



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

MÁSTER OFICIAL EN  
INGENIERÍA AMBIENTAL

**Análisis de Ciclo de Vida de la Producción de  
Biocombustibles líquidos (BUTANOL) a partir  
de Subproductos Lignocelulósicos (Pulpa de  
Remolacha)**

Autor:

Montero De la Cruz, Silena Esther

Tutor Académico:

Coca Sanz, Mónica

Departamento de Ingeniería Química y  
Tecnología del Medio Ambiente

Valladolid, Julio de 2017

## RESUMEN

La necesidad de introducir energías renovables en el sector industrial aumenta la importancia de diseñar estrategias de producción eficiente y sostenible para las futuras demandas energéticas. El análisis de ciclo de vida de la producción de biocombustibles a partir de biomasa lignocelulósica permite comparar las ventajas y desventajas que se presentan respecto a la producción de combustibles convencionales, así como también definir la importancia de su impacto sobre el medio ambiente. Las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos asociados durante la etapa de operación de la planta provienen de los aspectos ambientales definidos, como el consumo de combustibles fósiles, generación de vapor en calderas y producción de residuos y vertidos. En este ACV se ha realizado la comparación de tres metodologías de evaluación de impacto, en la que se escoge la más actualizada y conforme a los objetivos de estudio. Con dicha metodología, se comparan los dos componentes más importantes y de mayor producción de impactos ambientales en la sección de fermentación para así proponer estrategias de disminución de impactos con un análisis de sensibilidad. Este ACV ha comprobado que los impactos ambientales asociados a la producción de biobutanol con pretratamiento térmico provienen principalmente al uso de vapor de proceso durante esta etapa, así como el consumo de energía eléctrica en las etapas de hidrólisis enzimática y fermentación.

**Palabras claves:** ACV, Biobutanol, Biocombustibles, Ecoinvent, Impactos ambientales, SimaPro.

# CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	8
1.1. Los biocombustibles .....	8
1.2. El Butanol como biocombustible.....	10
1.3. Producción de biobutanol a partir de materiales lignocelulósicos .....	11
1.3.1. La pulpa de remolacha como materia prima en la producción de biobutanol.....	12
1.4. Análisis de Ciclo de Vida .....	13
1.5. Energía y desarrollo sostenible .....	14
2. JUSTIFICACIÓN .....	15
3. OBJETIVOS DE ESTUDIO .....	15
4. ALCANCE DEL ESTUDIO .....	16
4.1. Unidad Funcional .....	16
4.2. Límites del sistema .....	17
4.3. Simplificaciones y consideraciones de cálculo .....	18
4.4. Descripción del proceso. Diagrama de Flujo.....	18
4.4.1. Pre-tratamiento hidrotérmico de pulpa de remolacha.....	19
4.4.2. Hidrólisis Enzimática.....	19
4.4.3. Separación del hidrolizado .....	20
4.4.4. Fermentación .....	20
4.5. Base de datos y Metodologías de evaluación .....	23
4.6. Mix eléctrico.....	27
4.7. Datos de proceso .....	28
4.7.1. Balances de materia: Flujos másicos y volumétricos .....	30
5. ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA .....	31
5.1. Especificaciones del dimensionamiento de equipos.....	32
5.1.1. Dimensionado de reactor de Pre-tratamiento.....	33
5.1.2. Dimensionado de reactores de Hidrólisis Enzimática .....	33
5.1.2.1. Reactor de preparación de enzimas .....	34
5.1.3. Dimensionado de la centrífuga .....	34
5.1.4. Dimensionado Reactores de Fermentación .....	35
5.1.4.1. Reactores de preparación de inóculo .....	35
5.2. Inventario de ciclo de vida (ICV) .....	36
5.2.1. Materiales: Acero inoxidable correspondiente a 8 kg de Butanol.....	36
5.2.2. Balances de materia y energía: Flujos de correspondientes a 8 kg de butanol .....	36
5.2.2.1. Energía eléctrica (kWh).....	37
5.2.2.2. Necesidades de agua, vapor, nutrientes, regulador pH, gases y refrigerante correspondientes a 8 kg de butanol.....	37

5.2.3.	Ocupación de la planta (m <sup>2</sup> ) .....	38
5.2.4.	Flujos de referencia para 1 kg de butanol.....	38
6.	EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA (EICV) .....	40
6.1.	Comparativa de Metodologías.....	40
6.1.1.	CML 2 Baseline 2000 .....	40
6.1.2.	Eco-Indicator 99 (E).....	42
6.1.3.	IMPACT 2002+ .....	43
6.2.	Metodología seleccionada.....	46
7.	INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	46
7.1.	Comparación del impacto generado por el uso de vapor y consumo eléctrico de la planta. ....	47
7.2.	Análisis de Sensibilidad .....	50
7.1.2.	Comparación de energías convencionales con energías renovables propuestas en el análisis de sensibilidad .....	51
8.	CONCLUSIONES .....	53
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	55
I.	ANEXO. MEMORIA DE CÁLCULO .....	59
II.	ANEXO. DIAGRAMAS DE PROCESOS .....	78

## LISTA DE ABREVIACIONES

ACV: Análisis de ciclo de vida

PRE-TR: Pre-tratamiento

HE: Hidrólisis Enzimática

FER: Fermentación

STEAM: Vapor

ICV: Inventario de ciclo de vida

EICV: Evaluación de impactos ambientales en el ciclo de vida

ABE: Acetona, Butanol y Etanol

TFM: Trabajo fin de máster

TFG: Trabajo fin de grado

REE: Red eléctrica de España

UNESA: Asociación española de la Industria Eléctrica

REFRI: Aguas de refrigeración

S1: Mezclado de pulpa + remolacha

S1: Mezclado de hidrolizado + NaOH

DALY: Año de Vida Ajustado a la Discapacidad

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

1GMS: Primera generación (25% de los cultivos a la producción de butanol).

1G2GMS: Primera generación (50% de cultivos a la producción de etanol y 50% producción de azúcar), integrado a una segunda generación con la producción de butanol a partir de los subproductos (bagazo).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Visión general de un Inventario (ICV) en un producto.....	14
Figura 2. Diagrama de flujo de la sección de Fermentación del proceso de producción de biobutanol a partir de pulpa de remolacha a escala industrial. ....	22
Figura 3. Concepto central de la metodología Eco-Indicator 99.....	24
Figura 4. Simplificación de categorías en Impact 2002+. ....	24
Figura 5. Procedimiento del análisis de inventario. Especificaciones de la norma.....	32
Figura 6. Caracterización en CML Baseline 2000. Fuente: SimaPro. ....	41
Figura 7. Normalización en CML Baseline 2000. Fuente: SimaPro. ....	41
Figura 8. Caracterización en Eco-indicator 99. Fuente: SimaPro. ....	42
Figura 9. Normalización en Eco-indicator 99. Fuente: SimaPro. ....	43
Figura 10. Caracterización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro.....	44
Figura 11. Normalización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro.....	45
Figura 12. Análisis de los componentes destacados de la sección de fermentación. Fuente: SimaPro.....	48
Figura 13. Normalización del análisis en sección de fermentación. Fuente: SimaPro. ....	48
Figura 14. Producción neta de energía con respecto al calentamiento global. Fuente: SimaPro.....	49
Figura 15. Producción neta de energía con respecto al uso de energías no renovables. Fuente: SimaPro.....	50
Figura 16. Caracterización en la comparación de alternativas. Fuente: Simapro.....	52
Figura 17. Evaluación del daño en la comparación de alternativas. Fuente: SimaPro.....	52

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de biocombustibles basados en sus tecnologías de generación.....	8
Tabla 2. Poder calorífico Inferior de los combustibles más empleados en (MJ/kg).....	10
Tabla 3. Unidad funcional del sistema. ....	17
Tabla 4. Procesos unitarios y periodos de las fases de construcción y operación de la planta.....	18
Tabla 5. Enfoques de las metodologías aplicadas. ....	25
Tabla 6. Clasificación de categorías de impactos en daños ocasionados de la metodología IMPACT 2002+. ....	26
Tabla 7. Clasificación de categorías de impactos en daños ocasionados de la metodología Eco-Indicator 99. ....	26
Tabla 8. Distribución del mix energético de España del año 2016.....	27
Tabla 9. Datos para establecer flujos de referencia.....	28
Tabla 10. Guía de diseño de biorreactores para la preparación de enzimas. ....	29
Tabla 11. Parámetros y condiciones especiales de entrada a las diferentes etapas.....	29
Tabla 12. Parámetros de operación en gasto energético de reactores. ....	30
Tabla 13. Parámetros de operación en gasto energético de intercambiadores de calor. ....	30
Tabla 14. Flujos de entradas y salidas de las diferentes etapas simuladas por Aspen Plus. ....	31
Tabla 15. Especificaciones del reactor de pretratamiento. ....	33
Tabla 16. Especificaciones del reactor de Hidrólisis. ....	33
Tabla 17. Especificaciones del biorreactor para la Producción de Enzimas. ....	34
Tabla 18. Especificaciones de la centrífuga de la etapa de Separación.....	34
Tabla 19. Especificaciones del reactor de Fermentación. ....	35
Tabla 20. Especificaciones de reactores de preparación de inóculo en la etapa de fermentación. ....	35
Tabla 21. kg de Acero inoxidable en toda la producción.....	36
Tabla 22. Energía de entrada a las etapas del proceso.....	37
Tabla 23. Flujos de materiales de la sección de fermentación. ....	37
Tabla 24. Flujos de referencia para SimaPro.....	39
Tabla 25. Comparativa de impactos asociados al cambio climático en kg de Dióxido de carbono equivalente. ....	45
Tabla 26. Datos de resultados asociados al agotamiento de los recursos naturales.....	46
Tabla 27. Sustancias emitidas asociados a la categoría de calentamiento global.....	47
Tabla 28. Reducción del consumo de vapor como alternativa de mejora.....	51
Tabla 29. Producción de energías renovables como alternativa de mejora.....	51
Tabla 30. Datos comparativos de alternativas de mejora. ....	52

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Los biocombustibles

Los biocombustibles son una alternativa a los combustibles fósiles que comprende una variedad de productos tales como el bioetanol, biobutanol, biodiésel, metano, entre otros. Esta alternativa busca equilibrar y en un futuro reemplazar la actual demanda de combustibles fósiles y satisfacer las necesidades de los consumidores, con su propósito de no alterar deliberadamente los recursos naturales del medio.

