

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Química- Farmacia

Departamento de Ingeniería Química



Trabajo de Diploma

*Análisis del Ciclo de Vida y Exergético de la Obtención de Etanol a Partir del
Bagazo de la Caña*

Leyanet Beltrán Díaz

2013-2014

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Química- Farmacia

Departamento de Ingeniería Química



Trabajo de Diploma

*Análisis del Ciclo de Vida y Exergético de la Obtención de Etanol a Partir del
Bagazo de la Caña*

Autora: Leyanet Beltrán Díaz

Tutoras: Dra. Nancy López Bello

Dra. Elena R. Rosa Domínguez

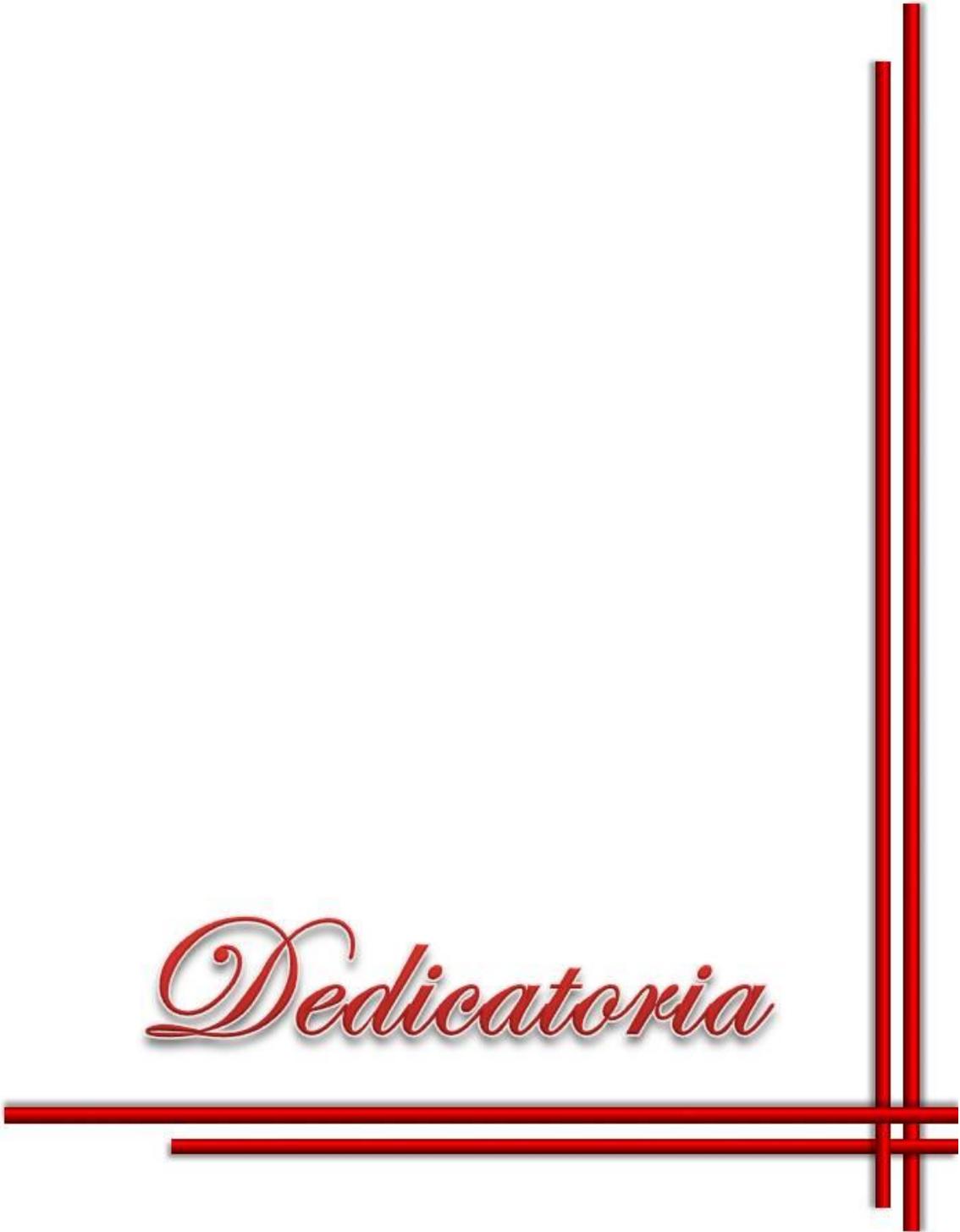
2013-2014



“Sólo renuncian a la calidad los que no la poseen, ni tienen voluntad, ni talento para alcanzarla”.

Ché

Dedicatoria



Dedico este triunfo a mis padres Jorge y Miguelina, por el infinito amor que me brindan, por tantos desvelos, por todos los sacrificios, preocupaciones, y por esa inmensa confianza que han depositado en mí.

A mi novio Nelson por estar siempre a mi lado y compartir conmigo muy buenos momentos.

A mis suegros Nelson y María A. por apoyarme tanto y depositar tanta confianza en mí.

A mis abuelas: Hidelfiza y María porque en el día de hoy se sientan tan orgullosas de mí como yo de ellas, por su dedicación que me da fuerzas para mirar al futuro y por ser fuente de inspiración de este trabajo.

A mis tíos y tías Fidel, Pablo, Iraida, Daisy, Robert, Rolando, Alberto y Belky por estar siempre al pendiente de mis resultados.

A mi hermana Lillian que aunque no hayamos compartido mucho estoy segura que me desea lo mejor.

A todos los primos que de una forma o de otra se preocuparon por mis logros y fracasos.

En general a todos los que en realidad confiaron en mis esfuerzos.

Agradecimientos



A mis compañeros de aula por vivir cada experiencia universitaria juntos.

A los profesores del departamento de Ingeniería Química de la UCLV por formar parte de mi formación profesional.

A mi tutoras Nancy López Bello y Elena Regla Rosa Domínguez, por confiar en mi desempeño como diplomante y apoyarme incondicionalmente durante todo este período.

Al profesor Jorge L. García Jacomino por ayudarme y demostrarme que con perseverancia siempre se puede llegar al final y por su gran ayuda incondicional en este trabajo.

A toda mi familia en general, a mi novio, suegros y amistades que de corazón comparten conmigo esta alegría.

En fin a todas aquellas personas que un día lo apostaron todo porque me hiciera una Ingeniera.

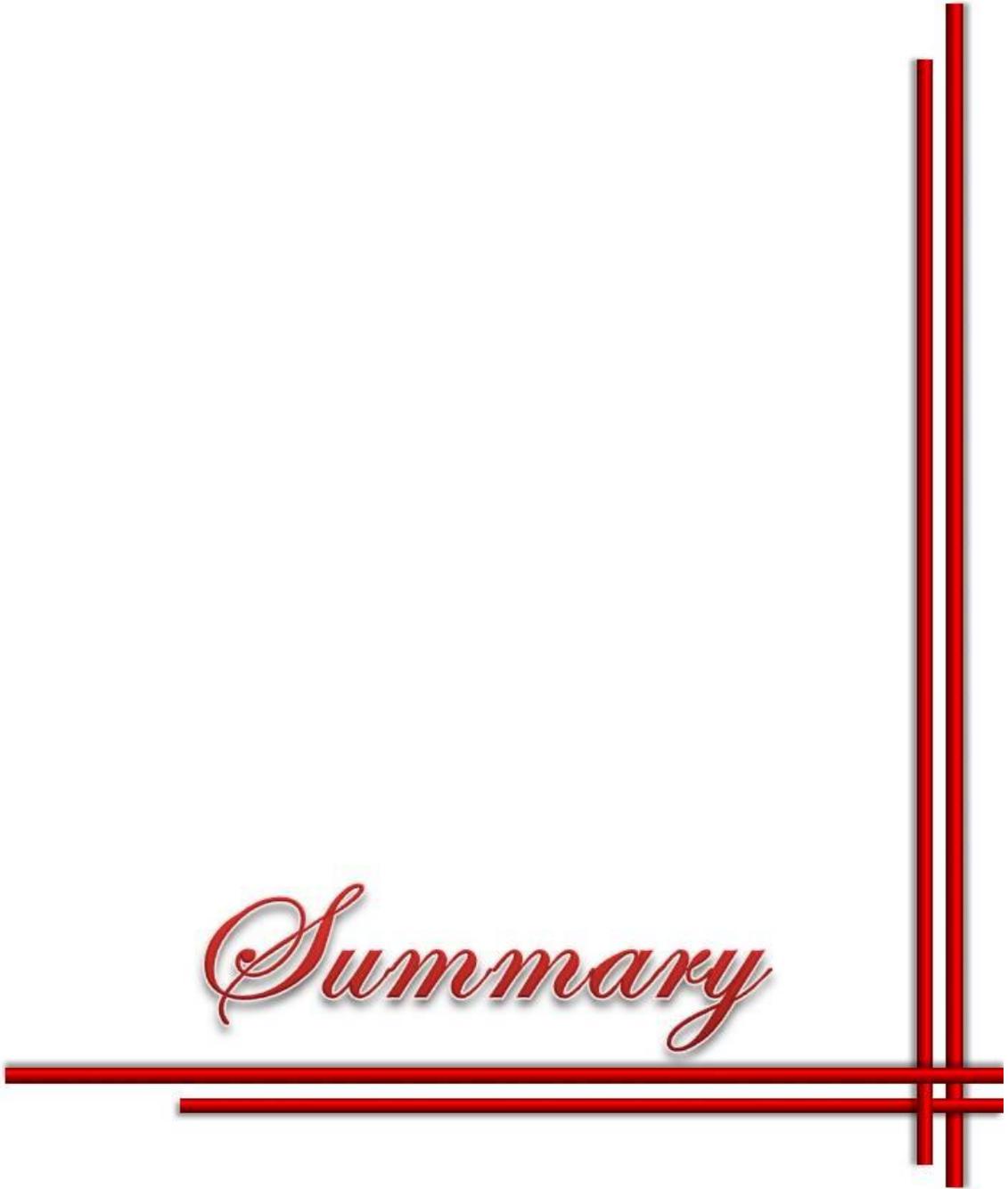
Resumen



Resumen.

En el presente trabajo se aplicó el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) uno de los métodos más novedosos para evaluar cuantitativamente los impactos ambientales generados por productos y procesos a una de las alternativas de obtención de etanol a partir del bagazo de la caña para cuantificar el impacto ambiental de las etapas agrícola e industrial mediante la metodología Recipe y el Software SimaPro 7,3. Para ello se realizó la modelación del inventario del ciclo de vida del proceso que utiliza el método organosolv como pre tratamiento, lo cual permitió evaluar los impactos ambientales asociados al proceso en diferentes escenarios de operación y se detectaron las variables operacionales que mayor incidencia tienen sobre cada una de las categorías de impacto que se analizan. Mediante el diagrama del proceso se identificaron todas las corrientes de entrada y salida correspondientes a cada una de las etapas constituyentes del mismo; las cuales se cuantificaron mediante índices reportados en la literatura y/o balances de materiales y energía de este análisis se determinó que el mayor impacto está asociado al agotamiento de los combustibles fósiles. Además se calcularon las exergías físicas y químicas de cada una de las corrientes que intervienen en el proceso haciendo énfasis principalmente en el estudio de la variante donde se trabaja con sacarificación y fermentación simultánea, ya que es esta en la que se obtuvo mejores resultados debido a que la misma presenta ahorro de materias primas, equipos, energía, donde se observa pérdidas exergéticas de 690776,18 kW para una eficiencia en general de 64,89 %.

Summary



Abstract

In this paper the Life Cycle Analysis (LCA) was applied to one of the most innovative methods to quantitatively assess the environmental impacts caused by products and processes of the alternatives for obtaining ethanol from sugarcane bagasse to quantify the environmental impact of the agricultural and industrial stages Recipe by SimaPro 7.3 software and methodology. This modeling inventory lifecycle process using the method as organosolv pretreatment was performed, which allowed us to evaluate the environmental impacts associated with the process in different operating scenarios and operational variables with the greatest impact were detected on each one of the categories discussed impact. Through the process diagram all input and output streams were identified corresponding to each of the constituent stages thereof; which were quantified by indices reported in the literature and / or material and energy balances of this analysis it was determined that the greatest impact is associated with the depletion of fossil fuels. Besides the physical and chemical properties of each of the streams involved in the process with an emphasis on the study of the variant where it works with simultaneous saccharification and fermentation exergies were calculated, as it is this in the best results are obtained because that it presents savings in raw materials, equipment, energy, exergy losses where 690776,8 kW for an efficiency of 64,89 % generally observed.

Índice

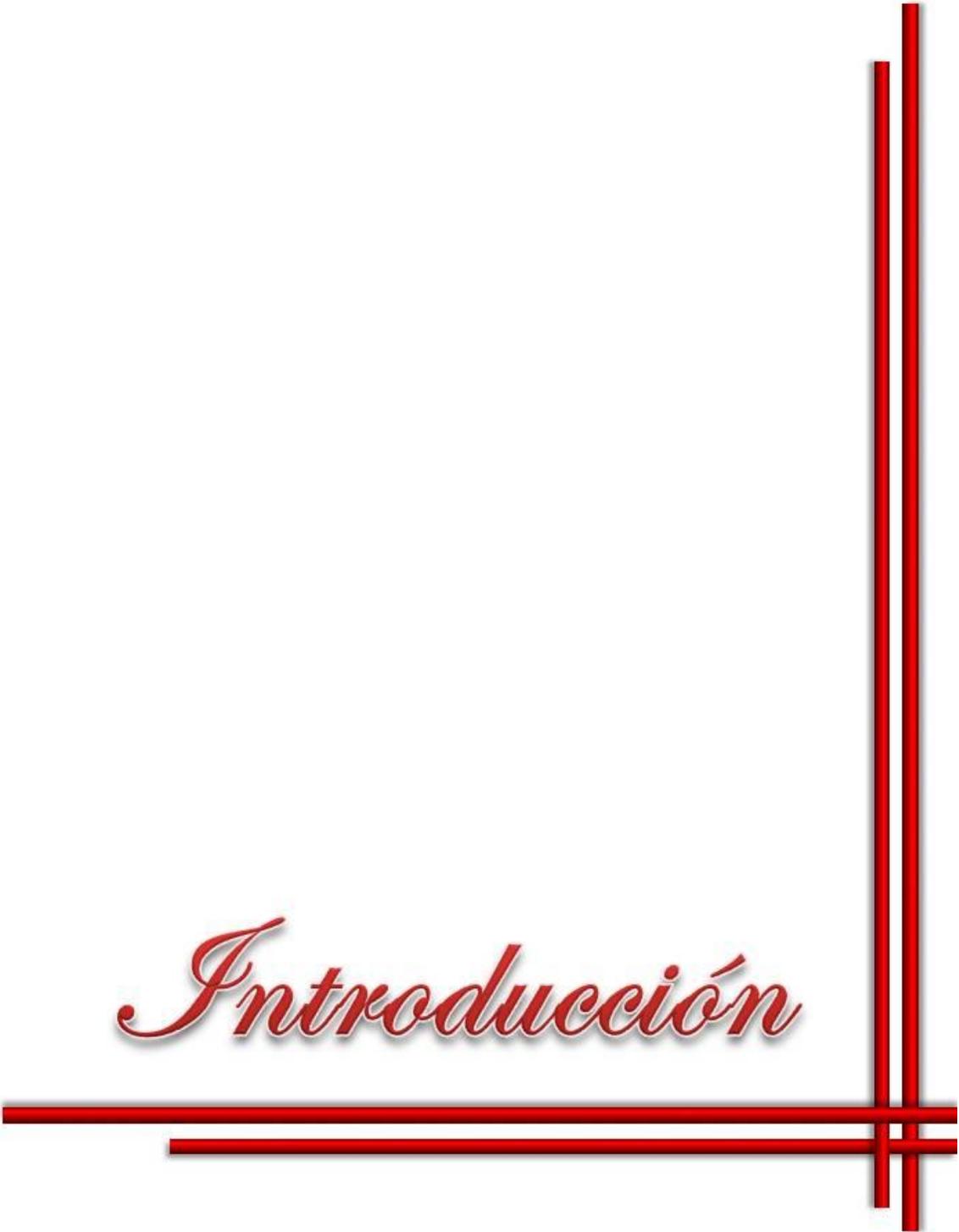


Índice

Introducción	i
Capítulo 1: Revisión bibliográfica	1
1.1. Características generales y composición química del bagazo	1
1.1.1. Celulosa.....	2
1.1.2. Hemicelulosas	3
1.1.3. Lignina.....	4
1.2. Etapas para la producción de etanol.....	4
1.4. Ventajas y desventajas de los biocombustibles.....	5
1.4.1. Desventajas de los biocombustibles	5
1.4.2. Ventajas de los biocombustibles	6
1.5. Materias Celulósicas	6
1.8. La exergía. Generalidades.....	11
1.8.1. Concepto de exergía	12
1.8.2. Tipos de exergía.....	12
1.8.2.1. Exergía física.....	13
1.8.2.2. Exergía química.....	13
1.8.2.2.1. Exergía química de las sustancias de referencias	13
1.8.3. Eficiencia exergética.....	14
1.9. Análisis de Ciclo de Vida.....	15
1.9.1. Definición y metodología del ACV	16
1.10. El análisis de ciclo de vida para biocombustibles	19
1.10.1. Concepto de la perspectiva de un ACV y fases que se tienen en cuenta.....	20
Capítulo 2: Análisis del Ciclo de Vida para el proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de la caña	22
2.1. Definición del objetivo y alcance del ACV (NC-ISO 14040, 2007).....	22
2.1.1. Objetivo	22
2.1.2. Alcance del estudio	22
2.1.2.1. Función y descripción del sistema en estudio	22
2.1.2.2. Selección de la unidad funcional	25
2.1.2.3. Establecimiento de los límites del sistema	25
2.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (AICV) (NC ISO 14041, 2000)	26
2.3. Impacto Ambiental	28

2.3.1. Ventajas de utilizar SimaPro 7.3	29
2.3.2. Análisis de los resultados	37
Capítulo 3: Análisis exergético del proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de la caña de azúcar	38
3.1. Análisis exergético	38
3.1.1. Balances de exergía	38
3.4. Cálculo de las exergías por etapas	40
3.4.1. Exergía del pre tratamiento 1	40
Cálculo de las exergías para la entrada al Pre tratamiento 1	42
Cálculo de las exergías para la salida del Pre tratamiento 1	43
3.4.2. Exergía del pre-tratamiento 2	45
Cálculo de las exergías para la entrada al Pretratamiento 2	46
Cálculo de las exergías para la salida del Pre tratamiento 2	48
3.4.3. Exergía de la Hidrólisis enzimática y Fermentación Simultánea (SFS).....	50
Ecuaciones la Hidrólisis enzimática y Fermentación Simultánea	51
3.4.4. Exergía de la Destilación	51
3.5. Métodos de cálculo de la exergía química estándar de sustancias orgánicas.....	52
3.6. Estimación de las pérdidas económicas asociadas a la no integración de las etapas y la baja eficiencia exergético en cada una de ellas.....	53
3.7. Análisis de los resultados.....	53
Conclusiones	54
Recomendaciones	55
Bibliografía	56
Anexos.....	59

Introducción



Introducción

El mundo encara el agotamiento progresivo de los recursos renovables y los combustibles fósiles que son la principal fuente de energía a nivel mundial. El consumo de energía aumenta a ritmos cada vez más crecientes y por otro lado, el consumo global de combustibles genera enormes cantidades de gases contaminantes que son liberados a la atmósfera, cuya acción tiene múltiples e importantes efectos negativos sobre los ecosistemas y para las que en determinadas ocasiones, como ocurre en el caso del CO₂ o de los residuos de las centrales nucleares, no existen soluciones satisfactorias para su adecuado tratamiento y eliminación.

Es por esto que el aprovechamiento de residuos agroindustriales como sustratos para la producción de productos de alto valor agregado, entre ellos el etanol, es una alternativa viable ya que estos materiales son abundantes, renovables y de bajo costo. El incremento en el interés por el etanol combustible ha atraído la atención de investigadores debido a que su combustión no implica una adición de CO₂ a la atmósfera por lo que no contribuye al efecto invernadero. Los materiales lignocelulósicos, entre ellos el bagazo de caña de azúcar, es una materia prima potencial para la obtención de bioetanol debido a que los sustratos azucarados y amiláceos usados tradicionalmente para la producción de etanol son insuficiente para cubrir la demanda emergente de carburantes y para dejar de ser usados alimentos como el maíz, trigo y arroz.

En este contexto, la producción de bioetanol de segunda generación para su aplicación en el sector del transporte, es una alternativa al empleo de las gasolinas, ya sea como aditivo, único combustible o como materia prima para la producción de hidrógeno o biodiesel.

Entre las tecnologías para los pre-tratamientos actuales está siendo evaluado el proceso organosolv con etanol. Este proceso, históricamente, ha sido investigado desde la perspectiva de la industria de la pulpa y el papel, pero es usado también como pre-tratamiento de la biomasa lignocelulósica para la obtención de etanol.

En la literatura se reportan los daños que causan el uso desmedido de los combustibles fósiles al medio ambiente, pero no se encuentran suficientes referencias que destaquen el impacto ambiental de los procesos de producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos. La evaluación de daño ambiental permite establecer las etapas o procesos en la elaboración del producto que mayor influencia tenga. Por este motivo el análisis de ciclo de vida (ACV) se torna importante para cuantificar los problemas ambientales de cada etapa del proceso y con ello definir las estrategias de mejora con mayor seguridad.

De la misma manera que la industria busca constantemente nuevos procesos de manufactura, materias primas y equipos para incrementar la eficiencia y rentabilidad, se puede realizar un análisis exergético que pueda cuantificar las pérdidas y la eficiencia del proceso en cada una de sus etapas. Las empresas en todo el mundo están respondiendo a los nuevos mercados con productos verdes y están empezando a ver el desempeño ambiental como un factor clave de competitividad.

Problema Científico: Los nuevos procesos en estudio de obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos a través del método de organosolv son insuficientes aún para diagnosticar la situación ambiental del proceso, y los principales aspectos energéticos que de este se derivan.

