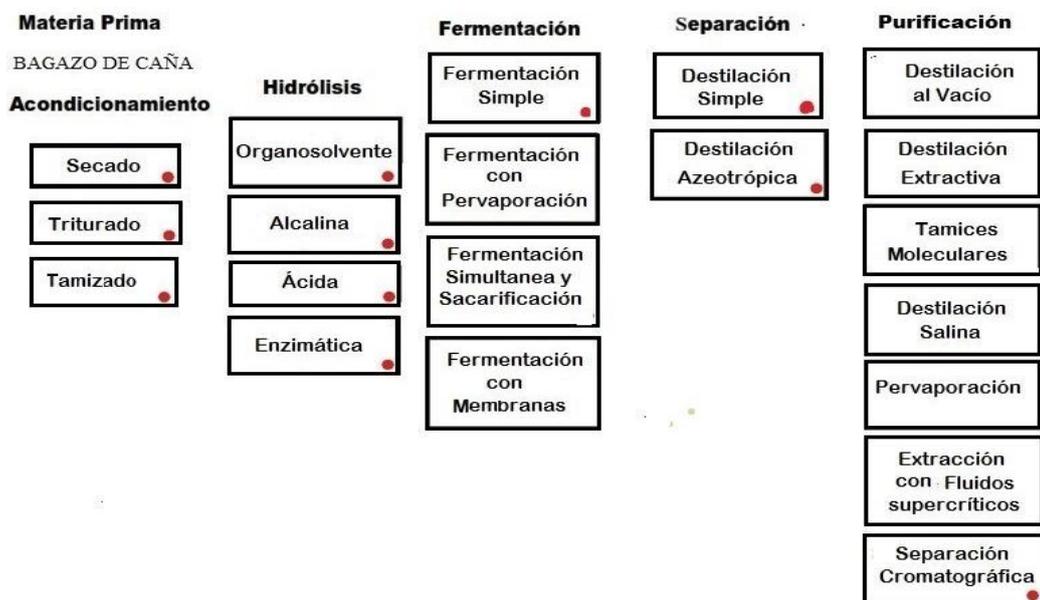


Figura 5. Métodos para la obtención de etanol a partir de maíz, modificado para el bagazo de caña.

Fuente: Modificado de (Cardona, Julián, Montoya, & Quintero, 2005).

El proceso de obtención de bioetanol, se destaca por ser un proceso integral en el cual se buscan las mejores operaciones unitarias para obtener los mejores rendimientos de los productos en cada etapa e inhibir la obtención de productos no deseables. El método seleccionado para el estudio se representa con puntos rojos en la parte inferior del recuadro.

2.3.1. Acondicionamiento.

La etapa de acondicionamiento tiene como finalidad proveer materia prima óptima e inocua que permita desarrollar posteriormente otros procesos de la mejor manera. En la producción

de etanol a partir de caña de azúcar, el acondicionamiento consiste en el lavado inicial de la caña con agua a 40°C y posteriormente la molienda o trituración donde se extrae el jugo azucarado con agua a 60°C, con un contenido de 18 a 20°Brix y se retira como subproducto el bagazo con un contenido en fibra de alrededor del 46% (Cardona et al., 2005).

Este proceso es de gran importancia, debido a que la materia prima puede estar acompañada de otros componentes innecesarios, algunas impurezas, tierra, astillas o agentes biológicos. Posteriormente, en dependencia de la materia prima, se somete al triturado en la sección de molienda con la finalidad de reducirlos de tamaño entre 3 y 5 mm (Montoya, Quintero, Sánchez, & Cardona, 2005). Estas partículas pasan al tamizado en malla 10 para seleccionar partículas uniformes de 2 mm. Finalmente, el proceso de secado para evitar crecimiento de hongos y microorganismos (Velásquez Riascos & López, 2015).

2.3.2. Pretratamientos.

Es de interés conocer la composición del bagazo para la adecuada selección de la tecnología y el aprovechamiento. Por lo tanto, la característica típica de cada material lignocelulósico indica cuál debe ser la aplicación más adecuada. En varios estudios se han propuesto diferentes métodos de pretratamiento para facilitar la hidrólisis de la celulosa y conjuntamente con procesos de deslignificación adecuados, fraccionar los materiales.

Las alternativas para transformar biomasa lignocelulósica a azúcares fermentables se observan en la tabla 4; estas deben permitir la separación eficiente del complejo de celulosa hemicelulosa, lignina y evitar la degradación de los principales componentes. Las tecnologías de pre-tratamiento producen cambios físicos y/o químicos, con el propósito de romper el recubrimiento de lignina, solubilizar la hemicelulosa y alterar la estructura cristalina de la celulosa.

Tabla 4. Pretratamientos para transformar la biomasa lignocelulósica.

Físicos	Fisicoquímicos	Químicos	Biológicos
Pulverizado mecánico	Explosión de vapor Afex	Ozonólisis Ácido diluido	Enzimas
Pirólisis	Explosión con CO ₂ Termohidrólisis	Ácido concentrado Hidrólisis alcalina Deslignificación oxidativa Proceso organosolvente	

Fuente: (Ruiz Colorado et al., 2014).

2.3.2.1. Pre tratamientos físicos

La disminución de los materiales lignocelulósicos a través de una combinación de fragmentado, triturado y/o molienda, puede aplicarse para reducir la cristalinidad de la

celulosa. El tamaño de los materiales suele ser de 10-30 mm después del fragmentado y de 0,2-2 mm después de la molienda (Gómez, Ríos, & Peña, 2013). Este proceso de reducción de tamaño facilita la accesibilidad de las enzimas a la superficie de la biomasa aumentando la conversión de la celulosa.

2.3.2.2. Pretratamientos físico-químicos.

Se destacan los procesos de explosión de vapor, Afex y explosión con CO₂ utilizados para pretratar la biomasa lignocelulósica, lo cual implica tomar en cuenta las variables importantes que incluyen el tiempo, la temperatura, el tamaño de los pedazos y el contenido de humedad (Gómez et al., 2013). Consiste en someter la biomasa a una despresurización súbita de vapor saturado a alta temperatura. Usualmente se realiza a temperaturas entre los 160 y 260 °C durante segundos o unos pocos minutos para lograr la degradación de hemicelulosas principalmente y la transformación de las ligninas, e incrementar el potencial de producción de glucosa durante la hidrólisis (Sarkar et al., 2012).

El pretratamiento Afex es similar al de la explosión de vapor pero se realiza a temperaturas inferiores de 60-100°C durante un tiempo de 5 y 30 minutos y se somete posteriormente la biomasa impregnada en amoníaco, a una descompresión repentina. Las alteraciones estructurales durante el pretratamiento son causadas por la rápida despresurización que provoca una evaporación del agua interna de la biomasa, separando las fibras, principalmente la celulosa (Irfan et al., 2010; Sarkar et al., 2012).

2.3.2.3. Pretratamientos químicos.

Para los pretratamientos químicos se han utilizado diferentes sustancias. Las utilizadas comúnmente son: ácido sulfúrico, hidróxido de sodio, amoníaco o disoluciones diluidas, de disolventes orgánicos como: metanol, etanol, acetona entre otros. Entre las ventajas de este método se encuentra su bajo costo, comparado con los que usan líquidos iónicos, su tolerancia a la presencia de agua, la capacidad de disolución de celulosa a baja temperatura, no volatilidad, estabilidad química y fácil reciclamiento (Domínguez Domínguez, Álvarez Castillo, Granados Baeza, & hernández Campos, 2012). A continuación se realiza una descripción de los pretratamientos químicos de interés en el presente estudio.

➤ Hidrólisis ácida diluida.

El pretratamiento con ácido diluido se realiza empleando ácido sulfúrico, clorhídrico, nítrico o el ácido fosfórico en concentraciones entre 1-5% en volumen. Son procesos de flujo continuo para baja carga de sólidos entre 5-10% en relación al peso sustrato/peso mezcla. La reacción se realiza colocando en contacto la biomasa con la disolución de ácido, a

temperaturas entre 160 y 220 °C por periodos de tiempo entre 1 y 60 min. Se presenta hidrólisis del 80-100% de las hemicelulosas con altas conversiones de xilano a xilosa.

El efecto producido con la aplicación de ácido sulfúrico son: la hidrólisis de hemicelulosas aunque se requiere neutralizar el pH pues ocurre la despolimerización parcial de la celulosa y la redistribución de las ligninas. Entre las desventajas asociadas a este pretratamiento están la acción corrosiva del ácido sobre los equipos empleados en el procedimiento y la degradación de los carbohidratos hidrolizados a compuestos derivados del furano como el furfural proveniente de la hidrólisis de las pentosas y el 5-hidroximetilfurfural (5HMF) por hidrólisis de las hexosas (Mateus, Hernández, Velásquez, & Díaz, 2012). La biomasa (bagazo de caña) se diluye con ácido sulfúrico con 1% (w / v) en fibra seca, 175 ° C y 9 atm de vapor de agua, 1:1 (w / v) relación sólido-líquido y tiempo de residencia igual a 40 min. Después de la Etapa de lavado, se obtiene un sólido, una solución rica en glucosa (Albernas Carvajal, Corsano, Gonzáles Cortéz, & González Suárez, 2017).

➤ **Hidrólisis ácida concentrada.**

Este tipo de tratamiento puede realizarse empleando diferentes clases de ácidos como el ácido sulfúrico, clorhídrico, sulfuroso, fosfórico, nítrico y fórmico. Sin embargo, solo los ácidos clorhídrico y sulfúrico se han empleado a escala industrial.

El ácido sulfúrico es el catalizador ampliamente utilizado y reportado en varias investigaciones; se utiliza a concentraciones de 10-30 % en volumen, temperaturas entre 170-190°C y relación de peso sólido-líquido de 1:1,6. Muchas veces se requiere de la recuperación del ácido. Los tiempos de residencia son mayores que en la hidrólisis de ácido diluido. En la literatura se informan algunos materiales pretratados como el bagazo de caña. El ácido concentrado se usa para la extracción de la celulosa, en donde este destruyen los enlaces de hidrógeno que unen las cadenas adyacentes a la glucosa anhidra perdiendo así la estructura cristalina, lo que permite a la celulosa aumentar su porosidad, facilitar la introducción de agua en su estructura y soportar un efecto de hinchamiento.

➤ **Hidrólisis Alcalina.**

La aplicación de la hidrólisis alcalina requiere de sustancias básicas como el hidróxido de sodio, hidróxido de calcio (cal), hidróxido de potasio, hidróxido de amonio, sean estos en combinación con peróxido de hidrógeno u otras sustancias. Es ventajosa la aplicación de este pretratamiento en los materiales lignocelulósicos, porque permite el aumento del área superficial interna, disminuye el nivel de cristalización de la celulosa, facilita la separación de las uniones estructurales lignina-carbohidratos (celulosa, hemicelulosa) y finalmente rompe la estructura de la lignina (Canilha et al., 2012).

Por lo general se llevan a cabo con disoluciones de álcalis fuertes o NaOH diluido en el cual se sumerge el material lignocelulósico a 60°C por 24 horas lo que provoca un estado de hinchamiento de la biomasa. Posteriormente, ocurre la degradación de polisacáridos causada por el rompimiento de radicales finales y reacciones hidrolíticas, el proceso lo hace más accesible para enzimas y bacterias añadidas en el proceso de fermentación (Sánchez Riaño, Gutiérrez Morales, Muñoz Hernández, & Rivera Barrero, 2010). El hidróxido de sodio (NaOH) aumenta la digestibilidad de la madera dura del 14% al 55% al reducir el contenido de lignina del 24-55% al 20% (Sarkar et al., 2012). En el bagazo de caña se aplica una solución de 3% p/v en fibra seca con una conversión de glucosa del 70% (Albernas Carvajal et al., 2017).

2.3.2.4. Pretratamientos biológicos.

➤ **Hidrólisis enzimática.**

La degradación de la lignina es uno de los factores más impactantes en el rendimiento de la hidrólisis enzimática, ya que removerla minimiza el requerimiento enzimático y permite realizar esta etapa enzimática con altas cargas de sustrato.

El método de la hidrólisis enzimática se produce mediante la ruptura de las cadenas poliméricas de la celulosa y las hemicelulosas, que previamente han sido modificadas estructuralmente en el pretratamiento; de la celulosa se obtiene glucosa y a partir de las hemicelulosas se obtienen diferentes monosacáridos como xilosa, glucosa, arabinosa, galactosa, manosa entre otros. En este proceso las condiciones de operación están en el intervalo de temperatura (45-50°C) y pH (4-5) óptimo de acción de las enzimas (Sarkar et al., 2012). En la hidrólisis enzimática se requieren enzimas de alta especificidad para la degradación de la matriz lignocelulósica como celulasas y xilanasas producidas a partir de hongos y bacterias. Como presenta en la tabla 5, estas enzimas son una mezcla de al menos tres grupos.

Tabla 5. Especialidad de las enzimas para degradar la matriz lignocelulósica.

Enzimas	Reacción
Endoglucanasas	Atacan las regiones de celulosa de baja cristalinidad descomponiendo los enlaces β (1→4) y creando finales de cadena.
Exoglucanasas	Degradan la celulosa cristalina y amorfa para producir celobiosa.
Beta- glucosidasas	Hidrolizan la celobiosa y oligosacáridos menores para producir glucosa.

Fuente: (Sarkar et al., 2012).

La hidrólisis enzimática es necesaria en la conversión de los polisacáridos que contiene el bagazo de caña, principalmente la celulosa, que contiene productos de alto valor agregado como la glucosa. Sin embargo, conseguir una eficiente acción de las enzimas y los catalizadores ácidos sobre los enlaces glucosídicos β , 1-4 (unión de glucosa) resulta complicado debido al fuerte arreglo cristalino de la celulosa y las acciones protectoras de la lignina y la hemicelulosa (Canilha et al., 2012). La cantidad de enzimas (alfa-amilasa) utilizado para realizar la cocción y licuefacción será en el orden de 0,07% del peso de grano de maíz, se dividido en dos tiempos 0,02% en el premezclado y en el orden de 0,04-0,06% en peso del cereal (maíz) después de la ebullición, donde la mezcla es enfriada a 79-90 °C (Álvarez, Salamanca Fresno, & Fernández Portales, 2008). En el bagazo de caña se emplean enzimas hidrolasas de entre el 10% al 15% p/v, con la conversión de glucosa al 79% (Albernas Carvajal et al., 2017).

2.3.3. Fermentación.

La actividad de las enzimas celulósicas se ve afectada por la presencia en menor proporción de celobiosa y glucosa. Entre los métodos implementados para reducir la inhibición están: el aumento de la concentración de enzimas, la adición de beta-glucosidasa en la hidrólisis y la eliminación de glucosa por hidrólisis y fermentación simultánea (SSF), después de haber comparado los efectos de los diferentes pretratamientos (explosión con vapor, hidrólisis ácida diluida, hidrólisis alcalina, organosolvente, ozonólisis, entre otros) en los materiales lignocelulósicos y seleccionar el mejor. La reacción de fermentación para la transformación del etanol se presenta en la figura 6.

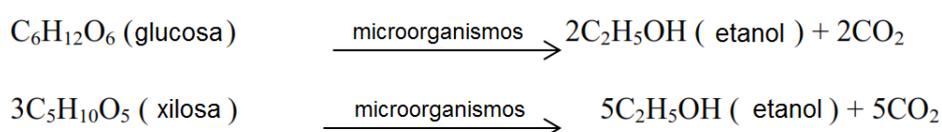


Figura 6. Reacción de fermentación para la transformación de bioetanol.

Fuente:(Ishola, 2014).

La operación de fermentación también se realiza con microorganismos y períodos de tiempo diferentes, para la mejor utilización de los azúcares (hexosas y pentosas). Algunos de los microorganismos nativos o de tipo salvaje utilizados en la fermentación son: *S. cerevisiae*, *Escherichia coli*, *Zymomonas mobilis*, *Pachysolen tannophilus*, *C. shehatae*, *Pichia stipitis*, *Candida brassicae*, *Mucor Indicus*, etc. Diferentes microorganismos han mostrado diferentes rendimientos de etanol dependiendo de los azúcares fermentables utilizados (Sarkar et al., 2012).

Los procesos fermentativos pueden llevarse a cabo de forma continua, discontinua (*batch*) o semi-continua (*feed-batch*). El proceso continuo consiste en un sistema abierto en el que existe la entrada del sustrato y la salida del producto y la biomasa molecular. El proceso discontinuo (*batch*) se emplea para la conversión por cargas de azúcares a etanol. Mientras que en el proceso semi-continuo el sustrato se añade alimentando al reactor con la técnica adecuada (recirculación de la levadura post-fermentativa a través de una separadora centrífuga), favoreciendo el manejo y homogenización del medio y disminuyendo los efectos inhibitorios de los productos tóxicos. Este último es uno de los métodos más utilizados en la industria del etanol pues presenta mayor productividad, tiempo de fermentación menor y elevadas velocidades de sacarificación.

2.3.3.1. Sacarificación y Fermentación Simultánea (SSF).

Son dos procesos que se llevan a cabo en una misma unidad: la sacarificación de las dextrinas para obtener glucosa y la fermentación de la glucosa en etanol y dióxido de carbono principalmente. La sacarificación es posible gracias a la acción de la enzima glucoamilasa que es alimentada continuamente al reactor. La fermentación se lleva a cabo mediante la levadura *Saccharomyces cerevisiae* que es alimentada junto a una fuente de nitrógeno (amoníaco). Los gases formados en la fermentación son retirados y enviados a una torre de adsorción en la cual se debe recuperar el 98% en masa del etanol arrastrado (Cardona et al., 2005).

El proceso de fermentación y sacarificación tiene lugar simultáneamente en el tanque de fermentación, gracias a la enzima de sacarificación (amiloglucosidasa o glucoamilasa), operación que se realiza a un pH entre 3,5 – 4,5 y a una temperatura de 30 a 35 °C. La glucoamilasa se añade directamente a la entrada de los tanques de fermentación (Couto & Sanromán, 2006).

En este proceso se evitan acumulaciones de la fuente de carbono que puedan inhibir la levadura pues, al tiempo que la celulasa hidroliza el material, la levadura consume los azúcares para su crecimiento, mantenimiento y/o producción de etanol (Gómez et al., 2013). El coeficiente de rendimiento de etanol más alto de SSF se debería en parte a una mayor conversión de xilosa en xilitol bajo las condiciones de SSF (Sarkar et al., 2012).

El proceso SSF puede llegar a ser más económico en comparación con el SHF, puesto que puede aumentar la concentración de etanol en el mosto de fermentación, disminuye el riesgo de contaminación, se necesita una menor dosis de enzimas y se reduce el tiempo total del proceso. Es en las posteriores etapas de destilación los costos de energía y el número de equipos

de proceso se reducen, en consecuencia los costos, de producción también disminuyen y se logra un proceso más sostenible (Albernas Carvajal et al., 2017).

2.3.3.2 Hidrólisis y Fermentación Separada (SHF).

La fermentación se puede realizar como un proceso independiente de la hidrólisis que es conocido como hidrólisis y fermentación separada (SHF); la ventaja de realizar cada etapa de forma independiente es la posibilidad de operar a la temperatura óptima en cada uno de los equipos, que está entre 45 a 50 °C para la hidrólisis (ácida, básica, enzimática, ozonólisis, otros) y 30 °C para la fermentación (Mateus et al., 2012). El sistema separado puede producir inhibición de la levadura por productos de la hidrólisis, el tiempo del proceso es más largo y existe una mayor probabilidad de contaminación (Gómez et al., 2013).