Se entiende por biocombustible todos aquellos combustibles que se obtienen a partir de biomasa. La biomasa es referida por su origen en los procesos biológicos de productos comprendidos tanto de origen vegetal como de animal. Este término se ha aceptado para denominar a un grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de la materia prima orgánica formada por vías biológicas [1]. Según la naturaleza de la biomasa, los biocombustibles son clasificados tal y como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de biocombustibles basados en sus tecnologías de generación. [2]

### Classification of biofuels based on their generation technologies.

Generation	Feedstocks	Examples
First-generation biofuels	Sugar, starch, vegetable oils, or animal fats	Bioalcohols, vegetable oil, biodiesel, biosyngas, biogas
Second generation biofuels	Non food crops, wheat straw, corn, wood, solid waste, energy crop	Bioalcohols, bio-oil, bio-DMF, biohydrogen, bio-Fischer-Tropsch diesel
Third generation biofuels	Algae	Vegetable oil, biodiesel
Fourth generation biofuels	Vegetable oil, biodiesel	Biogasoline

El uso de la biomasa en la producción de biocombustibles con el propósito de suplir los actuales consumos de energías fósiles, contribuye a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Todo esto debido a la absorción de CO<sub>2</sub> que la planta tuvo durante su crecimiento lo que disminuye las emisiones de este gas de efecto invernadero [3]. A diferencia del uso de hidrocarburos de origen fósil, el uso de biocombustibles permite disminuir el impacto ambiental negativo que generan los combustibles fósiles sobre la emisión de gases de efecto invernadero.

### *Biocombustibles de primera generación*

Los biocombustibles líquidos en primera generación son todos aquellos producidos a partir de materiales azucarados, materiales amiláceos, aceites vegetales o grasas animales de forma que su proceso de producción es relativamente sencillo. Las ventajas de esta producción es que se consideran alternativas ambientalmente amigables que ayudarían a combatir el cambio climático y disminuir la contaminación ambiental. Algunos la consideran energía renovable en la medida en que el ciclo de plantación y cosecha se podría repetir indefinidamente, teniendo en cuenta el buen cuidado y manejo de los suelos evitando su agotamiento y contaminación [1].

Su viabilidad se ha puesto en duda debido al controvertido conflicto por el suministro de alimentos, ya que se necesitaría de gran parte de suelos fértiles dedicados a cultivos de alimentación para producir biocombustibles de primera generación. Además, los costes de estos biocombustibles son relativamente altos, por lo que estas limitaciones han favorecido la búsqueda de biomasa no comestible para su generación [4].

### *Biocombustibles de segunda generación*

Este tipo de biocombustibles son producidos a partir de cultivos no alimentarios como la paja de cereal, rastrojos de maíz, madera, residuos sólidos y en este caso la pulpa de remolacha.

Como se obtienen a partir de materia prima no alimentaria, pueden ser cultivadas en tierras que no requieran los estándares de cultivo de alimentos. Por ello, permiten una mayor diversificación y promueve el desarrollo agrícola y agroindustrial. Particularmente pueden diversificar el uso de los bosques y poner freno a la deforestación. En algunos casos ésta técnica puede servir para recuperar terrenos erosionados en zonas desertificadas y fijar CO<sub>2</sub> en las raíces de sus plantas. Ésta técnica abre la posibilidad de obtener combustibles más respetuosos con el medio ambiente y sin competir con los cultivos alimenticios, al disponer de una mayor variedad de materias primas no comestibles [1].

Una de las principales desventajas de los biocombustibles de segunda generación es que los procesos que se llevan a cabo en su producción son más complejos, requieren equipos más sofisticados, así como instalaciones e inversión a gran escala. El desarrollo de biocombustibles de segunda generación requiere un importante esfuerzo en investigación debido a la compleja estructura de sus materias primas, así como la implementación de nuevas tecnologías de conversión necesarias para modificar la estructura lignocelulósica en la etapa de pretratamiento y así favorecer la hidrólisis de los polisacáridos a monosacáridos fermentables [4].

### *Biocombustibles de tercera y cuarta generación*

Los biocombustibles de tercera generación son aquellos obtenidos a partir algas. Se ha considerado apropiar esta clasificación a las algas debido a los altos rendimientos en generación de combustibles partiendo de una cantidad menor en materia prima. Estos pueden generar gran diversidad de combustibles como la gasolina, el biodiésel, metanol, butanol, metano, aceite vegetal entre otros. Sin embargo, este tipo de producción requiere de condiciones muy controladas de temperatura, y la aplicación de fósforo [5]. La aplicación de biocombustibles de cuarta generación incluye la modificación genética de microalgas para la producción de energías renovables.

## 1.2. El Butanol como biocombustible

El butanol es también llamado alcohol n-butanol. Se utiliza como precursor químico para la elaboración de productos tales como disolventes de resinas naturales y sintéticas, revestimientos, disolvente de pinturas, lacas, gomas, tintes, aceites vegetales y alcaloides. También es empleado en la elaboración de detergentes [6].

Es un alcohol primario constituido por 4 carbonos cuya fórmula es  $C_4H_{10}O$ . Se trata de un líquido incoloro, inflamable, con olor característico. Su vapor irrita las membranas mucosas produciendo efectos secundarios en altas concentraciones. Tiene un punto de ebullición de  $117,7\text{ }^{\circ}C$  y un punto de fusión de  $-80,9\text{ }^{\circ}C$ . El butanol es una sustancia miscible en solventes orgánicos comunes y parcialmente miscible en el agua [7]. Además de esto posee el poder calorífico inferior más alto en comparación con otros combustibles, incluso el doble que el etanol, tal y como lo indica la tabla 2.

Tabla 2. Poder calorífico Inferior de los combustibles más empleados en (MJ/kg). Fuente: [8].

<i>Butanol</i>	45,684
<i>Diésel</i>	43
<i>Gasolina</i>	42,5
<i>Biodiesel</i>	37,2
<i>Etanol</i>	27,684

A través de los años y como resultado de estudios, el butanol se presenta como una interesante alternativa que permite superar muchas de las limitaciones del etanol como combustible, convirtiéndolo en uno de los combustibles clave del futuro [9]. En general éste presenta características lo suficientemente similares a la gasolina como para utilizarse en cualquier motor y sin ningún tipo de modificación; además, su carácter hidrófobo evita la absorción de agua y problemas de separación de fases. Al tener en cuenta las principales características de este material, el por qué debería ser considerado como una alternativa en la generación de biocombustibles lo dice por sí mismo, pues el

butanol presenta numerosas ventajas frente al etanol, quien ha sido junto con el biodiesel, los biocombustibles más desarrollados y utilizados en la actualidad.

Las ventajas que presenta el butanol como carburante con respecto al etanol consisten en que el primero alcanza un 96% de energía que el mismo volumen de gasolina, mientras que el etanol no supera el 75%. Puede ser usado en su forma pura o mezclado con cualquier concentración de gasolina, en una proporción mayor que el etanol y sin tener que hacer adaptaciones en los motores ni en los sistemas de transporte de hidrocarburos. El butanol es también menos corrosivo, y más seguro de manejar ya que tiene menor presión de vapor que el etanol, por lo que se puede mezclar directamente con la gasolina, ayudando a la ampliación de la vida útil de los materiales o equipos empleados para su manejo [10]. El etanol, butanol y diésel pueden ser producidos a partir de biomasa. Butanol y etanol se obtienen a partir de procesos biológicos de fermentación.

Este proceso fermentativo consiste básicamente en la producción biológica de butanol, a partir de algunas especies de microorganismos tales como las bacterias *Clostridium acetobutylicum* o *Clostridium beijerinckii*. Las especies más estudiadas en este caso pertenecen al género *Clostridium* ya que son capaces de convertir diversas fuentes de carbono, como la glucosa, xilosa y arabinosa, en combustibles líquidos como el butanol, etanol y sustancias químicas como la acetona.