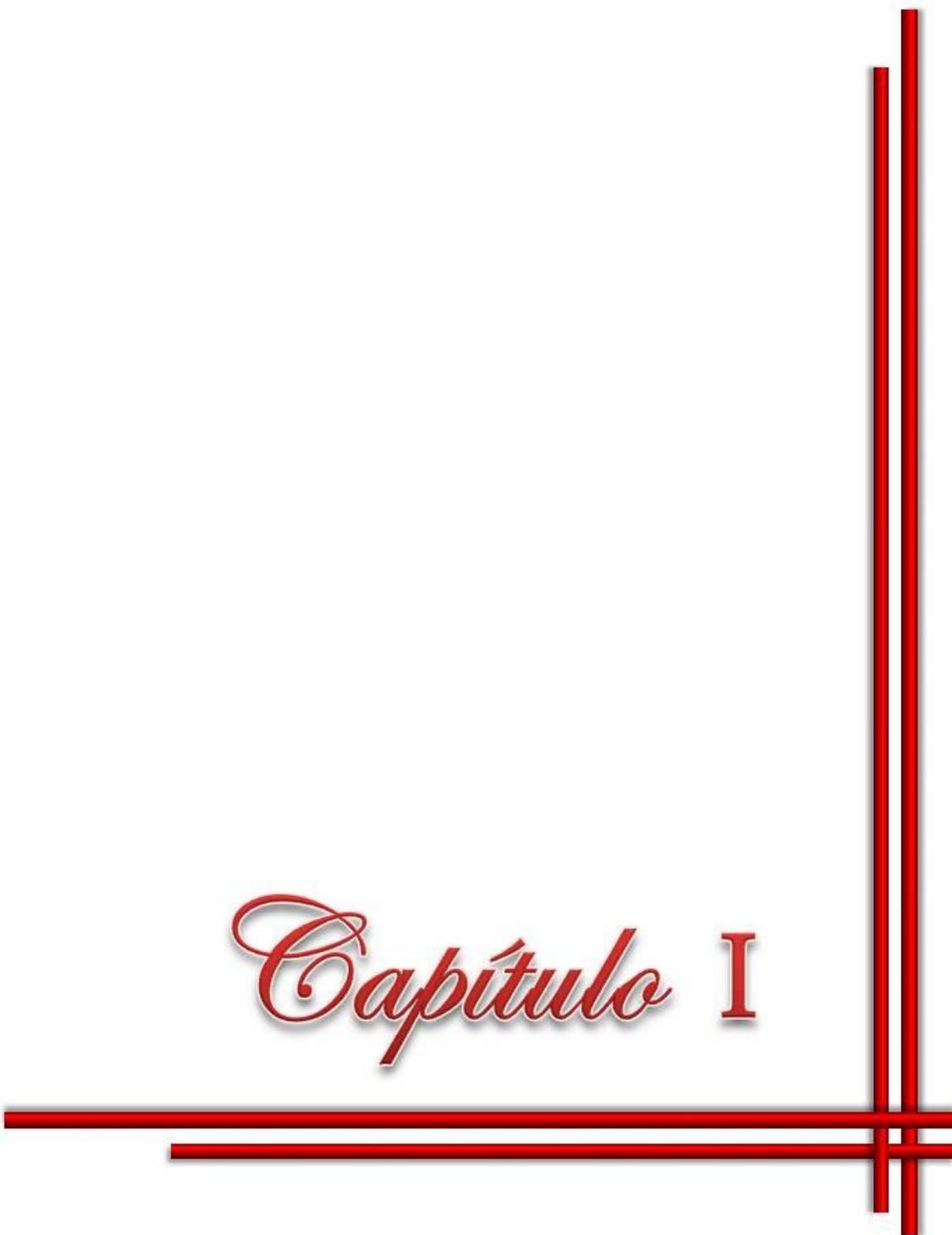
Hipótesis: El análisis de ciclo de vida y los análisis exergéticos pueden contribuir al mejoramiento de los procesos de obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos para un establecimiento futuro de tecnologías técnico-económica y ambientalmente factibles.

Objetivo General: Establecer los principales indicadores ambientales y exergéticos que contribuyan al desarrollo de procesos en la obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos.

Objetivos Específicos:

1. Realizar el estudio de estado del arte acerca de los temas de la investigación.
2. Confeccionar el Inventario del proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de caña para la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.
3. Aplicar la metodología del RECIPE para la evaluación de Impacto Ambiental del proceso analizado.
4. Determinar las principales pérdidas exergéticas que se establecen en las diferentes etapas del proceso.
5. Evaluar la importancia de los impactos ambientales y exergéticos en el proceso.

Capítulo I



Capítulo 1: Revisión bibliográfica

1.1. Características generales y composición química del bagazo

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) contiene entre el 73 y 76 % de agua y sacarosa desde 8 hasta 15 % como componentes mayoritarios y además ácidos orgánicos, glucosa, fructosa, etc. en menor proporción (Ver tabla 1). Es una gramínea con una elevada eficiencia en la fotosíntesis, que le permite obtener hasta 85 t de biomasa seca por hectárea de cultivo (Gálvez, 2000), por lo que constituye una fuente inagotable de alimentos, energía y materias primas para la industria y ha sido tradicionalmente la base de la economía de Cuba y otros países tropicales. La variabilidad de los precios del azúcar en el mercado mundial sugiere que la diversificación de la industria azucarera es un requerimiento urgente de los países exportadores de azúcar (Carvajal, 2000), (Reyes, 1997), (Olguin, 1995), (Clarke, 1996).

Tabla 1. Componentes de la caña de azúcar en Cuba.

Componentes	Proporción (%)	Componentes	Proporción (%)
Agua	73 – 76	Glucosa	0,2 – 0,6
Sacarosa	8 – 15	Fructosa	0,2 – 0,6
Fibra	11 – 16	Sales	0,3 – 0,8
Ácidos orgánicos	0,1 – 0,8	Otros	0,3 – 0,8

El bagazo es el residuo separado después de la extracción del jugo de la caña de azúcar y es el principal subproducto de la industria azucarera (Banerjee y Pandey, 2002). Por cada 100 t de caña procesada para la producción de azúcar se obtienen alrededor de 28 t de bagazo y 20 t de residuos agrícolas (Gálvez, 2000).

El bagazo y los residuos de la cosecha de la caña de azúcar contienen alrededor de un 70 % de carbohidratos. Los datos de la literatura indican que el bagazo contiene de un 41 a un 52 % de celulosa, del 25 al 30 % de pentosanas y de un 18 a un 25 % de lignina, por lo que su composición química es más cercana a la de las maderas duras que a la de las maderas blandas (Gastón, 2000), (Banerjee y Pandey, 2002).

Los xilanos son, después de los glucanos, los carbohidratos más importantes en el bagazo. La xilosa representa casi un tercio del contenido de azúcares en los hidrolizados de bagazo.

El bagazo de caña de azúcar es un subproducto que se obtiene en el proceso de producción del azúcar es usado como combustible para generar vapor y electricidad en esta industria. La tendencia actual de producir biocombustibles a partir de residuos ha propiciado que se lleven a cabo estudios en Cuba para la producción de etanol. Para la obtención de los datos de

inventario se parte del proceso de producción de azúcar, considerando la etapa agrícola e industrial y se realiza una asignación de cargas ambientales en la etapa de extracción del jugo mezclado.

Como se dijo anteriormente el bagazo está constituido por tres componentes principales:

1. Celulosa
2. Hemicelulosa
3. Lignina

1.1.1. Celulosa

De todos los compuestos naturales del carbono, la celulosa es el más abundante. Es el primer componente de la pared celular de todos los materiales lignocelulósicos en general, constituyendo hasta el 45 % del peso seco. La celulosa es un polímero homogéneo lineal, de elevado peso molecular, con cadenas largas de D-glucosa en forma piranosa unidas por enlace β -1,4-glucosídico, siendo la celobiosa la unidad que se repite (Figura 1.1). Las fibras de celulosa están constituidas por unidades estructurales primarias llamadas microfibrillas de aproximadamente 300 D de largas y 150 D de sección transversal; cada microfibrilla contiene varias fibrillas elementales de alrededor de 30 D de sección transversal, estando éstas formadas por grupos de moléculas lineales de celulosa.

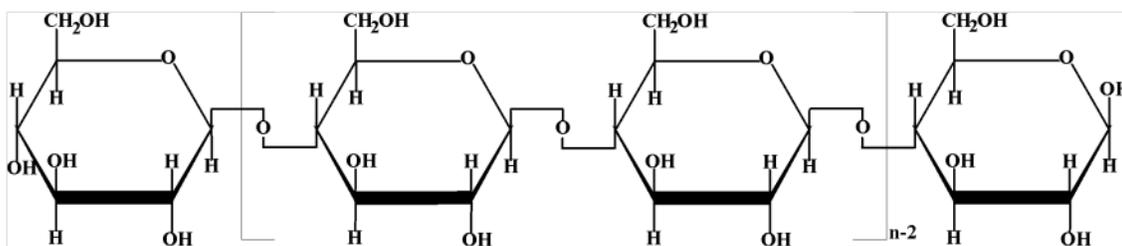


Figura 1.1. Estructura de la celulosa.

Cada molécula está enlazada con la adyacente por puentes de hidrógeno, hasta dos por unidad de D-glucosa anhidra. Sin embargo, la forma en que las moléculas de celulosa se ordenan no es bien conocida, habiéndose postulado diferentes modelos que coinciden en diferenciar entre una zona cristalina de gran orden y una zona amorfa. Considerados individualmente, los puentes de hidrógeno son enlaces débiles, pero la gran cantidad que hay entre las cadenas de D-glucosa que componen la fibra proporcionan una unión muy fuerte, siendo los responsables primarios de la rigidez de la pared celular.

La mayoría de los seres vivos son incapaces de utilizar la celulosa como fuente de carbono, pues carecen de las rutas metabólicas necesarias para efectuar su hidrólisis. Por el contrario, las plantas superiores, algunos invertebrados y, fundamentalmente, microorganismos como hongos y bacterias son capaces de hidrolizar la celulosa. La celulosa pura o casi pura sólo existe en las partes jóvenes de las plantas. En estados más avanzados las membranas celulósicas se encuentran entremezcladas con sustancias pépticas y con la lignina.

1.1.2. Hemicelulosas

Las hemicelulosas son polisacáridos homogéneos o heterogéneos que presentan una gran diversidad en cuanto a su composición y estructura, en función de su origen. Están constituidas por cadenas cortas y ramificadas, formadas por pentosas (D-xilosa, D-arabinosa, D-xilulosa...), hexosas (D-glucosa, D-galactosa, D-manosa, D-fructosa...) (Figura 1.2), junto a ácidos urónicos, principalmente ácido glucurónico y galacturónico. Se pueden identificar tres grandes grupos: xilanos, mananos y galactomananos, en función del azúcar dominante.

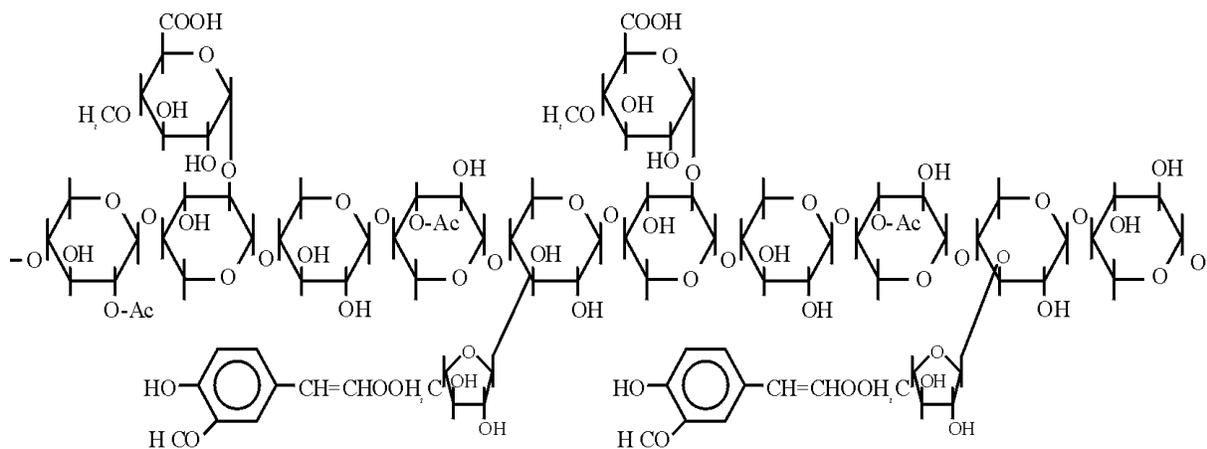


Figura 1.2. Esquema de un arabinoxilano típico de cereales.

Los xilanos son los polisacáridos no celulósicos más abundantes. En la mayoría de las angiospermas (maderas duras), los xilanos pueden representar hasta un 30 % del peso seco y son igualmente mayoritarios en el caso de las plantas anuales; por el contrario, en las gimnospermas (las maderas blandas) presentan una mayor proporción de mananos. Otras diferencias en cuanto a la composición entre las maderas duras y las blandas son que las hemicelulosas de las primeras tiene un mayor porcentaje de grupos acetilo, mientras que su contenido en lignina es ligeramente inferior.

Las maderas duras contienen dos tipos de hemicelulosa: el principal se designa como O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano, cuya base es un homopolímero de D-xilosa en forma piranosa unidos por enlaces β -(1,4); aproximadamente un 70 % de estas unidades están acetiladas en las posiciones 2 ó 3 y un 10 % están unidas a ácido 4-O-metil-D-glucurónico en posición 2. El segundo tipo de hemicelulosas predominante en las maderas duras son los glucomananos, formados por una proporción semejante de β -D-glucopiranososa y β -Dmanopiranososa, unidos por enlaces β -(1,4). En el caso de las maderas blandas, los dos principales tipos de hemicelulosas son los galactogluco-mananos y arabino-4-Ometilglucuronoxilanos (Brigham, 1996).

1.1.3. Lignina

El tercer constituyente fundamental de la estructura de los materiales lignocelulósicos es la lignina. Se trata de un material polimérico que actúa como material de unión entre la celulosa y las otras fibras de polisacáridos y esencialmente es un polímero tridimensional de fenilpropano con grupos fenólicos.

1.2. Etapas para la producción de etanol

Recientes innovaciones tecnológicas permiten obtener, empleando una variedad de métodos de extracción y disolución de celulosa y hemicelulosa, los azúcares simples que las componen de forma tal que puedan ser usados para producir etanol, independientemente de la vía seguida (Mesa, 2010), Los siguientes factores resultan claves (Hahn-Hägerdal, 2006).

- Eficiente fermentación de los hidrolizados, que contienen una mezcla de hexosas, pentosas y compuestos inhibidores de la fermentación.
- Una adecuada integración de las etapas del proceso, que permita minimizar la demanda energética.
- Aprovechamiento de la lignina.

1.3. Propiedades y usos del bioetanol

El bioetanol es el alcohol etílico producido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales (cereales, remolacha, caña de azúcar o biomasa)

combinados en forma de sacarosa, almidón, celulosa y hemicelulosa. Es un compuesto ternario, que está formado por carbono, oxígeno, e hidrógeno y su composición es la siguiente: 52,15 % de carbono, 34,33 % de oxígeno, y 13,12 % de hidrógeno, su grupo funcional es el hidroxilo unido directamente a un carbono (Palacios,1956). Es un líquido incoloro, transparente, volátil, de sabor picante y miscible en agua y otros líquidos orgánicos. Se emplea en la industria, destilado con diferentes grados de pureza según su destino. Normalmente se comercializa de forma hidratada (de 95 a 96 % volumen) o anhídrido (mayor de 99 % volumen). Tiene diferentes usos como por ejemplo:

- La fabricación del ETBE (etil terciario-butil éter, el cual posee propiedades oxigenativas de los combustibles).
- Mezcla directa con gasolina.
- Como combustible principal en los motores de gasolina o mezcla directa con diesel.
- Como materia prima en la obtención de hidrógeno.

1.4. Ventajas y desventajas de los biocombustibles

Producir bioalcohol o bioaceite siempre resulta bastante más costoso que generar gasolina y gasóleo, por lo que las subvenciones o facilidades impositivas resultan imprescindibles para potenciar el uso de estos biocombustibles, siempre menos agresivos para el medio ambiente. Mirando al futuro, cabe destacar que gracias a los decrecientes costos de las materias primas agrícolas y a las mejoras en la tecnología procesadora, los costos podrían reducirse en el cursar de los años.

1.4.1. Desventajas de los biocombustibles

Dentro de las principales desventajas de los biocombustibles se encuentran:

- Su costo de producción dobla, aproximadamente, al del de la gasolina o gasóleo (sin aplicar impuestos). Por ello, no son competitivos sin ayudas públicas.
- Se necesitan grandes espacios de cultivo, dado que del total de la plantación sólo se consigue un 7 % de combustible. Por ejemplo en España, habría que cultivar un tercio de todo el territorio para abastecer sólo la demanda interna de combustible.

- Potenciación de monocultivos intensivos, con el consiguiente uso de pesticidas y herbicidas.
- El combustible nace de una transformación previa compleja. Además, en los bioalcoholes, la destilación provoca, respecto a la gasolina o al gasóleo, una mayor emisión en dióxido de carbono.
- Su uso se limita a un tipo de motor de bajo rendimiento y poca potencia.

1.4.2. Ventajas de los biocombustibles

Por otra parte las principales ventajas de los biocombustibles son:

- No incrementan los niveles de CO₂ en la atmósfera, con lo que se reduce el peligro del efecto invernadero.
- Proporcionan una fuente de energía reciclable y, por lo tanto, inagotable.
- Revitalizan las economías rurales, y generan empleo al favorecer la puesta en marcha de un nuevo sector en el ámbito agrícola.
- Se podrían reducir los excedentes agrícolas que se han registrado en las últimas décadas.
- Mejoran el aprovechamiento de tierras con poco valor agrícola y que, en ocasiones, se abandonan por la escasa rentabilidad de los cultivos tradicionales.
- Mejora la competitividad al no tener que importar fuentes de energía tradicionales.

1.5. Materias Celulósicas

La celulosa es un componente de las fibras vegetales, por ejemplo, los residuos de la industria del papel, ya sea obtenido de la madera o del bagazo. Al presentar los materiales lignocelulósicos una estructura compleja (formada mayoritariamente por celulosa, hemicelulosa y lignina) el proceso de obtención de los azúcares para su transformación en etanol es más difícil que en el caso del almidón y de los sustratos tradicionales. La idea de producir etanol a partir de los residuos lignocelulósicos data de las décadas del 40' y 50'. En la literatura hay coincidencia en que constituye una posibilidad altamente prometedora por su amplia disponibilidad en el mundo y por ende la alternativa de emplear los residuos lignocelulósicos en la producción de etanol se hace factible.

Es considerada una materia prima de bajo costo que ofrece en el futuro, un potencial mayor para la producción de bioetanol; pues éstos pueden generarse como residuos en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal e industrial. También se incluyen residuos agrícolas como restos de aceitunas, cascarillas de arroz, cáscaras de frutos secos. Por otro lado, la madera no ha sido utilizada todavía en la producción comercial de etanol pero tiene una gran importancia debido a la gran cantidad de residuos de madera disponibles. La biomasa lignocelulósica presenta una estructura compleja compuesta de tres fracciones (celulosa, hemicelulosa y lignina) que deben ser procesadas por separado para asegurar una conversión eficiente de este tipo de materiales a etanol. La otra fuente potencial importante de recursos lignocelulósicos está constituida por los residuos urbanos. Existe un razonable acuerdo en considerar que los mismos están compuestos por un 50 % de materiales lignocelulósicos (papel, envases, residuos de maderas, etc.). Además, la generación de estos residuos, por su mismo carácter, está localizada y acumulada en zonas geográficas bien limitadas, lo que viabiliza su aprovechamiento.

Todos los procesos incluyen la hidrólisis de celulosa y hemicelulosa, fermentación de los azúcares y la recuperación del producto. La principal diferencia consiste en la etapa de hidrólisis, que puede ser realizada mediante catalizadores ácidos (diluidos o concentrados) o por vía enzimática, mediante el empleo de catalizadores biológicos. No obstante, los principales programas de investigación, se decantan por la hidrólisis enzimática, puesto que en esta vía se considera que existen mayores posibilidades de reducción de costes, en detrimento de los procedimientos que utilizan la hidrólisis ácida que se consideran tecnologías más desarrolladas y donde las opciones de mejora son más limitadas.

La hidrólisis ácida de materiales lignocelulósicos es conocida desde 1819 y ha sido ampliamente utilizada a escala industrial; por ejemplo, el proceso modificado Bergius, que utiliza HCl al 40 %, tuvo una especial aplicación durante la Segunda Guerra Mundial en Alemania. La hidrólisis ácida puede realizarse con ácidos como sulfúrico, clorhídrico, fosfórico, nítrico y fórmico, entre otros, tanto diluidos como concentrados. Cuando se emplean ácidos concentrados, generalmente se opera a bajas temperaturas, obteniéndose altos rendimientos; por ejemplo, a partir de una mezcla de astillas de maderas duras y blandas, se ha obtenido un 82 % de eficiencia en la obtención de azúcares mediante el empleo de ácido sulfúrico al 26 % en peso. (Figura 1.3).

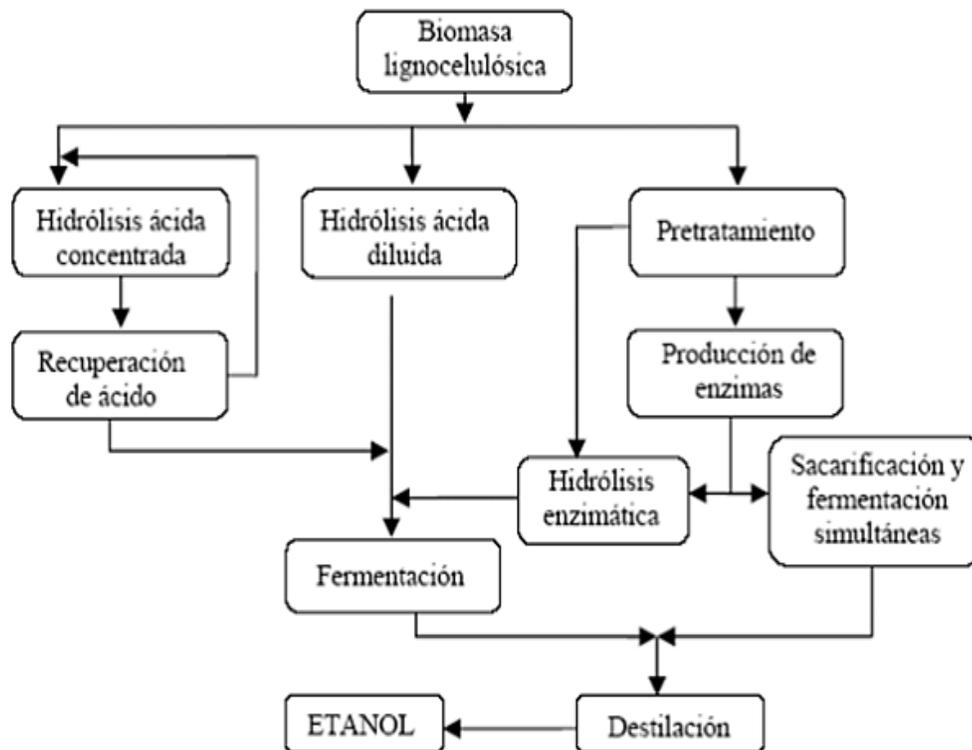


Figura 1.3. Obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos por diferentes vías.