La primera etapa de este proceso es la fermentación, en la cual se provee una mezcla de etanol-agua con una concentración de etanol entre 4% mol y 8% mol; posteriormente, el vino fermentado pasa a las columnas de destilación donde se obtiene como destilado el etanol hidratado. En función del uso, si se requiere una menor presencia de agua será necesario deshidratarlo (Lauzurique Guerra et al., 2017).

2.3.4. Destilación.

La técnica de destilación es necesario para la concentración del alcohol entre los 94-96% a partir de mosto fermentado. Como se observa en la figura 7, el proceso de destilación consiste en calentar un líquido (mezcla alcohol-agua) hasta que los componentes más volátiles pasen a la fase de vapor, por medio de la condensación se enfría el vapor para recuperar estos componentes en su forma líquida.

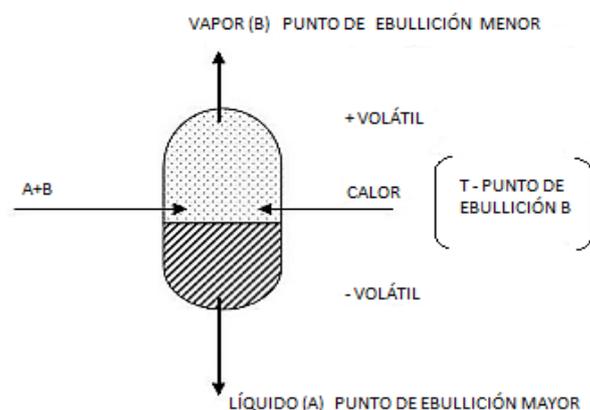


Figura 7. Separación de componentes.

Fuente: (Melgar et al., 2012).

En este proceso generalmente se aplica calor por el fondo y por la parte superior se alimenta la disolución a destilarse. Los vapores del fondo suben, enriqueciéndose del compuesto a separar, debido a que entran en contacto con el líquido alimentado. Este contacto se facilita en el interior de la columna por medio de platos o bandejas. Las fracciones o fracción volátil que llegan a la parte alta de la columna tendrán que convertirse en fase líquida para poderse recuperar y manejarse adecuadamente. Por medio de intercambiadores de calor o llamados condensadores se logra enfriar el producto. De forma general se observa en la figura 8, el proceso de destilación.

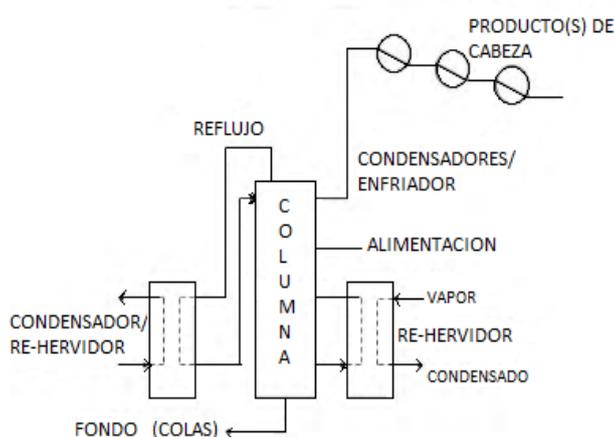


Figura 8. Esquema de destilación.

Fuente: (Melgar et al., 2012).

No todos los productos de la fermentación son afines y por los grandes volúmenes de producción, muchas veces no es posible separar todas las fracciones en una sola columna de destilación, por lo que necesariamente se requiere de dos torres o más. De forma general, en la primera columna se eliminan los componentes más pesados del mosto; el etanol producido tiene un porcentaje en volumen de aproximadamente 70%. En la segunda columna se elimina gran cantidad de agua y otros componentes que permitirán elevar el contenido de etanol a un 95-96 %, aunque otros sistemas pueden disponer de cuatro columnas principales: dos columnas de mosto, la columna de destilación de alcoholes ligeros y una columna de rectificación (Canilha et al., 2012).

El etanol es purificado mediante diversas destilaciones para obtener un 95% volumétrico de alcohol (azeotrópico). Previamente a la destilación, el etanol puede ser catalíticamente hidrogenado para convertir acetaldehído y aldehídos más pesados en sus respectivos alcoholes. Un 2% de dietiléter se forma como subproducto y puede ser fácilmente purificado y vendido con la corriente de ligeros de la destilación extractiva o puede ser recirculado al reactor.

2.3.5. Rectificación.

El producto pesado procedente de la destilación de alcoholes ligeros se carga en la columna rectificadora como se presenta en la figura 9. La rectificación es el proceso de enriquecimiento progresivo del vapor y del líquido en los componentes respectivos. El vapor se concentra en el componente más volátil a medida que asciende y el líquido de concentra en el menos volátil al descender.

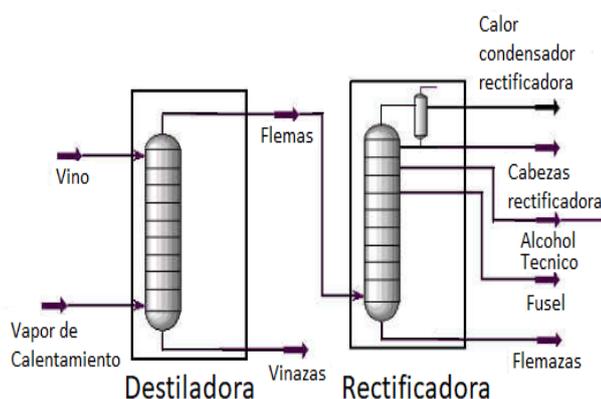


Figura 9. Etapa de rectificación de alcohol.

Fuente: (Pérez, Zumalacárregui, & Gozá, 2010).

Los platos o bandejas constan de una placa que posee un orificio central o chimenea por donde ascienden los vapores que llegan del plato inferior. El orificio está cubierto por una campana o sombrero con varias hendiduras por el cual salen los vapores, haciendo posible el contacto con el líquido contenido en el plato. En cambio, el líquido descende hacia el plato inferior por un conducto y al estar sumergido en el líquido se realiza un cierre hermético.

El agua de vinazas, libre de alcohol, se extrae por la parte inferior de la columna de rectificación. Parte de esta agua se emplea para calentar el evaporador (mediante un intercambiador de calor) y el resto se mezcla con la lechada de harina de maíz (recirculación) procedente del tanque de mezcla antes de la tubería de cocción (Álvarez et al., 2008).

Los alcoholes pesados o fúseles se separan en una salida intermedia de la columna de rectificación. Primeramente, se enfrían en un intercambiador de calor, después se diluyen con agua de proceso y finalmente, mediante decantación, se separan para ser quemados en una de las tres calderas de generación de vapor. El vacío de la primera columna de mosto se mantiene gracias a la acción de las bombas de vacío de anillo líquido. Los vapores de escape de las bombas de vacío, que son incondensables con vapores de agua y alcohol, se conducen al lavador de CO₂ donde se retira el alcohol para reprocesarlo (Melgar et al., 2012).

Se ha seleccionado este proceso ya que el mosto obtenido en la fermentación pasa a la etapa de destilación en el cual se separa el producto de interés (etanol) de los subproductos contaminantes y permite elevar los grados alcohólicos hasta su punto máximo en condiciones normales. Sin embargo, el producto alcohólico no podrá ser usado como sustituto de combustibles para el cual se requiere de un proceso posterior de deshidratación.

2.3.6. Deshidratación.

El etanol proveniente de la columna rectificadora ingresa a uno de los platos de la columna deshidratadora. Como se muestra en la figura 10, en esta etapa se obtendrá un producto de alta pureza; para ello es necesario utilizar columnas de deshidratación con un gran número de platos (por encima de 40) y con altas relaciones de reflujo; además, para poder desplazar el azeótropo es necesario trabajar a presiones inferiores a 6 kPa (Lauzurique Guerra et al., 2017).

Existen diversas técnicas para deshidratar mezclas de compuestos orgánicos valiosos a nivel industrial, dentro de ellas se encuentran la destilación por cambio de presión, la destilación azeotrópica, la destilación extractiva (con sales, con glicoles, con polímeros y con líquidos iónicos), la adsorción con tamices moleculares y la pervaporación entre otros (Canilha et al., 2012).

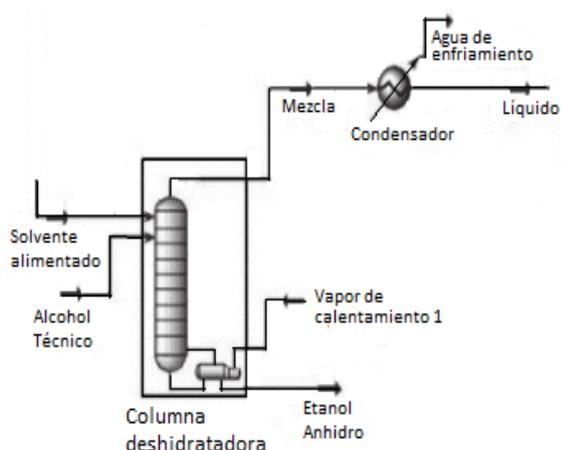


Figura 10. Etapa de deshidratación de alcohol.

Fuente: (Lauzurique Guerra et al., 2017).

2.3.6.1. Destilación azeotrópica.

La mezcla azeotrópica de agua y alcohol se produce cuando existe un 95,57% a 96% p/p de alcohol y un 4,43% a 4% de agua. Esta es la máxima concentración de alcohol que se podría obtener en una destilación normal. Para obtener un alcohol anhidro es necesario deshidratar el azeótropo que se puede hacer por diversos métodos (Melgar et al., 2012).

➤ Destilación azeotrópica con benceno

La columna de deshidratación se alimenta con la disolución alcohólica proveniente de la columna rectificadora y en el plato superior se añade el benceno, el cual forma un azeótropo nuevo. El etanol se envía por el fondo de la torre y el azeótropo ternario heterogéneo formado se condensa como producto de cabeza y se le decanta para obtener dos fases inmiscibles. La fase orgánica rica, en el modificador, regresa a la columna deshidratadora como reflujo mientras la fase acuosa del azeótropo formado se envía a la columna recuperadora donde se separa el modificador restante del agua. El modificador se obtiene como producto de cabeza y se recircula a la alimentación principal de la columna deshidratadora, mientras que el agua obtenida como producto de cola se utiliza en otras etapas del proceso. Se consideró que la presión permanecía constante en el condensador y que a la salida de este la temperatura de la mezcla etanol-agua-benceno era 25°C (Lauzurique Guerra et al., 2017).

2.3.6.2. Adsorción con tamices moleculares.

El proceso de separación con tamices moleculares opera en fase de vapor, está conformado por dos lechos de tamiz molecular en el que se emplean adsorbentes como gel de sílice, alúmina, zeolita, entre otros, que permiten una mayor eliminación de agua. El proceso comienza cuando en el primer lecho se lleva a cabo la deshidratación o eliminación de agua mientras que de manera paralela en un segundo tamiz se lleva a cabo la operación de regeneración del adsorbente en el que se recircula parte de los vapores de etanol anhidro con la finalidad de retirar la mayor parte de la humedad acumulada. En este proceso se integran al sistema los equipos de vaporización que hace pasar los vapores de etanol azeotrópico a alta presión, los condensadores de vapor, un separador y una bomba que permiten el procesos de purificación del etanol carburante (Lauzurique Guerra et al., 2017).

2.3.6.3. Pervaporación.

Este proceso consta de una columna destiladora que está conformada por 84 platos, un condensador y un rehervidor; posee, además, una unidad de pervaporación para producir etanol anhidro. El producto de tope obtenido en la columna, rico en etanol pasa a la membrana donde se obtiene un retenido con altas concentraciones de este componente y como permeado una mezcla etanol-agua que se recircula a la columna para recuperar el etanol que está contenido en la columna (Lauzurique Guerra et al., 2017).

2.3.6.4. Separación cromatográfica por Columna.

Esta técnica de purificación permite separar los componentes deseados de una mezcla, columnas verticales que se llenan con un soporte sólido (adsorbente) polar, poroso, finamente granulada, que ejerce un efecto de retención sobre los componentes de la mezcla estacionaria. La muestra que se desea separar se deposita en la parte superior del soporte, el

resto de la columna se llena con el eluyente o disolvente que constituye la fase móvil, este puede de ser un líquido o un gas que provoca el desplazamiento de los componentes de la mezcla. Estos dos efectos alternos influyen y condicionan la eficacia en la separación de los componentes. El desplazamiento de los componentes de una mezcla a lo largo de la fase estacionaria es impulsado la fase móvil, que por efecto de la gravedad hace mover la muestra a través de la columna, esto se denomina elución (Cases & Hens, 1988).

Existen dos grupos de separación cromatográfica: cromatografía de adsorción y cromatografía de reparto, en función del tipo de interacción entre las fases. La técnica que se utiliza en esta investigación es la cromatografía de adsorción, esta separación se debe a las diferencias existentes en la capacidad de adsorción y desorción. El proceso de adsorción se debe a las interacciones intermoleculares de tipo dipolo-dipolo o enlaces de hidrógeno entre el soluto y el adsorbente. La eficacia de la separación depende de la naturaleza del adsorbente y eluyente, la polaridad del compuesto que está determinada por el número y la naturaleza de los grupos funcionales. Los absorbentes más utilizados son el gel de *sílice* (SiO_2) y *Alúmina* (Al_2O_3) (Cases & Hens, 1988). Como se observa en la figura 11, los solutos más polares serán más retenidos puesto que se adsorben con más fuerza a los centros activos de la fase estacionaria, mientras que los no polares eluirán con mayor facilidad.

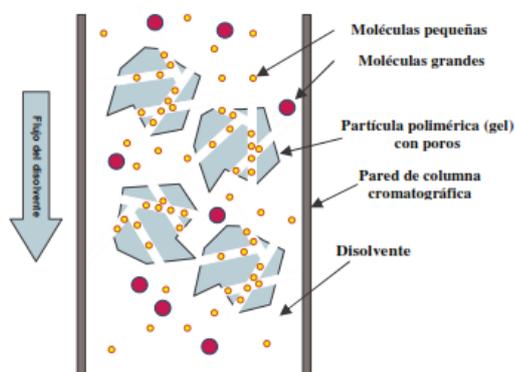


Figura 11. Condiciones para el proceso de separación.

Fuente: (Balcinde et al., 2005; Baudino Torossi, 2007).

El proceso de separación cromatográfica seleccionado en el presente estudio se utilizará en la purificación del producto de interés (etanol); en este sistema se modifican las condiciones de temperatura y presión hasta alcanzar el rompimiento del azeótropo. De este proceso se obtiene alcohol de 99,4% a 99,9% expresados en grados Gay Lussac.

2.4. PROCEDIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE PROCESOS.

El diseño de procesos establece el desarrollo de las actividades productivas mediante la elección de las entradas, las operaciones, los flujos y los métodos necesarios en la

producción. Estos factores están condicionados por las tecnologías seleccionadas para llevar a cabo dichas operaciones y en función del tipo de producto a elaborar. No siempre se desarrolla este diseño para iniciar una nueva actividad productiva también se usa para el rediseño de un proceso existente (Trebilcock, 2009). Los métodos para llevar a cabo un proyecto de diseño se pueden dividir en las siguientes clasificaciones, dependiendo de la precisión y el detalle requerido:

1. Diseños preliminares o de estimación rápida
2. Diseños de estimación detallada
3. Diseños de procesos firmes o diseños detallados

En el transcurso de un proyecto de diseño es necesario determinar el más adecuado proceso para obtener un producto deseado. Varios métodos de fabricación pueden estar disponibles y varios procesos deben compararse para seleccionar el mejor. En una comparación de este tipo se deben considerar: Los factores técnicos del proceso, disponibilidad de materias, la generación de productos de desecho y subproductos, disponibilidad y diseño de equipos, ubicación de la planta, costos que se involucran el proceso, el factor tiempo y las consideraciones del proceso. Al comparar diferentes procesos, siempre se deben tener en cuenta las ventajas de la operación continua sobre el funcionamiento por lotes (Peters & Timmerhaus, 1991).

El diseño de procesos involucra una secuencia de etapas, las cuales pertenecen a ámbitos de disciplinas bastante diferentes como, por ejemplo: las tecnológicas, las económicas, las sociales y las ambientales. Su aplicación no se basa solo en las bases teóricas de cada aspecto involucrado, sino que desde algún enfoque se debe abarcar integralmente cada una de las cuestiones. El enfoque tecnológico referido al diseño de sistemas de procesamiento es abundante, a veces antagónico y se relacionan con los trabajos de Linnhoff et al. 1982; Douglas 1988; Shenoy 1995; Smith 1995; Biegler et al. 1997; Seider et al. 1999, en los que se evidencia una falta de acuerdo generalizado en el tratamiento del tema. Muchos de estos procesos se han materializado en sistemas de computación para simulación y diseño (Domínguez, Finetti, Michel, & Villanueva, 2007)

El diseño de procesos se usa para determinar los datos de diseño y como modelos para la optimización, una vez que se ha establecido el diseño. Estos requieren el uso de diagramas de flujo para mostrar la secuencia de operaciones de equipos y unidades en el proceso general, importantes para simplificar la visualización de los procedimientos de fabricación e indicar las cantidades de materiales y la transferencia de energía. Estos diagramas se

pueden dividirse en tres tipos generales: cualitativo, cuantitativo y detalles combinados. (Peters & Timmerhaus, 1991).

El diseño de sistemas productivos surge de algunos métodos tradicionales; que se fundamentan en los Procesos y Operaciones Unitarias, los Módulos Básicos y el área de Síntesis y Análisis de Procesos. Para este último método se ha desarrollado una gama de herramientas y técnicas de diseño como la Síntesis Sistemática de Procesos, la Descomposición de Problemas o Análisis Morfológico, el Diseño Heurístico, el Diseño Evolutivo y el Diseño Algorítmico (Castellanos, Ramírez, & Rueda, 2002).

Por ello, es necesario usar herramientas para generar y evaluar cuidadosamente las alternativas de procesos, a través del seguimiento de un procedimiento descrito en términos de una jerarquía de decisiones. Generalmente están basadas en reglas heurísticas compuestas por la intuición, el conocimiento ingenieril y los principios físicos, para obtener como resultado el diagrama de flujo del proceso que representa la solución más razonable al problema inicialmente planteado (Halima, Carvalhdo, Srinivasana, Mathosb, & Gan, 2011; Rodríguez González, González Gonzáles, Noy Viamontes, & Pérez Sotolongo, 2012). Los modelos pueden ser el resultado de la representación de un fenómeno de la realidad, seleccionado por su interés científico, para su estudio, o puede representar los principios de una teoría, sin que ambas funciones sean excluyentes ya que están interrelacionadas (López Cantos, 2015).

Otras alternativas para el diseño de procesos, considerado como las técnicas importantes que se pueden aplicar al desarrollo y mejoramiento de procesos son: la Reingeniería de Procesos, Ingeniería Inversa, Ingeniería Concurrente y Transferencia Tecnológica, las cuales han surgido para dar solución a problemas de producción, optimización, competitividad contaminación ambiental, entre otras. La aplicación de estas herramientas no se reduce a procesos nuevos sino que también se pueden emplear en algunos ya existentes (Castellanos et al., 2002).