### **1.3. Producción de biobutanol a partir de materiales lignocelulósicos**

A principios del siglo XX se desarrollaron diversos procesos microbianos para la producción de acetona utilizada en explosivos, mediante una fermentación llevada a cabo por la bacteria *Clostridium acetobutylicum* y que no sólo producía acetona, sino también butanol y etanol. Esta fermentación fue denominada como fermentación ABE, una producción biotecnológica de acetona, butanol y etanol, utilizada en numerosas plantas industriales hasta mediados del siglo XX, en el que fue desplazada por procesos de origen petroquímico. La crisis del petróleo en 1973 incentivó de nuevo el interés en alternativas de obtención de estas sustancias a partir de procesos biológicos. Las bacterias del género *Clostridium* son bacterias Gram-positivas, formadoras de endoesporas y anaerobias estrictas. Estas bacterias son fermentadoras por excelencia. Dependiendo del sustrato, la vía metabólica y la cepa, sintetizan una variedad de ácidos grasos, orgánicos y solventes. Entre los *clostridium* involucrados en la fermentación ABE se citan: *Clostridium beijerinckii*, *Clostridium acetobutylicum*, *Clostridium saccharobutylicum* [10].

El sustrato considerado para este cultivo comprende materia prima lignocelulósica en la producción de butanol de segunda generación a partir de plantas vegetales no comestibles asociadas a un bajo coste de generación. Los residuos lignocelulósicos tienen una compleja estructura que requiere de un enfoque más complejo para su producción. Dicho enfoque debe tener en cuenta la eficacia del hidrólisis de la hemicelulosa y celulosa, un factor importante en el proceso ya que así se obtendrá una buena producción de pentosas (xilosas, galactosas, arabinosas) y hexosas (glucosa, fructosa, sacarosa).

El proceso de obtención de butanol a partir de materiales lignocelulósicos consta de cuatro etapas principales: la etapa de pretratamiento, la etapa de hidrólisis enzimática, la etapa de fermentación y por último una etapa compleja de separación con varias operaciones (para la separación y purificación de productos a partir del caldo de fermentación).

El uso de materias primas lignocelulósicas en la producción de biocombustibles, requiere de una etapa de pretratamiento debido a que su estructura compleja dificulta el acceso de las enzimas debido a la protección que ejerce la lignina y a la cristalinidad de la celulosa [11].

El proceso de análisis que se llevará a cabo en este trabajo, comprenderá a escala industrial la construcción y operación de las tres primeras etapas exceptuando la etapa final de separación y purificación de los productos finales debido a su complejidad y extensión en el estudio del análisis de ciclo de vida.

### **1.3.1. La pulpa de remolacha como materia prima en la producción de biobutanol**

La remolacha azucarera es una especie agrícola con una elevada concentración de azúcares capaz de adaptarse a zonas marginales de cultivo. Debido a estas características es empleada para la producción de azúcar en países de la Unión Europea y Estados Unidos. Dentro de la UE, la producción de remolacha azucarera en España representa un 2,9 %, siendo el séptimo país productor de azúcar [12]. Para la producción de biocombustibles se puede utilizar como materia prima la pulpa de la remolacha, un subproducto que genera la industria azucarera. La producción de pulpa por tonelada de remolacha azucarera convertida oscila en 16% según el informe 2017 publicado por la compañía *Azucarera*, en el que destaca los rendimientos elevados de la producción de remolacha en la zona de norte de Castilla y León [13]. La pulpa de remolacha ha sido investigada como materia prima muy prometedora para la fermentación ABE, mediante fermentación con *Clostridium beijerinckii*. A pesar de que el contenido de lignina de este subproducto es bajo, se necesita de un pretratamiento para aumentar los rendimientos de liberación de azúcares fermentables en la hidrólisis enzimática [14]. Al ser un subproducto

importante, su utilización en la producción de biocombustibles es considerada de segunda generación, ya que no compite directamente con los cultivos alimentarios.

La composición de la pulpa de remolacha azucarera comprende un 20-25% de celulosa, 25-36% de hemicelulosa, 20-25% de pectina, 10-15% de proteína y 1-2% de lignina en peso seco. Su transformación a biobutanol requiere de técnicas de pretratamiento e hidrólisis enzimática para alterar significativamente la estructura y así liberar los azúcares simples, los cuales se usarán como sustrato para la producción de biobutanol en la etapa de fermentación. La fermentación de los hidrolizados enzimáticos produce acetona, butanol y etanol con una relación típica de fermentación ABE de (3:6:1), donde el butanol es el principal producto. [14]

Entre las bacterias *Clostridium*, figura el *Clostridium beijerinckii*, conocido por ser un interesante producto de butanol [15], ya que puede utilizar como sustrato tanto las hexosas como las pentosas liberadas después del hidrólisis enzimática para producir ABE. El uso eficiente del contenido de azúcar de la biomasa lignocelulósica es la clave para la viabilidad económica de la producción de biocombustibles [16].

## 1.4 Análisis de Ciclo de Vida

Un análisis de ciclo de vida es una metodología que estima y evalúa los impactos medioambientales que produce la fabricación, operación y desmontaje de un producto, proceso o actividad. Una producción siempre conlleva la aplicación de diferentes actividades y subprocesos de operación lo cual provocan impactos debido al consumo de recursos, sustancias y algunas modificaciones ambientales. Se trata de una herramienta diagnóstica utilizada también para la comparación de productos o servicios, con la posibilidad de indicar acciones de mejora en las diferentes etapas del proceso y su adecuación para disminuir impactos ambientales asociados. Para implementar esta herramienta lo primero que se debe realizar es la identificación y descripción de todas las etapas relacionadas en el ciclo de vida, desde la extracción de materia prima, preparación o adecuación de los flujos principales de entrada al sistema, la fase de producción y distribución del material hasta su disposición final [17]. Sus fases principales consisten en los siguientes puntos:

- ✓ La definición de objetivo y alcance de estudio: en un ACV no siempre se deben realizar todas las etapas relacionadas con el producto. Un ACV puede abarcar procesos explícitos, siempre y cuando se especifique el motivo de evaluación.
- ✓ Fase de preparación: por el que se incluyen las entradas y salidas. Esta fase comprende el inventario de ciclo de vida (ICV) donde se recogen todos los datos del

sistema. La idea es simplificar los datos, identificando las entradas de flujos y las salidas de emisiones o efluentes, tal y como muestra la figura 1.

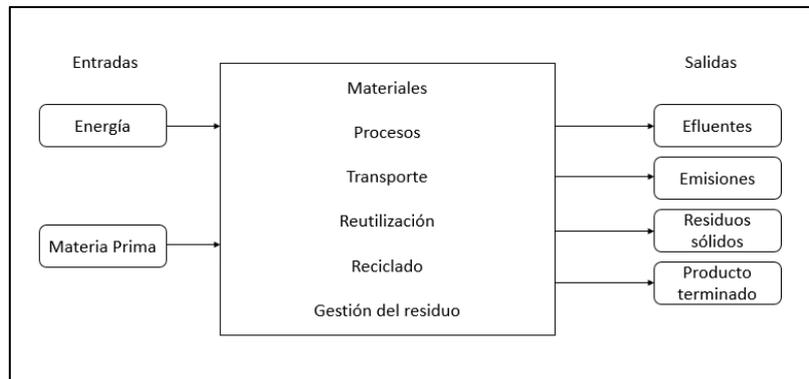


Figura 1. Visión general de un Inventario (ICV) en un producto. Fuente: Life04-ENV/GR/110.

- ✓ Definición y validación de datos: en esta fase, se escoge una unidad funcional para establecer los flujos de referencia que definirán la relevancia de los flujos de entrada y salida. Es muy importante definir muy bien esta valoración, debido a que los resultados darán la idea de los posibles impactos del sistema.
- ✓ Por último, la fase de interpretación y análisis de los resultados por el que se especifican los daños y problemas ambientales que conlleva la fabricación del producto.

## 1.5. Energía y desarrollo sostenible

El Desarrollo sostenible es uno de los conceptos más utilizados e implementados en todas las industrias del país que buscan equilibrar el crecimiento de su mercado con una política comprometida con el medio ambiente. La sensibilización que comprende la implementación de esta estrategia novedosa y de muy buen punto de partida, está ligada a los procesos de reciclaje, uso de las energías renovables, reducción de la contaminación, entre otros. El uso de las energías renovables está ligado al compromiso con el medio ambiente por países interesados en mejorar las condiciones actuales del planeta. Los objetivos de la Unión Europea en el marco del protocolo de Kioto para el 2020, fueron los de abastecer un 20% de la demanda energética con energía renovables y reducir un 20% de las emisiones de CO<sub>2</sub> referidas al año 1990. En marzo de 2006 la comisión presentó el “Libro verde sobre una estrategia europea para una energía sostenible, competitiva y segura” con el objetivo de presentar criterios y sugerencias que debían ser incluidos en una nueva política energética. Dentro de esas sugerencias, se destacaría “el establecimiento de un mix eléctrico sostenible, eficiente y de diversificado y un procedimiento integrado

para combatir el cambio climático”. Los programas de actuación presentados en dicha sugerencia enmarcan acciones de reducción del consumo de energías no renovables, una gestión sostenible de los recursos naturales y una lucha integrada contra la contaminación [18].