Por otra parte, la gran cantidad de ácido ocasiona problemas de corrosión de los equipos y de demanda energética en la etapa de recuperación del ácido. Igualmente, si se usa ácido sulfúrico, el proceso de neutralización origina una gran cantidad de precipitado. La principal ventaja de la hidrólisis diluida es el menor consumo de ácido. Sin embargo, se requieren altas temperaturas para lograr rendimientos aceptables en glucosa, lo que provoca a su vez una mayor descomposición de los azúcares procedentes de la hemicelulosa, generando compuestos que pueden inhibir la actuación de los microorganismos en la etapa de fermentación, e incrementa los problemas de corrosión.

La hidrólisis enzimática presenta, al menos, tres ventajas potenciales frente a los procesos catalizados por ácidos: mayores rendimientos, menores costes de equipamiento debido a que se realizan a presión atmosférica y bajas temperaturas y no existe producción de sustancias tóxicas como consecuencia de la degradación de los azúcares que pudieran comprometer la fermentación posterior. Como limitación, existe inhibición de las celulasas por el producto final (glucosa), que disminuye el rendimiento del proceso. Para efectuar esta hidrólisis, suele utilizarse un complejo enzimático compuesto por endo y exoglucanasas suplementadas con

β -glucosidasas cuyo objetivo es asegurar la ruptura de las moléculas de celobiosa generadas por la acción de las otras enzimas.

En función de la concentración de enzima, la concentración de sustrato y el tiempo de operación, el ataque enzimático resulta en una disolución de glucosa, que puede utilizarse como medio de fermentación para su transformación en etanol, y en un residuo sólido, formado principalmente por lignina que puede ser utilizado como combustible.

Para la obtención del bioetanol el proceso se divide en cuatro etapas fundamentales, en las que se liberan los azúcares presentes en el material lignocelulósico. Estas etapas se resumen en el esquema de la Figura 1.4.

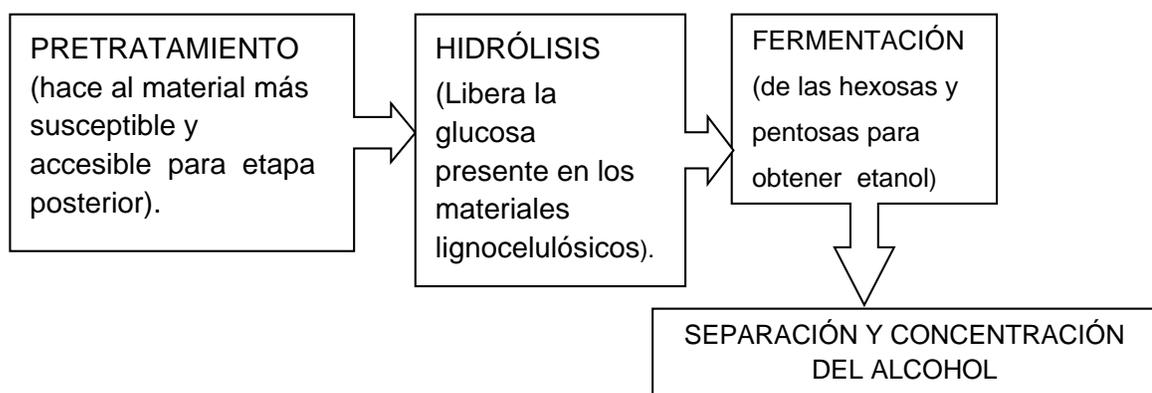


Figura 1.4. Etapas necesarias para extraer los azúcares que se encuentran presentes en los materiales lignocelulósicos.

1.6. Tratamiento con organosolventes

El pre-tratamiento con organosolventes surge por ser una tecnología limpia que se ha utilizado para el pre-tratamiento de pulpas en la industria papelera. Por los resultados obtenidos se decide investigar este método aplicándolo al bagazo de la caña de azúcar para la obtención de bioetanol pues se obtienen mayores resultados y menor impacto medioambiental. También es un proceso selectivo para la eliminación de lignina, sin afectar en gran medida la celulosa presente en el bagazo, genera menor cantidad de inhibidores y le provoca un menor daño a la fibra celulósica (Pan, 2006). En este tratamiento se utilizan solventes orgánicos, en este caso etanol porque puede recuperar posteriormente e incorporarlo nuevamente al proceso. Desde el punto de vista químico lo que ocurre es una dilución del bagazo para separar los componentes para luego ser utilizados en la producción de otros materiales.

Los procesos organosolventes se encuentran hasta el momento en estado de tecnologías emergentes y en plantas experimentales de baja producción. Históricamente el proceso organosolv ha sido investigado ampliamente con la perspectiva de la producción de pulpa y papel, pero varios estudios han sido realizados analizando la fracción lignina extraída durante el pulpeo, incluyendo la demostración de su potencial para la obtención de varios coproductos tales como adhesivos o polímeros biodegradables (Lopretty, 2004). En este se emplea una mezcla de solventes orgánicos o acuosos junto con un catalizador ácido (clorhídrico o sulfúrico) para romper los enlaces internos de la lignina y la hemicelulosa. Los solventes utilizados para esto se prefieren que sean con puntos de ebullición más bajos que el del agua como los alcoholes menores porque pueden recuperarse del licor residual por destilación simple como lo pueden ser: metanol, etanol, acetona y etilenglicol. También pueden emplearse ácidos orgánicos como el ácido oxálico, acetilsalicílico y salicílico.

Con el objetivo de reducir costos y de evitar problemas en la posterior etapa de fermentación se deben reciclar los solventes. Por otra parte, la adición de ácido sulfúrico a la mezcla agua etanol mejora la selectividad respecto a la hemicelulosa y la habilidad de deslignificación del etanol por lo tanto mayores rendimientos en el proceso de pulpeo.

También se puede llevar a cabo la deslignificación a un pH cerca del neutro lo que reduce la degradación térmica de la celulosa y la hemicelulosa resultando un aumento en el rendimiento. Se refiere a que el empleo de etanol favorece el proceso de deslignificación pero que a niveles mayores de 50 % dificulta la deslignificación, es por esto que como límite superior se fija 45 % de etanol. La generación de una lignina de alta calidad y otros coproductos de alto valor a partir de los residuos lignocelulósicos a través de este método de pre-tratamiento lo hacen efectivo económicamente para la producción de etanol combustible. Este es un proceso que produce un sustrato que es altamente degradable por enzimas y microorganismos (Pan, 2006).

Este proceso posee otras ventajas que lo hacen interesante como pre-tratamiento de la biomasa lignocelulósica para la producción de etanol, como lo son: mayor recobrado de sólidos, conservación de la fracción glucano del material lignocelulósico, deslignificación uniforme del material, generación de menor cantidad de inhibidores de la fermentación, recuperación económica del etanol utilizado en un 95 % a través de la destilación del condensado de los vapores que se originan producto del cambio brusco de presión, fácil recuperación de los componentes, potencialmente utilizables, del hidrolizado obtenido y como mencionamos arriba la calidad de la lignina obtenida. Los solventes usados en los

procesos necesitan ser recuperados del reactor, evaporados, condensados y reciclados para así disminuir su costo. La eliminación de los solventes del sistema es necesaria porque estos pueden ser inhibitorios del crecimiento de los microorganismos, hidrólisis enzimática y la fermentación.

El bagazo de la caña de azúcar es una materia prima potencial para la obtención de etanol por la vía de aprovechamiento de la celulosa y hemicelulosa presente en su composición, que posteriormente se utilizaría como biocombustibles.

El pre-tratamiento organosolv de materiales lignocelulósicos para la producción de etanol, es una opción atractiva para el desarrollo de esta tecnología insertada dentro del concepto de biorefinerías por lo que se puede utilizar este método como pre-tratamiento del bagazo de caña de azúcar.

Con la aplicación del método organosolv sobre los materiales lignocelulósicos pueden reducirse de forma considerable la formación de compuestos inhibidores de la fermentación y favorecer la obtención de coproductos de alto valor agregado con fines industriales.

La hidrólisis enzimática de los materiales lignocelulósicos pre tratados ofrece una alternativa interesante desde el punto de vista medioambiental para la conversión de estos materiales a azúcares fermentables, debiéndose aún mejorar en los costos de obtención de las enzimas.

Se requiere de un análisis detallado del proceso tecnológico y una estimación de los costos inversionistas de la instalación industrial para de acuerdo con la estimación de costos de producción general de etanol de residuos lignocelulósicos evaluar la factibilidad de estas producciones, así como los factores que afectan su factibilidad.

1.8. La exergía. Generalidades

La exergía, que es la parte de la energía que puede convertirse en trabajo mecánico, fue descubierta en la termodinámica casi desde sus orígenes formales, con el nombre de "trabajo disponible". Hoy en día cobra una enorme importancia, por un lado, porque la exergía es la medida cuantitativa de la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema físico y el ambiente que lo rodea, o entorno, determina cuantitativamente el valor termodinámico de cualquier recurso; y por otro lado, la exergía permite analizar rigurosamente el desperdicio de los recursos en las actividades de una sociedad, estableciendo pautas cuantitativas para su ahorro y uso eficiente.

La exergía es una función de estado termodinámico, que proporciona una medida de trabajo disponible de un fluido o masa, como resultado de su condición de no equilibrio relativo a alguna condición de referencia, cuyo valor puede ser calculado en cualquier punto del sistema a partir de otras propiedades conocidas determinadas mediante un balance de energía convencional. (Kotas, 1995), (Maturell, 2007).

1.8.1. Concepto de exergía

El concepto de exergía está indisolublemente asociado al de desequilibrio entre un cierto sistema y su entorno, determinado por la diferencia entre los valores de alguna variable dinámica que los caracteriza (por ejemplo la temperatura o la presión) (Kotas, 1995), (Maturell, 2007). El desequilibrio consiste en que el valor de la variable dinámica en cuestión es diferente para el sistema y su entorno y, por ello, ambos están en una situación de desequilibrio por lo que se puede definir como: La exergía es la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de un desequilibrio entre un sistema y su entorno.

La exergía es una cantidad física que depende de las variables de dos sistemas, y no de uno sólo; tiene por ello una propiedad singular, pues vale cero cuando ambos sistemas están en equilibrio y que es diferente de cero cuando están en desequilibrio.

Los autores (Lapido y Col., 2006) definen la exergía como una propiedad del sistema termodinámico o flujo de energía que caracteriza la fracción de la energía que puede convertirse en trabajo si el sistema se lleva reversiblemente hasta el estado muerto y es la magnitud cuyo valor refleja de manera cuantitativa la calidad de la energía.

Cuando se realiza un proceso real determinado, la exergía disminuye, o sea, una parte de la exergía disponible se transforma en energía útil, pero el resto no se puede usar.

1.8.2. Tipos de exergía

La exergía está constituida por las llamadas inercial y sustancial. La exergía sustancial que es la más importante en cuanto a su valor relativo con una corriente específica tiene dos contribuciones: la exergía física y la exergía química.

1.8.2.1. Exergía física

La exergía física depende de: la temperatura entre la materia y el medio ambiente, lo que se denomina exergía térmica, dada por la expresión. (Montero, 1998).

$$B_f = \Delta H - T\Delta S = (H - H_o) - T_o(S - S_o) \quad (1.1)$$

Donde ΔH y ΔS son las variaciones de entalpía y de entropía y el subíndice o indica el ambiente de referencia, por lo tanto, T_o es la temperatura en el estado de referencia. (Kotas, 1995).

1.8.2.2. Exergía química

La exergía química es el trabajo máximo que puede obtenerse al pasar el flujo estacionario de un sistema abierto del estado ambiental al estado muerto solo con transformaciones químicas entre el flujo estacionario y el medio ambiente. La exergía química coincide con la disminución de la función de Gibbs en el valor y como estado coincide con el cambio del estado ambiental al estado muerto o de referencia.

1.8.2.2.1. Exergía química de las sustancias de referencias

La primera definición de exergía química indica que, para conseguir el máximo trabajo, el proceso usado tiene que ser completamente reversible. El estado inicial en este proceso es el medio ambiente, definido a P_o y T_o , y el estado final es el estado muerto, definido por T_o y presión parcial P_∞ de la sustancia de referencia gaseosa considerándola como componente de la atmósfera. El trabajo obtenido para este proceso por mol de sustancia será igual a la exergía química (e_{ch}). (Kotas, 1995)

$$e_{ch} = RT_o \ln \frac{P_o}{P_\infty} \quad (1.2)$$

La exergía química para componentes puros es igual a E_{ch}^o :

Para mezclas ideales la exergía química se calcula por:

$$E_{ch} = \sum x_i \cdot E_{chi}^o + R \cdot T_o \sum x_i \cdot \ln \cdot x_i \quad (1.3)$$

Dónde: E_{ch}° es la exergía química estándar

En el caso de la exergía química para mezclas reales se introduce el coeficiente de actividad como propiedad termodinámica que da una medida del comportamiento de solución real, el que se determina por los modelos derivados de la energía libre en exceso.

$$\ln \gamma_i = \frac{G_i^E}{R^*T} \quad (1.4)$$

El desarrollo teórico moderno de la termodinámica molecular sobre el comportamiento de las soluciones líquidas se basa en el concepto de “composición local”. El concepto fue introducido por G.M. Wilson en 1964 con la publicación de un modelo de comportamiento de la solución conocido desde entonces como la ecuación de Wilson. El éxito de esta ecuación en la correlación de datos de equilibrio vapor-líquido impulsó el desarrollo de modelos alternos de composición local, el más notable es la ecuación de Renon y Prausnitz conocida como NRTL (*Non-Random-Two-Liquid*: dos líquidos no al azar) y la ecuación de Abrams y Prausnitz como UNIQUAC (*Universal-Quasi-Chemical*: Quasi química universal). Un importante desarrollo posterior, basado en la ecuación de UNIQUAC es el método UNIFAC (*UNIQUAC Functional-Group-Activity coefficients*) desarrollado por Fredenslund y Col. en el que se calculan los coeficientes de actividad mediante las contribuciones de los diferentes grupos que constituyen las moléculas en una solución y el método ASOG (*Analytical Solutions of Groups*). (Kotas, 1995).

De aquí que estos modelos se puedan separar en dos grupos:

Modelos que precisan del conocimiento de los parámetros de correlación de los correspondientes sistemas binarios entre los que se tienen: ecuación de Wilson., ecuación de NRTL., ecuación de UNIQUAC.

1.8.3. Eficiencia exergética

Hasta mucho más de la primera mitad del siglo XX los análisis energéticos se habían desarrollado a partir de coeficientes energéticos que si bien cumplieron un rol importante en la determinación y utilización de la energía no lo han hecho así en el perfeccionamiento termodinámico de los procesos , pues no establecen la diferenciación entre la calidad de la energía que se distribuye , la cual está relacionada con la capacidad de realizar trabajo útil,

razón por la cual se imponen en la actualidad los análisis exergéticos que superan esta dificultad.

Luego entonces una manera alterna de medir la utilización adecuada de los recursos exergéticos es mediante la llamada eficiencia exergética, la que se define como el cociente de la exergía mínima y la exergía consumida en la tarea. Esto es:

$$\eta_{EX} = \frac{Ex_{entrada}}{Ex_{Salida}} \quad (1.5)$$

El valor máximo de la eficiencia exergética es de uno. La eficiencia exergética, o eficiencia de tarea, es distinta de la eficiencia tradicional de los dispositivos mecánicos o termodinámicos, también llamada eficiencia energética. Ésta se calcula por el cociente de la energía de salida o útil, y la energía de entrada al dispositivo (por ejemplo, en una planta termoeléctrica o de potencia, la eficiencia es normalmente el cociente de la energía eléctrica y el calor generado en la caldera):

$$\eta = \frac{Energia_{util}}{Energia_{disponible}} \quad (1.6)$$

1.9. Análisis de Ciclo de Vida

Los primeros estudios de análisis de ciclo de vida datan de los años '60 y '70. Inicialmente, se limitó a simples balances de materiales y energía a lo largo del proceso. Dada la relación entre el consumo energético, de recursos materiales y las emisiones de residuos, no fue difícil evolucionar hacia el ACV actual. El primer ACV fue comisionado por la Coca Cola en 1969, para evaluar diferentes tipos de envases desde el punto de vista del consumo de recursos y generación de residuos. La implementación de esta herramienta fue madurando en el mundo industrializado, hasta hoy (INOVA ,1997), (Zaror, 2000).

De aquí que, el ACV es una técnica relativamente nueva; tiene los primeros desarrollos metodológicos en los años 60, pero ha tomado auge a partir de los años 90. Se basa en una estructura donde el impacto ambiental del producto lo determina la sumatoria de todos los impactos durante el ciclo de vida. Su importancia está dada porque relaciona los impactos con los problemas ambientales y permite establecer prioridades para definir estrategias preventivas de mejoramiento del desempeño ambiental. Además, permite que antes de iniciar un programa de mejora ambiental, se tenga toda la información para poder cuantificar la

magnitud de los problemas y definir las soluciones con mayor seguridad. Por otra parte, evita desplazar los problemas de una etapa del ciclo de vida a otra o de un medio a otro y favorece la adopción de patrones de consumo y de producción sostenibles, por lo que es una de las herramientas de gestión ambiental a las que se les predice una mayor expansión futura (PNUMA, 2003), (NC ISO 14 040, 2005).

1.9.1. Definición y metodología del ACV

Las metodologías del ACV se basan en estándares desarrollados por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC, 1991) y la Organización Internacional para la Normalización (ISO), conocidas como serie ISO 14040, en el marco de las normas para la gestión ambiental ISO 14000. Fuentes como (SETAC, 1998), (Sáenz y Zufia, 2006), (Rieradevall, 1999), ofrecen definiciones de ACV similares a la de la (NC-ISO 14040, 2005) que plantea, que el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto mediante la compilación de un inventario de entradas y salidas del sistema, evaluación de impactos ambientales asociados a las mismas e interpretación de los resultados de las fases de inventario y evaluación de impactos con relación a los objetivos del estudio.

La técnica utilizada en ACV es la creación de modelos. Se elabora un modelo del complejo sistema utilizado para producir, transportar, usar y eliminar un producto, resultando en un árbol de procesos con todos los aspectos relevantes. Se recopilan todas las entradas y salidas, obteniéndose una larga lista de entradas y salidas, que en muchos casos es difícil de interpretar. Durante la evaluación del impacto, se usa otro modelo para describir la relevancia de entradas y salidas (modelo de mecanismo ambiental).

Las aplicaciones más importantes del ACV son: análisis de la contribución de estados de ciclos de vida a la carga ambiental general, con el objetivo de tratar preferentemente los puntos débiles; mejora del producto o proceso, comparación de productos con similar función, comparación de opciones de procesos tecnológicos o manejo de residuos, evaluación de nuevos productos, planeación y evaluaciones estratégicas (Goedkoop y Oele, 2004), (Gaudreault, 2006).

Un estudio de ACV se puede hacer para diferentes niveles de profundidad, la tendencia actual es a realizar estudios simplificados. Diferentes autores, (Rieradevall, 1999, 2000), (Sáenz y Zufía, 2006), (Rodríguez, 2002), (NC ISO 14 040, 2005) analizan las etapas de un ACV, como se muestra en la Figura 1.6.

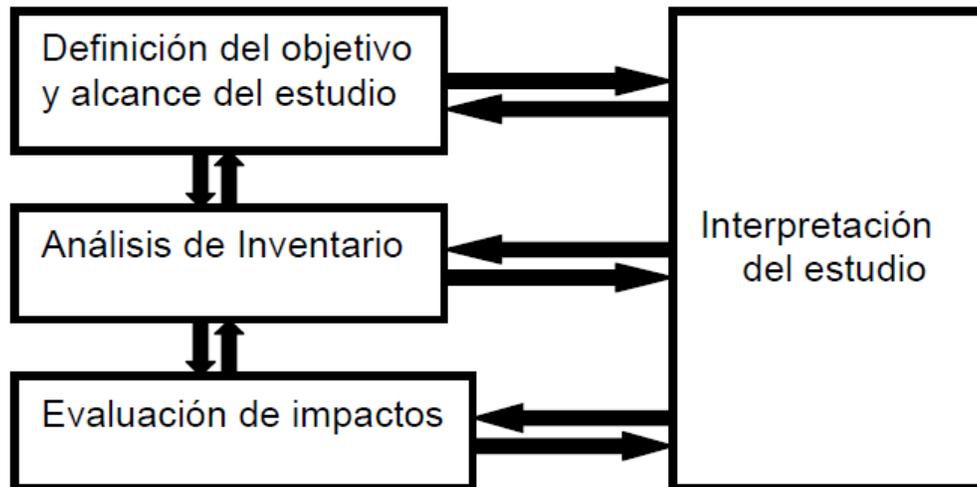


Figura 1.6. Fases de un ACV de un producto en general.

En correspondencia con estas fases, hay cuatro estándares ISO especialmente designados para la aplicación del ACV, que en Cuba se corresponden con las NC-ISO 14040- NC-ISO 14043.

La definición del objetivo y alcance permite definir el propósito y extensión del estudio, y contiene una descripción del sistema estudiado. Resultan importantes la unidad funcional del producto o servicio entregado y la distribución. ISO recomienda evitar distribuciones, de no ser posible, distribuir el perjuicio ambiental en base a una causalidad física o una base socioeconómica (Goedkoop and Oele, 2004) (NC-ISO 14041, 2000), (Vink, 2003). La recolección de datos es la tarea más exigente en cuanto a la ejecución del ACV. En general, se requiere dibujar un diagrama de flujo del sistema, coleccionar datos de uso de recursos y emisiones de todos los procesos, utilizando distintas fuentes de datos (Bases de datos de ACV, reportes, artículos científicos, investigaciones en el lugar, conocimientos de expertos), construir un modelo del sistema y calcular el uso de recursos y emisiones del producto estudiado (NC-ISO 14041, 2000), (Llanes y col, 2005), (Bjorklund, 2006).

Los resultados del inventario constituyen una lista de emisiones y materias primas que en muchos casos cubre cientos de sustancias, lo que lo hace muy difícil de interpretar, pero tiene la ventaja de ser un resultado detallado y no está afectado por incertidumbres introducidas en

la determinación del impacto (Goedkoop and Oele, 2004). Esto permite combinar el método con otros más precisos como el análisis termodinámico.

La evaluación de los impactos es el proceso técnico para caracterizar y evaluar los efectos ambientales de las entradas y salidas identificadas en el análisis de inventario, con el fin de determinar la importancia relativa de cada uno de los elementos del inventario y agregarlos a un sistema pequeño de indicadores, o a un indicador (Vink, 2003).