2.5. MARCO REFERENCIAL.

2.5.1. Estrategia para desarrollar la tecnología.

La simulación permite predecir la operación de un proceso cuando se han alcanzado condiciones de estacionalidad, esto facilita el estudio de la sensibilidad del sistema frente a cambios en los distintos parámetros y variables de operación. De esta manera, pueden ser ajustados, usando técnicas de optimización, para determinar las mejores condiciones operacionales. En el simulador *SuperPro Designer* debe partirse de unos datos determinados,

según el modelo que proporciona, para cada equipo y que serán necesarios para la correcta simulación de la planta (Intelligen Inc, 1991)

La planta se diseña para una cierta capacidad nominal. La simulación del esquema tecnológico para la producción de etanol anhidro a partir de bagazo, se realizó usando el simulador de procesos *SuperPro Designer*. Los componentes tenidos en cuenta para la simulación comprenden los provenientes de la materia prima e insumos: glucosa, fructosa, cenizas, fibra, azúcares, enzimas y amoniaco (como fuente de nitrógeno) y los formados en la etapa de fermentación: etanol, dióxido de carbono, biomasa, acetaldehído, vinaza, oxígeno, alcoholes de fusel y glicerol, entre otros.

En este estudio se describirán las características específicas de las condiciones del proceso de obtención de bioetanol, se reunirá la información específica de la cantidad de bagazo necesario para la producción, los tipos de pretratamientos, fermentación, destilación, deshidratación y se realizará el análisis económico de factibilidad a partir de estos resultados, lo que permitirá evaluar y cuantificar los datos definidos en el primer paso del análisis de las fuentes primarias (artículos, libros, datos estadísticos, etc.), el objetivo y el alcance. Además se describirán las condiciones específicas donde se desarrollan estas actividades.

En la producción de etanol carburante se requiere la selección de una tecnología que involucre el análisis de criterios técnicos, económicos y ambientales, entre los que se encuentran: el consumo energético, eficiencia, depreciación, automatización, costos de operación y capital, control ambiental y alternativas de cogeneración de vapor y electricidad. Estos parámetros se describen en el diagrama heurístico planteado por (Pérez Martínez et al., 2012) para el diseño de procesos.

2.5.2. Simulación asistida por computadora.

Las empresas normalmente automatizan sus procesos de gestión y producción por etapas y áreas, tratando de integrarse bajo un sistema de Manufactura Integrada por Computador (CIM). Los diseños y fabricación asistidos por computador llamados CAD/CAM son tecnologías que normalmente abarcan el manejo de bases de datos, fabricación, simulación de procesos, control numérico de máquinas-herramientas, inteligencia artificial, robótica, visión computarizada, etc. No se limitan a ofrecer mejoras en las capacidades de diseño o en las posibilidades de ensamblaje de piezas, sino que se presentan como herramientas para la simulación virtual y para la automatización integrada desde una perspectiva mucho más general de los procesos en la industria manufacturera (Rojas Lazo, 2005).

La simulación fundamentada en principios termodinámicos y cinéticos juega un papel fundamental en la síntesis de procesos, ya que permite reducir drásticamente el trabajo experimental, el cual podría tornarse poco efectivo si dicha síntesis se basa exclusivamente en resultados de planta piloto.

El simulador *SuperPro Designer* es una herramienta computacional que cuenta con modelos matemáticos para varias operaciones unitarias (reacción estequiométrica, intercambio de calor, secado, filtración, destilación, mezcla y separación de corrientes, entre otros), con una serie de equipos representativos para cada operación de interés en la presente investigación. El ingreso de datos de nuevas reacciones químicas y sus propiedades facilitan el cálculo de los balances de masa y energía que posibilitan el dimensionamiento de los equipos. Además, el programa posee bases de datos de agentes de transferencia de calor, permite realizar evaluaciones de costo, impacto ambiental y calcular propiedades termodinámicas.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1. LOCALIZACIÓN.

El presente estudio se realizó en la ciudad de Puyo del cantón y provincia de Pastaza. La ejecución del presente proyecto de investigación se desarrolló en la Universidad Estatal Amazónica, ubicada en el km 1 1/2 del Paso Lateral de la vía Puyo-Tena. El proyecto tuvo una duración de 400 horas necesarios para la búsqueda de datos, análisis, entrada de datos al simulador, la simulación del proceso tecnológico y evaluación de datos.

En la tabla 6, se muestra la caracterización de la Provincia de Pastaza. Además, las condiciones meteorológicas de la zona son la Temperatura media anual: 25°C; Precipitación anual media: 4321,8 mm y Humedad relativa media anual: 87.83 %.

Tabla 6. Caracterización de la provincia de Pastaza.

Límites	Norte: provincias de Napo y Orellana. Sur: Provincia de Morona Santiago. Este: República de Perú. Oeste: Provincia de Tungurahua.
División político-administrativa	4 cantones: Pastaza, Mera, Santa Clara y Arajuno. 21 parroquias: Puyo, Tarqui, Fátima, Teniente Hugo Ortiz, Diez de agosto, El Triunfo, Veracruz, Pomona, Canelos, Simón Bolívar, Sarayacu, Montalvo, Río Tigre, Río Corrientes, Mera, Shell, Madre Tierra, Santa Clara, San José, Arajuno y Curaray.
Población Total	83.933 (INEC 2010)
Extensión	29.6423,33 km ²

Fuente:(GADPPz, 2017).

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.

En esta investigación se utilizaron antecedentes recopilados de las diferentes investigaciones publicadas en revistas indexadas, en bases de datos de instituciones gubernamentales, centros de investigación, entre otros; que permitieron obtener datos técnico-científicos asociados a la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos como el bagazo de caña.

Por el lugar

- **De campo:** nos permitió experimentar en el medio donde se encontró el objeto de investigación, medio en el cual están ocurriendo los hechos y fenómenos investigados.

- **Bibliográfica:** Permitió obtener información de diferentes fuentes (libros, artículos científicos, patentes, otros) acerca de los procesos de investigación. Esto se utilizó en todos los capítulos del presente trabajo.

Por los objetivos

- **Aplicada:** esta investigación se encaminó a la solución del problema, tratando de modificar una realidad presente con alguna finalidad práctica.

Por la naturaleza del estudio, el alcance planteado es el exploratorio-descriptivo-explicativo. La investigación no posee antecedentes de haberse realizado en la provincia o en simuladores de procesos para obtener bioetanol. Además puede ser el punto de partida para involucrar nuevas alternativas de aprovechamiento del bagazo de caña producida en las paneleras de la misma localidad como en las demás ciudades de la Amazonía o el Ecuador. El carácter del estudio fue cuantitativo, ya que la identificación y cuantificación del bagazo necesario para el proceso, los parámetros para las operaciones unitarias, el análisis económico-ambiental del estudio; el dimensionamiento de equipos, y la cantidad de productos y residuos emitidos al entorno, permitieron analizar y evaluar la factibilidad de la simulación del proceso y a futuro implementar posibles mejoras.

En este estudio se describieron las características específicas de las condiciones del proceso de obtención de bioetanol, se reunió la información específica del bagazo de caña de azúcar de los tipos de pretratamientos, fermentación, destilación, deshidratación; se realizó el análisis económico de factibilidad a partir de estos resultados, lo que permitiría evaluar y cuantificar los datos definidos en el primer paso del análisis de las fuentes primarias (artículos, libros, datos estadísticos, etc.), el objetivo y el alcance.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.

3.3.1. Método de análisis-síntesis.

El método utilizado fue el método de investigación análisis-síntesis, revisando cada uno de los elementos, comportamientos y características del proceso tecnológico del Bioetanol permitieron comprenderlos con detalle y profundidad, a partir de investigaciones realizadas sobre el empleo de los residuos lignocelulósicos (bagazo de caña) en la obtención de biocombustibles. Se dividieron los datos de los componentes en unidades independientes y la información obtenida fue procesada a fin de proporcionar una explicación concreta. Estos fueron evaluados en cada uno de los escenarios de estudio como el económico y ambiental. El objeto de estudio se dividió en otros objetivos específicos, a fin de establecer relaciones referidas a las partes del esquema global o total de la investigación. En este proyecto se

realizó la compilación de los resultados de las investigaciones realizadas para la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, además de los datos para la simulación del proceso (composición de la materia prima, producción, distribución y precio).

3.4. FUENTES DE RECOPIACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

La recolección de información y datos necesarios en el estudio se obtuvieron a partir de investigaciones realizadas por otros investigadores. Estas investigaciones son publicaciones de artículos científicos, libros, expedientes estadísticos, base de datos, entre otros. La recopilación de datos y el acceso de datos se desarrollaron con el programa *EndNote*.

3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.

El diseño de la investigación fue relacionado con la metodología seleccionada para ello la simulación del proceso de obtención de Bioetanol a partir del bagazo de caña se realizó con el Simulador *SuperPro Designer*. Se describió como un proceso compuesto por cinco etapas principales: Preparación de la materia prima, hidrólisis, fermentación, destilación y deshidratación y tratamiento de efluentes.

3.5.1. Diseño de procesos.

El diseño lleva implícita la necesidad de seleccionar dentro de un conjunto de posibilidades aquellas alternativas que cumplan con los objetivos deseados. Como se observa en la figura 13, el procedimiento secuencial del diseño de procesos planteado por (Pérez Martínez et al., 2012), determina un análisis multicriterial con la integración de los aspectos técnicos, económicos y ambientales, que permite la obtención de un resultado cualitativamente superior. De forma general este procedimiento consta de 16 pasos donde cinco de ellos son de toma de decisiones.

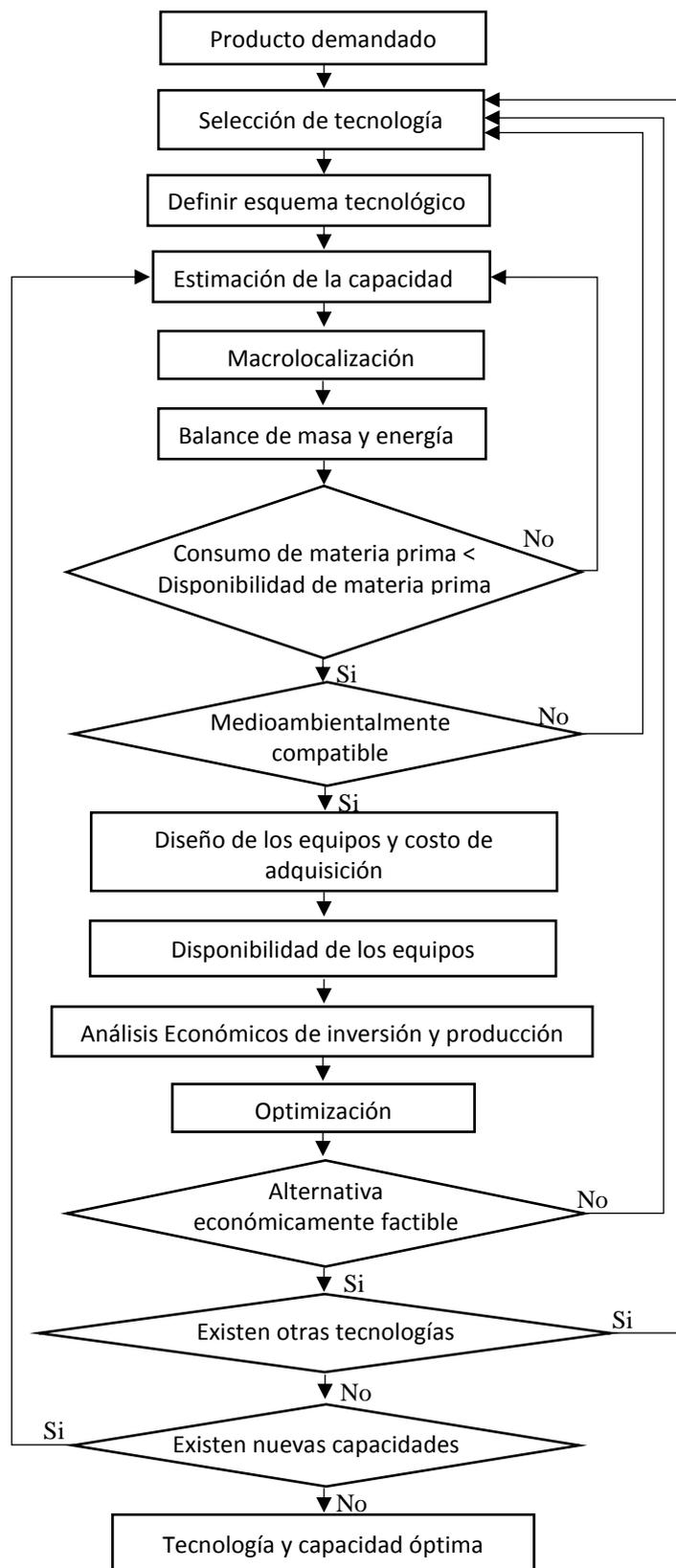


Figura 12. Procedimiento secuencial para el diseño de procesos.

Fuente: (Pérez Martínez et al., 2012).

3.6. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.

El proceso de simulación se pudo ejecutar a través del tiempo, haciendo uso de un software *SuperPro Designer* previamente instalado en un computador, permitió generar muestras representativas del comportamiento del sistema a simular. Por lo tanto, se observan en la tabla 7, los instrumentos utilizados, entre ellos, se destaca la simulación asistida por computadora como técnica alternativa para diseñar y construir modelos que imiten la realidad.

Tabla 7. Instrumentos utilizados.

Técnica	Instrumentos
Simulación asistida por computadora	Programa <i>SuperPro Designer</i>
Revisión bibliográfica	Programa <i>EndNote</i>

Fuente: Elaboración propia.

3.7. TRATAMIENTO DE DATOS.

El procesamiento de datos generados durante la simulación del proceso tecnológico de producción de etanol, empleando el programa *SuperPro Designer*, facilitó obtener la versión virtual de los productos, subproductos, balance de masa y energía para desarrollar la evaluación económico-ambiental del proceso. Esto permitió la construcción de los modelos en función de la capacidad óptima y la disponibilidad de materia prima.

3.8. RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES.

3.8.1. Recursos humanos.

Los recursos humanos para el desarrollo de la investigación se detallan en la tabla 8.

Tabla 8. Recursos humanos para el proyecto de investigación.

Recursos humanos	Cantidad
Directores del proyecto de investigación	2
Estudiante	1

Fuente: Elaboración propia.

3.8.2. Recursos materiales.

Los recursos materiales necesarios en la elaboración del proyecto de investigación se detallan en la tabla 9.

Tabla 9. Recursos materiales para el proyecto de investigación.

Recursos Materiales	Cantidad
Laptop	1
Libreta	1
Bolígrafo	1

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. DISEÑO DE PROCESOS.

La aplicación del procedimiento secuencial propuesto por (Pérez Martínez et al., 2012) conlleva la realización de varios pasos. Cada uno de ellos tiene un objetivo para diseñar un proceso tecnológico a partir de una materia prima determinada y obtener un producto. En este capítulo se muestran los resultados del diseño del proceso de obtención del etanol carburante partir de bagazo de caña en el contexto de la Amazonía ecuatoriana.

4.1.1. Producto demandado.

Se realizó, el estudio de la demanda del etanol carburante a partir de fuentes de datos que proporcionaron los criterios de calidad, sectores en los que se emplea, cantidad producido en el país, operaciones unitarias que involucró su obtención, entre otros criterios se describió en el primer paso del diagrama heurístico.

Las propiedades del etanol tanto físicas como químicas dependen fuertemente del grupo hidroxilo que dota de polaridad a la molécula. La fórmula química es C_2H_5OH en condiciones normales es un líquido incoloro, transparente, volátil e inflamable. Es miscible en todas proporciones con agua, acetona, benceno y otros disolventes orgánicos. El alcohol anhidro es higroscópico llegando a tomar agua hasta un 0,3-0,4% de su peso (ICIDCA, 2000).

En el campo del etanol se puede distinguir entre el alcohol anhidro y el alcohol hidratado. El alcohol anhidro no contiene agua y al menos tiene un 99% de pureza por lo que se puede usar en mezclas de combustible. Por otro lado, el alcohol hidratado contiene agua hasta el 4% y generalmente tiene una pureza del 96% de alcohol. El etanol constituye una fuente renovable de energía. Su mezcla con gasolina o petróleo proporciona un combustible de mejor calidad principalmente porque es utilizado para oxigenar la gasolina (ICIDCA, 2000). El uso de combustible de etanol se ha incrementado en Estados Unidos en 2001 fue 1,7 billones de galones y en el 2014 aproximadamente a 13,4 billones de galones, Brasil es uno de los mayores productores del etanol por lo cual ha disminuido en un 40% las importaciones del petróleo. En América del Sur Colombia es el segundo productor después de Brasil. Ecuador ocupa el puesto veinte cuatro a nivel mundial (PROECUADOR, 2013).

La producción de etanol en los países en desarrollo se proyecta que aumente de 42.000 millones de litros en 2012 a 72.000 millones de litros en 2022. Brasil representará el 80% de este incremento seguido por China en donde menos de la mitad de su producción de etanol se utiliza para la producción de combustibles. Mientras que el consumo mundial de etanol

para combustible se incrementaría en 84% en el periodo 2012 a 2022 alcanzando 145.202 millones de litros. Los principales consumidores serán: EE.UU. con 60% del mercado mundial seguido por Brasil con 23% y la Unión Europea con 10% (PROECUADOR, 2013). En el Ecuador los biocombustibles se han definido como un sector estratégico en la nueva matriz productiva del país. El programa piloto “Ecopaís” que se desarrolla desde enero del 2010 en la ciudad de Guayaquil tiene como objetivos replicarse a nivel nacional. La gasolina ECOPAÍS es un biocombustible que está compuesta por un porcentaje de hasta el 10% de bioetanol anhidro, grado carburante y diferencia por naftas necesarias para alcanzar el número de octanos (Decreto Ejecutivo 675, 2015).

La demanda nacional de gasolina es de 14.943.000 barriles/año lo que corresponde a 6.500.000 litros /día. La demanda de etanol anhidro es de 650.000 litros /día por lo que no se puede cubrir la demanda de etanol con la producción existente de caña, pues de cada hectárea de caña se puede obtener entre 5.000 y 6.000 litros de etanol anhidro. La producción de etanol no supera la demanda lo que requiere de su exportación como se muestra en la Figura 14, el principal exportador es Perú con el 94 % de exportación seguido de Alemania y EE UU con el 2%.

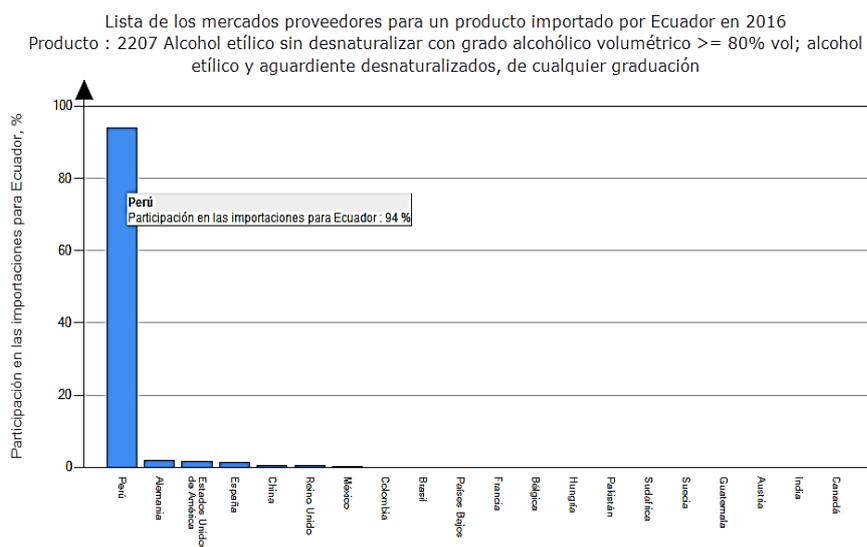


Figura 13. Países proveedores de etanol en el 2016.