## 2. JUSTIFICACIÓN

La creciente importancia de los impactos ambientales asociados a la fabricación de biocombustibles, ha aumentado el interés por demostrar si su metodología contribuye o no significativamente al calentamiento global. A menudo surgen interrogantes de si se producen biocarburantes a favor del medio ambiente o se está produciendo impactos en igual o mayor proporción que la producción de carburante convencional. Para saber las proporciones del impacto de su fabricación, es necesario realizar un inventario completo en el que se incluyan todos los componentes y materiales. En él se analizan los aspectos significativos del sistema y se diseña un análisis del ciclo de vida para todo el proceso que convierte la biomasa en combustible. Con la ayuda de los programas de desarrollo sostenible en el ámbito energético, se pretende encontrar estrategias para disminuir los consumos de la transformación de biomasa y sus alternativas de producción. Los indicadores evaluados se aplican a las etapas del proceso de producción que contenga los consumos de mayor relevancia y los componentes ambientales significativos, excluyen la separación y recuperación del butanol debido a su extenso marco de referencia.

## 3. OBJETIVOS DE ESTUDIO

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de ciclo de vida que incluya todos los parámetros de construcción y operación, de la sección de fermentación, requeridos en la producción de biobutanol por fermentación ABE con la bacteria *Clostridium beijerinckii* a partir de pulpa de remolacha, con el fin de determinar qué etapa del proceso, pretratamiento, hidrólisis enzimática o fermentación tiene un mayor impacto ambiental, desde el punto de vista de contribución al cambio climático. Para ello se utilizarán diferentes metodologías de análisis de impactos (CML Baseline 2000, Eco-indicator 99, IMPACT 2002+) analizando y comparando los diferentes resultados que proporcionan, utilizando para ello el software SIMAPRO. Se pretende, asimismo, proponer soluciones de mejora mediante el uso de esta herramienta de análisis de impactos. El marco general para la realización de este ACV está basado en la norma UNE-ISO 14044:2006.

Para alcanzar este objetivo general se definen los siguientes **objetivos parciales**:

- 1) Realizar una búsqueda de información primaria y secundaria necesaria para la cuantificación de los impactos, así como realizar cálculos de estimación de materiales y equipos necesarios.
- 2) Desarrollar un modelo de ciclo de vida del proceso productivo para obtener 1 kg de butanol.
- 3) Analizar los resultados de las categorías de impactos ambientales que arrojan las diferentes metodologías de estudio (CML Baseline 2000, Eco-indicator 99, IMPACT 2002+) y escoger cuál de ellas es la más conveniente para el ACV.
- 4) Identificar la etapa de mayor impacto ambiental de la sección de fermentación.
- 5) Evaluar los resultados de impactos asociados a la producción de biocombustibles en la metodología escogida.
- 6) Implementar un análisis de sensibilidad en el que se propongan acciones de mejora para disminuir los impactos del ciclo de vida asociados a las calderas de vapor y sus flujos energéticos.
- 7) Para llevar a cabo este análisis de sensibilidad, plantear un escenario tecnológico que modifique la distribución del mix eléctrico español con una tecnología 100% basada en energías renovables y reducir vapor al 50% de su valor inicial.

## **4. ALCANCE DEL ESTUDIO**

### **4.1. Unidad Funcional**

La unidad funcional es un elemento definitivo para realizar ACV. En él se establece la medida de la función del sistema estudiado para referenciar los flujos de entrada y salida, lo cual permite la comparación de dos sistemas diferentes. La unidad funcional de este sistema se escoge en base a los kg de butanol producidos en la corriente de salida del fermentador. A partir de la bibliografía que se ha tomado como referencia para analizar el proceso de producción de biobutanol a partir de pulpa de remolacha [19], son necesarios 100 kg de pulpa de remolacha para producir 8 kg de Butanol durante una carga, lo que es igual a 0,00987 m<sup>3</sup> de butanol. Como se indica en la tabla 3 se establece como unidad funcional 1 kg de butanol a la salida del fermentador, lo cual significa que se debe recalculan los valores de flujos másicos, volumétricos y energéticos de todas las etapas del proceso, para calcular los correspondientes a 1 kg de butanol a la salida del fermentador.

Tabla 3. Unidad funcional del sistema.

DATOS BÁSICOS		
Pulpa de remolacha (kg)		
UNIDAD FUNCIONAL:	1	kg de butanol
Se escoge esta unidad funcional ya que el estudio sólo comprende la sección de fermentación. A la salida del fermentador, no se tendría butanol puro sino una mezcla de compuestos con una concentración de butanol de 0,8 % w/w.		

## 4.2 Límites del sistema

El análisis de ciclo de vida del proceso de producción de Biobutanol a partir de pulpa de remolacha se basará en la evaluación de las tres principales etapas propias de una fermentación ABE: **etapa de pretratamiento, etapa de hidrólisis enzimática y etapa de fermentación**. La etapa de separación del hidrolizado mediante centrifugación es una actividad adicional de la hidrólisis enzimática, necesaria para separar el hidrolizado enzimático del sólido agotado, tal y como se describirá más adelante. Se ha considerado su consumo energético en el análisis del proceso. No se tendrá en cuenta el transporte, almacenamiento, ni flujos y materiales de acondicionamiento de la biomasa previo al pretratamiento; tampoco se evaluará la cuarta etapa principal que comprende unidades de operaciones en separación y purificación de productos, así como los tratamientos de sus efluentes y la producción de gases en esta fase. La producción de gases durante todo el proceso, además del CO<sub>2</sub> producido en las calderas también tendremos en cuenta la corriente de generado en la fermentación. Se considerará el inventario ambiental relativo a la preparación del inóculo y la producción de enzimas para las etapas de fermentación e hidrólisis enzimática, respectivamente, en el que se tendrá en cuenta el gasto por equipos, la aplicación de nutrientes y energía. Se contemplará el estudio de las diferentes etapas del proceso teniendo en cuenta los límites establecidos para una escala industrial, teniendo en cuenta el tiempo de funcionamiento y la carga total de pulpa de remolacha. Dicho proceso será llamado “Sección de fermentación”, el cual se distingue de la “Sección de separación por destilación” que no será evaluada en este ACV. La tabla 4 nos resume los límites del sistema en el que se producirá biobutanol a partir de pulpa de remolacha en un periodo de vida útil de 10 años y cada año se trabajará 300 días.

Tabla 4. Procesos unitarios y periodos de las fases de construcción y operación de la planta.

LÍMITES DEL SISTEMA:			
Procesos Unitarios			
Pre-Tratamiento	Hidrólisis Enzimática	Separación	Fermentación
Fase de construcción y operación			
Periodo de trabajo (días)		300	
Periodo en (años)		10	

### 4.3. Simplificaciones y consideraciones de cálculo

- 1) En el sistema de mezclado se diseñan los agitadores asumiendo un espesor de paletas y disco en 5 cm. El diámetro de tubo de soporte de las turbinas tendrá 0,1 metros.
- 2) Los flujos energéticos de los agitadores de los reactores de hidrólisis y fermentación estarán calculados bajo la referencia en potencia de 0,4 kW necesarios por cada m<sup>3</sup> de reactor [20].
- 3) Se supone una vida útil de la planta de producción de Biobutanol de 10 años, con 300 días al año de trabajo.
- 4) La densidad del acero inoxidable de los equipos será de 7930 kg/m<sup>3</sup>.
- 5) La relación diámetro-altura de los equipos de reacción será de 1:1,2.
- 6) Los reactores de acondicionamiento y preparación del inóculo se asumen con unas dimensiones basadas en la relación (1/10) de volumen y energía con respecto a los reactores de fermentación.

### 4.4. Descripción del proceso. Diagrama de Flujo

La producción de biobutanol a partir de pulpa de remolacha comprende etapas de pretratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación, tal y como se ha indicado previamente y se describe detalladamente a continuación. La sección de separación y purificación de productos esta fuera del alcance del TFM, tal y como se ha comentado anteriormente.

Los datos de proceso (balances de materia y energía, condiciones de operación) necesarios para evaluar el impacto ambiental de este proceso se han tomado de bibliografía [14], [19].

#### **4.4.1. Pre-tratamiento hidrotérmico de pulpa de remolacha**

La primera etapa de pretratamiento tiene como objetivo alterar la estructura de la biomasa lignocelulósica para mejorar la capacidad de formación de azúcares en la hidrólisis enzimática. Dicha alteración consiste en “romper” las estructuras de la lignina y la hemicelulosa y/o aumentar la porosidad de la biomasa. Según investigaciones, es importante que el método de pretratamiento seleccionado sea eficiente debido a que en esta etapa se debe mejorar el rendimiento de la formación de azúcares fermentables, a la vez que evitar la degradación o la pérdida de los hidratos de carbono [19].