Existen múltiples metodologías para la evaluación de impactos ambientales y aún no existe un consenso generalizado sobre cuál es la mejor. La (NC-ISO 14042, 2001), en los métodos de evaluación de impacto distingue elementos obligatorios, como clasificación y caracterización y elementos opcionales como agrupación y ponderación; el resultado final de estas últimas etapas o valoración, debe ser un número que indica la bondad ambiental del producto.

La valoración es el paso más difícil y controvertido de un ACV, ya que la ponderación relativa de las categorías presenta cierto grado de subjetividad y es la menos desarrollada actualmente. Esta se refiere a la evaluación cuantitativa/cualitativa de la importancia relativa de las distintas categorías de impacto. El objetivo de la valoración es la agregación de los datos del análisis de impactos, se obtiene un perfil ambiental ponderado que conduce a un único índice ambiental global para el sistema (Rieradevall, 1999), (Vink, 2003), (LLanes y col, 2005). La selección del método y categorías de impacto se basa en el nivel deseado de agregación de los resultados.

En la fase de interpretación de los resultados se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto, para derivar las conclusiones y/o recomendaciones, se analizan los resultados de los análisis de sensibilidad e incertidumbre. Además, se requiere información sobre aspectos como economía, comportamiento del producto y opinión pública. Optativamente, se realiza un análisis de mejoras. La revisión crítica verifica que los métodos utilizados son consistentes con las normas vigentes, científica y técnicamente válidos; los datos son apropiados y razonables; las interpretaciones reflejan las limitaciones planteadas y el objetivo e informe del estudio son consistentes. Se utilizan procedimientos como el Análisis de Incertidumbre, el Análisis de Sensibilidad y el Análisis de Contribución, para entender la incertidumbre de los resultados, y qué procesos son significativos en los mismos (NC ISO 14 043, 2001), (Vink, 2003), (Goedkoop and Oele, 2004), (Sáenz y Zufia, 2006).

1.10. El análisis de ciclo de vida para biocombustibles

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos. La principal característica de esta herramienta es su enfoque holístico, es decir, que se basa en la idea de que todas las propiedades de un sistema no pueden ser determinadas o explicadas solo de manera individual por las partes que lo componen. Es necesaria la integración total de todos los aspectos que participan; de ahí el concepto de tener en cuenta todo el ciclo de vida del sistema.

Los elementos que se tienen en cuenta dentro del ACV, comúnmente se conocen como (entradas/salidas) (Figura 1.7):

- Entradas: Uso de recursos y materias primas, partes y productos, transporte, electricidad, energía... etc., que se tienen en cuenta en cada proceso/fase del sistema.
- Salidas: Emisiones al aire, al agua y al suelo, así como los residuos y los subproductos que se tienen en cuenta en cada proceso/fase del sistema (IHOBE, 2010).

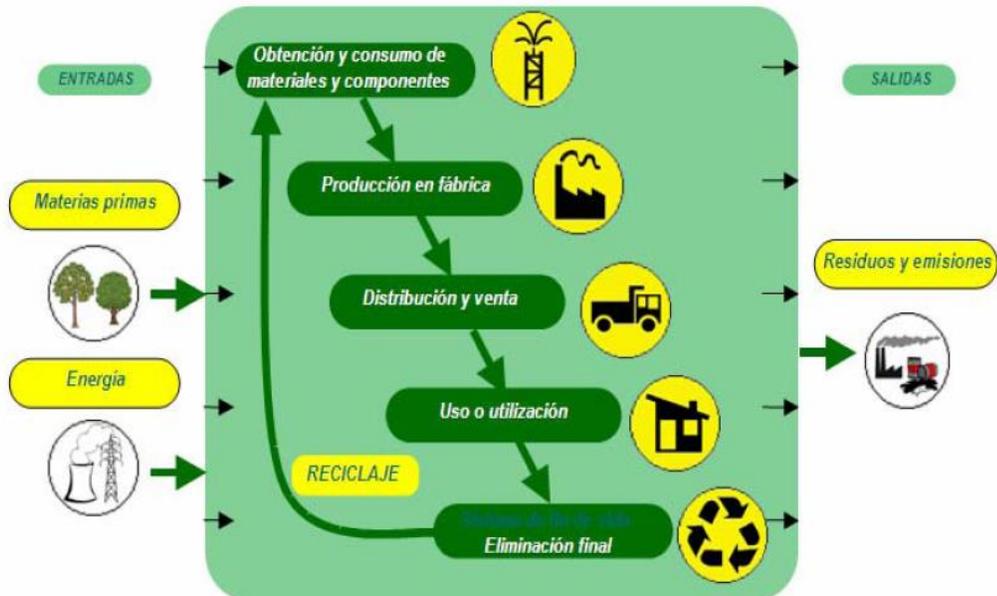


Figura 1.7. Elementos a tener en cuenta en un Análisis de Ciclo de Vida.

1.10.1. Concepto de la perspectiva de un ACV y fases que se tienen en cuenta

La manera y forma en la que se recopilan estas entradas/salidas se conoce como Inventario de ciclo de vida (ICV), y es la fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas/salidas de un sistema durante su ciclo de vida. (Figura 1.8).

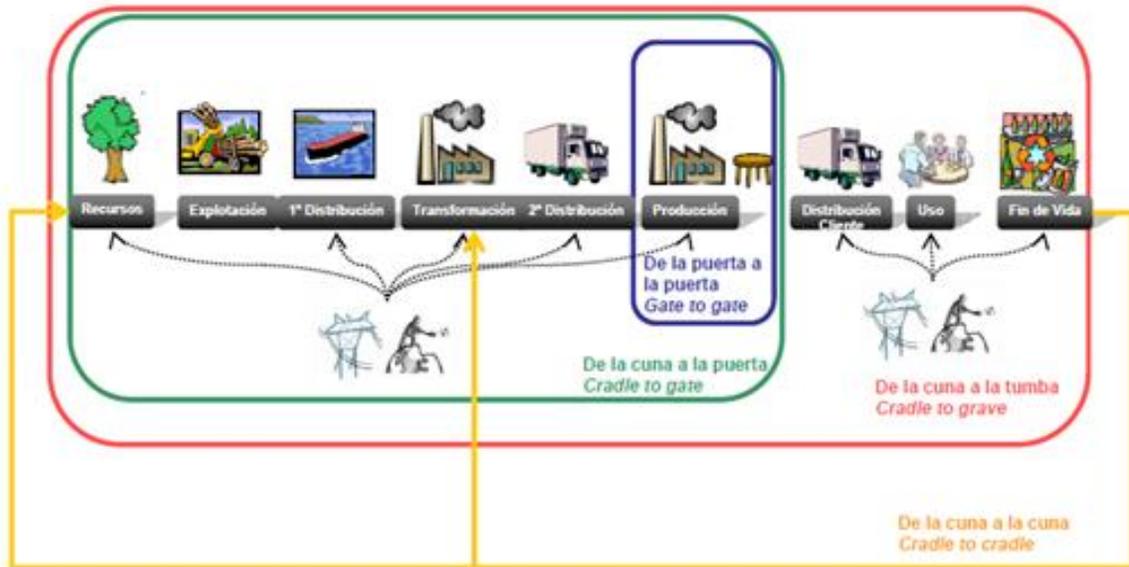


Figura 1.8. Terminología relacionada con el alcance de un Análisis de Ciclo de Vida.

El ACV de un producto debería incluir todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida: la extracción de materias primas y el procesado de los materiales necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final. El transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias entre las fases del ciclo de vida también se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente. A este tipo de ciclo de vida se le denomina comúnmente “de la cuna a la tumba”.

Cuando el alcance del sistema se limita a las entradas/salidas desde que se obtienen las materias primas hasta que el producto se pone en el mercado (a la salida de la planta de fabricación/montaje), se le denomina como “de la cuna a la puerta”.

Y cuando solo se tienen en cuenta las entradas/salidas del sistema productivo (procesos de fabricación), se le llama “de la puerta a la puerta”. (IHOBE, 2010).

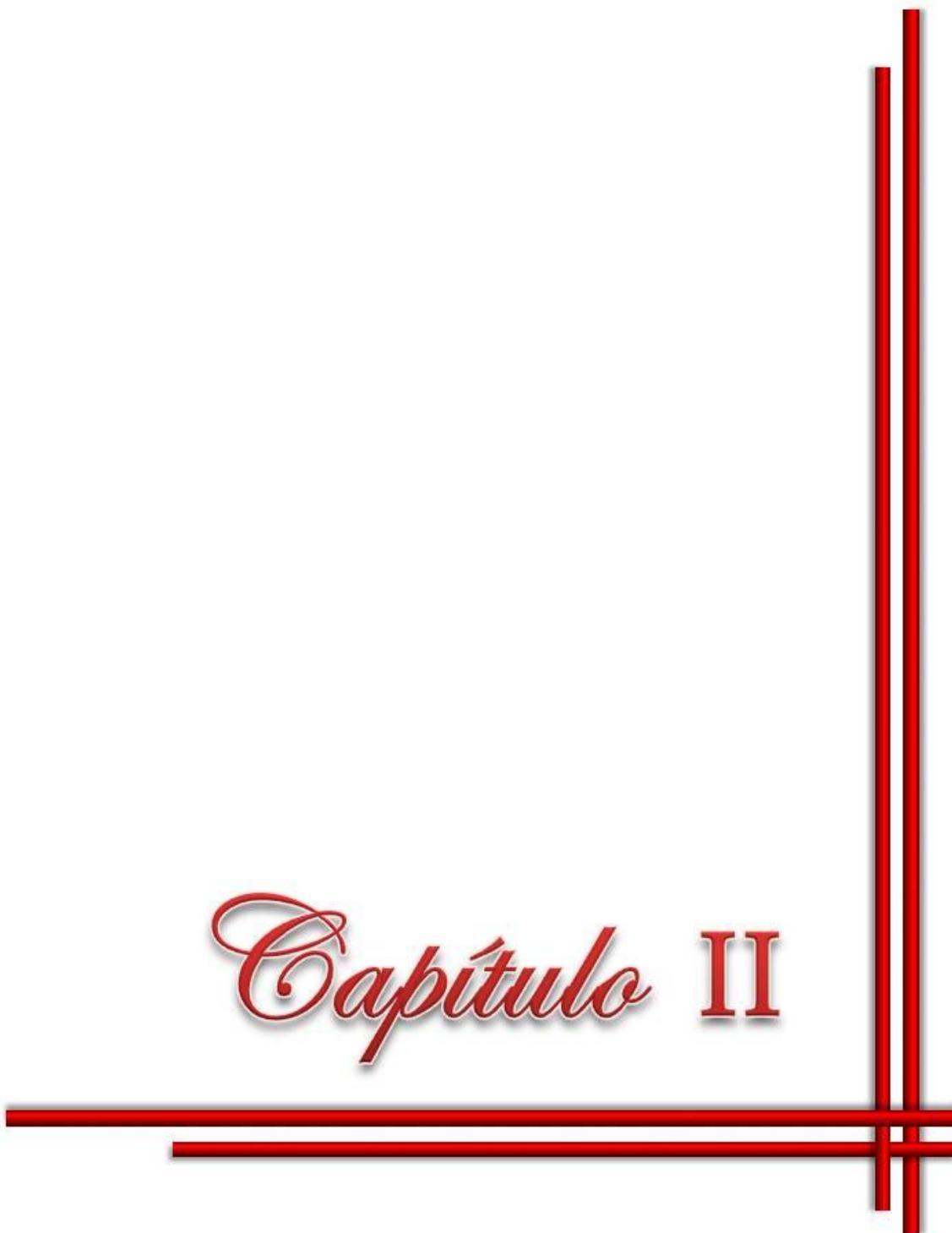
Sin embargo, es el alcance de todo el ciclo de vida (de la cuna a la tumba) el único que nos asegura que las cargas medioambientales de una fase no se traspasan a otras fases del ciclo de vida. Esto significa que, por ejemplo, externalizar un proceso de nuestro sistema

contratando a un proveedor externo, no nos evita la contabilización de la carga ambiental asociada a ese proceso. Aunque el mismo no esté en nuestra propia planta, el concepto holístico del ACV nos obliga a tenerlo en cuenta.

Un nuevo enfoque, basado en tener en cuenta que las corrientes de salida del Fin de Vida del sistema pueden ser valoradas como materias primas y/o entradas al mismo sistema o a otro, está teniendo un importante reconocimiento en los últimos años. A este tipo de enfoque en ACV se le denomina como “de la cuna a la cuna”.

La suma total de entradas y salidas sienta las bases para un posterior análisis y evaluación de los efectos medioambientales relacionados con el producto.

Capítulo II



Capítulo 2: Análisis del Ciclo de Vida para el proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de la caña

El bagazo de caña de azúcar es un subproducto que se obtiene en el proceso de producción del azúcar, es usado como combustible para generar vapor y electricidad en esta industria. La tendencia actual de producir biocombustibles a partir de residuos ha propiciado que se lleven a cabo estudios en Cuba para la producción de etanol.

Sin embargo, el bioetanol producido a través de residuos lignocelulósicos tiene inconvenientes reportados por varios autores, los más frecuentes son: el pre-tratamiento utilizado tradicionalmente para eliminar la lignina es muy costoso, la producción de enzimas capaces de hidrolizar la celulosa/ hemicelulosa ocurre en reactores micro-biológicos muy costosos, el costo de inversión para una planta de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña es 50 % mayor que para una planta similar a partir de melazas. Sin embargo diferentes autores han reportado beneficios considerables relacionados con este producto (Mesa, 2010). De aquí se deriva la importancia de realizar el estudio en todo su ciclo de vida.

2.1. Definición del objetivo y alcance del ACV (NC-ISO 14040, 2007)

2.1.1. Objetivo

El objetivo del estudio es servir como guía para realizar ACV de biocombustibles en Cuba que apoyen la toma de decisiones al respecto de políticas y medidas relacionadas con la promoción y uso de combustibles alternativos posibilitando aumentar la sostenibilidad de estas producciones.

2.1.2. Alcance del estudio

2.1.2.1. Función y descripción del sistema en estudio

La función principal del proceso es la obtención de etanol a partir del bagazo de la caña de azúcar. En esta etapa es necesario conocer detalladamente el proceso, las operaciones unitarias que la conforman y las conexiones de materiales y energía existentes entre ellas.

El sistema está en correspondencia al ciclo de vida del proceso de obtención de etanol que se divide en dos etapas: Agrícola e Industrial. (Contreras, 2007), (Pérez, 2004).

En la Etapa Agrícola se realiza el cultivo de la caña de forma convencional, incluye diferentes operaciones (Anexo 1), las cuales se pueden resumir en: preparación de la tierra, atenciones culturales requeridas por la planta en su proceso evolutivo, cosecha y finalmente la transportación hacia el ingenio.

Es importante destacar que en esta etapa se requieren diferentes productos como fertilizantes químicos u orgánicos, pesticidas, herbicidas, agua para regadío, combustibles fósiles para todas las actividades agrícolas, lo cual contribuye a elevar los impactos ambientales que tienen lugar en la misma.

La Etapa Industrial considera todo el proceso, desde la entrada del bagazo de la caña la obtención del etanol donde se destacan como etapas fundamentales: los pre tratamientos, hidrólisis, evaporación, fermentación y destilación. En la Figura 2.1 se detallan las operaciones de esta etapa con la identificación de sus respectivas corrientes de entradas y salidas.

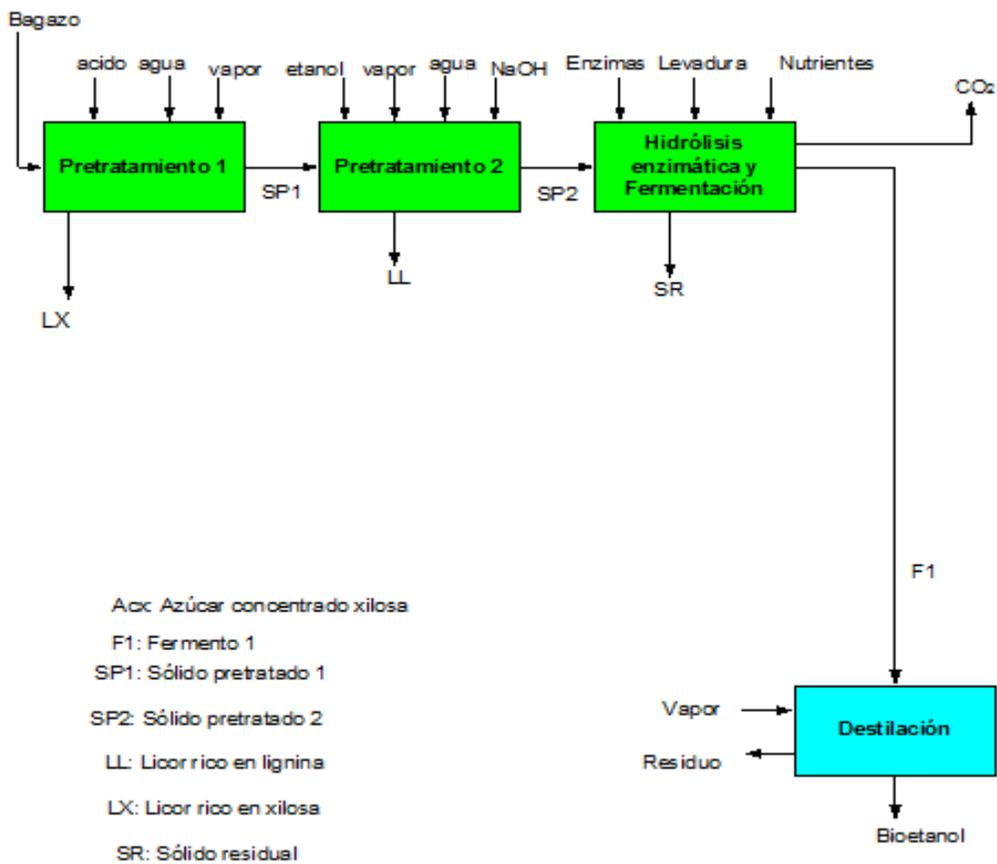


Figura 2.1. Diagrama de bloques del proceso de obtención de etanol a partir del bagazo por la variante de hidrólisis enzimática y la fermentación simultáneas.

2.1.2.1.1. Descripción del proceso

El proceso para obtener bioetanol del bagazo consiste en cuatro etapas fundamentales: los pre-tratamientos, la hidrólisis enzimática y fermentación simultánea y la destilación. La materia prima usada es el bagazo obtenido de un central, del cual una parte considerable es utilizada como combustible en la caldera y la sobrante puede tener varios usos entre los que se encuentra la producción de bioetanol. Este bagazo se almacena con aproximadamente 60 % de humedad.

El proceso consta de dos etapas de pre-tratamiento, en la primera se obtiene un líquido rico en xilosa, para ello la biomasa se somete a la acción de una solución de ácido sulfúrico al 1 % de base a la fibra seca, en presencia de vapor a 120 °C y una relación sólido:líquido de 1:1, el tiempo de residencia de esta etapa es de 40 minutos. Este líquido rico en xilosa que se obtiene puede ser sometido a otros tratamientos para la obtención de furfural.

Como resultado de esta etapa se obtiene además una corriente sólida con gran contenido en glucosa en forma de celulosa y lista para pasar a la segunda etapa de pre-tratamiento, en esta etapa el sólido obtenido se trata con una solución de hidróxido de sodio al 3 % masa en fibra seca y etanol al 30 % v/v en esta etapa se trabaja a una temperatura de 185 °C, la relación sólido:líquido es de 1/7, el tiempo de residencia en esta etapa es de 60 minutos. En esta etapa solo se pierde 1 % del etanol respecto a fibra seca y se obtiene una segunda masa sólida con una cantidad pequeña de lignina y una corriente líquida con un gran contenido de esta. El objetivo del pre-tratamiento es hacer al material lignocelulósico más susceptible para la posterior etapa.

Posteriormente se somete esta biomasa a la etapa de hidrólisis enzimática y fermentación simultánea mediante la acción de las enzimas celulasas por un término de 24 h, las principales ventajas de estos sistemas son el incremento de la velocidad de hidrólisis, debido al decrecimiento continuo de la concentración de glucosa por su asimilación mediante los microorganismos fermentadores, lo cual deriva en la minimización de la inhibición por producto de la etapa hidrolítica y la consiguiente mejora en el rendimiento global de la producción de etanol. (Ghose, 1984).

Esta fase se lleva a cabo a 35 °C, usando 30 FPU/g de enzimas celulolíticas, se trabaja a un pH de 4,8 y una velocidad de agitación de 150 rpm, donde se añaden las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*), nutrientes (cloruro de amonio, hidrógeno fosfato de potasio y sulfato de magnesio).

La batición fermentada es enviada a la columna destiladora a una temperatura de 89 °C aproximadamente, interactuando con el vapor que se alimenta por el fondo a contracorriente a través de los platos perforados. Los vapores alcohólicos pasan a la columna rectificadora, esta, a diferencia de la otra está compuesta por platos de cazoletas, donde los vapores más ligeros suben a la parte superior de la columna constituyendo el producto o destilado a 91 % mol y los más pesados descienden por tener un punto de ebullición más elevados (desde 100 hasta 130°C) considerada esta corriente como las vinazas del proceso.

2.1.2.2. Selección de la unidad funcional

La unidad funcional se define en función del objetivo del estudio y se le refieren todas las entradas (materias primas, energía, insumos, recursos) y salidas (productos, subproductos, emisiones) del sistema en estudio. Debe ser medible y representativa de todos los flujos del proceso.

Para el proceso en estudio la producción de etanol a partir del bagazo es la unidad más representativa de todas las entradas y salidas; por lo que se toma como unidad funcional la producción de 1 MJ de energía, esto posibilitará en el futuro ser comparado con otros combustibles.

2.1.2.3. Establecimiento de los límites del sistema

Los límites del sistema se establecen de acuerdo al objetivo específico que se persigue en el estudio; señalan las operaciones unitarias a tener en cuenta en el ACV, enmarcando lo que es objeto de estudio y lo que queda fuera de este. La región externa a los límites se conoce como el entorno del sistema, el cual actúa como fuente para las entradas y como sumidero para todas las salidas.

En la Figura 2.2 se representa el modelo del ciclo de vida del proceso en estudio especificando las corrientes de entradas y salidas al sistema, referidas al consumo de materias primas, insumos, agua y energía, obtención de productos, subproductos y las emisiones al medio ambiente.