Fuente: (TRADEMAP, 2017).

El precio propuesto por Asociación de Productores de Alcohol del Ecuador (APALE) la Unión Nacional de Cañicultores del Ecuador (UNCE) y la Cámara de Industrias de Guayaquil fue de 0,55 \$/L hasta su incremento a 0,65 \$/L de etanol anhidro, mientras durara el plan piloto “Ecopaís”. Dicho precio fue fijado teniendo como referencia los precios del etanol a nivel internacional como los precios domésticos del etanol en Brasil eran de 0,43 \$/L y en Colombia 0,59 \$/L (Figueroa de la Vega & Altamonte, 2008).

A nivel regional de la Amazonía, la producción de biocombustibles es nula. Sin embargo, la producción de alcohol etílico o más conocido como “aguardiente” es obtenido a través de las 23 destilerías presentes en la provincia de Pastaza y es destinado para el consumo de la población (GADPPz, 2017), sin embargo, en la Región Sierra ecuatoriana también se produce aguardiente, es vendido a las empresas SODERAL S.A., PRODUCARGO S.A., como materia prima para suplir la demanda de etanol carburante. Por lo tanto, la demanda de producción de etanol es considerable principalmente en el desarrollo del programa ECOPAÍS el cual pretende sustituir la gasolina comercial ‘‘Extra’’.

4.1.2. Selección de la tecnología.

La etapa de selección de la tecnología se estableció con el análisis de la fundamentación teórica de la investigación, en el capítulo 2, epígrafe 2.2, se detallan las materias primas y el epígrafe 2.3 se hace referencia a las tecnologías que implican la producción de etanol carburante. En ellas se engloba el rendimiento de cada una de las etapas del proceso y se determinan las mejores condiciones para lograr una mayor producción.

La tecnología aplicada en la obtención de etanol carburante se detalla en el epígrafe 2.3.1, el acondicionamiento de la materia prima; 2.3.2, la descripción de los pretratamientos, 2.3.3, la etapa de fermentación; el epígrafe 2.3.4, la destilación y la etapa de deshidratación en el epígrafe 2.3.6. De manera general estas etapas son aplicables para distintas materias primas (ver figura 15) de las que se obtendrán los combustibles de primera generación. En el caso de los materiales lignocelulósicos procedentes de la biomasa cañera o subproductos agroindustriales como el bagazo, permitirán obtener los combustibles de segunda generación.

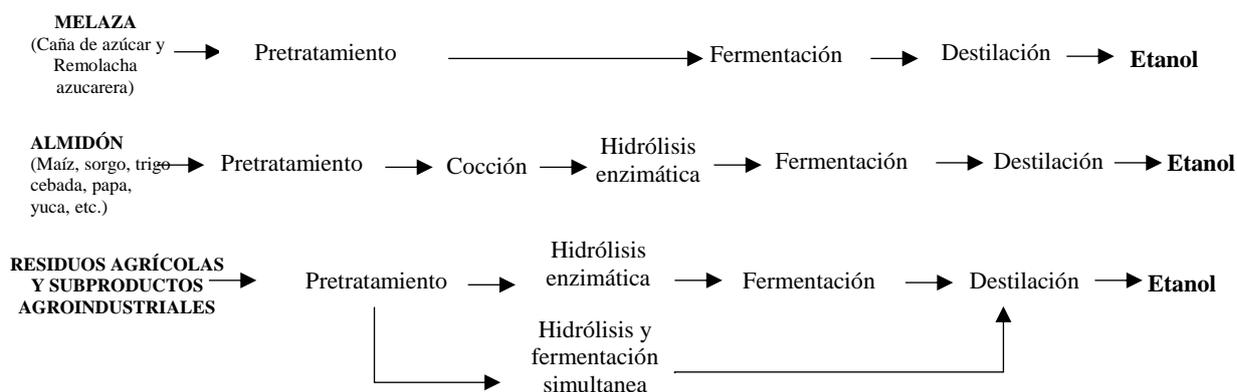


Figura 14. Fuentes de obtención de Bioetanol.

La selección de la tecnología se realizó a partir de la revisión de las distintas tecnologías utilizadas para la obtención de etanol descrita en el epígrafe 2.3 del capítulo 2. Se analizó las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías y se seleccionó la que más se ajusta

al contexto de la región amazónica. La tecnología seleccionada se representa en el diagrama de bloque en la figura 16. Este se llevó a cabo siguiendo un proceso de varias operaciones.

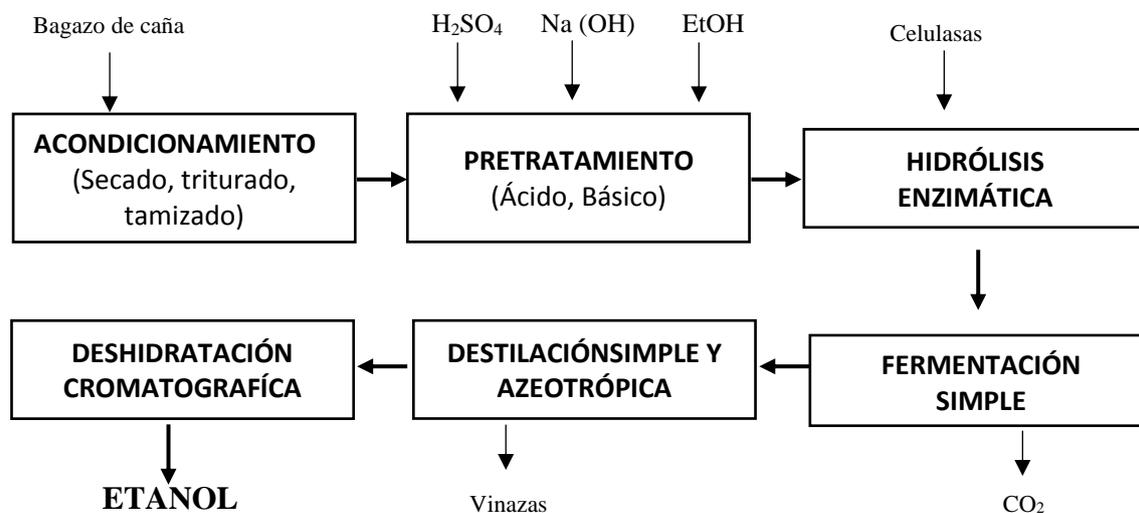


Figura 15. Diagrama de Bloque seleccionado en la obtención de etanol carburante.

Fuente: Elaboración Propia.

Los procesos tecnológicos utilizados en el presente estudio son el acondicionamiento del bagazo aplicando las operaciones de secado, reducción de tamaño y tamizado para obtener partículas uniformes de bagazo para que sean más accesibles a los pretratamientos (físicos, químicos, biológicos), hidrólisis enzimática, fermentación, destilación, rectificación y deshidratación por separación cromatográfica. En la etapa de pretratamiento se obtienen azúcares fermentables del tipo glucosa y xilosa mientras que en la fermentación se lleva a cabo la conversión de los azúcares fermentables a etanol y dióxido de carbono por medio de microorganismos. Si sólo se utiliza la levadura más común (*Saccharomyces cerevisiae*) sólo fermentaría la glucosa (Aburto et al., 2008). Sin embargo se encuentran otros productos hidrolizados de hemicelulosa como la xilosa que son fermentados a través de otras enzimas (hidrolasas). Tomando en cuenta estos detalles se empleó la hidrólisis enzimática y la fermentación por separado. La hidrólisis enzimática o sacarificación permite la transformación de los polisacáridos de celulosa en azúcares fermentables (glucosa). Estos azúcares fermentables se envían a la etapa de fermentación y por la acción de microorganismos fermentadores de azúcares son transformados en etanol. La ventaja de estos procesos es que permiten establecer las condiciones óptimas en cada una de las operaciones.

4.1.3. Definir el esquema tecnológico.

El esquema tecnológico inició con el acondicionamiento del bagazo de caña (ver figura 17) que consiste en el lavado, la reducción de tamaño y tamizado, para la obtención de partículas uniformes y el transporte del bagazo hacia la siguiente etapa. (Ver Anexo 1).

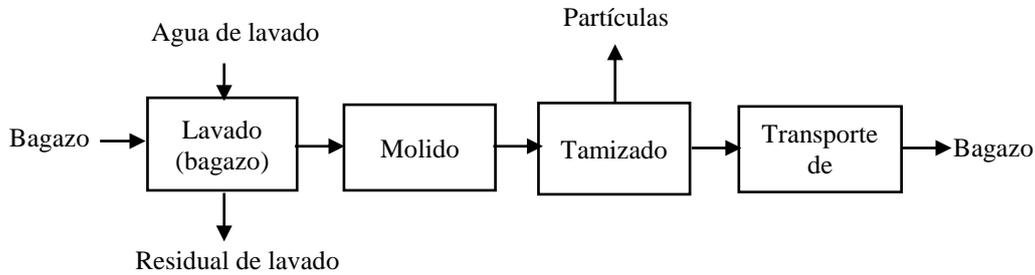


Figura 16. Diagrama de bloques del acondicionamiento de bagazo.

Fuente: Elaboración Propia.

Las partículas seleccionadas se envían al proceso de pretratamiento en los que se aplica la hidrólisis ácida, básica y enzimática, para el posterior filtrado en cada una de las etapas, como se muestra en la figura 18. En este proceso la estructura de la fibra se rompe o se fracciona en sus componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina) (Albernas Carvajal et al., 2017). Del proceso se obtiene furfural producto de la hidrólisis ácida de la lignina y azúcares fermentables (glucosa xilosa) como productos de la hidrólisis básica y enzimática de la celulosa y hemicelulosa. El bagazo hidrolizado es llevado a la siguiente etapa. (Ver Anexo 2).

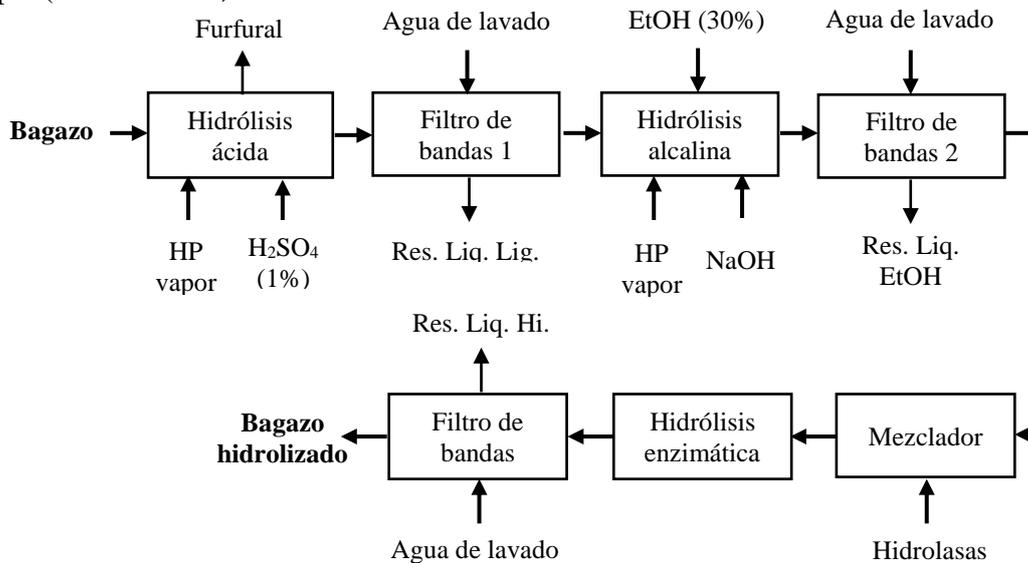


Figura 17. Diagrama de bloque para el pretratamiento del bagazo.

Fuente: Elaboración Propia.

La corriente del bagazo hidrolizado obtenido en la etapa anterior contiene azúcares fermentables (xilosa, glucosa) y agua. Como se muestra en la figura 19, estos azúcares fermentables, se envían a la etapa del mezclado; pasaran a la etapa de pre-fermentación con adición de aire a través de un compresor; de este proceso se obtiene un sustrato idóneo para la fermentación total de los azúcares y un residual de CO₂. Posteriormente, la etapa de fermentación de los azúcares se realizó mediante cepas de levaduras u otros microorganismos que metabolizan la glucosa en etanol y CO₂ (Ishola, 2014). De la etapa de almacenamiento se separa del mosto el alcohol etílico de los demás productos de la fermentación. El alcohol obtenido pasa al intercambiador de calor, a continuación al proceso de destilación, del cual se obtienen como residuos la vinaza; pasó al rectificador que recircula al intercambiador de calor, el enfriamiento del alcohol y finalmente pasó a la deshidratación y se obtiene etanol. (Ver Anexo 3)

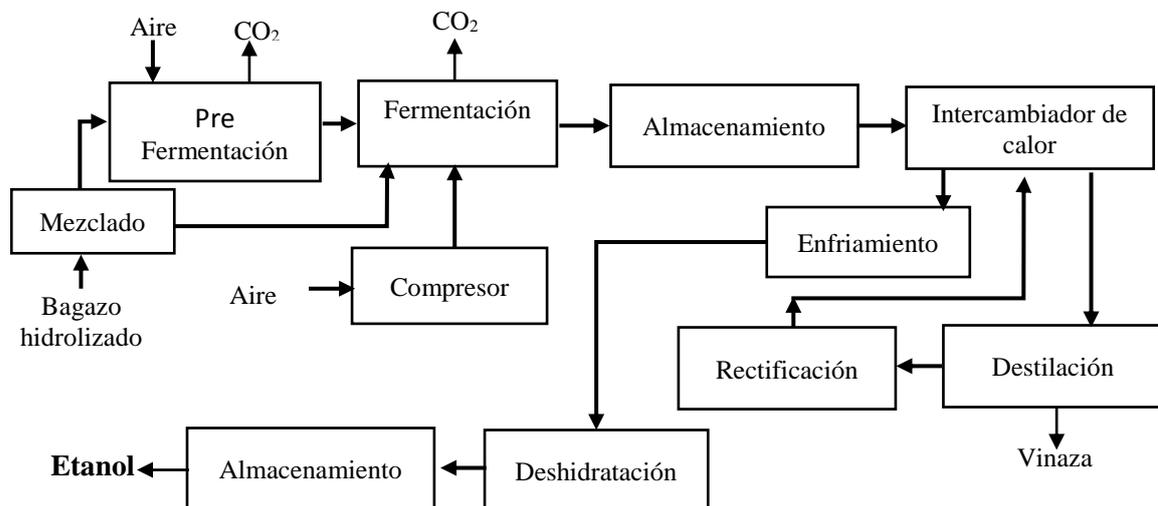


Figura 18. Diagrama de bloque de la tecnología de producción de Etanol.

Fuente: Elaboración Propia.

Estas etapas se desarrollaron a partir de la selección de la tecnología descrita el paso 4.1.2, el proceso se realizó con el simulador *SuperPro Designer*, esta herramienta permite construir modelos tecnológicos con una representación exacta del proceso real; para el análisis y evaluación de los aspectos técnicos económicos y ambientales requeridos para el diseño del proceso tecnológico de etanol. Una vez que se definió el esquema tecnológico se prosiguió con los pasos siguientes.

4.1.4. Estimación de la capacidad.

En la caracterización de la industria del etanol en Ecuador, analizados en los epígrafes 2.1.1 y 2.1.2, Estos datos se utilizaron en la ecuación 1, para el cálculo de la cantidad de bagazo de caña producida o que se produciría diariamente en la provincia de Pastaza. La estimación de la capacidad de obtención de bagazo de caña se realizó en función de la cantidad de caña cultivada en la provincia de Pastaza.

Datos.

Producción de caña de azúcar (PC): 4500 ha

% de cultivo de caña de azúcar útil (CCU): 90%

Rendimiento estimado de caña (RC): 55 t/ha

% destinado para la producción de panela y aguardiente (PPA): 70 %

% de bagazo extraído de la molienda de caña (BE): 42 %

Días del año (d): 365 días

¿Cantidad de bagazo tentativo de producción diaria (CBPD): ?

Solución:

$$CBPD = \frac{PC * CCU * RC * PPA * BE}{d}$$

$$CBPD = \frac{4\,500 \text{ ha} * 0.90 * 55 * 0.70 * 0.42}{365 \text{ d}} = 179,42 \text{ t/d.}$$

Ecuación 1. Estimación de la capacidad de bagazo de caña.

Por lo tanto se cuenta con una disponibilidad de 179,42 t/d de bagazo de caña en la provincia de Pastaza, siendo una cantidad representativa para su aprovechamiento en la obtención de bioetanol carburante. Esta valoración permitió determinar el rendimiento ideal de producción de etanol en comparación con otros rendimientos, utilizando las materias primas habituales.

El rendimiento de etanol a partir del jugo de caña se reporta en 75 L/t de caña. Los procesos de molienda de maíz en húmedo y seco poseen eficiencia superior al 95% en la producción de etanol a partir de almidón. Estos rendimientos están entre 419.4 – 460.6 L de etanol por tonelada de maíz con moliendas en seco y de 403.1 L de etanol por tonelada de maíz con molienda en húmedo (Montoya et al., 2005)

El estudio desarrollado por (Velásquez Riascos & López, 2015) en la obtención de etanol carburante a partir de biomasa cañera se obtuvo 121 000 L/d de etanol anhidro a partir de 1000 t de hojas y cogollo con un rendimiento del 78,5%. El estudio realizado por (Sarkar et al., 2012) señala, que se pueden producir 442 mil millones de litros de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica y que los residuos totales de los cultivos y los cultivos

desperdiciados pueden producir 491 mil millones de litros de bioetanol por año, unas 16 veces más que el mundo actual en la producción de bioetanol.

Se comprobó que la disponibilidad de bagazo de caña es de 179,42 t/d cantidad suficiente en comparación de las 36, 54, 72, 90, 108, 126, 144 t de bagazo de caña que se simularon para la producción de etanol carburante.

4.1.5. Macrolocalización.

La macrolocalización de la planta permitió determinar la disponibilidad de la materia prima (bagazo) provenientes de las parroquias Tarqui, Puyo, San José, Fátima que presentaron la mayor superficie de producción de caña. Principalmente en la parroquia Tarqui y Puyo sector las Américas se concentró la mayor producción de panela y aguardiente (GADPPz, 2017). La superficie sembrada de caña de azúcar para cada una de las parroquias se detalla en la Tabla 1, para lo cual, se calculó la cantidad de bagazo producido aplicando la ecuación 1, definida en la estimación de la capacidad.

Tabla 10. Disponibilidad de bagazo.