La pulpa de remolacha, tiene un elevado tamaño de partícula, por lo que la primera etapa es una reducción de tamaño. Por esto, se realiza inicialmente una molienda de aproximadamente 1 mm de grosor. La molienda de la pulpa requiere de un considerable gasto energético que depende directamente del tamaño final de las partículas. Posteriormente se mezcla con agua, en una proporción másica del 6%. El pre-tratamiento escogido en este proceso es hidrotérmico con un pH de 4.8 a 5. El flujo másico de agua es de 1666,67 kg/h, lo que sumado al flujo másico de pulpa en 100 kg/h crea un flujo másico de entrada (pulpa+agua) con un total de 1766,67 kg/h, que es calentado con vapor de 690 kPa hasta una temperatura de 120 °C, para ser introducido a un reactor de 550 litros con un tiempo de residencia de 10 minutos. Es indispensable mantener las condiciones de temperatura y presión del reactor durante el tiempo de reacción. La recuperación de la pulpa con respecto a la materia inicial introducida es del 85,3%. EL pH a la salida del reactor será de aproximadamente 4.2, por el que es necesario hacer un ajuste a pH 5 antes de la etapa de hidrólisis enzimática con un volumen de NaOH 6M.

#### **4.4.2. Hidrólisis Enzimática**

La etapa de hidrólisis enzimática es indispensable para la liberación de azúcares monoméricos necesarios para la fermentación. Esta hidrólisis de biomasa lignocelulósica es realizada con enzimas de tipo celulasas. Estas enzimas son catalizadores naturales altamente específicos obtenidos a partir de hongos de pudrición [19]. El diseño de la etapa de producción de enzimas se basa en informes técnicos publicados por el NREL (National Renewable Energy Laboratory of the US) sobre la conversión bioquímica de biomasa lignocelulósica a etanol. El proceso es considerado una “fermentación aeróbica” con el hongo *Trichoderma reesei* a partir de un cultivo con glucosa y agua dulce. Una pequeña

fracción de glucosa es convertida en soforosa, un potente inductor de la celulasa. Toda la información detallada del procedimiento que se debe llevar a cabo en la producción de enzimas de tipo celulasa, se recoge en el anexo [I] de este trabajo, y se ha tomado como referencia para evaluar los impactos de esta etapa.

Antes de que el material pretratado ingrese en el proceso de hidrólisis enzimática es indispensable ajustar su pH mediante la adición de 0,02 kg/h de NaOH y reducir la temperatura de 120°C a 50°C. El flujo másico de entrada será la mezcla del material pretratado (1766,67 kg/h) más el flujo de NaOH para ajuste de pH (0,02 kg/h) y el flujo del cóctel de enzimas con 5,91 kg/h, dando un flujo total de entrada de 1772,6 kg/h. La concentración de sólidos en la hidrólisis enzimática es de 5% (w/w), ingresando a dos reactores de acero inoxidable de 87 m<sup>3</sup> cada uno con un tiempo de reacción de 72 horas (3 días) y una agitación con turbinas de acero inoxidable a una velocidad de 175 rpm. Las reacciones que se producen en la etapa de hidrólisis, producen una disminución del pH de 5 a 4,3.

#### **4.4.3. Separación del hidrolizado**

La combinación de pretratamiento e hidrólisis enzimática recupera aproximadamente un 65% de los azúcares (glucosa, xilosa y arabinosa) contenidos en la pulpa de remolacha [19]. A continuación, se implementa una operación de centrifugación para separar dichos hidrolizados. El objetivo es separar la fase líquida (hidrolizado enzimático) del sólido (pulpa agotada) para luego aumentar su pH de 4,3 hasta 6, todo esto antes de alimentar el hidrolizado a la etapa de fermentación.

Para llevar a cabo esta etapa se ha seleccionado una centrífuga RINA serie 500 con diámetro de 300 mm, capacidad de 1,5 a 2,5 tonelada métrica por hora y potencia total de 15 kW. El flujo másico de entrada a la centrífuga es el mismo que a la etapa de hidrólisis, con un caudal de 1,76 m<sup>3</sup>/h.

#### **4.4.4. Fermentación**

Los hidrolizados de pulpa de remolacha constituyen la fase líquida resultante de la centrifugación, con ajuste de pH a 6 mediante la adición de NaOH 6M. Se prepara con anterioridad un inóculo con una concentración del 10% (v/v) de cultivo *Clostridium beijerinckii* en dos líneas de reactores de preparación previo a los fermentadores. En esta etapa, según la metodología descrita en la bibliografía [14] es necesario la adición de nutrientes en la siguiente concentración: 0,20 g/L de MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0,01 g/L de MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 0,1 g/L de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0,01 g/L de NaCl, junto con una solución tampón de acetato de compuesta por 0,50 g/L de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0,50 g/L de K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> y 2,20 g/L de acetato de amonio.

El inóculo se mantiene a 35 °C durante 24 horas. A escala industrial se implementará este procedimiento utilizando tres reactores de 1 m<sup>3</sup> en acero inoxidable para la preparación del medio de crecimiento y tres reactores de 10 m<sup>3</sup> antes de su inoculación en los fermentadores en la concentración deseada (10% v/v). El proceso de fermentación tiene lugar en tres fermentadores de acero inoxidable con un volumen de 100 m<sup>3</sup> cada uno, mediante condiciones anaerobias y a una temperatura de 35 ° C a pH 6. El flujo másico del fermentador será el flujo de salida del hidrolizado (1747,16 kg/h) más el flujo de NaOH (174,32 kg/h), dando un total de 1921,47 kg/h. El tiempo de reacción será de 120 horas (5 días), obteniéndose conversiones de azúcares del 86,5% y unos rendimientos de butanol de 8 kg por cada 100 kg de pulpa de remolacha.

La figura 2 muestra el diagrama de flujo del proceso analizado.

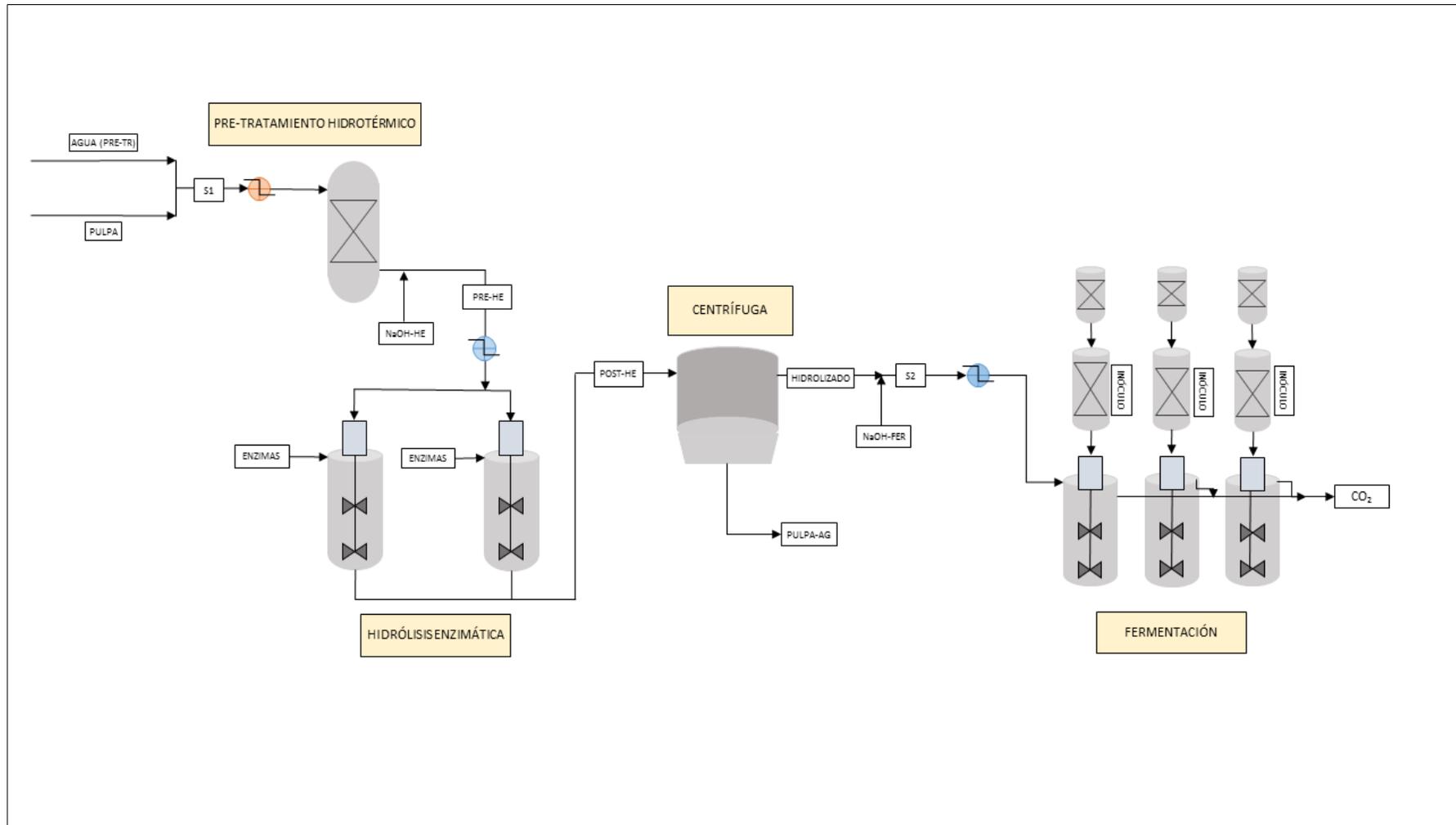


Figura 2. Diagrama de flujo de la sección de Fermentación del proceso de producción de biobutanol a partir de pulpa de remolacha a escala industrial.