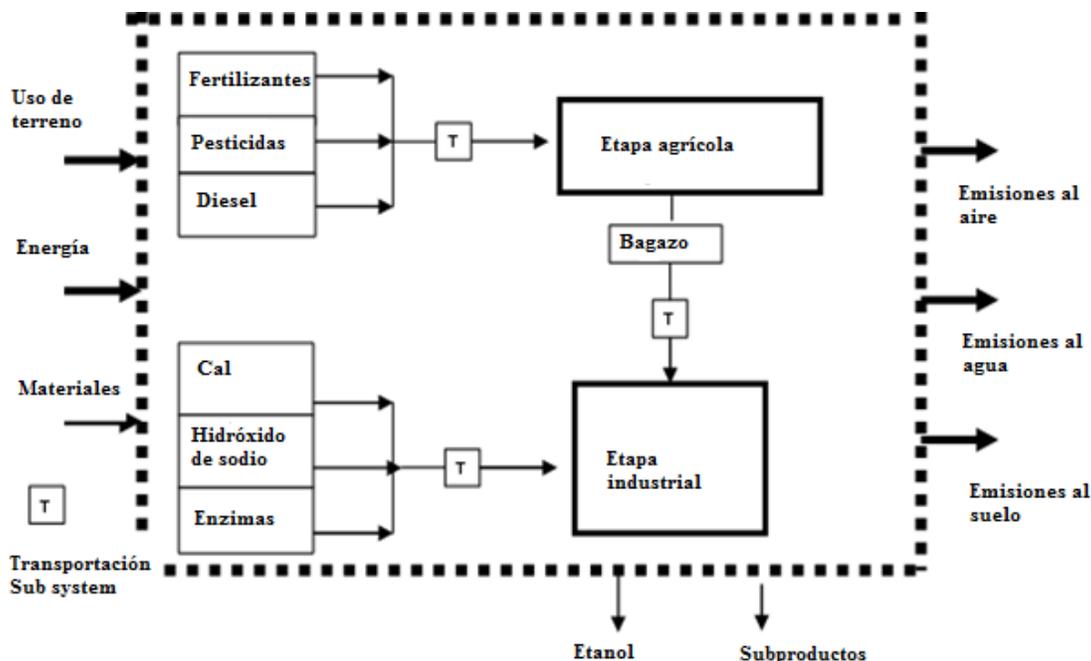


Figura 2.2. Modelo del ciclo de vida de la producción de etanol a partir del bagazo de la caña de azúcar.

2.2. Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (AICV) (NC ISO 14041, 2000)

En el AICV se cuantifican todas las entradas y salidas que se dan a lo largo del ciclo de vida del producto, en cada uno de los subsistemas que se consideran. El nivel de detalle que se alcance en el inventario depende de la disponibilidad de los datos y del grado de complejidad con que se obtengan.

Para la conformación del inventario se consideraron los inventarios de procesos unitarios de obtención de bagazo de caña y producción de alcohol lignocelulósico en las condiciones de Cuba desarrolladas por el grupo de ACV de la Facultad de Química-Farmacia de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas Cuba.

El inventario está dividido en las fases agrícolas e industrial considerando la unidad funcional. En el subsistema agrícola se incluye de forma general la etapa de preparación de la tierra, siembra, atenciones culturales requeridas por la planta en su proceso evolutivo, cosecha y finalmente la transportación a la central.

En el subsistema Industrial se considera la etapa de obtención de bagazo por lo que se parte del inventario para obtener el azúcar haciendo una asignación de carga ambiental entre el jugo y el bagazo, así como la obtención de etanol a partir del mismo.

A partir de los balances de masa fue posible realizar el inventario para el proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de la caña de azúcar. En la Tabla 2.1 se muestra el resultado de este inventario para lograr 1 MJ de energía tanto para la etapa agrícola como la industrial.

Tabla 2.1. Inventario de Ciclo de vida para la producción de etanol lignocelulósico: 1 MJ

Entradas		
FASE AGRÍCOLA	Unidad	Cantidad
Entradas de la naturaleza		
H ₂ O superficial	m ³	0,000963079
Terreno	m ²	0,02093
Semilla de caña	kg	0,00041561
Fertilizantes		
Urea, como N	kg	0,00046644
Vinazas , N	kg	0,00073255
Cenizas	kg	2,2425*10 ⁻⁰⁸
Cachaza	kg	3,3787*10 ⁻⁰⁸
SPT, como P ₂ O ₅	kg	0,000128122
Cloruro de potasio, como K ₂ O	kg	0,0004186
Pesticidas		
Diuron	kg	1,23637*10 ⁻⁰⁶
Gesapox 80	kg	1,49201*10 ⁻⁰⁶
Glyposate	kg	3,03485*10 ⁻⁰⁶
Sal de Amina 72Diuron	kg	7,8039*10 ⁻⁰⁷
Asulfox	kg	7,8039*10 ⁻⁰⁶
Amigan	kg	5,2026*10 ⁻⁰⁷
Merlin 75	kg	3,6777*10 ⁻⁰⁸
Gramoxone	kg	1,04202*10 ⁻⁰⁷
ACTIVIDADES AGRÍCOLAS		
Prep suelo (arado)	m ²	0,02093
Aplicación de fertilizante	m ²	0,02093
Siembra	m ²	0,02093
Transporte	kg.km	2,99
ETAPA INDUSTRIAL		
Sosa cáustica	kg	0,005155895
Ácido sulfúrico	kg	0,001495492
Flujos de energía		
Vapor	kJ	0,624895466
Energía eléctrica	kJ	0,003920743
Transporte		
Importación	kg.km	0,099769463
Distribución	kg.km	0,000845981
SALIDAS		
ETAPA AGRÍCOLA		
Emisiones al aire		
N ₂ O	kg	3,7076*10 ⁻⁰⁷
Vertimientos al agua		
P, agua sup	kg	1,02258*10 ⁻¹⁰
Nitrógeno total	kg	2,55645*10 ⁻⁰⁸
Fosfatos	kg	3,30395*10 ⁻⁰⁶

Pesticidas	kg	2,05E-08
ETAPA INDUSTRIAL		
Vertimientos al agua		
P, agua sup	kg	1,41408E-07
Nitrógeno total	kg	3,55661E-07
DQO	kg	3,98512E-05
DBO	kg	6,42762E-05
Sólidos	kg	1,58548E-05
Emisiones al aire		
CO ₂ biogénico	kg	0,030903856

2.3. Impacto Ambiental

El concepto de biocombustibles, bioetanol en particular, ha sido de gran interés en el mundo actual, la razón se enfoca hacia la reducción del uso de recursos fósiles. Sin embargo la viabilidad de bioetanol en cuanto al impacto ambiental ha sido un desafío. El principal resultado de estos estudios es la reducción en la extracción de recursos fósiles hasta un cierto punto, pero es necesario garantizar que los procesos de producción sean ambientalmente compatibles.

Las tecnologías actuales son capaces de convertir carbohidratos de los cultivos por ejemplo la caña de azúcar a etanol. Sin embargo el requerimiento de uso de tierra para este tipo de aplicación compite con otros usos, entre los que se encuentran la garantía de alimentos para la sociedad. Esta razón se ha convertido en la fuerza impulsora principal del desarrollo y la implementación de tecnologías avanzadas para producir etanol de celulosas de los co-productos agrícolas por ejemplo el bagazo de la caña.

Para evaluar objetivamente el impacto ambiental de estas producciones es necesario un enfoque integral, evaluando todo el ciclo de vida de estos productos. Varios estudios de ACV enfocados a estas tecnologías avanzadas se han realizado demostrándose una reducción en el uso de combustibles fósiles y las emisiones de CO₂. Sin embargo, otros impactos ambientales incluyendo el requerimiento de tierra causado por la producción de bioetanol recibieron menos atención. La viabilidad económica no ha sido de interés en los estudios de ACV. Un estudio completo que considere varias categorías de impacto es necesario.

Para el análisis ambiental se analizará el ciclo de vida de la producción de alcohol a partir de bagazo de caña de azúcar.

2.3.1. Ventajas de utilizar SimaPro 7.3

Utilizar el software SimaPro tiene varias ventajas dentro de las que se encuentran:

- Está basado en modelos cinéticamente probados para la evaluación de impactos.
- Es fácil utilizar y también menos costoso.
- Ofrece muchos datos inventarios.
- Facilita la evaluación de incertidumbre.

A partir de los resultados del inventario del Ciclo de Vida, se realiza la evaluación de los impactos del proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de la caña de azúcar mediante el software SimaPro 7.3, utilizando la metodología del *Recipe End point*. Como primer resultado se obtiene el árbol del proceso. En la Figura 2.3 se representa una sección de dicho árbol.

Se observa que del impacto del proceso en la etapa agrícola (0,448 Puntos), la mayor contribución corresponde al uso de las combinadas para la cosecha de la caña (0,447 Puntos) debido fundamentalmente al uso de combustibles en las labores agrícolas.

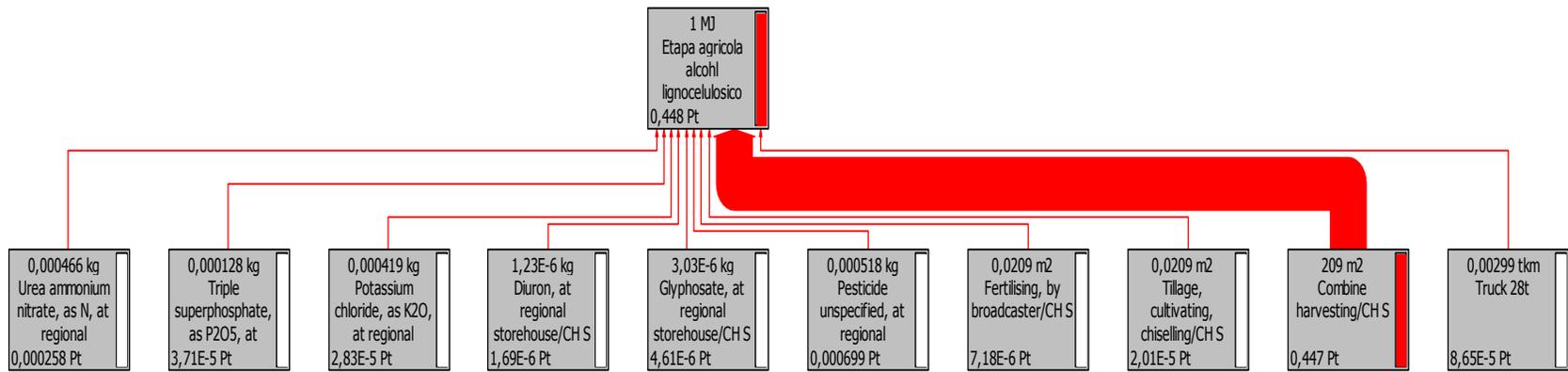


Figura 2.3. Árbol de la etapa agrícola del proceso en estudio.

En la Figura 2.4 se muestran los resultados de caracterización para la etapa agrícola donde se puede observar que predomina el impacto por el uso de combustibles fósiles (diesel) en las combinadas, así como el uso de pesticidas aunque en menor medida.

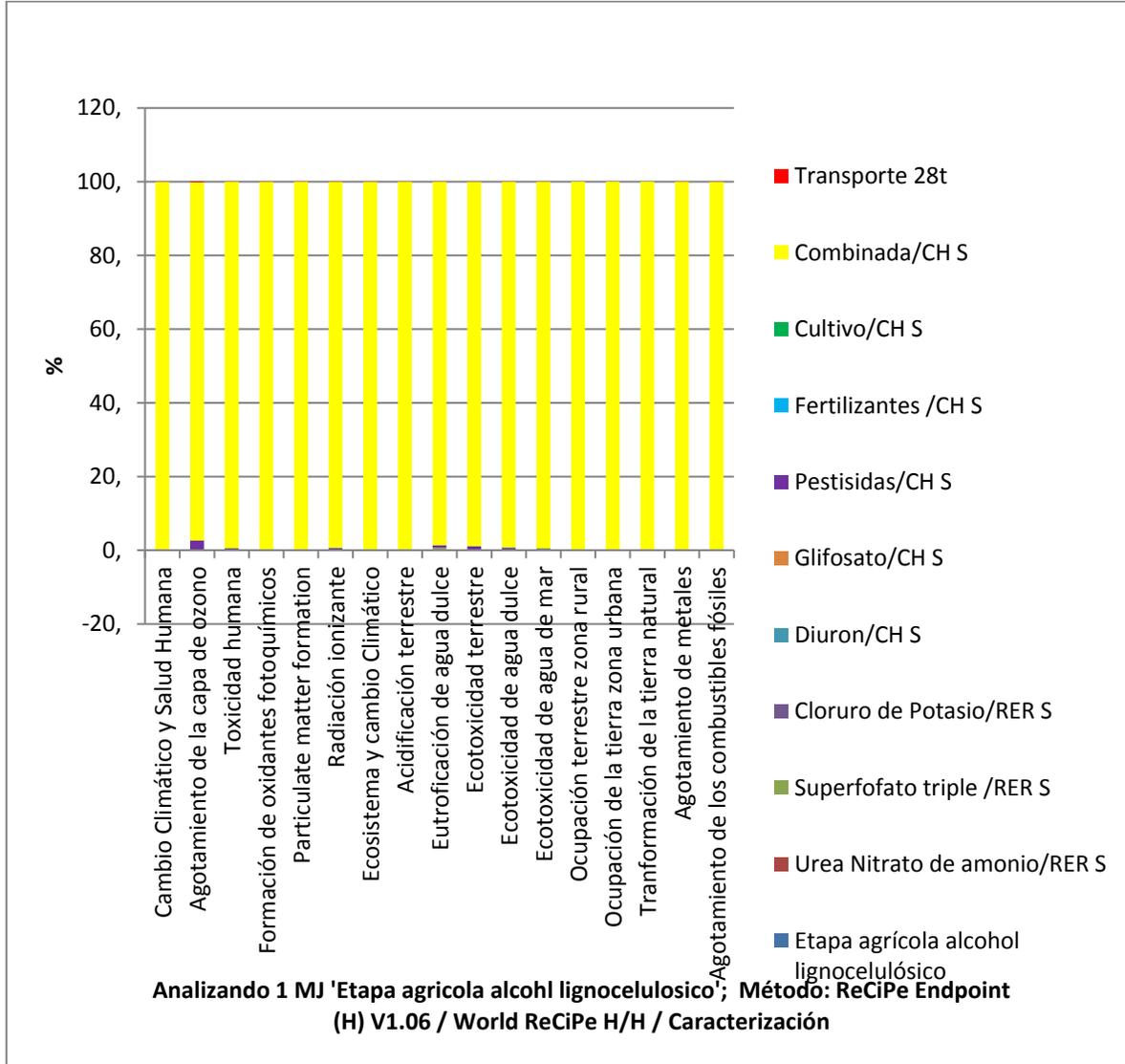


Figura 2.4. Resultados de la Caracterización en la etapa agrícola.

Estos resultados pueden ser vistos además al analizar la gráfica de ponderación de los datos mostrada en la Figura 2.5 donde se aprecia que el uso de la combinada afecta cada una de las 18 Categorías de Impacto pero sobre todo en el uso de los combustibles fósiles.

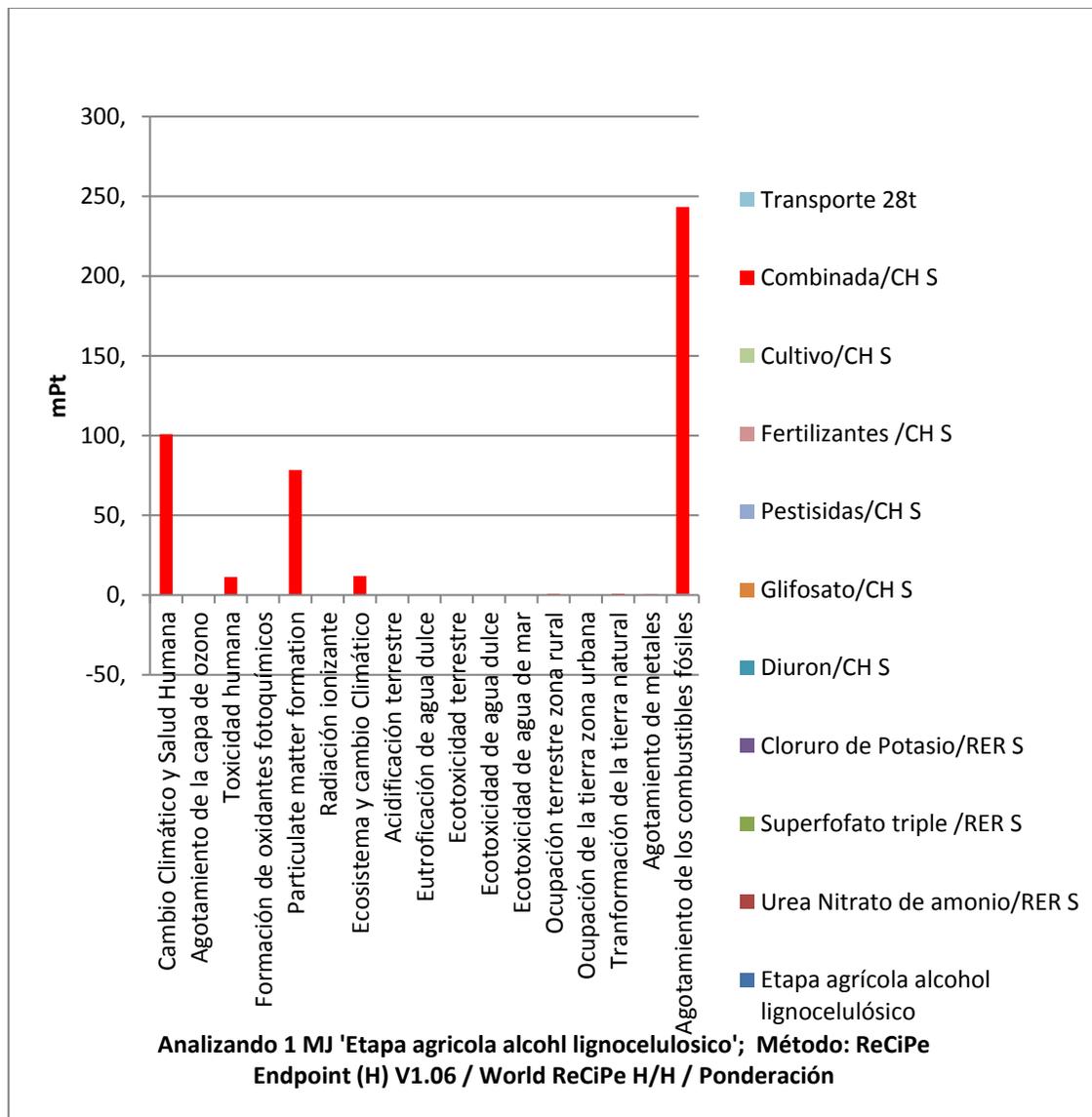


Figura 2.5. Ponderación etapa agrícola.

En la Figura 2.6 se observa la red de proceso de la etapa industrial donde el mayor impacto está dado por el uso de la transportación (0,00291 Pt) además del uso del hidróxido de sodio (0,000702 Pt)

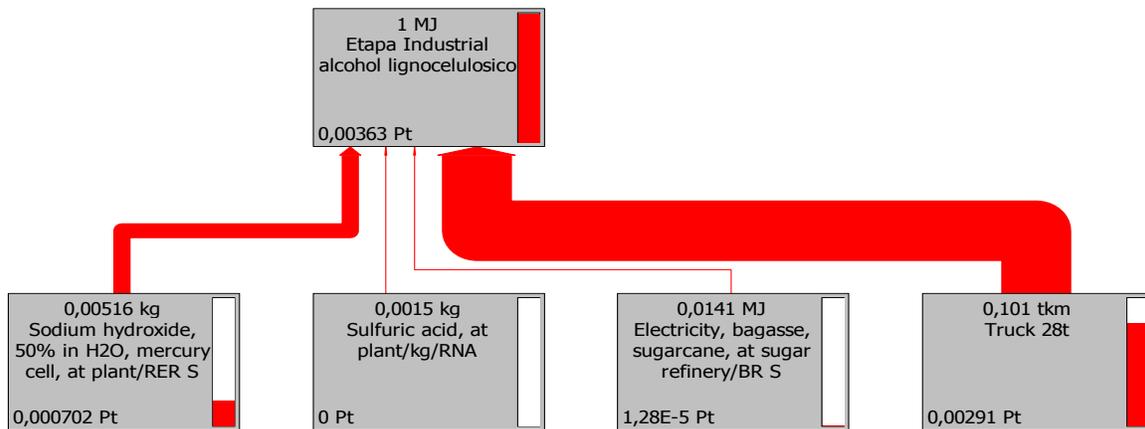


Figura 2.6. Red del proceso etapa industrial.

En la Figura 2.7 se muestran los resultados de caracterización para la etapa industrial donde se puede observar que predomina el impacto por el uso de la transportación, además tiene un gran impacto el uso del hidróxido de sodio en la primera etapa de pre-tratamiento del proceso de obtención de etanol a partir del bagazo, así como el uso de la electricidad principalmente en la ocupación terrestre de la zona rural.

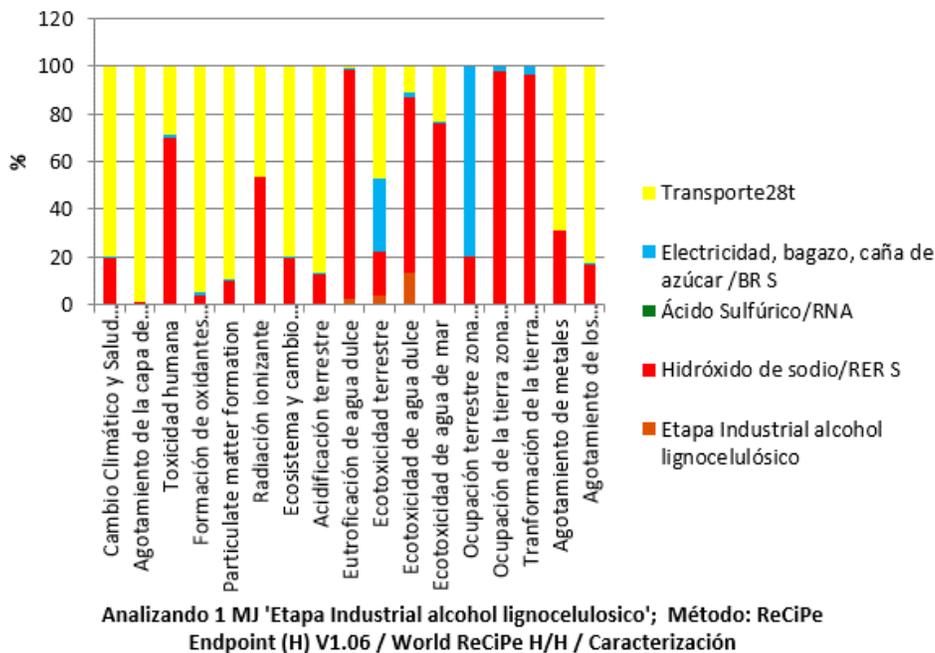


Figura 2.7. Caracterización del proceso etapa industrial.