Sectores	Producción de caña (ha)	Producción de Bagazo (t)
Tarqui	198.75	7.9 t/d
Veracruz	131.35	5.2 t/d
San José	91.9	3.6 t/d
Fátima	80.35	3.2 t/d
Otros sectores	3547.65	141.4 t/d

Fuente: (GADPPz, 2012).

Estos datos no revelaron la totalidad de producción de residuos debido a que existen paneleras artesanales en las comunidades alejadas de otras parroquias y destilerías que no reportan la cantidad de caña empleada en el proceso de molienda.

4.1.6. Balance de masa y energía.

Los balances de masa y energía se realizaron para cada uno de los equipos que intervienen en el diagrama de bloque del acondicionamiento del bagazo de la figura 17, (Anexo1); el diagrama de bloque del pretratamiento de bagazo de la figura 18, (Anexo 2) y el diagrama de bloque de la tecnología de producción de etanol de la figura 19, (Anexo 3). En estos diagramas de flujo se muestran en el epígrafe 4.1.3, de definición del el esquema tecnológico. Se realizó por medio del programa computacional *SUPERPRO DESIGNER* herramienta que facilita el cálculo de balance de masa y energía y el dimensionamiento de los equipos. Se determinaron los flujos y composición de cada una de las etapas que conforman el esquema tecnológico para la producción de etanol carburante a partir de bagazo de caña.

Tomando en cuenta estos factores se analizaron en la tabla 11, los indicadores ambientales para las capacidades de 36, 54, 72, 90, 108, 126, 144 t/d de bagazo que se construye a partir de las cantidades de los materiales a granel (Anexo 4), la cantidades del consumo de utilidades (Anexo 5) y la cantidad de residuos generados del proceso (Anexo 6) en relación a la cantidad de etanol producido.

Tabla 11. Indicadores Ambientales.

Indicadores cuantificables		INDICADORES AMBIENTALES						
		Capacidad: Bagazo de caña						
		36 t/d	54 t/d	72 t/d	90 t/d	108 t/d	126 t/d	144 t/d
Materiales a granel								
kg/kg de producto	H ₂ SO ₄ (10% w/w)	2 392	2 392	2 392	2 392	2 393	2 393	2 393
kg /kg de producto	Vapor	1 096	0 731	0 548	0 439	0 365	0 313	0 274
kg/kg de producto	Hidrolasa	0 115	0 114	0 114	0 011	0 114	0 114	0 114
kg/kg de producto	Agua	7 714	5 143	3 857	3 086	2 572	2 205	1 929
kg/kg de producto	Bagazo	11 96	11 96	11 96	11 96	11 96	11 96	11 96
kg/kg de producto	Aire	11 53	11 53	11 53	11 54	11 54	11 54	11 54
kg/kg de producto	RO Agua	4 526	3 018	2 263	1 811	1 509	1 294	1 132
kg/kg de producto	EtOH (30% p/p)	2 679	1 786	1 340	1 072	0 893	0 766	0 670
kg/kg de producto	NaOH (3% p/p)	2 679	1 786	1 340	1 072	0 893	0 766	0 670
Consumo de utilidades								
kW-h/kg de producto	Energía estándar	0 208	0 207	0 206	0 206	0 206	0 205	0 205
kg/kg de producto	Vapor	1 922	1 922	1 923	1 922	1 923	1 923	1 923
kg/kg de producto	agua de enfriamiento	387 6	387 6	387 6	387 7	387 7	387 7	387 8
kg/kg de producto	Agua de pozo	13 383	13 382	13 381	13 380	13 379	13 378	1 338
Categoría de residuos								
Residuo sólido								
kg/kg de producto	Ceniza	0 1460	0 1457	0 1460	0 1458	0 1457	0 1459	0 1460
Líquido acuoso								
kg/kg de producto	Residual del lavado(B)	1 081	1 082	1 082	1 082	1 082	1 082	1 082
kg/kg de producto	Res.Liq.(lignina)	68 52	48 27	38 15	32 08	30 92	25 14	25 14
kg/kg de producto	Res.Liq.(EtOH)	45 62	30 55	23 01	18 49	15 48	13 32	11 71
kg/kg de producto	Vinazas	3 763	3 763	3 764	3 764	3 764	3 980	3 765
Emisiones								
kg/kg de producto	flujo de CO ₂ (caldera)	17 75	17 75	16 74	17 75	17 75	17 76	17 74

kg/kg de producto	CO2 Prefermentador	1 084	1 085	1 085	1 085	1 085	1 085	1 085
kg/kg de producto	CO2 Fermentador	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191	1 191
Producción de etanol								
kg /año	Producto (Etanol)	993 289	1 489 850	1 986 354	2 482 802	2 979 201	3 475 532	3 971 830

Fuente: Elaboración Propia.

A partir de las capacidades de bagazo de caña que se simularon se identificaron los materiales a granel que corresponden a la materia prima principal (bagazo). El H₂SO₄ (10% w/w), vapor, Hidrolasa, Agua, Aire y RO Agua presentan incrementos progresivos en relación al aumento del consumo de bagazo de caña, a excepción del vapor EtOH (30% p / p) y NaOH (3% p / p). Estos materiales son utilizados principalmente en la primera etapa de hidrólisis en el lavado del producto hidrolizado y en la etapa de fermentación en la que es necesario el acondicionamiento del sustrato.

En cuanto al consumo de las utilidades como el consumo de energía, vapor, agua de enfriamiento y agua de pozo, presentan incrementos debido a que intervienen directamente en el funcionamiento de los equipos y posibilitan las reacciones y la formación de producto a lo largo de todo el proceso tecnológico para la obtención de etanol.

Los residuos generados en el proceso corresponden a los residuos sólidos como cenizas y los residuos líquidos generados son: el residual del lavado, residual de lignina y residual de etanol que va en incrementando en relación al aumento de consumo de bagazo.

4.1.7. Constatar la disponibilidad y consumo de materia prima.

En este paso se verificó si el consumo de materia prima era menor a la disponibilidad de materia primas, hasta que el objetivo se cumpla no se avanza a la etapa siguiente, por lo que se volvería a analizar el paso 4.1.4, de estimación de la capacidad. En este estudio se demostró que la disponibilidad de bagazo de caña en la provincia era de 179.42t/d de bagazo comparado con al consumo de bagazo que se utilizó, lo cual se detalla en la tabla 12.

Tabla 12. Disponibilidad vs consumo de bagazo de caña.

Disponibilidad de Bagazo	Consumo de Bagazo	Diferencia de bagazo
179.42 t/d	36 t/d	143,42 t/d
	54 t/d	125,42 t/d
	72 t/d	107,42 t/d
	90 t/d	89,42 t/d
	108 t/d	71,42 t/d
	126 t/d	53,42 t/d
	144 t/d	35,42 t/d

Fuente: Elaboración Propia.

Se detalla el bagazo de caña excedente, aun después de su utilización en el proceso, por lo tanto se determinó que el consumo de bagazo de caña es menor que la disponibilidad de bagazo, por lo que no fue necesario estimar nuevas capacidades. Entonces, la decisión que presentó el diagrama heurístico era la continuación a la etapa 8.

4.1.8. Comprobar el cumplimiento de normas ambientales

Los residuales generados del proceso tecnológico se detallaron en el paso 4.1.6 del Balance de Masa y Energía, en la tabla indicadores ambientales, donde se relacionaron las cantidades de los residuos sólidos (cenizas), los residuales líquidos (residual de lavado, lignina, vinazas) y las emisiones de CO₂ provenientes de la caldera, prefermentador y fermentador (Ver anexo 6). Estos residuales se incrementaron a medida que aumentó la capacidad de bagazo que se simuló con el programa *SuperPro Designer*. En las 36 t de bagazo empleados los residuales generados representaron el 6%; para las demás capacidades de bagazo los residuales aumentaron, hasta que en la capacidad de 144 t de bagazo fue de 23% de residuos generados, por lo tanto, el costo de tratamiento de estos residuos también aumentó. Los costos de los residuales generados se visualizan en la figura 20.

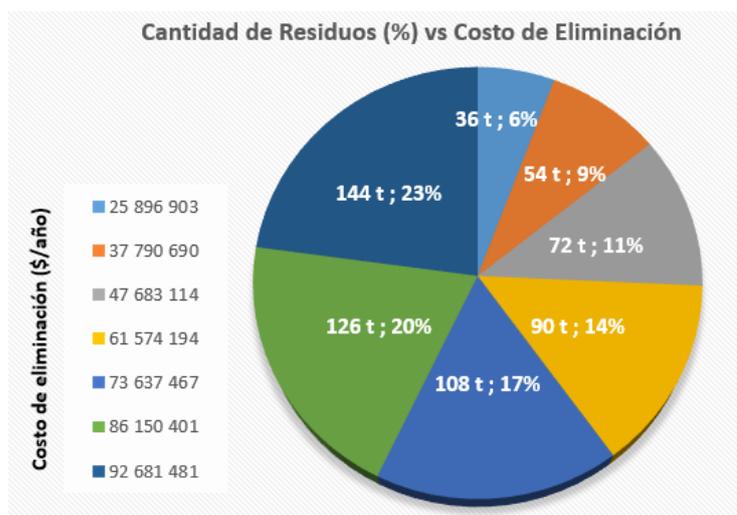


Figura 19. Costo anual de eliminación de residuos.

Fuente: Elaboración Propia.

Los costos de residuales se determinaron a partir del costo de materia primas que se han transformado en el proceso productivo de etanol. Estos residuos se deben tratar eficazmente de manera que no impacten de forma negativa al ambiente. El diseño del tratamiento lo puede realizar la propia industria lo que supondría un coste adicional o se optaría por enviar el residuo a terceros para que sea tratado adecuadamente.

Por ello se deben manejar sistemas de gestión ambiental bajo normativas internacionales que garanticen el adecuado vertimiento de residuales al ambiente. Entre la normativa

internacional se encuentra la Norma ISO 14000 del Sistema de Gestión Ambiental. A nivel nacional se halla incorporado en la Constitución Política de la República del Ecuador la promoción de las energías renovables sin que estas prácticas pongan en riesgo la soberanía alimentaria del país, mediante la adopción de medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero de la deforestación y de la contaminación atmosférica; además, se tomarán medidas para la conservación de los bosques y la vegetación y protegerá a la población en riesgo (Trávez, 2011).

El tratamiento de los residuales generados del proceso tecnológico de obtención de etanol carburante se detalla en la categorización de los residuales, de los que se pueden generar recursos adicionales para la fábrica con la obtención de nuevos productos, como se definen a continuación.

➤ **Residuos sólidos.**

La biomasa agrícola tiene mucha menor cantidad de cenizas que el carbón. Sin embargo, estas cenizas originadas en la combustión de la biomasa agrícola o cultivos energéticos pueden utilizarse como regeneradores de suelos ácidos en agricultura y silvicultura debido a que son completamente inocuas.

➤ **Residuos líquidos.**

El residuo líquido de gran volumen obtenido con alta contaminación es el licor post-fermentativo. Esta corriente posee una carga contaminante alta por lo que su depuración requiere utilizar un tratamiento adecuado antes de su desecho, lo que supone un gasto extra para la planta.

La fase líquida obtenida de la separación está compuesta principalmente por agua, polialcoholes y otras sustancias producidas durante la fermentación con una carga contaminante baja, pero que debe ser tratada al contener una DQO (Demanda Química de Oxígeno) moderada y compuestos con nitrógeno, fósforo y sulfatos.

Se podrían prevenir o minimizar estos residuos líquidos mediante la recirculación de aguas utilizadas para refrigeración, la separación de aguas de lluvia de las descargas de residuos líquidos, tratamientos del agua de lavado, el aprovechamiento al máximo del bagazo de caña reducción de las pérdidas del producto en la línea de proceso e implementando un programa de mantenimiento de válvulas bombas, etcétera.

Para el tratamiento de los efluentes tendría que diseñarse un proceso con digestores anaeróbicos, seguido de un tratamiento aerobio para eliminar entre un 70% a 80% de la

demanda química de oxígeno (DQO) lo que produciría además un biogás útil para producir energía.

Vinaza.

Es el efluente resultante de la producción de alcohol a partir de la fermentación y la destilación. Se caracteriza por ser un líquido de color marrón con un gran contenido de sólidos suspendidos, presenta pH bajo (aproximadamente, pH de 4 a 5), altos valores de DQO y DBO, olor a miel final y sabor a malta. Se considera como un residual que impacta negativamente al ambiente especialmente al recurso hídrico, ya que disminuye la luminosidad de las aguas, la actividad fotosintética, producen la eutrofización del agua, contribuye al aumento de poblaciones de insectos y vectores y como resultado el desarrollo de enfermedades. Además, puede tener un potencial uso como subproducto del proceso de producción de etanol, lo cual tiene una utilidad económica y social (Zúñiga Cerón & Gandini Ayerbe, 2013).

Para ellos se han propuesto varias soluciones como recirculación y reúso al proceso de obtención de etanol específicamente al proceso de fermentación, la aplicación directa como fertilizante, en la irrigación de cultivos, concentración e incineración y tratamientos biotecnológicos.

➤ **Emisiones gaseosas.**

Dióxido de carbono (CO₂).

La producción de caña y su procesamiento en la obtención de productos como azúcar, etanol, energía eléctrica y otros productos, generan un impacto ambiental, debido al consumo de combustibles, uso de insumos, las operaciones de procesamiento, entre otros.

Se atribuye a las emisiones de CO₂ como la principal causa del calentamiento global, del cual aproximadamente el 40% de la contaminación ambiental proviene de las actividades vinculadas con el consumo de combustibles fósiles como el petróleo y sus derivados (Cenicaña, 2017).

Las emisiones gaseosas se forman como resultado del exceso de azúcar (sacarosa y otros componentes) y el suministro insuficiente de oxígeno en el fermentador. Del proceso de fermentación se desprende dióxido de carbono.

Con la finalidad de reducir las producciones de altas cantidades de CO₂ durante las operaciones de prefermentación y fermentación es primordial realizar el control de proceso que puede incluir medidas como el adecuado control de calidad, calcular la composición de azúcares, Brix, pH; suministrar suficiente oxígeno a los fermentadores para optimizar el contenido de oxígeno disuelto en el medio.

El determinar plantaciones que tengan por finalidad producir energía lleva a considerarlos como procedimientos renovables, mediante los procesos de combustión, se devuelve a la atmósfera sólo aquel CO que las propias plantas han retirado de la misma para su crecimiento. En general la biomasa (residual o no) proviene de la fotosíntesis. Esto conlleva a generar un equilibrio entre la generación de CO₂ de las destilerías que será aprovechado en el proceso de fotosíntesis de los cañaverales, por lo que se determinó que los residuales de CO₂ generados de las capacidades de bagazo de caña que se simularon eran compatibles con el ambiente.

4.1.9. Determinar la capacidad y costos de adquisición de los equipos.

Referido a los balances de masa y energía del epígrafe 4.3.6 se determinó la capacidad de los equipos y cantidad necesaria para el proceso tecnológico de etanol en función de la disponibilidad del bagazo.

Los parámetros de diseño de los equipos se obtuvieron de las ecuaciones de diseño de cada una de las operaciones y procesos unitarios que intervienen en el proceso tecnológico de obtención de etanol. (Anexo 1), acondicionamiento del bagazo; (Anexo 2), pretratamiento del bagazo;(Anexo 3), producción de etanol.

La simulación del esquema tecnológico para la producción de etanol carburante a partir de bagazo de caña se realizó usando el programa computacional *SuperPro Designer*. En el Anexo 8, se muestra el dimensionamiento de los equipos, la cantidad de equipos utilizados en el proceso y el costo de adquisición actualizados para el año 2010. Con estos datos se confeccionó la Figura 21 que corresponde a los costos totales de adquisición de los equipos.

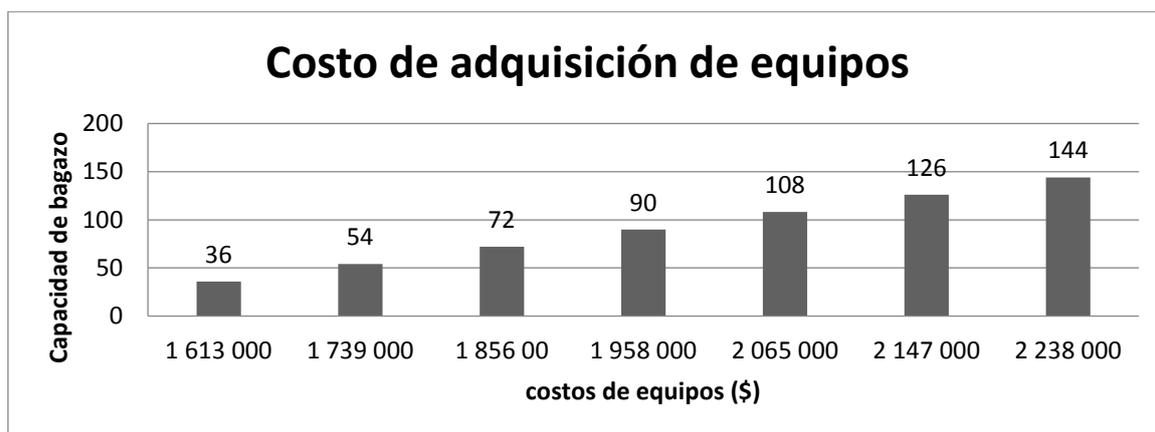


Figura 20. Costos totales de adquisición de equipos.

Fuente: Elaboración Propia.

Para las capacidades de 36, 54, 72, 90, 108, 126, 144 t/d se evidenció el aumento de la capacidad de bagazo de caña y el aumento del dimensionamiento de los equipos. Sus costos

dependen directamente de los parámetros de diseño como caudales, temperaturas, presiones, potencias, entre otros, que caracterizan a cada equipo y esto caracteriza su fiabilidad; en función de las operaciones de trabajo de los mismos y la capacidad de bagazo de caña que se empleó para el proceso tecnológico.

4.1.10. Determinar la disponibilidad de los equipos.

A partir de los cálculos de balance de masa y energía elaborado para las capacidades de bagazo de caña estudiadas (Anexo 7), se obtuvo el dimensionamiento y los parámetros de operación de los equipos. Para el presente estudio el número óptimo de equipos no sufrió cambios debido a que estos tienen alta fiabilidad.

4.1.11. Análisis económico.

El análisis económico del esquema tecnológico para la producción de etanol carburante a partir de bagazo de caña se realizó usando el simulador de procesos *SuperPro Designer* que permiten desarrollar el análisis y evaluación económica para las capacidades de 36, 54, 72, 90, 108, 126, 144 t/d de bagazo de caña.

➤ Costo de inversión.

El resumen estimado del capital fijo se presenta en el anexo 8, que corresponden al costo de inversión y se detalla en función de los precios del año del 2010. En el resumen estimado del capital fijo se especifican el costo directo total de planta (TPDC) (costo físico), costo indirecto total de la planta (TPIC), costo total de la planta (TPC), tarifa y contingencia del contratista (CFC) y costo directo de capital fijo (DFC) para las siete capacidades de bagazo simuladas. El costo de inversión resultó directamente proporcional al incremento de la capacidad de bagazo de caña.

➤ Costo de operación anual.

El costo de operación anual dependió directamente de la capacidad de producción de la planta, estas operaciones involucran los costos de materia prima, costos de servicios y costos de los tratamientos de residuos; estos datos se presentan en la tabla del Anexo 9. El costo total de las operaciones mencionadas anteriormente se representa en la figura 22, estos costos de operación anual están en función del incremento de consumo de bagazo.