## 4.5. Base de datos y Metodologías de evaluación

Este TFM está basado en el uso del software SIMAPRO versión (7.2), un programa desarrollado por la empresa holandesa *PréConsultants*, que permite realizar análisis de ciclo de vida mediante bases de datos de inventario propias y bibliográficas. La base de datos de este estudio será bibliográfica con las recopilaciones establecidas por *Ecoinvent*, una base de datos de inventario de ciclo de vida que proporciona datos de proceso documentados para una gran cantidad de productos, con el fin de evaluar los impactos ambientales relacionados a su fabricación o construcción. Se seleccionan los métodos de CML 2000, Eco-Indicator 99 (E) e IMPACT 2002+ para la evaluación comparativa de los impactos ambientales del ciclo de vida en la producción de biobutanol a partir de subproductos lignocelulósicos. La idea es analizar las categorías de impacto de cada uno, seleccionar los indicadores y detallar los impactos más significativos que comprendería dicho ciclo de vida. Los métodos seleccionados en este ACV, disponibles en el software SimaPro y adaptados a las normas de estandarización (ISO 14040:2006) e (ISO 14044:2006) contienen las siguientes definiciones:

### *CML 2 Baseline 2000:*

La metodología del (Centro de estudios Medio Ambientales de la Universidad de Leiden, NL, 2000) entre otras metodologías, proporciona medidas potenciales para el daño medioambiental de emisiones mediante factores de equivalencia apropiados a compuestos de referencia seleccionados. Sus indicadores se basan en el establecimiento de los potenciales de calentamiento global, acidificación, eutrofización, la formación de ozono troposférico y smog fotoquímico. En este y todos los casos se deben seleccionar las categorías de impactos más adecuadas con respecto al objetivo de la evaluación [21]. Los impactos calculados se clasifican como potenciales en vez de reales, ya que se cuantifican en la posición intermedia entre el punto de intervención ambiental y el daño causado [22].

### *Eco-Indicator 99 (E):*

Este es método de análisis de daño o efecto que modela el daño producido por emisiones y finalmente realiza un análisis de daños. Permite estimar el daño ponderado desde tres modelos: el jerárquico, individualista y el igualitario. Sus categorías de impacto más importantes son: Human Health, Ecosystem quality y Resources. Sin embargo, contiene categorías de impacto como ozone layer, radiation, acidification/eutrophication para casos que sean de estudio aplicable [23]. De las tres categorías de impacto consideradas se obtiene un indicador. Los pasos de esta metodología están descritos en la figura 3.

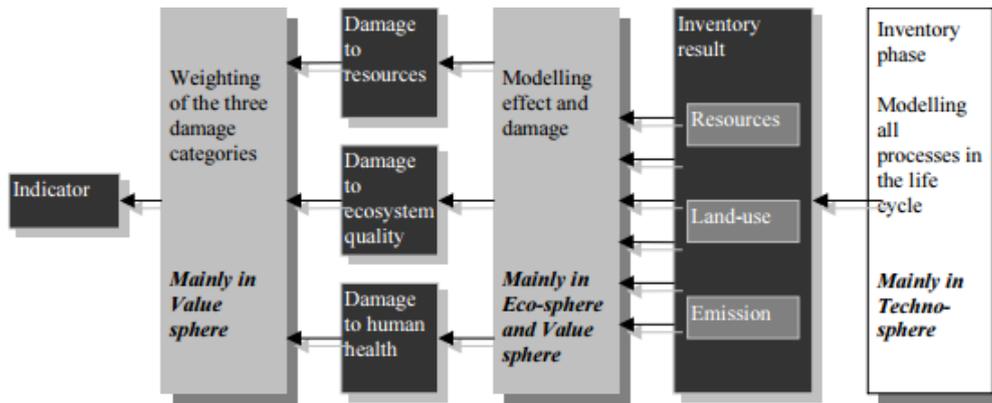


Figura 3. Concepto central de la metodología Eco-Indicator 99. Fuente: [24].

### IMPACT 2002+:

Es un método orientado a los daños, con semejanza a los dos métodos mencionados, pero con los factores de toxicidad totalmente recalculados. Sus categorías de impactos se simplifican en daños ocasionados por categorías de Human Health, Climate Change, Ecosystem Quality y Resources según lo resume en la figura 4. Tiene categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización aceptados internacionalmente [23].

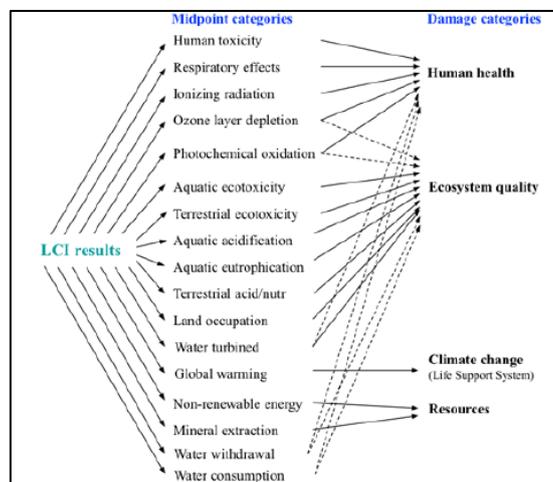


Figura 4. Simplificación de categorías en Impact 2002+. Fuente: [25].

El CML 2000 es una metodología con un planteamiento enfocado a los problemas ambientales, mientras que la metodología Eco-indicador 99 e IMPACT 2002+ son metodologías de planteamientos orientados a los daños causados, éste último contiene más categorías de daño con respecto a los anteriores.

Antes de iniciar la evaluación de ACV, se debe escoger las categorías de impacto y el modelo de caracterización para que el estudio sea coherente con los objetivos. En este

TFM se seleccionarán las categorías correspondientes a la emisión de gases de efecto invernadero en su contribución al cambio climático. La referencia de esta categoría viene dada en el ámbito de la convención marco del compromiso de reducción de emisiones adquirida en el año 2008 que comprende el *Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático 2013-2020* en España. Durante la evaluación de impactos es importante conocer algunos detalles de la norma [26] y características de funcionamiento del software para la interpretación de resultados. En la interpretación de resultados, se debe tener en cuenta el enfoque de la metodología escogida. La diferencia entre ellas se encuentra en las categorías de impacto y su indicador final, dentro del software SimaPro hay definidos dos enfoques metodológicos:

- *Enfoque de punto medio*

Es un enfoque orientado al problema. El término de punto medio se refiere al indicador para cada categoría de impacto. Este traduce la categoría de impacto en fenómenos reales como el cambio climático, la acidificación, la toxicidad acuática entre otros [27].

- *Enfoque de punto final*

Este enfoque es conocido por estar orientado a daños. El término “Punto final” se refiere a un indicador final de categoría para cada categoría de impacto. El indicador final traduce el impacto de la categoría, en función de “Human Health”, “Ecosystem Quality”, “Resources” [27]. En el método de IMPACT 2002+ aparece un indicador de “Climate Change”. La siguiente tabla 5 muestra cuáles de los métodos estudiados hace parte de los diferentes enfoques. [27]

Tabla 5. Enfoques de las metodologías aplicadas.

Método de Punto Medio	Método de Punto Final
USEtox	Eco-indicator 99
IPCC 2007	Impact 2002+
CML IA	EPS 2000

Elementos obligatorios de la fase EICV

La normativa [26] define que la Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida está constituido por elementos obligatorios y opcionales, así:

<b>Caracterización:</b> elemento obligatorio
<b>Normalización:</b> elemento opcional
<b>Ponderación y puntuación única:</b> elemento opcional

La “*Caracterización*”, se escala a 100% en las diferentes “Categorías de Impacto Ambiental”. El objetivo de una caracterización es aplicar modelos a las categorías de

impacto para obtener indicadores. Esto consiste en agrupar todos los valores de las cargas ambientales que forman una categoría de impacto y establecer un valor global [18].

En la “Normalización” se puede tener una escala de medición más precisa. Los resultados normalizados demuestran qué impactos contribuye de forma significativa un problema ambiental global o el orden de magnitud de los problemas ambientales generados por el ciclo de vida comparado con el total de impactos en Europa. Cabe destacar que *Ecoinvent* es una base de datos de referencia en Europa [18]. El objetivo de la normalización es el de comparar categorías de impacto con las mismas unidades ya que dichas categorías contienen diferentes unidades y que no todas provocan los mismos efectos o daños. Los elementos de *ponderación y puntuación única* no se evaluarán en este ACV. Las tablas 6 y 7 muestran la clasificación de categorías con su respectivo indicador de daños para las metodologías Impact 2002+ y Ecoindicador 99.