Al analizar los datos de la ponderación en la etapa industrial mostrada en la Figura 2.8 podemos observar que el uso de la transportación y del hidróxido de sodio afectan principalmente dos categorías, el agotamiento de los combustibles fósiles y el cambio climático aunque este último en menor medida.

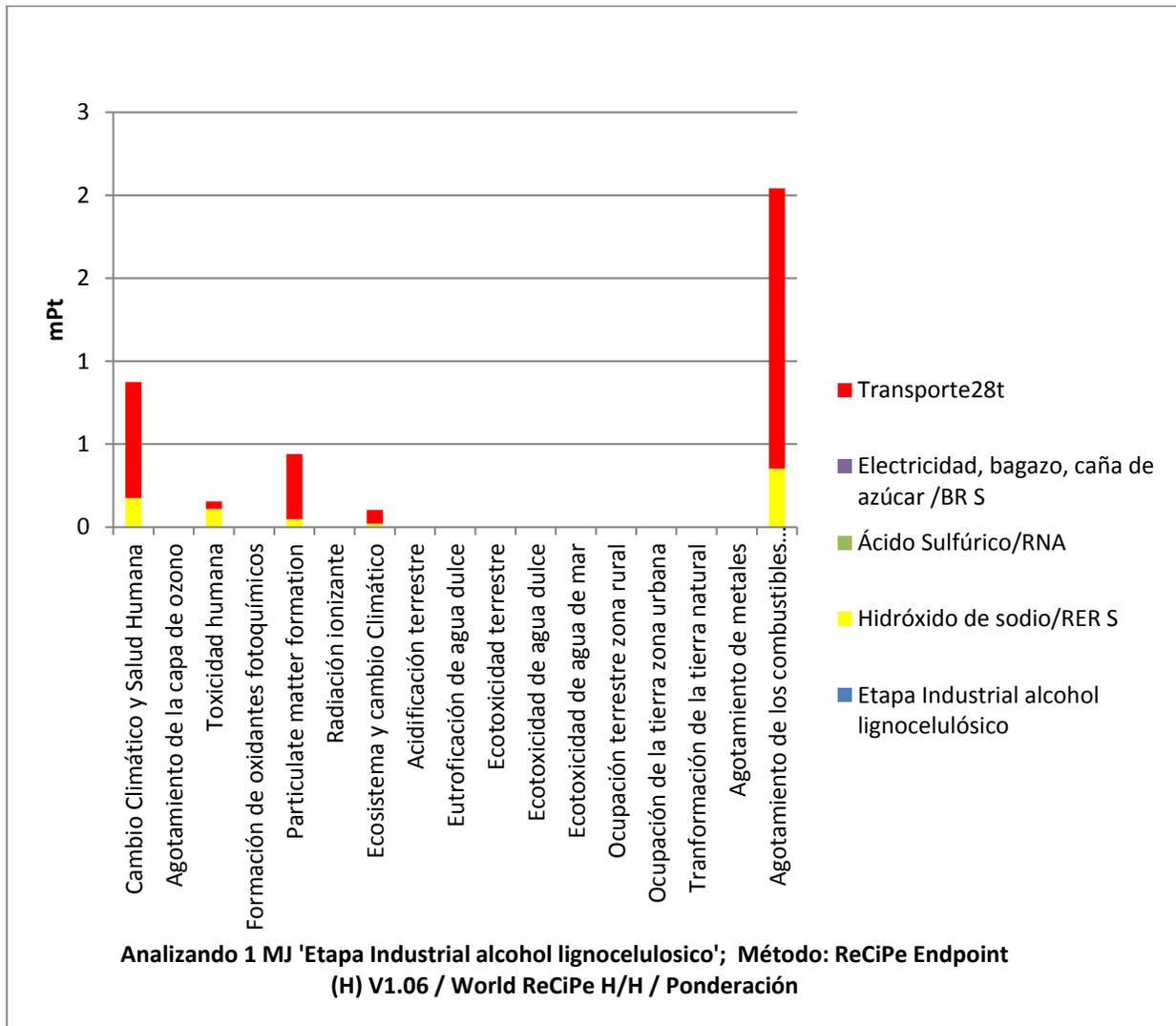
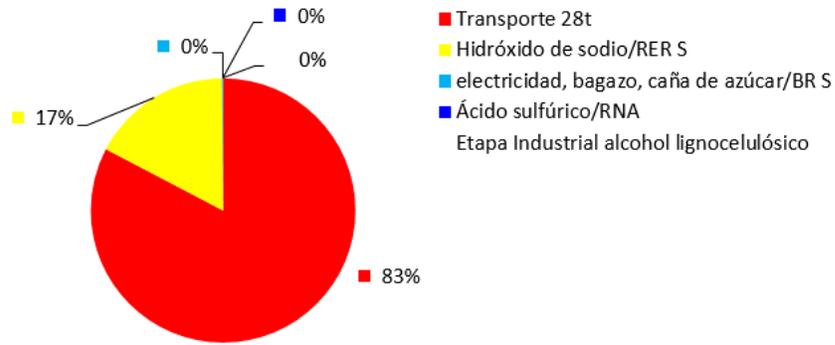


Figura 2.8. Ponderación etapa industrial.

Al ser la categoría combustibles fósiles la más impactada, es necesario analizar cuáles son los procesos que más contribuyen. Todo lo dicho anteriormente en cuanto a que el uso de la transportación y del hidróxido de sodio son los que más afectan lo podemos ver a través de la Figura 2.9 donde el transporte representa un 83 % del total y el hidróxido de sodio el 17 %, demostrándose que el proceso principal no genera impactos considerables, sin embargo los procesos auxiliares sí.



Analizando 1 MJ 'Etapa Industrial alcohol lignocelulósico'; Método: ReCiPe Endpoint (H) V1.06 / World ReCiPe H/H / Caracterización

Figura 2.9. Gráfico de pastel. Caracterización etapa industrial.

Al establecer una comparación de las etapas agrícola e industrial se observa que la etapa agrícola tiene un mayor impacto afectando cada una de las 18 categorías analizadas. Esto lo podemos ver a partir de la Figura 2.10.

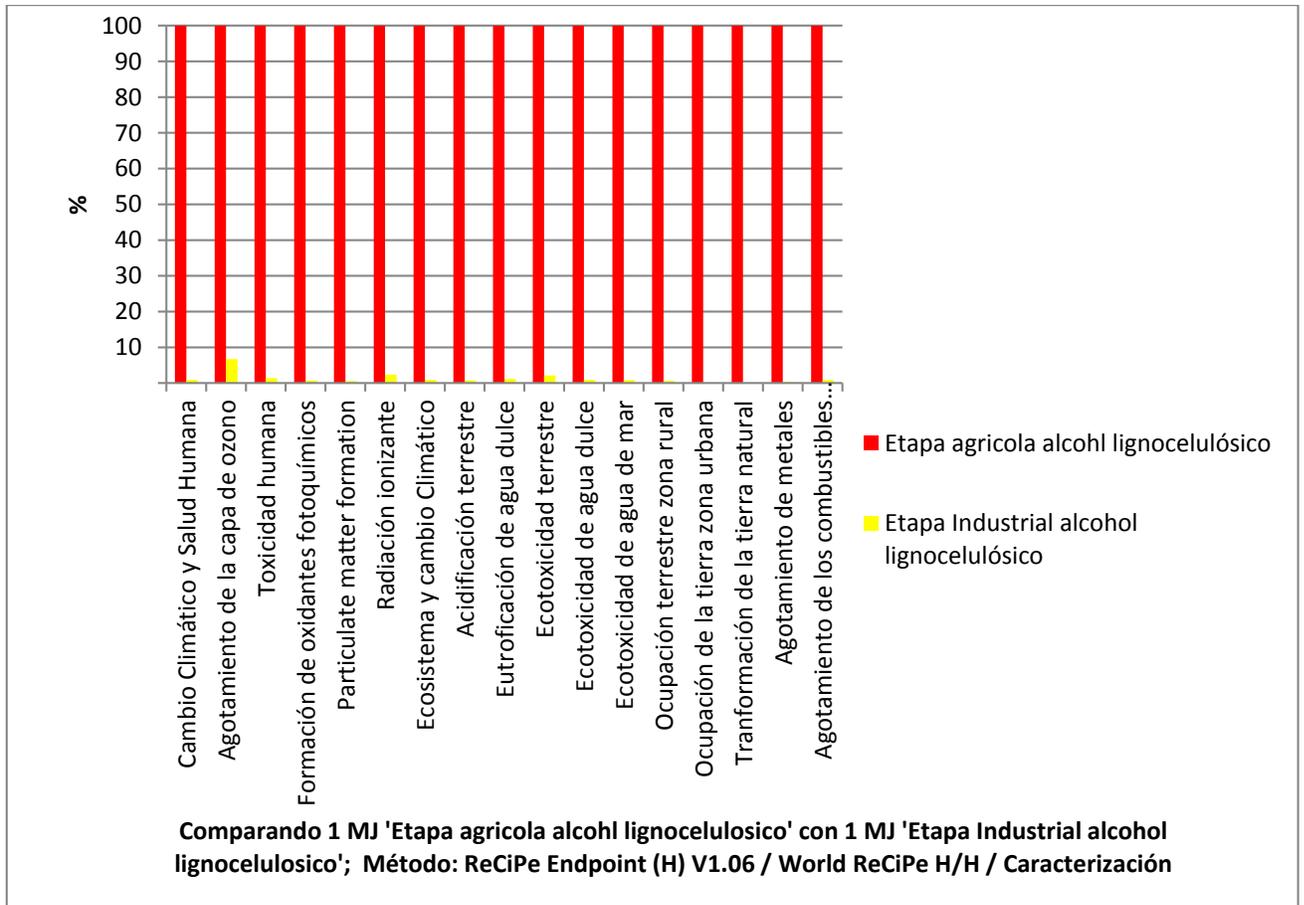


Figura 2.10. Resultados de la caracterización comparando las etapas agrícola e industrial.

Al analizar el gráfico de ponderación de las etapas agrícola e industrial podemos ver que predomina el impacto de la etapa agrícola sobre todo en la categoría del agotamiento de los combustibles fósiles. (Figura 2.11).

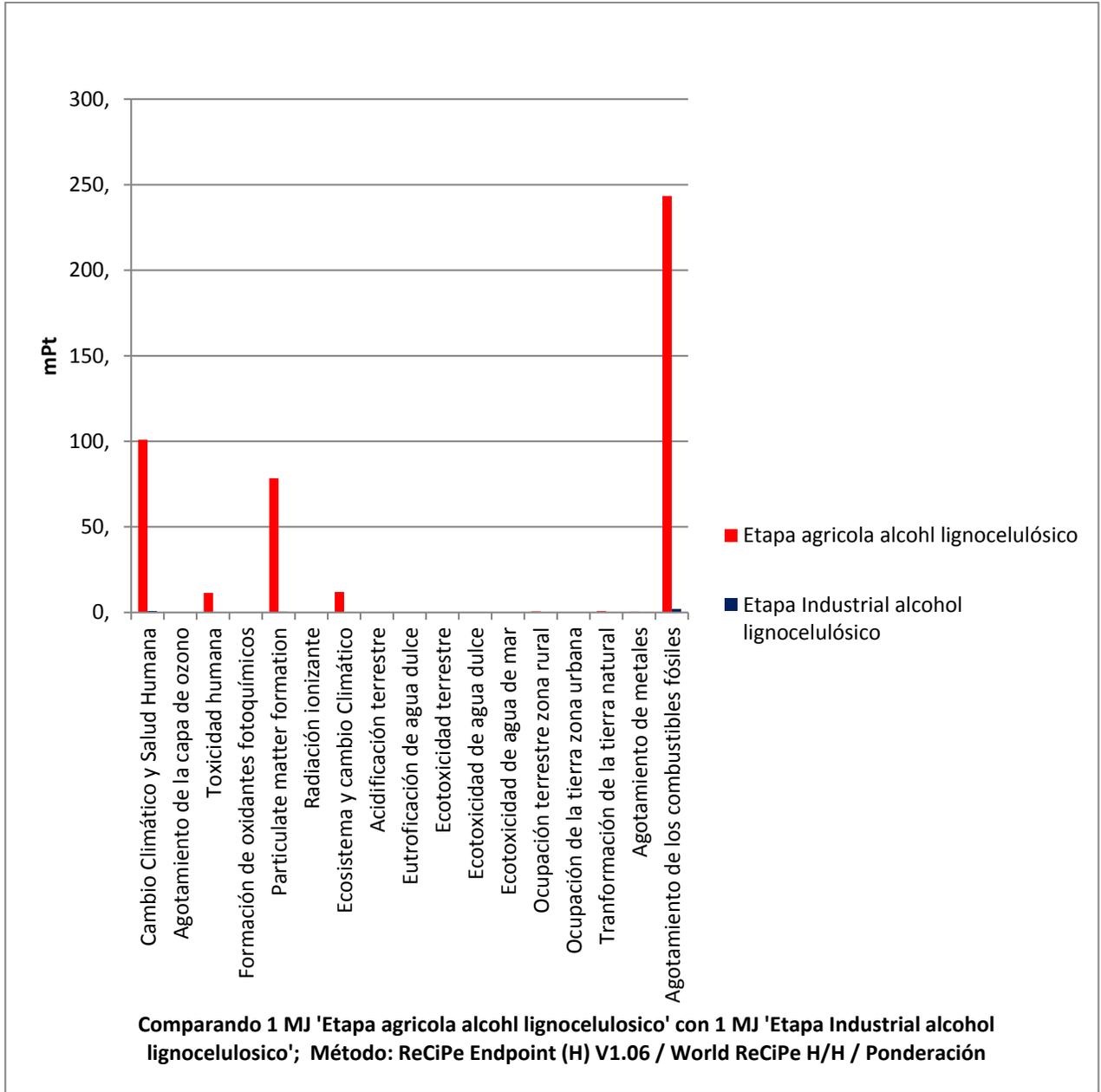


Figura 2.11. Resultados de la ponderación comparando las etapas agrícola e industrial.

Tabla 2.2. Ponderación comparando las etapas agrícola e industrial.

Categoría	Etapa agrícola m Pt	Etapa industrial m Pt
Cambio Climático y Salud Humana	100,8974	0,8744
Agotamiento de la capa de ozono	0,0271	0,0018
Toxicidad humana	11,3887	0,1547
Formación de oxidantes fotoquímicos	0,0393	0,0003
Formación de PM	78,4596	0,4401
Radiación ionizante	0,1183	0,0028
Ecosistema y cambio Climático	11,968	0,1037
Acidificación terrestre	0,0708	0,0005
Eutroficación de agua dulce	0,0103	0,0001
Ecotoxicidad terrestre	0,017	0,0004
Ecotoxicidad de agua dulce	0,0015	1,39*10 ⁻⁰⁵
Ecotoxicidad de agua de mar	5,22E-06	4,34*10 ⁻⁰⁸
Ocupación terrestre zona rural	0,601	0,0038
Ocupación de la tierra zona urbana	0,2905	0,0003
Tranformación de la tierra natural	0,7266	0,0005
Agotamiento de metales	0,4018	0,0014
Agotamiento de los combustibles fósiles	243,3591	2,0422

2.3.2. Análisis de los resultados

Con los resultados obtenidos se puede concluir que este producto tiene impactos en ambas etapas asociadas al agotamiento de combustibles fósiles por lo que para lograr un producto sustentable será necesario un análisis detallado de la posibilidad de disminuir el consumo de combustible tanto en las labores agrícolas como en la transportación de las materias primas y el producto.

Capítulo III



Capítulo 3: Análisis exergético del proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de la caña de azúcar

3.1. Análisis exergético

La determinación de las cantidades de energía disponible y no disponible en todas las corrientes de un sistema se denomina análisis exergético, de disponibilidad o entrópico. (De los Ríos, 1984), (Riera, 1998), (Maturell, 2007).

3.1.1. Balances de exergía

El balance de exergía (Figura 3.1) es similar al balance de energía pero con la diferencia fundamental que, mientras los balances de energía se basan en la ley de conservación de la energía los de exergía pueden estar basados en los postulados de la ley de la degradación de la energía. La degradación de la energía es equivalente a la exergía que se pierde en todo el proceso real irreversible.

En los balances de exergía, las cantidades de exergía que entran al sistema o dispositivo deben convertirse en lo posible en exergía de las corrientes de salida. Las diferencias son debidas a las discrepancias de los procesos termodinámicos con los reversibles y constituyen las irreversibilidades. La disminución de exergía por causas internas recibe el nombre de destrucción de exergía. La exergía de las corrientes de energía que salen del sistema y que no tiene una utilización para los fines concebidos para el sistema, recibe el nombre de pérdidas de exergía.

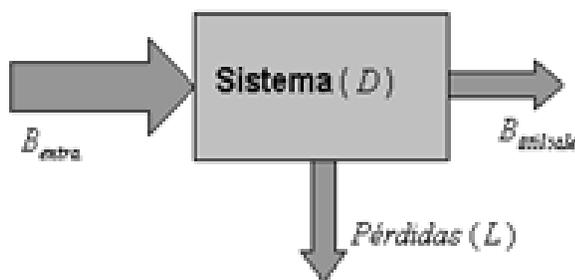


Figura 3.1. Balance de exergía.

$$B_{entra} - B_{\text{útil sale}} - L = D > 0 \quad (3.1)$$

3.2. Sacarificación y Fermentación Simultánea. (SFS)

Numerosos investigadores han encarado el estudio de esta alternativa (Numan, 1987) (Dale, 1989), (Holzapple, 1988),(Grethlein, 1993), (Derrickson, 1992).

Entre las ventajas citadas con respecto al sistema secuencial tradicional de hidrólisis y fermentación posterior, se incluyen la mejora del rendimiento debido a la remoción de la lignina que inhibe al complejo enzimático de celulosa, el hecho de la concentración alcohólica, debido a la limitante dada por la concentración inicial de celulosa nunca alcanza un nivel inhibitorio para las celulosas ni para las levaduras, la volatilidad del etanol como producto, que permite una recuperación más simple que la de la glucosa en el método tradicional, el incremento de las levaduras, etc.

Sin embargo aún resta resolver algunas desventajas técnicas del método. La fundamental está referida a la necesidad de trabajar a una temperatura de compromiso intermedia entre las óptimas para la sacarificación (50 °C) y para la fermentación (30 °C), respectivamente.

3.3. Balances de materiales por etapas empleando método organosolv con sacarificación y fermentación simultánea

Los cálculos de exergías se realizan a partir de conocer cada una de las entradas y salidas del proceso, así como las cantidades por etapas y para eso es necesario realizar los balances de masa reportados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Balances de masa para el proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de caña con la variante de sacarificación y fermentación simultánea.

Etapas	Ecuaciones	Leyenda
Pre-tratamiento 1	BT: $BI+Ag+Ac=SP1+LX$	BI: Bagazo inicial Ag: Agua inicial Ac: Solución de ácido sulfúrico al 1 % SP1: Sólido pre tratado 1 LX: Líquido rico en xilosa
	BP: $X_{gluBI} * BI = X_{gluSP1} * SP1 + X_{gluLX} * LX$ $X_{xilBI} * BI = X_{xilSP1} * SP1 + X_{xilLX} * LX$ $X_{ligBI} * BI = X_{ligSP1} * SP1 + X_{ligLX} * LX$	
Pre-tratamiento 2	BT: $SP1+NaOH+Ag+C_2H_5OH=SP2+LL$	SP2: Sólido pre tratado 2 LL: Líquido rico en lignina
	BP: $X_{gluSP1} * SP1 = X_{gluSP2} * SP2 + X_{gluLL} * LL$ $X_{xilSP1} * SP1 = X_{xilSP2} * SP2 + X_{xilLL} * LL$ $X_{ligSP1} * SP1 = X_{ligSP2} * SP2 + X_{ligLL} * LL$	
Hidrólisis enzimática y	BT: $SP2+enzimas=SR+F_1+CO_2$	
	BP:	

Fermentación Simultánea	$X_{gluSP2} * SP2 = X_{gluSR} * SR$ $X_{xilSP2} * SP2 = X_{xilSR} * SR$ $X_{ligSP2} * SP2 = X_{ligSR} * SR$	SR: Sólido residual después de la hidrólisis
Destilación	BT: $F_1 = D + W$	F ₁ : Fermento 1
	BP: $X_{alcF1} * F_1 = X_{alcD} * D + X_{alcW} * W$	D: Destilado (bioetanol) W: Residuo

3.4. Cálculo de las exergías por etapas

En este epígrafe se determinan las pérdidas de exergía y la eficiencia de cada una de las etapas involucradas en el proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de la caña de azúcar con la variante de Hidrólisis Enzimática y Fermentación Simultánea, en las Tablas desde la 3.2 hasta la 3.17 se pueden encontrar los datos necesarios para los cálculos correspondientes y los resultados de los mismos, presentándose además los diagramas de cada una de las etapas en las Figuras desde la 3.2 hasta la 3.5.

3.4.1. Exergía del pre tratamiento 1

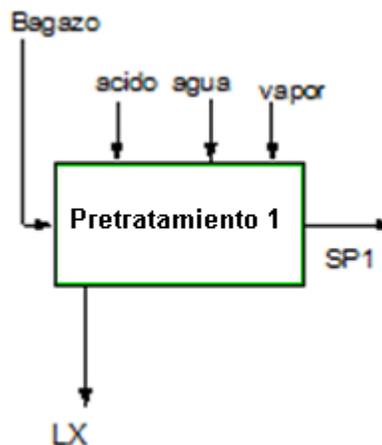


Figura 3.2. Diagrama del pre-tratamiento 1.

Tabla 3.2. Datos de las corrientes de entrada y salida del pre tratamiento 1.

Datos	Flujo (kg/d)	Cp (kJ/kg °C)	Comp. en bagazo	Comp. en el líquido rico en xilosa	Comp. en el sólido pretratado 1
Bagazo	315627,497	1,463			
Ácido sulfúrico	3320,6	4,0546			
Pérdida de energía	1663644,1	3,67640321			

Agua de entrada al proceso	1344696	4,195			
Agua de salida del proceso	1344696,01	4,195			
Líquido rico en xilosa	86660,55	2,74087824			
Sólido pre tratado 1	228966,95	1,94060052			
Glucosa		2,34707	0,49	0,1149	0,636
Xilosa		2,81	0,31	0,878	0,097
Lignina		0,659	0,19	0,0061	0,266
Mezcla entrada	1663644,1				
Mezcla salida	1660323,51				

Tabla 3.3. Propiedades físicas y químicas de las corrientes.