Figura 21. Costos de operación anual vs las capacidades de bagazo.

Fuente: Elaboración Propia.

Se evidencia el incremento del costo anual en dependencia del aumento de la capacidad de bagazo. Como se menciona en el estudio de (Aburto et al., 2008), la inversión total necesaria para la planta de bioetanol está determinada por las operaciones de pretratamiento (Ozonólisis) e hidrólisis enzimática (sacarificación), esto conlleva a que el volumen de los azúcares fermentables producidos en las operaciones mencionadas impactan de manera importante en el tamaño de los equipos subsecuentes y por lo tanto en la inversión del capital. Por lo tanto, la eficiencia de las operaciones unitarias que transforman las materias primas en producto debe ser de rendimientos altos. Los subproductos podrían recircularse a los mismos procesos o venderlos para generar beneficios económicos. La optimización en el consumo de facilidades auxiliares y otros aspectos necesarios en el proceso tecnológico repercuten en los costos de operación.

4.1.12. Optimización.

No se aplicará ningún proceso de optimización.

4.1.13. Valorar la alternativa económicamente factible.

La factibilidad económica y la rentabilidad del proceso tecnológico simulados se determinó a través del valor actual neto (VAN). Para ello se asume que el proyecto será rentable si el VAN es positivo.

Se analizaron varias capacidades de la tecnología, partiendo de 36 t y 54 t de bagazo de caña, se reportó el VAN negativo, la tasa interna de retorno y el tiempo de retribución son nulos, por lo que estas capacidades no son procesos rentables. Por lo tanto, regresando al paso de 4.1.4., de estimación de capacidad se estimaron nuevas capacidades de bagazo. Se tomó la decisión de seleccionar un valor cercano a la disponibilidad de bagazo estimada y una cantidad que este por debajo de este valor. Como se muestra en la figura 23 se simularon nuevas capacidades de 72, 90, 108, 126 y 144 t de bagazo de caña. Estas se presentan como

alternativas de capacidades de bagazo rentables de acuerdo a los indicadores dinámicos económicos y se avanzó hacia el paso 4.1.14.

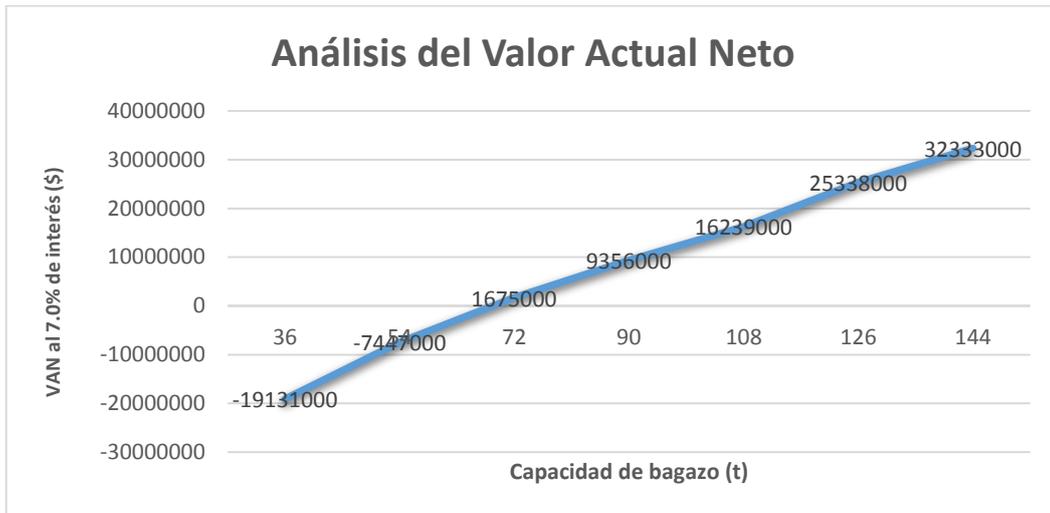


Figura 22. Análisis del VAN vs las Capacidades de bagazo.

Fuente: Elaboración Propia.

Dentro del intervalo analizado no se conoce exactamente la capacidad en la cual el VAN a una tasa de interés determinada se vuelve cero y pasa de negativo a positivo. Por ello, se calculó, la capacidad de bagazo en el que el VAN es cero (0) o comienza generar ganancias, representado en la figura 24. El valor obtenido es de 64 t, este dato se calculó utilizando la macro *Solver* del programa *Microsoft Excel*. Es a partir de esta capacidad de bagazo que el VAN comienza a ser positivo.

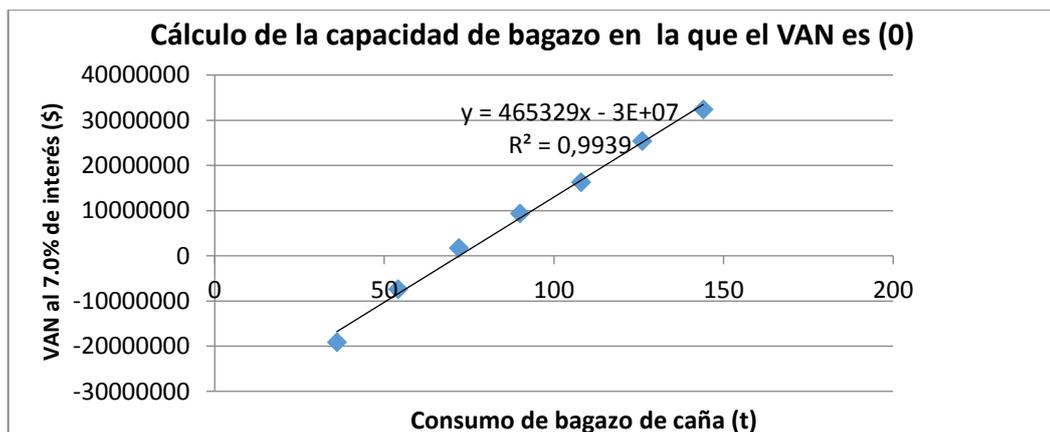


Figura 23. Cálculo de la capacidad de bagazo en la que el VAN es cero.

Fuente: Elaboración Propia.

Además, se calcularon los años de retorno de la inversión los que van disminuyendo a medida que el VAN aumenta (Ver anexo 10). Estos valores permiten identificar que la inversión es recuperable en el menor tiempo posible.

4.1.14. Análisis de otras tecnologías.

En este caso de estudio no se analizaron otras tecnologías. Solamente se analizó la tecnología de obtención de etanol carburante a partir de bagazo de caña.

4.1.15. Análisis de nuevas capacidades.

En este estudio se simularon las capacidades de 36, 54, 72, 90, 108, 126 y 144 t de bagazo de caña con el objetivo de proponer alternativas tecnológicas factibles en la obtención de etanol carburante. De estas alternativas, se seleccionó la capacidad de bagazo de caña más rentable en función de la demanda del producto. Este análisis se determinó comenzando por el epígrafe 4.1.3, de definición de la de la tecnología y considerando los pasos siguientes.

El esquema tecnológico definido es el proceso tecnológico de obtención de etanol carburante con hidrólisis enzimática del bagazo de caña que se detalla en el en los anexos 1 2 y 3. Se estimó la capacidad en el epígrafe 4.1.4, a partir de 4 500 ha de cultivo de caña de azúcar presentes en la provincia de Pastaza, se consideró que el 90% de este cultivo es aprovechable, obteniéndose 4050 ha de cultivo de caña; de las cuales el 70% se destinó para la elaboración de panela y aguardiente, con un rendimiento de 55 t/ha de caña de azúcar. La fabricación de panela es artesanal y se trabaja todo el año, en la molienda de la caña se extrae alrededor del 58% de jugo y 42% extracción de del bagazo. De estos datos se calculó la cantidad de bagazo de caña producida o que se produciría diariamente que es de 179,42 t/d. Se determinó en el epígrafe 4.1.5 que, sí existe la disponibilidad de bagazo proveniente de la fabricación de panela de las parroquias Fátima, Puyo y Tarqui, sector las Américas.

Utilizando el simulador SuperPro Designer se calculó el balance de masa y energía detalladas en el epígrafe 4.1.6; con los indicadores ambientales se determinaron los flujos y composición de cada una de las capacidades simuladas. En el epígrafe 4.1.7, se constató la que la disponibilidad de bagazo fue de 179.42 t/d, mayor que el consumo de bagazo de caña referente a las siete capacidades de bagazo simuladas; aun así se evidenció un sobrante de bagazo.

Se comprobó el cumplimiento de las normas ambientales en el epígrafe 4.1.8, Se obtuvo que los residuos sólidos (cenizas) y los residuales líquidos (residual de lavado, residual líquido de lignina y residual líquido de etanol) aumentan en función de las capacidades de bagazo simulada al igual que las emisiones de (CO₂) son compatibles ambientalmente.

La capacidad y costo de adquisición de los equipos descritos en el epígrafe 4.1.9, y 4.1.10, dependen directamente de los parámetros de diseño (caudales temperaturas, presiones, potencias, entre otros) que caracterizan a cada equipo del trabajo a desarrollar y la capacidad

de bagazo de caña que se emplea para el proceso tecnológico. El número óptimo de los equipos no presentó cambios en las capacidades de bagazo simuladas.

El análisis económico del epígrafe 4.1.11, se realizó a partir de los costos de operación anual; se evidenciaron incrementos de los costos debido a que para cada una de las capacidades también se incrementaron flujos y corrientes del proceso. Con este análisis se buscó maximizar los beneficios comparando los indicadores dinámicos económicos (Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno, tiempo de retorno de la inversión).

Se simuló las capacidades de 36 t y 54 t de bagazo, de las que se obtuvieron los indicadores dinámicos económicos negativos, por lo que se simuló nuevas capacidades a partir de 144 t de bagazo, el cual se fue disminuyendo hasta la menor capacidad de 36 t de bagazo simulada. En el epígrafe 4.1.13, se valoró la alternativa económicamente factible de las capacidades simuladas en función del Valor Actual Neto igual a cero este valor fue 64 t, es decir el VAN es positivo y empieza a generar ganancias hasta la capacidad de 144 t que se simuló finalmente (Ver Anexo 9).

El intervalo de 64 t hasta 144 t de bagazo de caña resultó factible para el desarrollo del proceso tecnológico de obtención de etanol carburante. Esto permitiría elegir cualquiera de ellas en función del monto de inversión que se disponga.

4.1.16. Selección de la tecnología y capacidad óptima.

Los indicadores dinámicos económicos de las diferentes capacidades de bagazo de caña necesaria en el proceso tecnológico de obtención de etanol carburante que se muestran en el Anexo 10, permitieron la selección de la tecnología y capacidad óptimas en función de que el Valor Actual Neto (VAN) sea positivo. Los indicadores dinámicos se obtuvieron principalmente del costo de inversión total de capital y los costos de operaciones. De estas capacidades se determinó la capacidad de bagazo en el que el VAN es positivo, este corresponde a 64 t de bagazo. La capacidad de bagazo simulada con 144 t presenta un mayor VAN \$32 333 000, una TIR del 31.3% y el tiempo de retribución es 2.38 años, esta capacidad seleccionada resultó óptima según el análisis técnico económico y ambiental. Además, estos criterios se analizaron en las etapas de macro localización y la disponibilidad de los equipos. Se puede producir etanol carburante a partir del etanol etílico o aguardiente producido en las 23 destilerías de la provincia; este producto presenta alrededor de 60°alcohólicos, el cual puede ser incorporado en la etapa de rectificación y deshidratación hasta alcanzar los grados alcohólicos requeridos para el etanol combustible.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.

1. Se realizó el diseño *in silico* del proceso tecnológico para la obtención de etanol carburante, obteniéndose la capacidad óptima de 144 t de bagazo para un VAN de \$32 333 000, una TIR del 31.3%, el tiempo de retribución es 2.38 años, lo que comprueba que es una alternativa de aprovechamiento del bagazo de caña en la provincia de Pastaza.
2. Se determinó que los pretratamientos físicos (secado, triturado, tamizado) en el bagazo de caña, posibilitan la accesibilidad eficaz de los disolventes químicos de la hidrólisis ácida y básica. La hidrólisis enzimática se utilizó para obtener azúcares fermentables que se emplearán en la tecnología de producción de etanol carburante que se seleccionó para el contexto de Pastaza.
3. La tecnología que se seleccionó para la obtención de alcohol carburante abarcó el acondicionamiento del bagazo de caña, el pretratamiento (hidrólisis ácida-básica); el proceso de hidrólisis enzimática, la fermentación simple, el proceso de separación (destilación simple y azeotrópica) y el proceso de purificación por cromatografía. Se seleccionaron estas etapas por su rendimiento y viabilidad técnica, fundamentalmente.
4. Se realizó la simulación de las capacidades de 36, 54, 72, 90, 108, 126, 144 t de bagazo con el programa *SuperPro Designer*, en función de las 179.42 t/d de bagazo disponible en Pastaza. Se determinaron los indicadores técnicos económicos y ambientales de las alternativas analizadas, identificándose que las capacidades de 36 t y 54 t de bagazo presentaron un VAN negativo, la TIR y tiempo de recuperación nulos y se comienza a generar ganancias a partir de 64 t.
5. Los residuales generados en el proceso tecnológico de obtención de bioetanol carburante son: cenizas (sólidos), lignina, lavado, etanol y vinazas (líquidos) y las emisiones de dióxido de carbono. Las cantidades que producen cada uno de estos residuales se encuentran dentro de los valores permisibles establecidos por la norma o se proyecta su utilización como materia prima para la obtención de nuevos productos.

5.2. RECOMENDACIONES.

1. Que se considere en trabajos futuros la viabilidad del proceso tecnológico propuesto para su desarrollo a escala piloto o semindustrial.
2. Que se realice el análisis de nuevas fuentes de materia prima de origen lignocelulósico presentes en la región amazónica.
3. Que se trabaje en el desarrollo de nuevos productos a partir de los residuales generados en el proceso tecnológico de obtención de etanol carburante para disminuir el impacto ambiental e incrementar las ganancias en el contexto de la región amazónica.

CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA.

- Aburto, J., Martínez, T., & Murrieta, F. (2008). Evaluación técnico-económica de la producción de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1), 23-30.
- Aguilar-Rivera, N. (2012). Paradigma de la diversificación de la agroindustria azucarera de México. *Convergencia*, 19, 187-213.
- Albernas Carvajal, Y., Corsano, G., González Cortéz, M., & González Suárez, E. (2017). Preliminary design for simultaneous saccharification and fermentation stages for ethanol production from sugar cane bagasse. *ICHEME*, 126, 232-240.
- Álvarez, J., Salamanca Fresno, C., & Fernández Portales, R. (2008). *Proyecto de Viabilidad de una Planta de Bioetanol con un Sistema de Cogeneración*. (Master en Energías Renovables y Mercado Energético.), EQI, España.
- Amezquita Fonseca, N. A. (2007). *Obtención de etanol por la fermentación alcohólica del hidrolizado enzimático del bagazo de caña de azúcar.*, Universidad Industrial de Santander., Bucaramanga.
- Balcinde, Y., Tirado, S., Farelo, A., Martí, E., Pineda, M., & Rosa Hugh, B. (2005). Cromatografía en capa delgada para la separación de los componentes del producto obtenido a partir de cera cruda de caña de azúcar. *Revista CENIC*, 36.
- Barroso Casillas, M. (2010). *Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorefinería*. Universidad Politécnica de Madrid., Madrid. Retrieved from [http://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL BARROSO CASILLAS.pdf](http://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL_BARROSO_CASILLAS.pdf)
- Baudino Torossi, F. (2007). *Una experiencia sencilla con fundamentos complejos: la separación de pigmentos fotosintéticos mediante cromatografía sobre papel*. Paper presented at the Anales de Química.
- Bidlack, J., Malonge, M., & Benson, R. (1992). Molecular structure and component integration of secondary cell walls in plants. *Proc. Okla. Acad. Sci.*, 72, 51-56.
- Campués Talcán, J., & Tarupí Rosero, J. (2011). *Obtención de alcohol a partir de jugo de caña, cachaza y melaza, mediante la incorporación de dos niveles de fermento (Saccharomyces cerevisiae)*. (Tesis previa a la obtención del Título de INGENIERO AGROINDUSTRIAL), Universidad Técnica del Norte, Ibarra.
- Canilha, L., Chandel Kumar, A., Milessi, T. S. d. S., Fernandes Antunes, F. A., da Costa Freitas, W. L., Almeida Felipe, M. d. G., & da Silva, S. S. (2012). Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 15. doi:10.1155/2012/989572
- Cardona, C. A., Julián, S. Ó., Montoya, M. I., & Quintero, J. A. (2005). Simulación de los procesos de obtención de etanol a partir de caña de azúcar y Maíz. *Scientia et Technica*, XI(28), 187-192.
- Cases, M. V., & Hens, A. G. (1988). *Técnicas analíticas de separación*: Reverté.
- Castellanos, O. F., Ramírez, J. C., & Rueda, M. A. (2002). Retos de la ingeniería industrial en el desarrollo de procesos. *Ingeniería e Investigación*.
- Castillo, R. O. (2012). *Caña de azúcar: Cultivo para la sostenibilidad*. Retrieved from Guayaquil.: <http://cincae.org>
- Cenicaña. (2017). *Metodología para el cálculo de la huella de carbono del etanol anhidro combustible en Colombia*. Retrieved from <http://www.cenicana.org/web/component/k2/item/713-metodologia-para-el-calculo-de-la-huella-de-carbono-del-etanol-anhidro-combustible-en-colombia>
- Couto, S. R., & Sanromán, M. A. (2006). Application of solid-state fermentation to food industry-A review. *Journal of Food Engineering*, 76(3), 291-302. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.05.022
- Chandel, A. K., F. Antunes, F. A., Vaz de Arruda, P., S. Milessi, S. T., da Silva, S. S., & Gracias de Almeida, M. (2012). Dilute Acid Hydrolysis of Agro-Residues for the Depolymerization of