Tabla 6. Clasificación de categorías de impactos en daños ocasionados de la metodología IMPACT 2002+.  
Fuente: [25]

CATEGORÍA DE IMPACTO	DAÑO O EFECTO
Toxicidad humana (Carcinógenos +No carcinógeno)	<b>Human Health</b> (Salud Humana)
Efectos respiratorios (Inorgánicos + Orgánicos)	
Radiaciones ionizantes	
Reducción de la capa de ozono	
Eco toxicidad acuática	<b>Ecosystem Quality</b> (Calidad del ecosistema)
Eco toxicidad terrestre	
Acidificación y eutrofización terrestre	
Ocupación del terreno	<b>Climate Change</b> (Cambio Climático)
Calentamiento global (GW)	
Extracción de minerales	<b>Resources</b> (Agotamiento de los recursos naturales)
Energías no renovables	

Tabla 7. Clasificación de categorías de impactos en daños ocasionados de la metodología Eco-Indicator 99.  
Fuente: (INTECH, 2012)

CATEGORÍA DE IMPACTO	DAÑO O EFECTO
Carcinógenos	<b>Human Health</b> (Salud Humana)
Efectos respiratorios (Inorgánicos + Orgánicos)	
Radiaciones ionizantes	
Cambio climático	
Reducción de la capa de ozono	<b>Ecosystem Quality</b> (Calidad del ecosistema)
Eco toxicidad	
Acidificación/Eutrofización	
Ocupación del terreno	<b>Resources</b> (Agotamiento de los recursos naturales)
Extracción de minerales	
Combustibles fósiles	

## 4.6. Mix eléctrico

En España, el *Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética de 2010-2022* indica que el consumo de energía primaria del año 2010 tuvo un incremento después de la disminución récord de 8,3% (con respecto a 2008) que se registró causado por la crisis, lo cual representa una recuperación leve de la demanda energética. Sin embargo, este declive supuso una alteración de la demanda energética y la estructura de sus fuentes, lo cual sostiene que las únicas fuentes cuyas demandas que no decaen son las energías renovables y ha puesto en crecimiento su cobertura en la demanda de energía primaria. Un “mix eléctrico” se describe como la combinación de diferentes fuentes de energía existentes, utilizadas para cubrir la demanda energética de un país [28]. Tres de las fuentes renovables orientadas a las soluciones ambientales de este estudio sería la producción de energía fotovoltaica, hidroeléctrica y cogeneración con biomasa. El mix de producción de energía en España se encuentra actualmente distribuido con un porcentaje de energías renovable del 39%, según el balance energético [29]. La distribución del mix energético español en el año 2016 se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Distribución del mix energético de España del año 2016. Fuente: REE y UNESA.

Energía integrada “MIX”	
Nuclear (21,4%)	Eólica (18,2%)
Hidráulica (14,9%)	Carbón (14,3%)
Gas natural (11,2%)	Cogeneración y residuos (11,1%)
Solar fotovoltaica (3%)	Otras renovable (1,3%)

El concepto de energía no contaminante se ha estado introduciendo gracias a los objetivos de desarrollo sostenible que enmarca la *Organización de las Naciones Unidas* con el propósito de reducir los gases de efecto invernadero, el mayor contribuidor del cambio climático. Recordemos que los gases de efecto invernadero los comprende el dióxido de carbono, óxido nitroso, vapor de agua, metano, los clorofluorocarbonos, entre otras sustancias. Los países y las grandes multinacionales pueden transformar totalmente este concepto invirtiendo en recursos energéticos renovables, implementando tecnologías e infraestructuras de priorización en las prácticas de alto rendimiento energético. Uno de los conceptos de priorización para el compromiso de las empresas, es el de desarrollar fuentes de bioenergía, o el de satisfacer el 100% de sus necesidades operacionales en energía a partir de fuentes renovables como la hidroeléctrica, biomasa, fotovoltaica, eólica u otras [30].

## 4.7. Datos de proceso

Los datos de partida para este estudio por el que se diseña un ACV en SimaPro son tomados del TFG “Evaluación tecno-económica de la producción de biocombustibles oxigenados a partir de subproductos industriales” el cual proporciona resultados de la simulación de la producción de Biobutanol mediante la fermentación ABE a partir de pulpa de remolacha utilizando el software *Aspen Plus* [19]. Los resultados del modelado y simulado, han demostrado que a partir de 100 kg/h de pulpa se pueden obtener 8 kg/h de butanol a la salida del fermentador. Se ha tomado como unidad funcional para la medida en función de este estudio obtener 1 kg/h de butanol a la salida del proceso y así establecer los flujos de referencia que se evaluarán por medio del software SimaPro. Como se ha mencionado, la planta de producción estará funcionando durante 10 años, 24 horas al día durante 300 días al año. Esto quiere decir que, de los 100 kg de pulpa requeridos para obtener 8 kg de butanol, se necesitarán un total de 7.200 toneladas de pulpa durante los 10 años de operación. La tabla 9 nos detalla la relación butanol/pulpa en el que el 8% equivale a butanol, por lo que en vida útil obtendremos 576.000 kg de butanol, es decir, 711,1 m<sup>3</sup>.

Tabla 9. Datos para establecer flujos de referencia.

DATOS BÁSICOS								
Pulpa de remolacha (kg)			100	Butanol a la salida (kg)			8	
UNIDAD FUNCIONAL:	1	kg de butanol	kg de pulpa/cada kg de butanol:	12,5	kg de pulpa en vida útil:	7200000	kg de butanol obtenido en vida útil	576000

Se ha considerado un tiempo de reacción de la etapa de pre-tratamiento de 10 minutos. Los datos de preparación y producción de enzimas se determinaron a partir de los resultados del informe técnico publicado por el NREL (*Laboratorio Nacional de Energías Renovable de US*) para la producción de etanol y otros combustibles líquidos a partir de materia prima lignocelulósica que describe en el *área 400* la producción de enzimas de tipo celulasas. Dicho informe detalla los parámetros básicos de diseño partiendo de una carga de celulasa de 20 mg de proteína por cada gramo de celulosa en materia prima [31] y una demanda total de proteína de 490 kg/h. La tabla 10 resume los datos tenidos en cuenta para el análisis de inventario de este ACV.

Tabla 10. Guía de diseño de biorreactores para la preparación de enzimas. Fuente: [31].

Parámetros	
Carga de proteínas en HE	20 mg proteína/g celulosa
Volumen del reactor	300.000 L
NH <sub>3</sub>	7 g/L
SO <sub>2</sub>	0,6 g/L
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,4 g/L
K <sub>3</sub> O <sub>4</sub> P	2 g/L
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,3 g/L
CaCl <sub>2</sub>	0,4 g/L
Total, energía / kg de proteína	9 kWh/kg

La sección “*Microorganismos y preparación de inóculo*” del artículo [14] describe el procedimiento que se lleva a cabo para la preparación del inóculo del microorganismo *C. beijerinckii*. Dicho microorganismo se mantiene en una solución de reserva en condiciones anaerobias para ser transferido a un medio de crecimiento compuesto de una solución de azúcar. Para el medio de crecimiento se ha considerado la importancia del gasto que demanda la utilización de nutrientes, en especial de soluciones con fosfato (PO<sub>4</sub>). El inóculo se prepara y se mantiene a 35 °C durante 24 horas.

La energía consumida en los sistemas de agitación para los reactores es obtenida a partir de las especificaciones del libro de Bailey y Ollis, *Biochemical Engineering Fundamentals* el cual dice que un agitador para grandes volúmenes requiere de 0,4 kW de potencia por cada m<sup>3</sup> de fermentador [20].

Los parámetros iniciales más importantes utilizados para la simulación del proceso, se establecen en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros y condiciones especiales de entrada a las diferentes etapas. Fuente: [19].

Etapa	Parámetros	Datos
Alimentación	Materia prima	Pulpa de remolacha
	Flujo másico (kg/h)	100
PRE-TR (Pre-tratamiento)	Agente	Agua
	Carga de sólidos (%w/w)	6
	Temperatura (°C)	120
	Tiempo de reacción (min)	10
	Presión (bar)	1
	(%) Recuperación de sólidos	85,32
Ajuste de pH	Agente básico	NaOH 6M
	pH inicial	4,2
	pH final	5

HE (Hidrólisis Enzimática)	Carga de sólidos (%w/w)	5
	Temperatura (°C)	50
	Tiempo de reacción (h)	72
	Cóctel enzimático	Tabla 7.
	Presión (bar)	1
Ajuste de pH	Agente básico	NaOH 6M
	pH inicial	3,3
	pH final	6
FER (Fermentación)	Temperatura (°C)	50
	Microorganismo	Clostridium beijerinckii
	Tiempo de reacción (h)	120
	Inóculo % (v/v)	10
	Presión (bar)	1

Los parámetros de operación de los requerimientos energéticos más importantes utilizados para la simulación del proceso, se encuentran en las tablas 12 y 13. Sus unidades son de potencia.

Tabla 12. Parámetros de operación en gasto energético de reactores. Fuente: [19].