Datos	λ del vapor a 120 ° C kJ/kg	S° del vapor a 120 ° C kJ/kg	Flujo en composición del total de entrada	E°
Bagazo			0,18972056	
Ácido sulfúrico			0,00199598	1,107
Agua de entrada			0,80828346	0,05
Agua de salida				0,05
Vapor entada	2706,3	7,1296		
Glucosa				15,504
Xilosa				12,224
Lignina				28,161

Tabla 3.4. Condiciones de trabajo para el pre-tratamiento 1

Otros	
ΔT_m para vapor	90
T referencia	298
T de entrada	303
T de salida	353
R	8,31
P pre tratamiento 1	1,95
Cpm	3,67640321
M vapor	203399,617
Cpm líquido rico en xilosa	2,74087824
Cpm sólido pre tratado 1	1,94060052
T superior de la mezcla	393

Cálculo de las exergías para la entrada al Pre tratamiento 1

$$E_T \text{ entrada} = E_{q_{\text{Bag}}} + E_{f_{\text{Bag}}} + E_{q_{\text{Agua}}} + E_{f_{\text{Agua}}} + E_{q_{\text{Ácido}}} + E_{f_{\text{Ácido}}} + E_{f_{\text{Pérdidas}}}$$

$$E_T \text{ entrada} = 49270218,6 \text{ kJ}$$

Bagazo

$$E_{q_{\text{Bag}}} = \sum X_i * E^\circ_{X_i} + R * T_0 * \sum X_i * \ln(X_i)$$

$$E_{q_{\text{Bag}}} = 5281,85 \text{ kJ}$$

$$E_{f_{\text{Bag}}} = \Delta H_{\text{Bag}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Bag}})$$

$$E_{f_{\text{Bag}}} = 20809,08 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Bag}} = m_{\text{Bag}} * C_{p_{\text{Bag}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Bag}} = 2308815,141 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Bag}} = m_{\text{Bag}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{\text{Bag}}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Bag}} = 7677,87 \text{ kJ}$$

Agua en la entrada

$$E_{q_{\text{Agua entrada}}} = m_{\text{Agua entrada}} * E^\circ_{\text{Agua}}$$

$$E_{q_{\text{Agua entrada}}} = 67,2348 \text{ kJ}$$

$$E_{f_{\text{Agua entrada}}} = \Delta H_{\text{Agua entrada}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Agua entrada}})$$

$$E_{f_{\text{Agua entrada}}} = 235659,0343 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Agua entrada}} = m_{\text{Agua entrada}} * C_{p_{\text{Agua entrada}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Agua entrada}} = 28204998,6 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Agua entrada}} = m_{\text{Agua entrada}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{\text{Agua entrada}}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Agua entrada}} = 93856,84418 \text{ kJ}$$

Ácido Sulfúrico

$$E_{q_{\text{Ácido}}} = m_{\text{Ácido}} * E^\circ_{\text{Ácido}}$$

$$E_{q_{\text{Ácido}}} = 3,6759 \text{ kJ}$$

$$E_{f_{\text{Ácido}}} = \Delta H_{\text{Ácido}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Ácido}})$$

$$E_{f_{\text{Ácido}}} = 2212,313 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Ácido}} = m_{\text{Ácido}} * C_{p_{\text{Ácido}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Ácido}} = 67318,5238 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Ácido}} = m_{\text{Ácido}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{Cp_{\text{Ácido}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Ácido}} = 218,477 \text{ kJ}$$

Pérdidas de Energía en el Pretratamiento 1

$$Ef_{\text{Pérdidas}} = \Delta H_{\text{Pérdidas}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Pérdidas}})$$

$$Ef_{\text{Pérdidas}} = 49006185,43 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Pérdidas}} = m_{\text{mezcla entrada}} * Cp_{\text{mezcla entrada}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Pérdidas}} = 244649059,8 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Pérdidas}} = m_{\text{mezcla entrada}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{Cp_{\text{mezcla entrada}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Pérdidas}} = 656519,71 \text{ kJ}$$

Cálculo de las exergías para la salida del Pre tratamiento 1

$$E_T \text{ salida} = Eq_{\text{Agua}} + Ef_{\text{Agua}} + Eq_{\text{SP}_1} + Ef_{\text{SP}_1} + Eq_{\text{LX}} + Ef_{\text{LX}}$$

$$E_T \text{ salida} = 28630022,5 \text{ kJ}$$

Agua en la salida

$$Eq_{\text{Agua salida}} = m_{\text{Agua salida}} * E^\circ_{\text{Agua}}$$

$$Eq_{\text{Agua salida}} = 67,2348 \text{ kJ}$$

$$Ef_{\text{Agua salida}} = \Delta H_{\text{Agua salida}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Agua salida}})$$

$$Ef_{\text{Agua salida}} = 25534951,09 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Agua salida}} = m_{\text{Agua salida}} * Cp_{\text{Agua salida}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Agua salida}} = 310254986,9 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Agua salida}} = m_{\text{Agua salida}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{Cp_{\text{Agua salida}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Agua salida}} = 955436,3618 \text{ kJ}$$

Sólido Pre-tratado 1

$$Eq_{\text{SP}_1} = \sum X_i * E^\circ_{X_i} + R * T_0 * \sum X_i * \ln(X_i)$$

$$Eq_{SP_1} = 4243,89 \text{ kJ}$$

$$Ef_{SP_1} = \Delta H_{SP_1} - (T_0 * \Delta S_{SP_1})$$

$$Ef_{SP_1} = 2012874,65 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{SP_1} = m_{SP_1} * Cp_{SP_1} * \Delta T$$

$$\Delta H_{SP_1} = 24438336,02 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{SP_1} = m_{SP_1} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{Cp_{SP_1} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{SP_1} = 75253,226 \text{ kJ}$$

Líquido rico en xilosa

$$Eq_{LX} = \sum X_i * E^\circ_{Xi} + R * T_0 * \sum X_i * \ln(X_i)$$

$$Eq_{LX} = 1099,24 \text{ kJ}$$

$$Ef_{LX} = \Delta H_{LX} - (T_0 * \Delta S_{LX})$$

$$Ef_{LX} = 1076786,336 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{LX} = m_{LX} * Cp_{LX} * \Delta T$$

$$\Delta H_{LX} = 13063930,88 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{LX} = m_{LX} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{Cp_{LX} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{LX} = 40225,3172 \text{ kJ}$$

Tabla 3.5. Resultados de los cálculos de exergías.

Datos	ΔT en ° C	ΔH en kJ	ΔS en kJ	Exergía física en kJ	Exergía química en kJ
Bagazo	5	2308815,141	7677,872667	20809,08582	5281,85065
Ácido sulfúrico	5	67318,5238	218,4772164	2212,313316	3,6759042
Pérdida de energía	40	244649059,8	656519,7126	49006185,43	
Agua de entrada	5	28204998,6	93856,84418	235659,0343	67,2348
Agua de salida	55	310254986,9	955436,3618	25534951,09	67,2348005
Líquido rico en xilosa	55	13063930,88	40225,31727	1076786,336	1099,27938
Sólido pre tratado 1	55	24438336,02	75253,22608	2012874,651	4243,89154

Tabla 3.6. Pérdidas y eficiencia de la etapa de Pre tratamiento 1.

Resultados	kJ	kW-h
Exergía total de entrada	49270218,6	13686.17
Exergía total de salida	28630022,5	7952.784
Pérdidas	20640196,14	
Eficiencia	0,581081702	

3.4.2. Exergía del pre-tratamiento 2

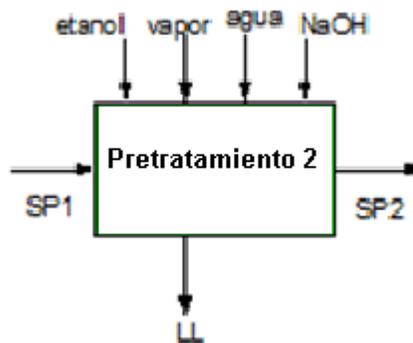


Figura 3.3. Diagrama del pre tratamiento 2.

Tabla 3.7. Datos de las corrientes de entrada y salida del pre-tratamiento 2.

Datos	Fujo kg/d	Cp kJ/kg °C	Composición en el sólido pretratado 1	Composición en el sólido pretratado 2	Composición en el líquido rico en lignina
sólido pre tratado 1	228966,95	1,94060052			
NaOH	12032,2	4,0546			
Pérdida de energía	2023393,15	3,76898705			
Agua de entrada al proceso	1142171,86	4,195			
Agua de salida del proceso	1142171,86	4,195			
Etanol	640222,14	3,6575			
sólido pre tratado 2	197340,67	2,00622838			
Líquido rico en lignina	43303,6	1,65245103			
Glucosa		2,34707	0,636	0,704	0,3275
Xilosa		2,81	0,097	0,0739	0,2049
Lignina		0,659	0,266	0,2219	0,4674
Mezcla entrada	2023393,15				
Mezcla salida	1382816,13				

Tabla 3.8. Propiedades físicas y químicas de las corrientes.

Datos	λ del vapor a 185 ° C kJ/kg	S° del vapor a 185°C kJ/kg	Flujo en composición del total de entrada	E°
sólido pre tratado 1			0,11315989	
NaOH			0,00594655	1948,375
Agua de entrada			0,56448341	0,05
Agua de salida				0,05
Etanol			0,31641015	27,154
Vapor entrada	2790	6,4693		
Glucosa				15,504
Xilosa				12,224
Lignina				28,161

Tabla 3.9. Condiciones de trabajo para el pre tratamiento 2.

Otros	
ΔT_m para vapor	105
T referencia	298
T entrada al proceso	353
T salida del proceso	353
R	8,31
P atm pre tratamiento 1	9
Cpm	3,76898705
M vapor	287005,366
Cpm líquido rico lignina	1,65245103
Cpm sólido pre tratado 1	1,94060052
Cpm sólido pre tratado 2	2,00622838
Temperatura superior de la mezcla	458

Cálculo de las exergías para la entrada al Pretratamiento 2

$$E_T \text{ entrada} = Eq_{SP_1} + Ef_{SP_1} + Eq_{Agua} + Ef_{Agua} + Eq_{Etanol} + Ef_{Etanol} + Eq_{NaOH} + Ef_{NaOH} + Ef_{Pérdidas}$$

$$E_T \text{ entrada} = 234761118 \text{ kJ}$$

Sólido Pre-tratado 1

$$Eq_{SP_1} = \sum X_i * E^\circ_{X_i} + R * T_0 * \sum X_i * \ln(X_i)$$

$$Eq_{SP_1} = 4243,89 \text{ kJ}$$

$$Ef_{SP_1} = \Delta H_{SP_1} - (T_0 * \Delta S_{SP_1})$$

$$E_{f_{SP_1}} = 2012874,65 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{SP_1} = m_{SP_1} * C_{p_{SP_1}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{SP_1} = 24438336,02 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{SP_1} = m_{SP_1} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{SP_1}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{SP_1} = 75253,226 \text{ kJ}$$

Agua en la entrada

$$Eq_{\text{Agua entrada}} = m_{\text{Agua entrada}} * E^{\circ}_{\text{Agua}}$$

$$Eq_{\text{Agua entrada}} = 57,1085 \text{ kJ}$$

$$E_{f_{\text{Agua entrada}}} = \Delta H_{\text{Agua entrada}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Agua entrada}})$$

$$E_{f_{\text{Agua entrada}}} = 204202,96 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Agua entrada}} = m_{\text{Agua entrada}} * C_{p_{\text{Agua entrada}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Agua entrada}} = 23957055 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Agua entrada}} = m_{\text{Agua entrada}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{\text{Agua entrada}}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Agua entrada}} = 79707,556 \text{ kJ}$$

Etanol

$$Eq_{\text{Etanol}} = m_{\text{Etanol}} * E^{\circ}_{\text{Etanol}}$$

$$Eq_{\text{Etanol}} = 17384,59 \text{ kJ}$$

$$E_{f_{\text{Etanol}}} = \Delta H_{\text{Etanol}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Etanol}})$$

$$E_{f_{\text{Etanol}}} = 102578,13 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Etanol}} = m_{\text{Etanol}} * C_{p_{\text{Etanol}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Etanol}} = 11708062 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Etanol}} = m_{\text{Etanol}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{\text{Etanol}}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Etanol}} = 38944,578 \text{ kJ}$$

NaOH

$$Eq_{\text{NaOH}} = m_{\text{NaOH}} * E^{\circ}_{\text{NaOH}}$$

$$Eq_{\text{NaOH}} = 23443238 \text{ kJ}$$

$$E_{f_{\text{NaOH}}} = \Delta H_{\text{NaOH}} - (T_0 * \Delta S_{\text{NaOH}})$$

$$E_{f_{\text{NaOH}}} = 7464,93 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{NaOH}} = m_{\text{NaOH}} * C_{p_{\text{NaOH}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{NaOH}} = 243928,79 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{NaOH}} = m_{\text{NaOH}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{\text{NaOH}}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{NaOH}} = 793,50 \text{ kJ}$$

Pérdidas de Energía en el Pre tratamiento 2

$$E_{f_{\text{Pérdidas}}} = \Delta H_{\text{Pérdidas}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Pérdidas}})$$

$$E_{f_{\text{Pérdidas}}} = 208965287 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Pérdidas}} = m_{\text{mezcla entrada}} * C_{p_{\text{mezcla entrada}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Pérdidas}} = 800744970 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Pérdidas}} = m_{\text{mezcla entrada}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{\text{mezcla entrada}}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Pérdidas}} = 1985837,9 \text{ kJ}$$

Cálculo de las exergías para la salida del Pre tratamiento 2

$$E_{T \text{ salida}} = E_{q_{\text{Agua}}} + E_{f_{\text{Agua}}} + E_{q_{\text{SP}_2}} + E_{f_{\text{SP}_2}} + E_{q_{\text{LL}}} + E_{f_{\text{LL}}}$$

$$E_{T \text{ salida}} = 218536655 \text{ kJ}$$

Agua en la salida

$$E_{q_{\text{Agua salida}}} = m_{\text{Agua salida}} * E^{\circ}_{\text{Agua}}$$

$$E_{q_{\text{Agua salida}}} = 57,1085 \text{ kJ}$$

$$E_{f_{\text{Agua salida}}} = \Delta H_{\text{Agua salida}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Agua salida}})$$

$$E_{f_{\text{Agua salida}}} = 216405318 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Agua salida}} = m_{\text{Agua salida}} * C_{p_{\text{Agua salida}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Agua salida}} = 263527602 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Agua salida}} = m_{\text{Agua salida}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{\text{Agua salida}}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Agua salida}} = 158128,47 \text{ kJ}$$

Sólido Pre tratado 2

$$Eq_{SP_2} = \sum X_i * E^{\circ}_{Xi} + R * T_0 * \sum X_i * \ln(X_i)$$

$$Eq_{SP_2} = 3564,9946 \text{ kJ}$$

$$Ef_{SP_2} = \Delta H_{SP_2} - (T_0 * \Delta S_{SP_2})$$

$$Ef_{SP_2} = 1797481,5 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{SP_2} = m_{SP_2} * Cp_{SP_2} * \Delta T$$

$$\Delta H_{SP_2} = 21775075 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{SP_2} = m_{SP_2} * \int_{T_0}^{Tf} \frac{Cp_{SP_2} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{SP_2} = 67038,904 \text{ kJ}$$

Líquido rico en lignina

$$Eq_{LL} = \sum X_i * E^{\circ}_{Xi} + R * T_0 * \sum X_i * \ln(X_i)$$

$$Eq_{LL} = 898,208 \text{ kJ}$$

$$Ef_{LL} = \Delta H_{LL} - (T_0 * \Delta S_{LL})$$

$$Ef_{LL} = 329335,55 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{LL} = m_{LL} * Cp_{LL} * \Delta T$$

$$\Delta H_{LL} = 3935639,3 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{LL} = m_{LL} * \int_{T_0}^{Tf} \frac{Cp_{LL} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{LL} = 12101,69 \text{ kJ}$$

Tabla 3.10. Resultados de los cálculos de exergías.

Datos	ΔT en ° C	ΔH en kJ	ΔS en kJ	Exergía física en kJ	Exergía química en kJ
sólido pre tratado 1	55	24438336,02	75240,51681	2016662,015	4243,89154
NaOH	5	243928,7906	793,502856	7464,939521	23443237,7
Pérdida de energía	105	800744969,9	1985837,862	208965286,9	
Agua de entrada	5	23957054,76	79707,55638	204202,9608	57,108593
Agua de salida	55	263527602,4	158128,4715	216405317,9	57,108593
Etanol	5	11708062,39	38944,57805	102578,1254	17384,592
Sólido pre tratado 2	55	21775074,9	67038,90391	1797481,531	3564,99464
Líquido rico en lignina	55	3935639,301	12101,69045	329335,5484	898,208424

Tabla 3.11. Pérdidas y eficiencia de la etapa de Pre tratamiento 2.

Resultados	kJ	kW
Exergía total de entrada	234761118,2	65211.42
Exergía total de salida	218536655,3	60704.63
Pérdidas	16224462,89	
Eficiencia	0,93088948	

3.4.3. Exergía de la Hidrólisis enzimática y Fermentación Simultánea (SFS)

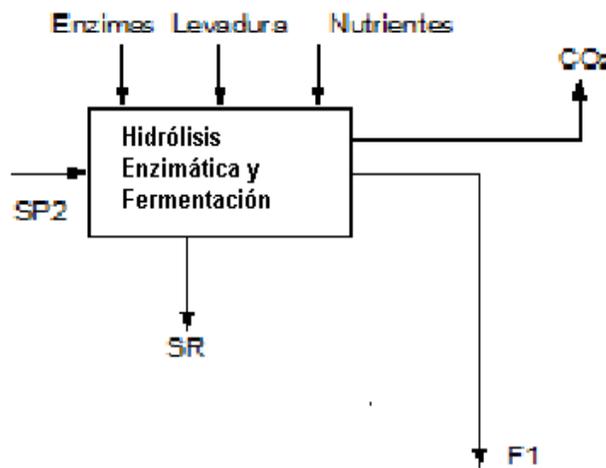


Figura 3.4. Diagrama de Hidrólisis enzimática y Fermentación Simultánea.

Tabla 3.12. Resultados de los cálculos de exergías para la hidrólisis enzimática y fermentación simultánea.

Datos	Flujo kg/día	E química kJ	E física kJ
Sólido pre tratado 2	197340,7	3564,9946	1797481,5
Enzima	1215,33	7,75	
Levadura	775,055	2671,96	
Nutrientes NH ₄ Cl			
KH ₂ PO ₄	501,3	27030	
MgSO ₄			
Pérdidas de energía	197340,7		1727041
Sólido residual	164620,8	1,7526	
Fermento 1	2258438	1881337	
CO ₂	6583,2	0,0028	

Ecuaciones la Hidrólisis enzimática y Fermentación Simultánea

Pérdidas de energía

$$E_{f_{\text{Pérdidas}}} = \Delta H_{\text{Pérdidas}} - (T_0 * \Delta S_{\text{Pérdidas}})$$

$$E_{f_{\text{Pérdidas}}} = 1797482 \text{ kJ}$$

$$\Delta H_{\text{Pérdidas}} = m_{\text{mezcla entrada}} * C_{p_{\text{mezcla entrada}}} * \Delta T$$

$$\Delta H_{\text{Pérdidas}} = 21775074,9 \text{ kJ}$$

$$\Delta S_{\text{Pérdidas}} = m_{\text{mezcla entrada}} * \int_{T_0}^{T_f} \frac{C_{p_{\text{mezcla entrada}}} * dT}{T} - R * \int_{P_0}^P \frac{dP}{P}$$

$$\Delta S_{\text{Pérdidas}} = 67038,9039 \text{ kJ}$$

Tabla 3.13. Pérdidas y eficiencia de la etapa de Hidrólisis enzimática y Fermentación Simultánea.

Resultados	kJ	kW
E total entrada	3557797,205	988,27
E total salida	1881338,755	522,59
Pérdidas	1676458,45	
Eficiencia	0,52879	

3.4.4. Exergía de la Destilación

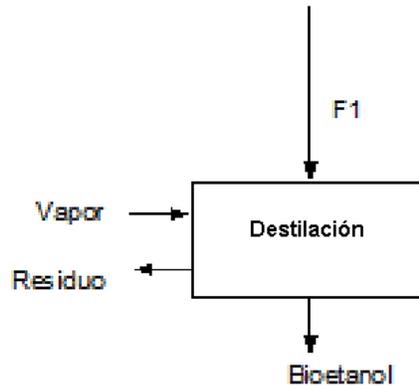


Figura 3.5. Diagrama de la Destilación.

Tabla 3.14. Datos de las corrientes en la Destilación.

Corriente	Kij	To (K)	T (K)	X 1 (mol)	X 2 (mol)	ΔH	ΔS	MM
Fermento	7,25	298	362	0,0605	0,9395	156,08	0,488	19,69817
Destilado	7,6	298	350	0,04	0,96	173,85	0,544	19,12276
Residuo	0	298	369	0,0123	0,9877	247,58	0,755	18,34525

Tabla 3.15. Datos de las exergías específicas para las corrientes involucradas en la Destilación.

Corrientes	F(kmol/h)	eph	emex	eq	eqkJ/kmol	Eph kJ/h
Fermento	4921,62	10,656	57577,6	-238,648	57338,95	1002746
Destilado	66,78	11,738	1242030,4	-539,954	1241490	34083,16
Residuo	4972,62	22,59	19865,712	-107,127	19758,58	2060161

Tabla 3.16. Resultados de los cálculos de exergías.

Resultados	E física (kW)	E química (kW)
Fermento	278,5407	78389,04
Destilado	9,467545	23029,65
Residuo	572,2669	27292,2

Tabla 3.17. Pérdidas y eficiencia de la etapa de Destilación.

Resultados	kJ	kW
Exergía total entrada	283203288	78667,58
Exergía total salida	183252888	50903,58
Pérdidas	99950400	
Eficiencia	0,64707189	

3.5. Métodos de cálculo de la exergía química estándar de sustancias orgánicas

Según (Kotas, 1995) la exergía estándar de un compuesto orgánico o inorgánico identificable, E_{ch}^0 , puede estimarse a partir de los valores de la energía libre de formación de Gibbs, $\Delta G_{f,298}^0$, del compuesto y de las exergías químicas estándar de los elementos que lo integran, según la ecuación siguiente:

$$E_{ch}^0 = \Delta G_{f,298}^0 + \sum n_i \cdot Ech_i^0 \quad (3.2)$$

Donde n_i y $E_{ch,i}^0$ representan el número de moles y la exergía química estándar de los elementos que lo constituyen, respectivamente.

Una variante de este método consiste en calcular la exergía química de una sustancia partiendo del conocimiento de una reacción en la cual esté involucrada tal sustancia y empleando las exergías químicas de las demás sustancias participantes, así como la energía libre de Gibbs de la reacción, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta G_{f,298}^0 = \sum n_k \cdot Ech_k^0 - \sum n_j \cdot Ech_j^0 \quad (3.3)$$

A partir de la cual se efectúa el cálculo respectivo, donde n_j y n_k representan los números de moles de reactivos y productos, respectivamente.