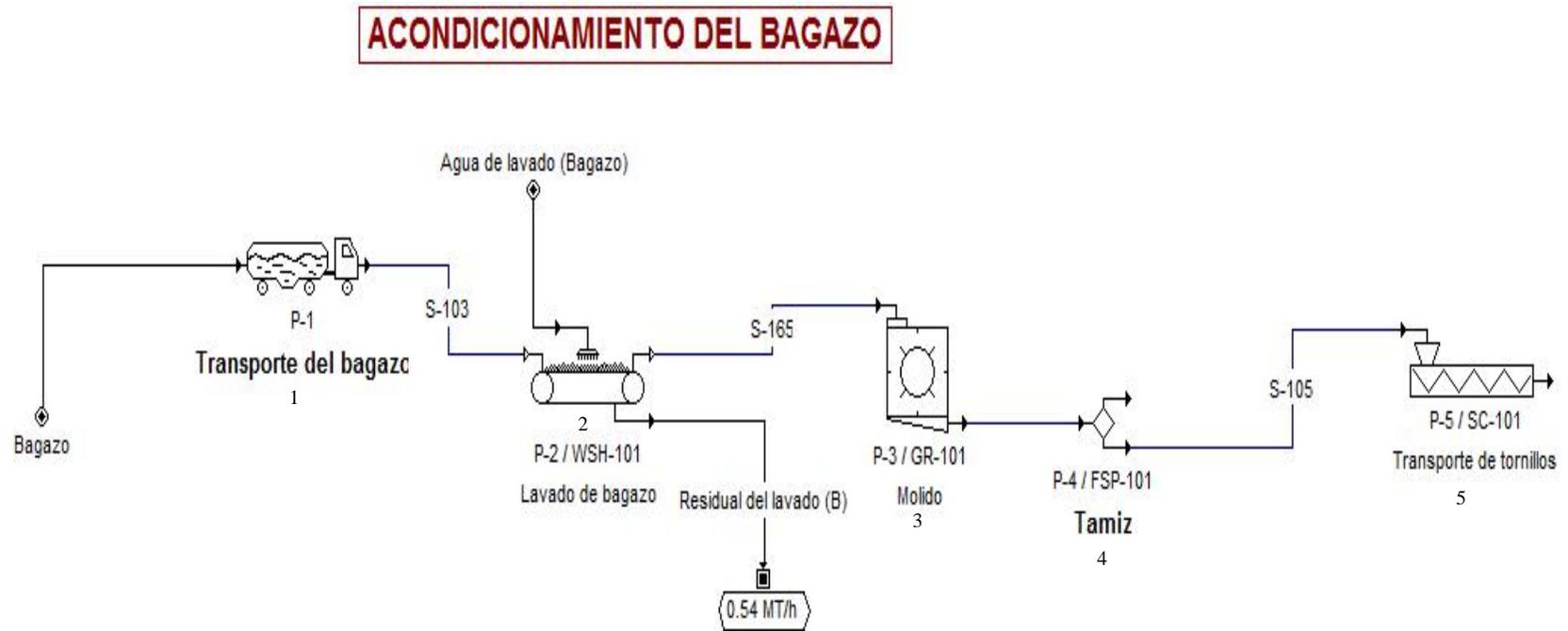
- Hemicellulose: State-the- Art. In Hardcover. (Ed.), *D-xilitol. Producción Fermentativa, Aplicación y Comercialización*. (Primera Edición. ed., Vol. XV.). Berlin. Heidelberg.
- Chandler, C., Villalobos, N., Gonzáles, E., Arenas, E., Mármol, Z., Ríos, J., & Aiello Mazzarri, C. (2012). Hidrólisis ácida diluida en dos etapas de bagazo de caña de azúcar para la producción de azúcares fermentables. *Multiciencias*, 12(3), 245-253.
- Decreto 675: Dispónese que la gasolina ECOPAÍS estará compuesta por un porcentaje de hasta el 10% de bioetanol anhidro, grado carburante, y la diferencia por naftas necesarias para alcanzar el número de octanos que establece la correspondiente norma I., § Registro Oficial 512. (2015).
- Domínguez Domínguez, M., Álvarez Castillo, A., Castrejón Rosales, T., Granados Baeza, M. J., Hernández Campos, F. J., Alcalá Octaviano, V. H., & Tapia Picazo, J. C. (2011). Estudio de la cinética de la hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar sin pretratamiento para la obtención de azúcares reductores. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 12(3), 153-159.
- Domínguez Domínguez, M., Álvarez Castillo, A., Granados Baeza, M., & hernández Campos, F. (2012). Estudio de la cinética del pretratamiento e hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 13(4), 200-211.
- Domínguez, O. J., Finetti, J. E., Michel, R. L., & Villanueva, B. A. (2007). Diseño de Sistemas de Procesos : Un enfoque integrador. *Informacion Tecnologica*, 18(4), 11-20. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642007000500003>
- Ferrer, J. R., Páez, G., Arenas de Moreno, L., Chandler, C., Mármol, Z., & Sandoval, L. (2002). Cinética de la Hidrólisis de bagacillo de caña de azúcar. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 19(1).
- Figueroa de la Vega, F. A., & Altamonte, H. (2008). " *Tablero de comando*" para la promoción de los biocombustibles en Ecuador. Retrieved from Santiago de Chile.:
- Fonseca Santanilla, E. B., María, O. A., & Vargas, I. J. (2006). Hidrólisis ácida de sustratos residuales agroindustriales colombianos. *Umbral Científico*.(8), 5-11.
- Fraguela, H., Laucerica, J. L., Moraes Rocha, G. J., Barbosa Soares, I., & Martín, C. (2013). Fraccionamiento de bagazo de caña de azúcar por prehidrólisis ácida y tratamiento con glicerol. *Centro Azúcar*, 40, 61-71.
- Plan de desarrollo de la provincia de Pastaza al año 2025. Actualizado 2012, (2012).
- GADPPz (Producer). (2017). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Pastaza al año 2025. Ajuste -2017.
- Gómez, E. A., Ríos, L. A., & Peña, J. D. (2013). Efecto del Pretratamiento de Biomasa Maderera en el Rendimiento a Etanol. *Informacion Tecnologica*, 24(5), 113-122. doi:10.4067/S0718-07642013000500013
- Halima, I., Carvalhdo, A., Srinivasana, R., Mathosb, H. A., & Gan, R. (2011). A combined heuristic and indicator- based methodology for desing of sustainable chemical process plants. *Computers and Chemical Engineering*, 35(1343-1358).
- ICIDCA. (2000). *Manual de los Derivados de la Caña de Azúcar*. (R. B. Silvia Ed. Tercera Edicion ed.). Habana, CUBA.
- Intelligen Inc. (1991). Programa Computacional SuperPro Designer. (Version v10.).
- Irfan, M., Syed, Q., Yousaf, M., Nadeem, M., Baig, S., & Ahmed Jafri, S. (2010). Studies on the Pretreatment of wheat straw for improve production of Carboxymethyl Cellulase by thermophilic *Trichoderma viride*-FBL1 in Solid State fermentation. *Academia Arena*, 2(7), 18-30.
- Ishola, M. M. (2014). *Novel Application of Membrane Bioreactors in Lignocellulosic Ethanol Production: Simultaneous Saccharification, Filtration and Fermentation (SSFF)*. (Tesis para el grado de Doctor en Filosofía Tesis Doctoral), Universidad de Borás.
- Lauzurique Guerra, Y., Zamalacárregui de Cárdenas, L., Pérez Ones, O., & Molina Rivero, G. (2017). Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol aplicando la simulación. *Dyna*, 84(200), 185-192. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n200.54230>
- López Cantos, F. (2015). La simulación y representación de modelos y teorías científicas mediante imágenes. *THÉMATA*(51), 271-288. doi:10.12795/themata.2015.i51.14

- Lozano L, C. K. (2015). Formulación de estrategias de producción más limpia para optimizar el desempeño ambiental en el trapiche panelero la tortuga Municipio de González., 15.
- Llerena Pizarro, O. R., Silveira, J. L., Silva Paulino, R. F., & Galarza Galarza, J. C. (2015). Energetic and Ecologic Analysis of Sugar Cane Bagasse Gasification Process Considering some Industries in SaO Paulo State. *ResearchGate*, 1-6.
- Mateus Fontecha, L. (2011). Evaluación de los pretratamientos con ácido sulfúrico diluido y AFEX en la biomasa lignocelulósica del tipo pasto gigante " *Pennisetum Sp*".
- Mateus, L., Hernández, O., Velásquez, M., & Díaz, J. d. J. (2012). Evaluación del pretratamiento con ácido sulfúrico diluido del pasto maralfalfa (*Pennisetum glaucum x Pennisetum purpureum*) para la producción de etanol. *Rev. Colomb. Biotecnol.*, XIV(1), 146-156.
- Melgar, M., Meneses, A., Orozco, H., Pérez, O., & Espinosa, R. (2012). *Desarrollo tecnológico de la agroindustria azucarera y perspectivas*. Guatemala: CENGICAÑA.
- Mesa Garriga, L., González Suárez, E., Cara Corpas, C., López Bello, N., & Castro Galiano, E. (2012). Evaluación de la etapa de hidrólisis y fermentación del bagazo pretratado con Orgasolv. *Centro Azúcar*, 39(2), 73-84.
- Montoya, M. I., Quintero, J. A., Sánchez, J. O., & Cardona, C. A. (2005). Evaluación económica del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de caña de azúcar y maíz. *REVISTA Universidad EAFIT*, 41(139), 76-87.
- Morales, Y., Kafarov, V., Ruiz, F., & Castillo, E. F. (2010). Modelamiento de los procesos de producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de caña de azúcar: Etapas; preparación, molienda y clarificación. *UMBRAL Científico*(16), 47-59.
- Moreno, F. P., Rojas L., F., & Pinto P., N. (1981). *Industrialización de la caña. Consideraciones de diseño en hornillas paneleras*. Retrieved from
- Muñoz Muñoz, D., Pantoja Matta, A. J., & Cuatin Guarín, M. F. (2014). Aprovechamiento de residuos agroindustriales como biocombustible y biorefinería. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 2(2), 10-19.
- Pérez Martínez, A., Cervantes Mendieta, E., Julián Ricardo, M. C., González Suárez, E., Gómez Atanay, A., Oquendo Ferrer, H., . . . Ramos Sánchez, L. (2012). Procedimiento para enfrentar tareas de diseño de procesos de la industria azucarera y sus derivados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11(2), 333-349.
- Pérez, O., Zumalacárregui, L., & Gozá, O. (2010). Simplificaciones en el cálculo de columnas de destilación alcohólica., 21(6), 103-112.
- Peters, M. S., & Timmerhaus, K. D. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (I. McGraw-Hill Ed. 4ta edición ed.). Singapore.
- Prinsen, P., Gutiérrez, A., & del Río, J. (2010). *Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas.*, Universidad de Sevilla., Sevilla.
- PROECUADOR. (2013). *Biocombustibles*. Retrieved from
- Reyes Valadez, J. N., Quintana Hernández, P. A., Coronado Velasco, C., & Castro Montoya, A. J. (2016). Simulación del proceso de producción de bioetanol a partir de la mezcla glucosa/xilosa incluyendo los efectos de temperatura, pH y concentración de azúcares. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(1), 1-9.
- Rocha Meneses, L., Raud, M., Orupöld, K., & Kikas, T. (2017). Second-generation bioethanol production: A review of strategies for waste valorisation. *Agronomy Research*, 15(3), 830 - 847.
- Rodríguez González, I. J., González González, A., Noy Viamontes, P., & Pérez Sotolongo, S. (2012). Metodología de Diseño Organizacional integrando enfoque a procesos y competencias.
- Rojas Lazo, O. (2005). Dibujo asistido por computador en la facultad de ingeniería agroindustrial-UNMSM. *Industrial Data*, 8(1), 18-24.
- Ruiz Colorado, A., Quintana, J. C., Niño, J., Cano, N., Gomez, A. C., Daza, S., . . . Correa, J. F. (2014). Biomasa lignocelulósica en Colombia, Pretratamientos y Productos de valor agregado. In

- UTadeo. (Ed.), *Aprovechamiento de biomasa lignocelulosica, algunas experiencias de investigación en Colombia*. (Primera Edición. ed., pp. 328). Bogotá.
- Sablón Cossío, N., Pérez Quintana, M., Acevedo Suárez, J., Chacón Guerra, E., & Villalba Pozo, V. (2016). La integración en la cadena agroalimentaria de panela en el Puyo- Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 128-135. doi:10.13140/RG.2.2.29471.56480
- Salcedo, J. G., Rios, J. M., Ferrer, A., López, J. E., Pardo, L. M., & Aiello, C. (2013a). Efecto de los pretratamientos deslignificantes sobre la cristalinidad, hidrólisis enzimática y ultraestructura de residuos de la cosecha de la caña de azúcar. *Acta Microscopica.*, 22(1), 142-151.
- Salcedo, J. G., Rios, J. M., Ferrer, A., López, J. E., Pardo, L. M., & Aiello, C. (2013b). EFECTO DE PRETRATAMIENTOS DESLIGNIFICANTES SOBRE LA CRISTALINIDAD, HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y ULTRAESTRUCTURA DE RESIDUOS DE LA COSECHA DE LA CAÑA DE AZÚCAR. *Acta Microscopica* 22(1), 142 - 151.
- Sánchez Riaño, A. M., Gutiérrez Morales, A. I., Muñoz Hernández, J. A., & Rivera Barrero, C. A. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Revista Tumbaga*, 5, 61-91.
- Sarkar, N., Kumar Ghosh, S., Bannerjee, S., & Kaustav, A. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy.*, 37, 19-27. doi:10.1016/j.renene.2011.06.045
- TRADEMAP. (2017). Países importadores hacia Ecuador de alcohol etílico con grado volumétrico >=80% vol. Retrieved from http://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_Graph.aspx?nvpm=3|218|||2207||4|1|1|1|1|1|2|1|1|1#RatePage
- Travaini, R., Barrado, E., & Bolado Rodríguez, S. (2016). Effect of ozonolysis pretreatment parameters on the sugar release, ozone consumption and ethanol production from sugarcane bagasse. *Bioresource Technology.*, 214, 150-158.
- Trávez, D. (2011). "Estado del arte y novedades de la bioenergía en el Ecuador. FAO. <http://www.fao.org/docrep/019/as418s/as418s.pdf>.
- Trebilcock, M. (2009). Proceso de Diseño Integrado: nuevos paradigmas en arquitectura sustentable. *Arquitectura Revista.*, 5(2), 65-75. doi:10.4013/ARQ.2009.52.01
- Vargas Radillo, J. J., Salazar Ríos, E., Barrientos Ramírez, L., Pérez Centeno, A., Rentería Urquiza, M., Rodríguez Rivas, A., . . . Rutiaga Quiñones, J. (2015). Pasta blanqueada y azúcares fermentables a partir de médula de bagazo de caña. *Maderas y Bosques* 21(2), 117-130.
- Velásquez Riascos, Y., & López, E. J. (2015). Tecnologías de producción de una planta de obtención de etanol a partir de residuos de cosecha (hojas y cogollos) de la caña de azúcar. *Colección Académica de Ciencias Estratégicas*, 2(1), 67-75.
- Zúñiga Cerón, V., & Gandini Ayerbe, M. (2013). Caracterización ambiental de las vinazas de residuos de caña de azúcar resultantes de la producción de etanol. *Dyna*, 177, 124-131.

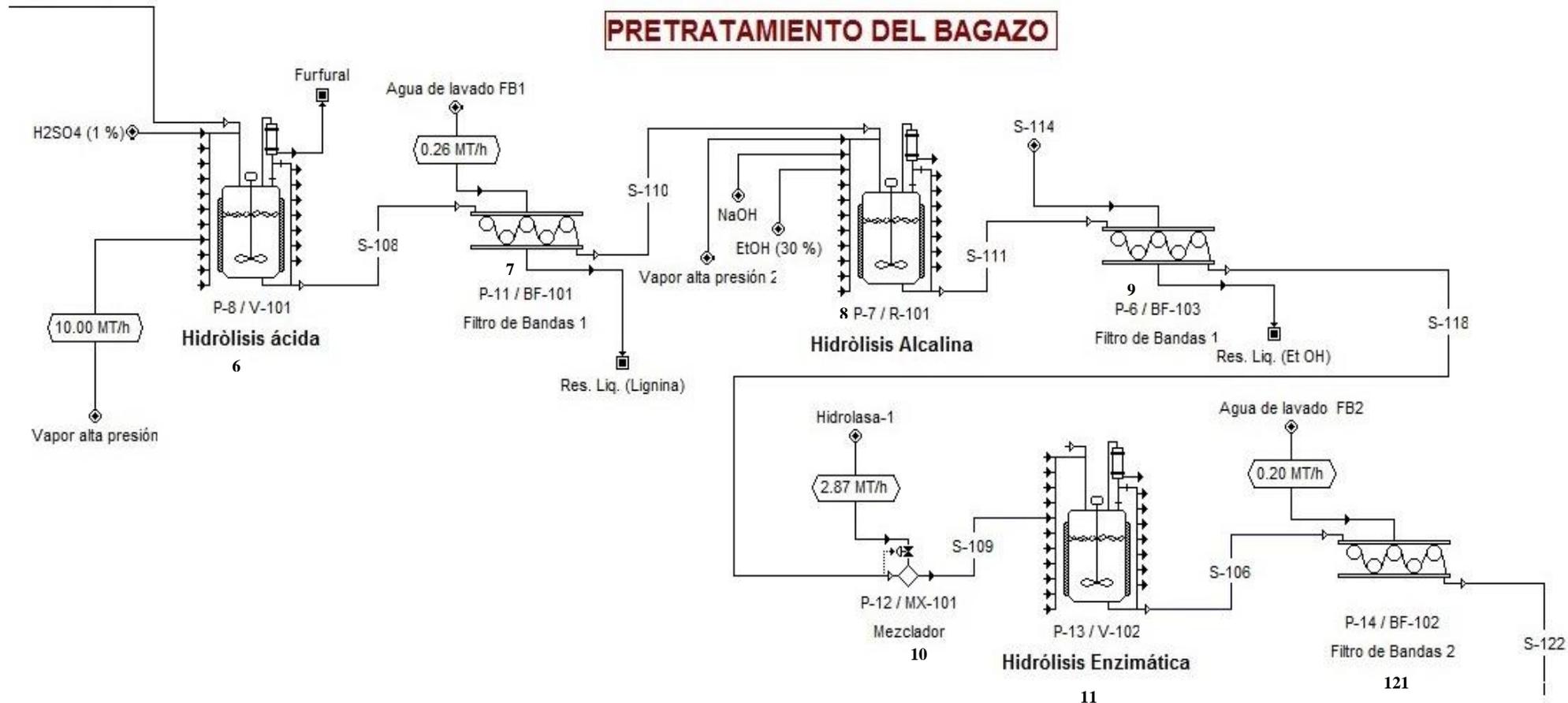
CAPÍTULO VII. ANEXOS.

Anexo 1. Acondicionamiento de bagazo de caña.



Unidad tecnológica 1. 1) Transporte de bagazo, 2) lavadora, 3) Molino, 4) tamiz, 5) transportador de bagazo. **Fuente:** Elaboración Propia.