3.6. Estimación de las pérdidas económicas asociadas a la no integración de las etapas y la baja eficiencia exergético en cada una de ellas

Tabla 3.18. Pérdidas económicas de los procesos involucrados en la obtención de etanol a partir del bagazo de caña.

Procesos	Pérdidas (kW)	Pérdidas (\$)
Pretratamiento 1	5733,38	16044
Pretratamiento 2	4506,70	10897
Hidrólisis enzimática y Fermentación	465,68	487,224
Destilación	27764	126199
Total	38469,76	153627,224

3.7. Análisis de los resultados

El proceso que se analiza está desarrollado por etapas y no como una tecnología integrada, en estas se observan demasiado tiempo de espera entre estas etapas y carece de algunos procesos auxiliares de enfriamiento y calentamiento de una etapa a la otra por lo que en ocasiones se determina la exergía que se pierde de una etapa a otra estos son los casos de la salida del pre tratamiento 1 y 2 y la batición alimentada al sistema de destilación.

Los resultados en cada una de las etapas demuestran que las pérdidas involucradas en cada una de ellas son significativas sobre todo en las etapas pre-tratamiento, sacarificación y fermentación simultánea y en la destilación, solo se alcanza un buen aprovechamiento de la energía refreída a la eficiencia exergético en la etapa dos de pre tratamiento.

En múltiples corrientes de entrada no se encontró en las bases de datos reportadas la exergía química de estas por lo que se estimaron por los métodos de energía libre de Gibbs.

Los resultados alcanzados en cuanto a la eficiencia no están lejos de los reportados por otros autores para tecnologías similares a la que se presenta como son (Kafarov y Ojeda 2010).

Conclusiones



Conclusiones

1. La necesidad de incrementar la eficiencia energética y la disminución de la contaminación ambiental en la industria cubana exige un nivel superior en el análisis de alternativas de solución y las tecnologías de obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos constituye un potencial desde ese punto de vista.
2. De acuerdo al inventario de la alternativa seleccionada, el agua es el recurso más consumido en el proceso, seguido del bagazo de caña de azúcar.
3. Los resultados obtenidos en el ACV de este producto se pudo constatar que este tiene impactos en la etapa de agricultura como de la industria y estas están asociadas al agotamiento de combustibles fósiles.
4. La exergía determinada en las diferentes etapas avizó que las pérdidas en estas son considerables resultando 690776,18 kW para una eficiencia en general de 64,89 % .
5. En este proceso se estimaron que las pérdidas asociados a las bajas eficiencias reportarían desde el punto de vista económico un costo de \$ 153627,22.

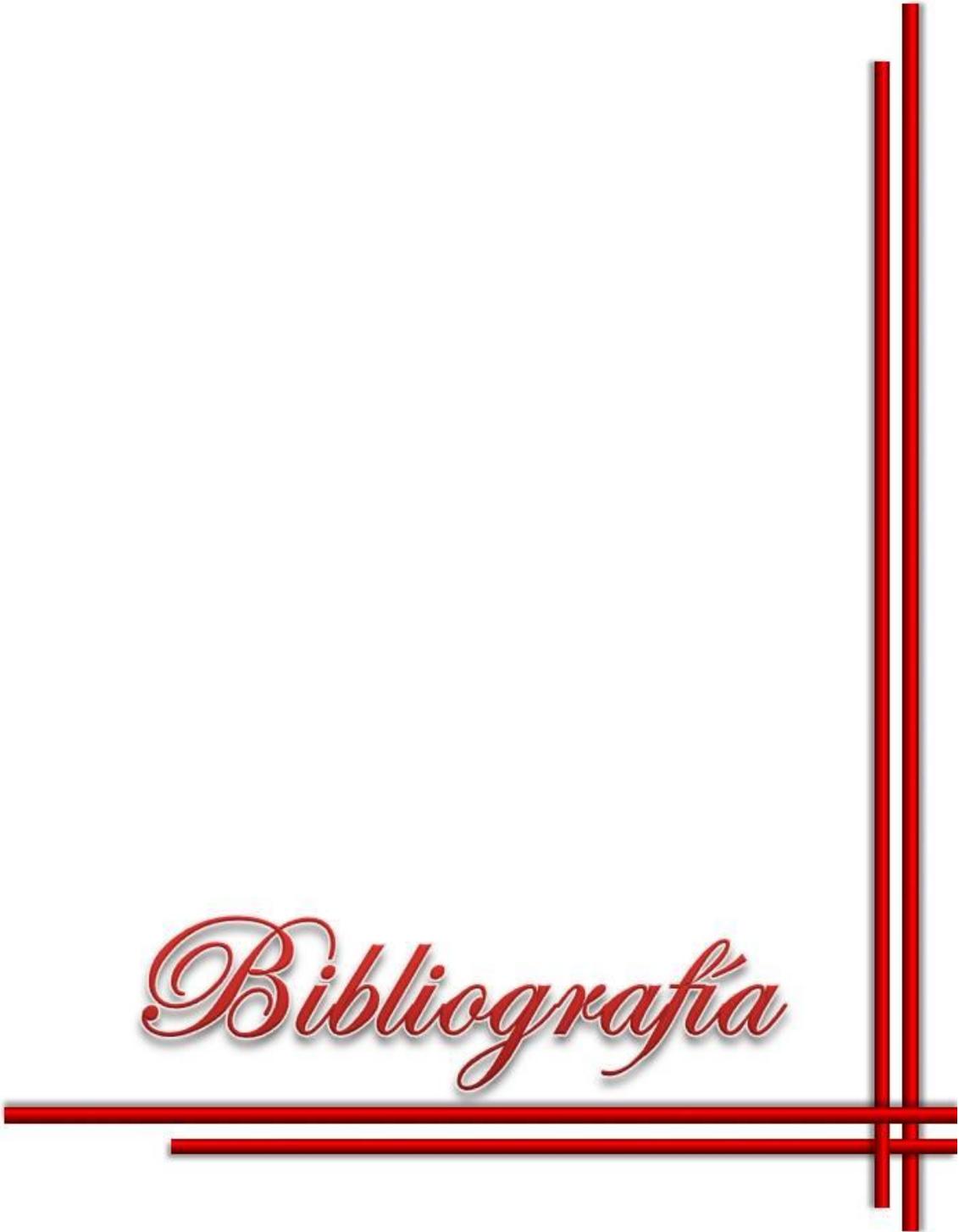
Recomendaciones



Recomendaciones

1. Que se analice la interconexión operacional de las etapas de forma tal que se establezca la tecnología adecuada al desarrollo de procesos.
2. Que se realice la integración material y energética del proceso para mejorar la eficiencia del mismo y disminuir las pérdidas asociadas a este.
3. Que se continúe con el estudio de las etapas para obtener los parámetros óptimos en cada una de ellas.

Bibliografia



Bibliografía

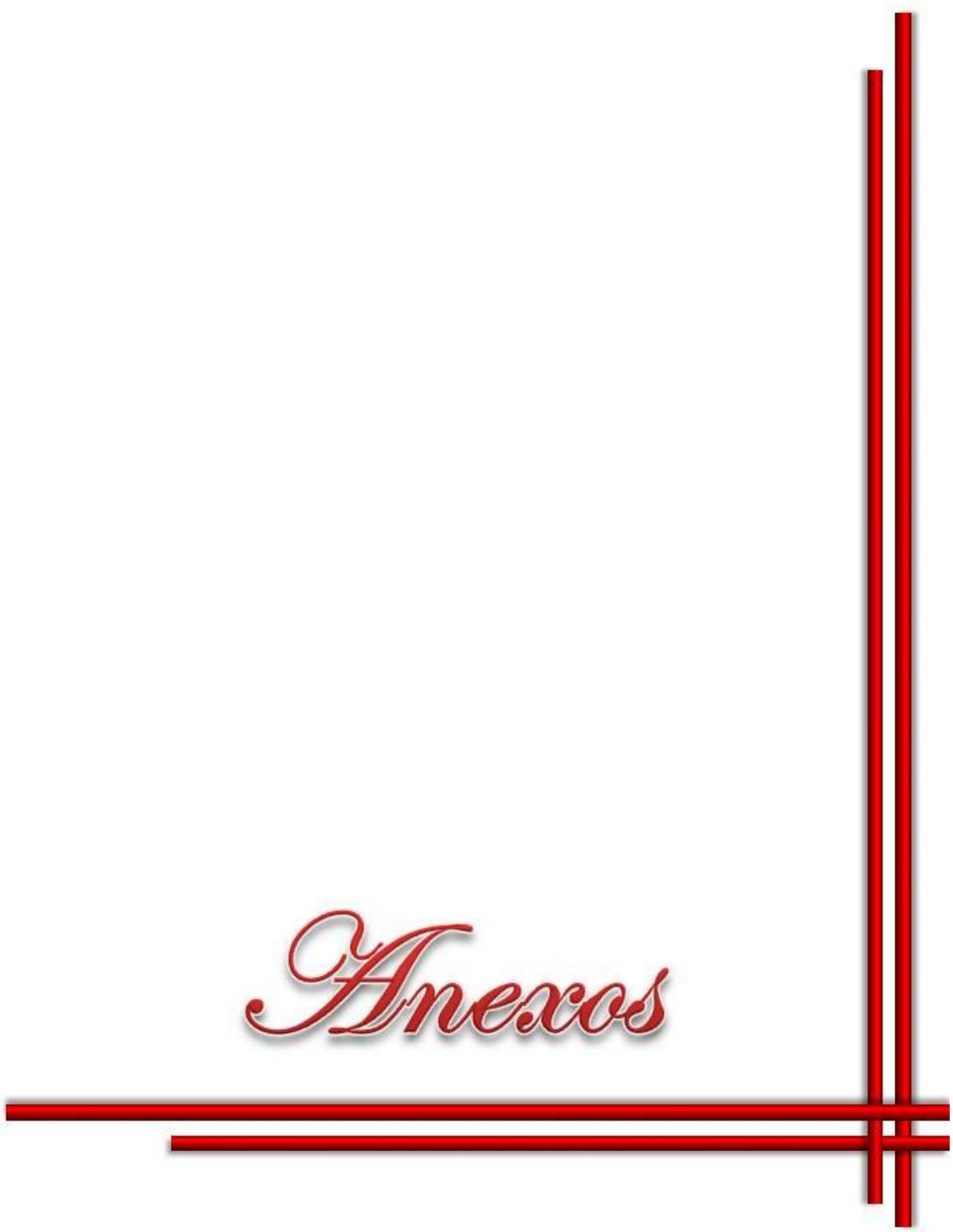
1. Banerjee, R., Pandey, A. Bio-industrial applications of sugarcane bagasse: A technological perspective. *Int. Sugar J.*, 104, 64-68, 2002
2. Björklund, A. and G. Finnveden (Abril, 2006). "Welcome to a course in Life Cycle Assessment, Center for Environmental Strategies research".
3. Brigham JS, Adney WS, Himmet ME. (1996). Hemicellulases: diversity and applications. En: *Handbook on bioethanol*. Wyman, C.E. (Ed.). Taylor & Francis. Washington. pp. 119-141.
4. Carvajal, O. , Serrantes, M., Martínez, M., Rodríguez, L. Bagasse particle boards. En *Handbook of sugarcane derivatives* (Ed. L.O. Gálvez). Third Edition. Havana, Cuba, 2000
5. Clarke, M.A. and L.A. Edye, Sugar beet and sugarcane as renewable resources. *Agric. Mat. Renewable Resour.* 1996.
6. Contreras, A. M. (2007). "Metodología para el análisis del ciclo de vida combinado con el análisis energético en la industria azucarera cubana". Cuba, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
7. De Los Ríos, R., Calvo, G. La Cogeneración en la Industria Azucarera; *Revista Centro Azúcar*, N° 2.1984
8. Derrickson, W. B. (1992). "Ethanol from biomass technology", presented to Pacific International Center for High Technology Research."
9. Gálvez L.O. La producción diversificada de la agroindustria de la caña de azúcar. En *Manual de los derivados de la caña de azúcar* (Ed. L.O. Gálvez). Tercera Edición. La Habana, Cuba. pp. 3-17, 2000
10. Gastón, C., Bambanaste, R., Correa, J., Alfonso, G., Herryman, M. Bagazo. En *Manual de los derivados de la caña de azúcar* (Ed. L.O. Gálvez). Tercera Edición. La Habana, Cuba. pp.31-44, 2000
11. Gaudreault, C. (2006). "LCA Applications in the Pulp and Paper Industry". *Conference Proceedings. 17th International Congress of Chemical and Process Engineering.*
12. Goedkoop, M. and M. Oele (Septiembre, 2004.). "Introduction to LCA (Life Cycle Assessment) with SimaPro". PRé Consultants.

13. Ghose, T. K., Roychoudhury, P.K., Ghosh, P (1984). Simultaneous saccharification and fermentation (SSF) of lignocellulosics to ethanol under vacuum cycling and step feeding.
14. Grethlein, H. E. A. T. D. (1993). The cost of ethanol production from lignocellulosic biomass-A comparison of selected alternative processes.
15. Hahn-Hägerdal B, et al., Bioethanol– the fuel of tomorrow from the residues of today. Trends Biotechnol 24, 549-556. , 2006.
16. Holzapple, M. (1988). "Conversion of grass to highly digestible animal feed, protein concentrate and ethanol."
17. (IHOBE S.A, (Septiembre 2010). "Análisis del Ciclo de Vida y Huella de Carbono". Sociedad Pública de Gestión Ambiental.
18. INOVA (Centro para el Desarrollo Sostenible). "Análisis del Ciclo de Vida".1997
19. Karina Ojeda, Eduardo Sánchez, Viatcheslav Kafarov*, Sustainable ethanol production from lignocellulosic biomass e Application of exergy analysis, Center for Sustainable Development in Industry and Energy, Industrial University of Santander, Cra 27 Cl 9, Bucaramanga, Colombia, 2010.
20. Kotas, T. J. (1995); Different definitions of exergetics efficiencies.
21. Lapido, M., Álvarez, M. (2006); Termodinámica Avanzada; Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente.
22. Lopretty, M., E. L. Mesa, and Gonzáles., "Lignocelulosic biomasa as substrate for ethanol production: Technical and economical Feasibility of a pretreatment area". Congreso Mundial de uso de la biomasa como fuente de energía. Roma., 2004.
23. Llanes, E. and col. (Mayo, 2005). "Propuesta de aplicación de herramienta de gestión ambiental. Análisis de Ciclo de Vida a la actividad agrícola". Revista Ciencias.com <<http://www.revistaciencias.com/>>.
24. Martín C, González Y, Fernández T, Thomsen AB. Investigation of cellulose convertibility and ethanolic fermentation of sugarcane bagasse pretreated by wet oxidation and steam explosion. J Chem Technol Biotechnol;81:1669–77, 2006
25. Maturell R. L. (2007) Propuestas de indicadores medioambientales y medidas de producción más limpias en la recapadora de neumáticos David Díaz Guadarrama de Santa Clara. Trabajo de Diploma.

26. Mesa, L. (2010). "Estrategia investigativa para la tecnología de obtención de etanol y coproductos del bagazo de la caña de azúcar". Cuba, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
27. Montero, G., Rivero, R. (1988); Métodos para la Estimación de la Exergía Química Estándar de los Compuestos Orgánicos; Revista de Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos; Vol. 9-10; pp. 14-18.
28. "NC ISO 14040. Environmental management. Life Cycle Assessment. Principles and framework". National Office of Normalization. Havana City Cuba." (2005).
29. "NC ISO 14041. "Environmental management. LCA. Goal and scope definition and inventory analysis". National Office of Normalization. Havana City. Cuba." (2000).
30. "NC ISO 14042. "Environmental management. Life Cycle Assessment. Assessment of Life Cycle Impact". National Office of Normalization. Havana City. Cuba." (2001).
31. "NC ISO 14043. Environmental management. Life Cycle Assessment. Life Cycle Interpretation". National Office of Normalization. Havana City." (2001).
32. Numan, R. P. (1987). "Sulphuric acid-sugar separation by ion exclusion."
33. Olguin, E.J., Doelle, H.W., Mercado, G. Resource recovery through recycling of sugar processing by-products and residuals. *Resour. Conserv. Recycling*, **15**, 85-94, 1995.
34. Palacios Llanes, H., Fabricación de alcohol. Salvat Editores, S.A. Barcelona-Madrid-Buenos Aires-Río de Janeiro, 1956.
35. Pan XJ, Gilkes N, Kadla J, Pye K, Saka S, Gregg D, et al. Bioconversion of Hibrid Poplar to ethanol and co-products using an organosolv fractionation Process: Optimization of Process Yields. *Biotechnol Bioeng*; 94:851-61. 2006.
36. Pérez, M. (2004). "Evaluación del Análisis del Ciclo de Vida del Azúcar de Caña". Santa Clara, UCLV.
37. "PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). "Life Cycle Initiative."2003.
38. Reyes, M., Rosa Domínguez, E., González, E., Esquerre, Y., Necesidad y perspectivas de la diversificación azucarera en Cuba., in Centro Azúcar. 1997.
39. Riera, G. (1998); Estudio del consumo de energía; Revista ATAC; Vol. 2.
40. Rieradevall, J. and J. Vinyets (Diciembre, 1999). "Ecodiseño y ecoproductos".

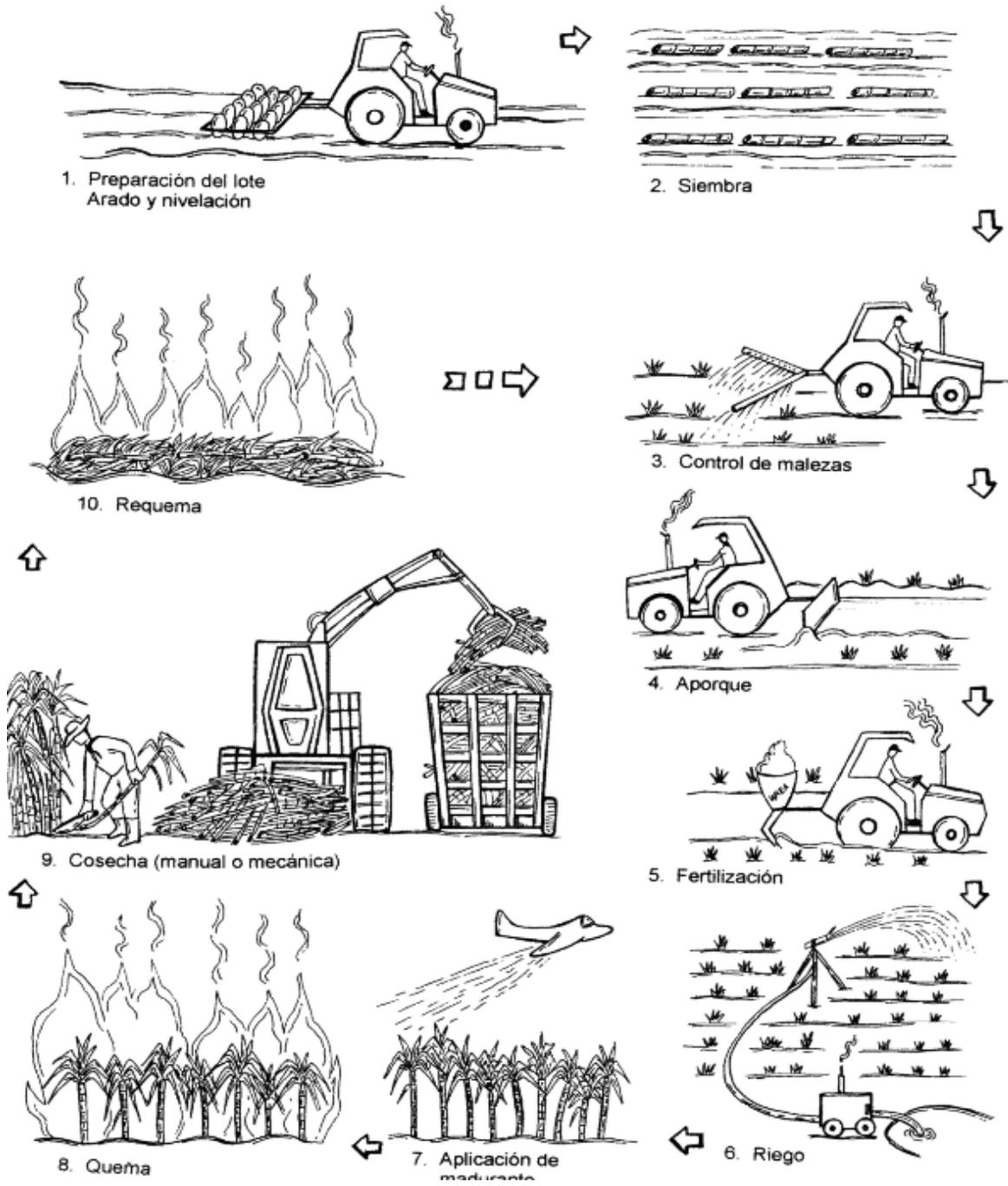
41. Rieradevall, J. and col. (Octubre, 2000). "Ecodiseño de envases. El Sector de la Comida Rápida".
42. Robert J. Wooley and Victoria Putsche, Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components, April 1996.
43. Rodríguez, J. (2002). "La Ingeniería Ambiental entre el reto y la oportunidad". Madrid.
44. Sáenz, M. and J. Zufía (2006). "Análisis de Ciclo de Vida para la reducción de impactos medioambientales generados por el sector agroalimentario Vasco".
45. SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry). "A Technical Framework for Life Cycle Assessments". . Washington, D.C. (1991).
46. "SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry)". Código de Procedimiento. (1998).
47. Valdés, A., Almazán, O., Fiandor, H. Contribución de la biomasa cañera al incremento del valor agregado de la producción azucarera. Int. Sugar J., **102**, 551-555, 2000.
48. Vink, E. and col. (2003). "Applications of life cycle assessment to Nature Works TM polylactide (PLA) production, Polymer Degradation and Stability".
49. Zaror, C. A. (Diciembre, 2000). "Introducción a la Ingeniería Ambiental para la industria de procesos". Chile, Universidad de Concepción.
50. http://dpi.eq.ufrj.br/ciaiq_22/CD/formCrCongreso/papers/04c/04c_479.pdf.

Anexos



Anexos

Anexo 1. Esquema de producción de azúcar convencional



Anexo 4. Excel de la etapa de Hidrólisis Enzimática y Fermentación Simultánea

	Flujo kg/día	E química	E física	E entrada	3557797,01
Solido pretratado 2	197340,7	3564,99	1797481,53	E salida	1881338,72
Enzima	1215,33	7,75			
Levadura	775,055	2671,96		Perdidas	1676458,29
Nutrientes	501,3	27030		Eficiencia	0,52879316
solido residual	164620,8	1,7526			
fermento 1	2258437,6	1881336,96			
CO2	6583,2	0,0028			
Perdida energ	197340,7		1727040,78		