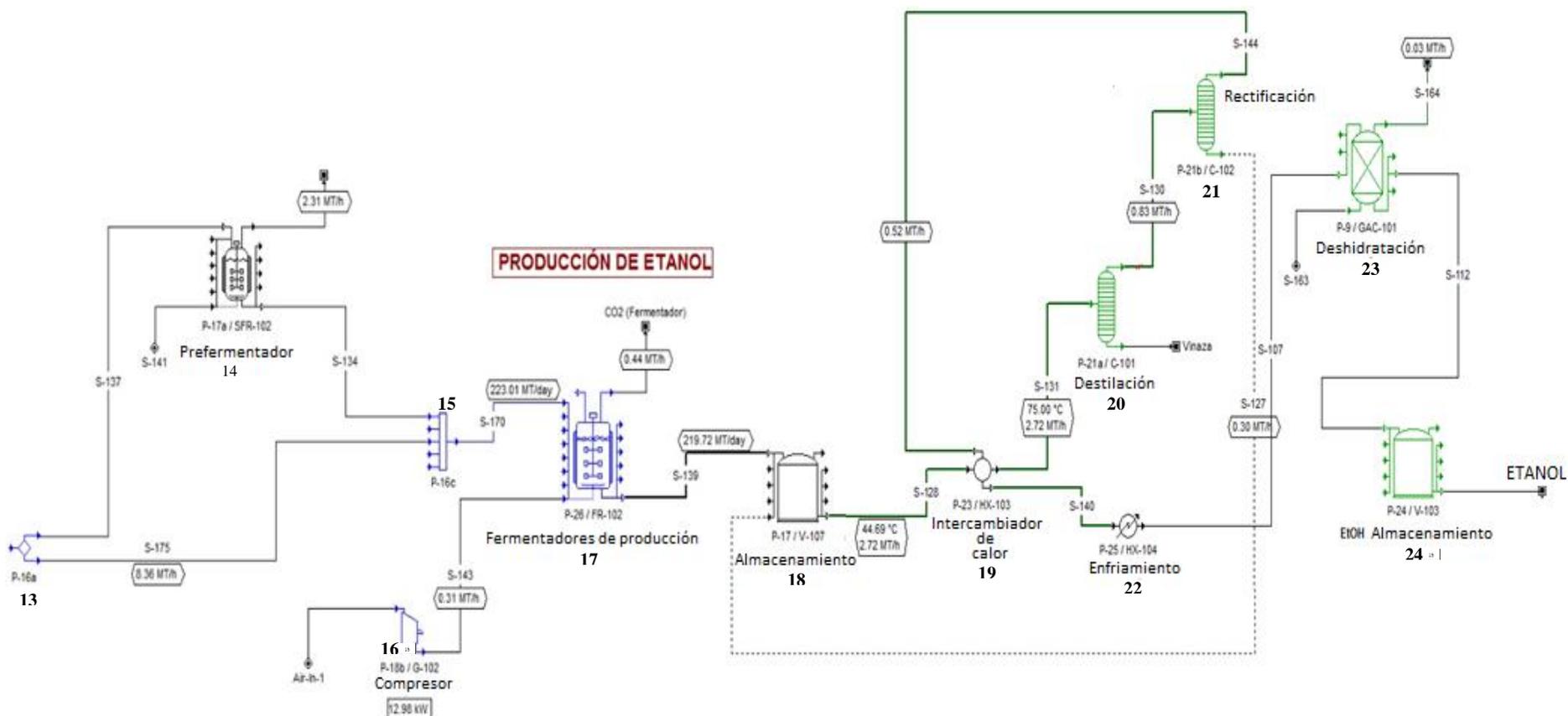
Anexo 2. Pretratamiento del bagazo.



Unidad tecnológica 2. 6) Reactor, 7) Filtro de bandas, 8) Reactor, 9) Filtro de bandas, 10) Mezclador, 11) Reactor, 12) Filtro de bandas.

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 3. Producción de Etanol.



Unidad tecnológica 3. 13) Divisor de flujo, 14) prefermentador, 15) Mezclador, 16) Compresor, 17) Fermentador, 18) Almacenamiento de mosto, 19) Intercambiador de calor, 20) Torre de destilación, 21) Torre de rectificación, 22) Enfriamiento, 23) Columna GAC de deshidratación, 24) Almacenamiento de etanol. **Fuente:** Elaboración Propia.

Anexo 4. Cantidad de materiales a granel.

Unidad	Materiales	Bagazo de caña						
		36 t	54 t	72 t	90 t	108 t	126 t	144 t
Kg	H ₂ SO ₄ (10% w/w)	2 376 000	3 564 000	4 752 000	5 940 000	7 128 000	8 316 000	9 504 000
t	vapor	108 900	108 900	108 900	108 900	118 800	108 900	118 800
Kg	Hidrolasa	113 747	170 583	227 394	284 18	340 945	397 678	454 398
t	Agua	7 662	11 491	15 319	19 146	22 972	26 796	30 620
Kg	Bagazo	11 880 000	17 820 000	23 760 000	29 700 000	35 640 000	41 580 000	47 520 000
Kg	Aire	11 456 498	17 184 482	22 912 327	28 640 054	34 367 589	40 095 227	45 822 513
t	RO Agua	4 496	6 745	8 995	11 247	13 499	15 753	18 007
Kg	EtOH (30% p / p)	2 661 120	2 661 120	2 661 120	2 661 120	2 661 120	2 661 120	2 661 120
Kg	NaOH (3% p / p)	2 661 120	2 661 120	2 661 120	2 661 120	2 661 120	2 661 120	2 661 121
kg /año	Producto (Etanol)	993 289	1 489 850	1 986 354	2 482 802	2 979 201	3 475 532	3 971 830

Fuente: Elaboración

Propia.

Anexo 5. Cantidad del consumo de utilidades.

Unidad	Utilidades	Bagazo de caña						
		36 t	54 t	72 t	90 t	108 t	126 t	144 t
kW-h	Energía estándar	206 602	307 899	409 203	510 517	612 381	713 177	815 056
t	Vapor	1 909	2 864	3 819	4 773	5 728	6 682	7 636
t	agua de enfriamiento	384 991	577 492	770 003	962 526	1 155 047	1 347 616	1 540 154
t	Agua de pozo	13 293	19 937	26 579	33 219	39 858	46 495	53 130
kg /año	Producto (Etanol)	993 289	1 489 850	1 986 354	2 482 802	2 979 201	3 475 532	3 971 830

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 6. Cantidad de residuales.

Unidad	Residuales	Bagazo de caña						
		36 t	54 t	72 t	90 t	108 t	126 t	144 t
Categoría de residuos								
Residuo sólido								
t	Ceniza	145	217	290	362	434	507	580
Líquido acuoso								
t	Residual del lavado(B)	1 074	1 612	2 149	2 686	3 223	3 761	4 298
Kg	Res.Liq.(lignina)	68 058 153	71 918 364	75 778 573	79 638 784	92 118 670	87 359 207	99 839 094
Kg	Res.Liq.(EtOH)	45 318 760	45 517 021	45 715 281	45 913 541	46 111 801	46 310 062	46 508 322
Kg	Vinazas	3 737 748	5 606 712	7 475 738	9 344 828	11 213 966	13 833 199	14 952 448
Emisiones								
Kg	flujo de CO2 (caldera)	17 628 219	26 440 096	33 250 464	44 059 322	52 866 922	61 720 542	70 477 519
Kg	CO2 Prefermentador	1 077 119	1 615 751	2 154 463	2 693 270	3 233 086	3 771 214	4 310 175
Kg	CO2 Fermentador	1 182 683	1 774 029	2 365 379	2 956 736	3 548 093	4 139 469	4 730 835
\$	TOTAL	25 896 903	37 790 690	47 683 114	61 574 194	73 637 467	86 150 401	92 681 481
Producción de etanol								
kg /año	Producto (Etanol)	993 289	1 489 850	1 986 354	2 482 802	2 979 201	3 475 532	3 971 830

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 7. Dimensionamiento y Costo de equipos.

ESPECIFICACIÓN DEL EQUIPO PRINCIPAL Y COSTO (precios de 2010)								
Cantidad	Descripción	Costo (\$) en función a la cantidad de bagazo de caña						
		36 t	54 t	72 t	90 t	108 t	126 t	144 t
1	Trituradora	67 000	69 000	71 000	72 000	74 000	76 000	78 000
	Tamaño / Capacidad	961.98 kg / h	1442.98 kg/h	1923.97 kg/h	2404.96 kg/h	2885.95 kg/h	3366.94 kg/h	3847.94 kg/h
1	Divisor de flujo	0	0	0	0	0	0	0
	Tamaño / Capacidad	961.98 kg / h	1442.98 kg/h	1923.97 kg/h	2404.96 kg/h	2885.95 kg/h	3366.94 kg/h	3847.94 kg/h
1	Transportador de tornillo	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	6 000
	Longitud del tubo	10.00 m	10.00 m	10.00 m	10.00 m	10.00 m	10.00 m	10.00 m
1	Reactor Agitado	116 000	121 000	126 000	131 000	143 000	140 000	151 000
	Volumen del recipiente	7.04 m ³	7.54 m ³	8.04 m ³	8.54 m ³	9.91 m ³	9.54 m ³	10.91 m ³
1	Mezclador	0	0	0	0	0	0	0
	Tamaño / Capacidad	1090.09 kg / h	1634.91 kg/h	2179.56 kg/h	2724.06 kg/h	3268.42 kg/h	3812.58 kg/h	4356.66kg/h
1	Reactor Agitado	18 000	23 000	27 000	31 000	35 000	38 000	41 000
	Volumen del buque	1.00 m ³	1.50 m ³	2.00 m ³	2.50 m ³	3 m ³	3.50 m ³	3.99 m ³
1	Filtro de Correa	220 000	222 000	224 000	225 000	227 000	228 000	229 000
	Anchura de la correa	0.13 m	0.20 m	0.27 m	0.33 m	0.40 m	0.47 m	0.53 m
1	Filtro de Correa	219 000	220 000	222 000	223 000	224 000	226 000	227 000
	Anchura de la correa	0.10 m	0.15 m	0.20 m	0.25 m	0.30 m	0.35 m	0.40 m
1	Lavadora (flujo masivo)	50 000	64 000	76 000	87 000	98 000	107 000	116 000
	Tamaño / Capacidad	1000.00 kg / h	1500.00 kg/h	2000.00 kg/h	2500.00 kg/h	3000.00 kg/h	3500.00 kg/h	4000.00 kg/h
1	Tanque de fondo plano	37 000	47 000	56 000	64 000	72 000	79 000	85 000
	Tamaño / Capacidad	4.77 m ³	7.16 m ³	9.55 m ³	11.93 m ³	14.32 m ³	16.71 m ³	19.10 m ³
1	Columna de destilación	16 000	20 000	24 000	28 000	31 000	34 000	37 000
	volumen de columna	256.39 L	384.57 L	512.75 L	640.92 L	769.09 L	897.25 L	1025.41 L
1	Columna de destilación	19 000	24 000	29 000	33.000	37.000	40 000	44 000
	volumen de columna	340.31 L	510.45 L	680.57 L	850.67 L	1020.76 L	1190.82 L	1360.88 L
1	Intercambiador de calor	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000	106 000
	área de cambio de calor	100.00 m ²	100.00 m ²	100.00 m ²	100.00 m ²	100.00 m ²	100.00 m ²	100.00 m ²
1	Intercambiador de calor	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	8 000
	Área de cambio de calor	0.31 m ²	0.47 m ²	0.62 m ²	0.78 m ²	0.93 m ²	1.09 m ²	1.24 m ²

1	Separador de flujo	0	0	0	0	0	0	0
	tamaño/ capacidad	733.46 kg/h	1100.19 kg/h	1466.92 kg/h	1833.65 kg/h	2200.38 kg/h	2567.11 kg/h	2933.84 kg/h
1	Fermentador de semillas	20 000	4 24 000	28 000	31 000	34 000	37 000	40 000
	Volumen del recipiente	27 m ³	6.41 m ³	8.54 m ³	10.68 m ³	12.82 m ³	14.95 m ³	17.09 m ³
1	Mezclador	0	0	0	0	0	0	0
	Tamaño / Capacidad	733.43 kg/h	1100.14 kg/h	1466.86 kg/h	1833.57 kg/h	2200.29 kg/h	2567.00 kg/h	2933.72 kg/h
1	Fermentador	38 000	48 000	58 000	66 000	73 000	81 000	87 000
	Volumen del recipiente	29.31 m ³	43.97 m ³	58.63 m ³	73.29 m ³	87.96 m ³	102.63 m ³	117.30 m ³
1	Compresor Centrifugo	64 000	64 000	64 000	64 000	64 000	64 000	64 000
	Potencia del compresor	0.79 kW	1.18 kW	0.58 kW	1.97 kW	2.37 kW	2.76 kW	3.16 kW
1	Mezclador	0	0	0	0	0	0	0
	Tamaño / Capacidad	954.36 kg/h	1431.31 kg/h	1908.10 kg/h	2384.74 kg/h	2861.23 kg/h	3337.53 kg/h	3813.75 kg/h
1	Generador de vapor	55 000	55 000	55 000	55 000	55 000	55 000	55 000
	Rendimiento	0.57 t/h	0.85 t/h	1.14 t/h	1.42 t/h	1.70 t/h	1.99 t/h	2.27 t/h
1	Turbina de Vapor	27 000	27 000	29 000	31 000	33 000	34 000	35 000
	Potencia del eje entregada al vapor	4.28 kW	7.99 kW	12.30 kW	17.07 Kw	22.21 kW	27.66 kW	33.37 kW
1	Bomba Centrifuga	8 000	10 000	11 000	12 000	13 000	14 000	15 000
	Potencia de la bomba	0.21 kW	0.31 kW	0.42kW	0.52 kW	0.63 kW	0.73 kW	0.83 kW
1	Filtro de Correa	219 000	220 000	222 000	223 000	225 000	226 000	227 000
	ancho de la correa	0.10 m	0.15 m	0.20 m	0.25 m	0.30 m	0.35 m	0.40 m
1	Reactor Agitado	22 000	24 000	27 000	29 000	31 000	33 000	35 000
	Volumen del reactor	0.44 m ³	0.52 m ³	0.61 m ³	0.69 m ³	0.78 m ³	0.87 m ³	0.95 m ³
1	Columna GAC	93 000	114 000	131 000	147 000	161 000	174.000	186 000
	Volumen de la columna	1858.98 L	2788.32 L	3717.55 L	4646.69 L	5575.73 L	6504.65 L	7433.51 L
1	Tanque de fondo plano	111 000	142 000	168 000	192 000	215 000	235 000	255 000
	Volumen del tanque	29.79 m ³	44.68 m ³	59.57 m ³	74.45 m ³	89.34 m ³	104.22 m ³	119.11 m ³
	Accesorios	81 000	87 000	93 000	98 000	103 000	107 000	112 000
	TOTAL	1 613 000	1 739 000	1 856 00	1 958 000	2 065 000	2 147 000	2 238 000

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 8. Costo de inversión.

INDICES	RESUMEN DEL ESTIMADO DE CAPITAL FIJO (precios de 2010 en \$)						
	BAGAZO DE CAÑA						
	36 t	54 t	72 t	90 t	108 t	126 t	144 t
A. Costo directo total de planta (TPDC)							
Costo de compra del equipo	1 613 000	1 739 000	1 856 000	1 958 000	2 065 000	2 147 000	2 238 000
Instalación	583 000	629 000	671 000	708 000	748 000	778 000	811 000
Tubería de proceso	565 000	609 000	650 000	685 000	723 000	751 000	783 000
Instrumentación	645 000	696 000	742 000	783 000	826 000	859 000	895 000
Aislamiento	48 000	52 000	56 000	59 000	62 000	64 000	67 000
Eléctrico	161 000	174 000	186 000	196 000	207 000	215 000	224 000
Edificios	242 000	261 000	278 000	294 000	310 000	322 000	336 000
Mejora de patio	242 000	261 000	278 000	294 000	310 000	322 000	336 000
Instalaciones Auxiliares	323 000	348 000	371 000	392 000	413 000	429 000	448 000
TPDC	4 422 000	4 769 000	5 088 000	5 368 000	5 663 000	5 887 000	6 138 000
B. Costo Indirecto Total de la Planta (TPIC)							
Ingeniería	1 105 000	1 192 000	1 272 000	1 342 000	1 416 000	1 472 000	1 535 000
Construcción	1 548 000	1 669 000	1 781 000	1 879 000	1 982 000	2 060 000	2 148 000
TPIC	2 653 000	2 861 000	3 053 000	3 221 000	3 398 000	3 532 000	3 683 000
C. Costo total de la planta							
TPC	7 075 000	7 631 000	8 141 000	8 589 000	9 061 000	9 419 000	9 821 000
D. Tarifa y contingencia del contratista (CFC)							
Tarifa del contratista	354 000	382 000	407 000	429 000	453 000	471 000	491 000
Contingencia	708 000	763 000	814 000	859 000	906 000	942 000	982 000
CFC	1 061 000	1 145 000	1 221 000	1 288 000	1 359 000	1 413 000	1 473 000
Costo directo de capital fijo (DFC)							
DFC	8 136 000	8 775 000	9 362 000	9 878 000	10 420 000	10 832 000	11 294 000

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 9. Costo de operación anual.

COSTO DE OPERACIÓN ANUAL (precios de 2010) - RESUMEN DEL PROCESO							
OPERACIONES	Costo anual (\$) en función a la cantidad de bagazo de caña						
	36 t	54 t	72 t	90 t	108 t	126 t	144 t
Materias primas	1 590 000	2 356 000	3 122 000	3 888 000	4 659 000	5 419 000	6 189 000
Dependiente del trabajo	1 222 000	1 222 000	1 222 000	1 222 000	1 222 000	1 222 000	1 222 000
Dependiente de la Dependencia	1 577 000	1 701 000	1 815 000	1 915 000	2 020 000	2 100 000	2 189 000
Consumibles	0	1	1	1	1	1	2 000
Tratamiento / Eliminación de Residuos	2 271 000	2 354 000	2 437 000	2 520 000	2 775 000	2 686 000	2 941 000
Utilidades	31	46	62 000	77 000	92 000	108 000	123 000
Transporte	0	0	0	0	0	0	0
Diverso	0	0	0	0	0	0	0
Publicidad / Venta	0	0	0	0	0	0	0
Regalías corrientes	0	0	0	0	0	0	0
Eliminación de productos fallidos	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	6 691 000	7 680 000	8 658 000	9 622 000	10 769 000	11 536 000	12 666 000

Fuente: Elaboración Propia.

Anexo 10. Indicadores dinámicos económicos.

Índices	Unidades	Bagazo de caña						
		36 t	54 t	72 t	90 t	108 t	126 t	144 t
Inversión total de capital	\$	8 936 000	9 650 000	10 310 000	10 895 000	11 524 000	11 985 000	12 530 000
Inversión de capital cobrada a este proyecto	\$	8 936 000	9 650 000	10 310 000	10 895 000	11 524 000	11 985 000	12 530 000
Costo operacional	\$/año	6 691 000	7 680 000	8 658 000	9 622 000	10 769 000	11 536 000	12 666 000
Coste Operativo Neto	\$/año	6 690 922	7 679 702	8 658 124	9 622 495	10 769 125	11 535 549	12 666 159
Ingresos principales	\$/año	811	1 217 000	1 622 000	2 028 000	2 433 000	2 839 000	3 244 000
Otros Ingresos	\$/año	1 524	2 849	4 385	6 085	7 916	9 858	11 892
Ingresos totales	\$/año	4 774 000	7 162 000	9 550 000	11 938 000	14 326 000	16 714 000	19 102 000
Costo Base Tasa anual	kg MP/año	1 263 356	1 894 926	2 526 425	3 157 853	3 789 218	4 420 497	5 051 733
Costo unitario de producción	\$/kg MP	5.30	4.05	3.43	3.05	2.84	2.61	2.51
Costo neto de producción unitaria	\$/kg MP	5.30	4.05	3.43	3.05	2.84	2.61	2.51
Ingresos de producción unitaria	\$/kg MP	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Margen bruto	%	- 40.15	- 7.23	9.34	19.39	24.83	30.98	33.69
Retorno de la inversión	%	- 12.80	3.27	14.25	22.42	28.65	36.67	41.95
Periodo de Recuperación	años	N/A	30.56	7.02	4.46	3.49	2.73	2.38
Tasa Interna de Retorno (TIR)	%	N/A	N/A	9.14	16.48	21.64	27.58	31.33
VAN (al 7.0% de intereses)	\$	-1 9131 000	-7 447 000	1 675 000	9 356 000	16 239 000	25 338 000	32 333 000

Fuente: Elaboración Propia.