Nombre	Unidades	Datos
Reactor PRE-TR	STEAM (kW)	58,19
Reactor HE	REFRI (kW)	16,97
Reactor FER	REFRI (kW)	26,083

Tabla 13. Parámetros de operación en gasto energético de intercambiadores de calor. Fuente: [19].

Nombre	Unidades	Datos
Inter PRE-TR	STEAM (kW)	195,33
Inter HE	REFRI (kW)	138,08
Inter FER	REFRI (kW)	27,38

#### 4.7.1. Balances de materia: Flujos másicos y volumétricos

Los flujos másicos y volumétricos de entrada y salida para cada etapa, vienen relacionados en la tabla 14.

Tabla 14. Flujos de entradas y salidas de las diferentes etapas simuladas por Aspen Plus. Fuente: [19].

Pretratamiento	Agua PRE-TR	Pulpa	S1	Post-(PRE-TR)
Flujo TOTAL (kg/h)	1666,7	100	1766,67	1766,67
Hidrólisis Enzimática	NaOH-HE	Pre-HE	Enzimas	Post-HE
Flujo TOTAL (kg/h)	0,02	1766,69	5,91	1772,6
Centrifugado	Pulpa-Ag	Hidrolizado		
Flujo TOTAL (kg/h)	25,44	1747,16		
Fermentación	NaOH-FER	S2	Pre-FER	Post-FER
Flujo TOTAL (kg/h)	174,32	1921,47	1921,47	1921,47
	CO <sub>2</sub>			
	21,313			
Flujo TOTAL (m <sup>3</sup> /h)	Water cooling			
	12,813			

## 5. ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

Un análisis de inventario permite la identificación y evaluación de las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida de una actividad o producto. Antes de iniciar dicho análisis es importante identificar las repercusiones en el medio natural una vez puesta en construcción y funcionamiento. Según la norma UNE-EN ISO 14044:2006, cuando se ejecuta un plan para el análisis del inventario de ciclo de vida, es necesario realizar las actividades que se describen en la figura 5. Básicamente se refiere a que en el momento de determinar los límites del sistema estudiado se debe recopilar los datos cualitativos o cuantitativos para cada proceso unitario, éstos cuantificarán las entradas y salidas del proceso. Dichas entradas y salidas deben incluir consumos de energía y materia prima, entradas auxiliares, productos, residuos, emisiones a la atmósfera, vertidos y suelo, junto con otros aspectos ambientales significativos. Deberá incluir un cálculo y verificación de datos en el que se deba relacionar los resultados de la verificación con la unidad funcional para incluirlos en este caso en el software SimaPro. Se debe tener en cuenta los procesos de recuperación para situaciones de reutilización y reciclado.

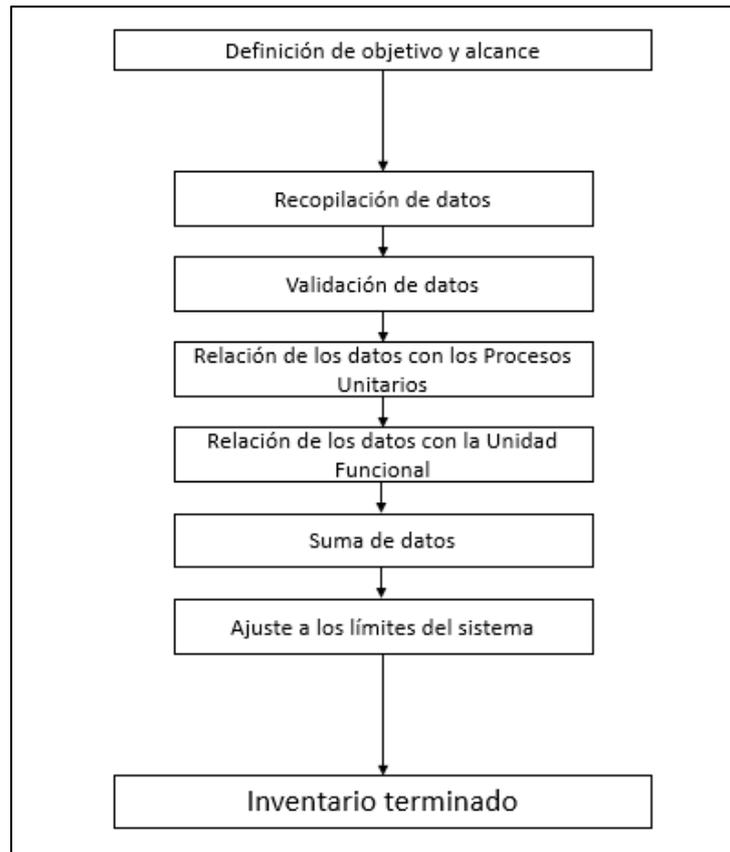


Figura 5. Procedimiento del análisis de inventario. Especificaciones de la norma. Fuente: [26].

En este proceso productivo va a ser necesaria la fabricación de reactores con materiales adecuados. Durante el inventariado de este proceso se especificará los diferentes parámetros a tener en cuenta, los equipos y sus gastos significativos. Estos datos fueron calculados según las especificaciones de la tabla 14 y se pueden observar en el anexo [I] la memoria de cálculo de este TFM.

## 5.1. Especificaciones del dimensionamiento de equipos

Este apartado comprende las especificaciones técnicas de los equipos que se diseñan para el proceso de producción. Los volúmenes y la cantidad de material necesario para su construcción, se han estimado a partir del tiempo hidráulico de residencia, teniendo en cuenta el caudal de alimentación de los reactores. Las tablas 15 a la 20 describen las dimensiones y algunas especificaciones de diseño de los reactores utilizados para toda la sección de fermentación. La información detallada de cálculo puede encontrarse en el Anexo [I] de este TFM.

### 5.1.1. Dimensionado de reactor de Pre-tratamiento

- ✓ Relación Inicial (Diámetro: Altura) = 1: 1,2
- ✓ Diseño del reactor = Forma cilíndrica con tapa y fondo semiesférico.
- ✓ Sin agitación.

Tabla 15. Especificaciones del reactor de pretratamiento.

Elemento	Descripción
Tapa y fondo	(2) Tapas semiesféricas de acero inoxidable serie 304.
	Radio de 0,36 m y espesor de 2 mm
	Sin orificios
	Sin agitadores
Tanque	Tanque cilíndrico de acero inoxidable serie 304
	Espesor de 2 mm
	Diámetro de 0,725 m y espesor de 2 mm
	Volumen del reactor 0,54 m <sup>3</sup>
	Presión 1 bar
	Altura de 0,86 m
	(1) Reactor

### 5.1.2. Dimensionado de reactores de Hidrólisis Enzimática

- ✓ Relación Inicial (Diámetro: Altura) = 1: 1,2
- ✓ Diseño del reactor = Forma cilíndrica con tapa plana y fondo semielíptico.
- ✓ Con agitación.

Tabla 16. Especificaciones del reactor de Hidrólisis.

Elemento	Descripción
Tapa	(1) Tapa plana de acero inoxidable serie 304.
	Diámetro de 4,25 m y espesor de 6 mm
	Con orificios
Fondo	(1) Fondo semielíptico de acero inoxidable
	Altura de la elipse de 1,08 m
	Espesor de 13 mm
Tanque	Tanque cilíndrico de acero inoxidable serie 304
	Espesor de 13 mm
	Diámetro de 4,35 m
	Volumen del reactor 87 m <sup>3</sup>
	Presión 1 bar
	Altura de 5,2 m
	(2) Reactores
Agitadores	Tipo turbina Rushton de 4 paletas

	(1) Disco, (1) soporte
	(2) turbinas por reactor para homogeneización
	Demanda energética tomada por cada 0,4 kW/m <sup>3</sup>

### 5.1.2.1 Reactor de preparación de enzimas

El reactor de preparación de enzimas también hace parte del diseño. Los gastos que demanda esta actividad influyen significativamente en la etapa de hidrólisis. La tabla 17 describe las especificaciones, entre ellas volumen total de biorreactores utilizados para la preparación de enzimas, tomadas del artículo [31].

Tabla 17. Especificaciones del biorreactor para la Producción de Enzimas.

Características	Unidades	Datos
Volumen	m <sup>3</sup>	0,4898
Diámetro	m	0,854
Altura	m	1,025
Temperatura	° C	28
Presión	bar	1
Fondo	Semielíptico	
Tapa	Plana	

### 5.1.3. Dimensionado de la centrífuga

La centrífuga es el equipo que separa las fracciones sólidas y líquidas del material hidrolizado que sale al finalizar la etapa de hidrólisis enzimática. La elección de esta centrífuga viene dada por sus especificaciones técnicas. El caudal de salida de la etapa de hidrólisis es de aproximadamente 1,74 m<sup>3</sup>/h, lo que apoya el rendimiento de la centrífuga RINA serie 500 de la tabla 18 es su rendimiento de 1,5 a 2,5. Haciéndola ideal para la producción.

Tabla 18. Especificaciones de la centrífuga de la etapa de Separación.

Especificaciones técnicas					
CENTRÍFUGA RINA Serie 500					
Modelo	Ø máx. cesto	Rendimiento	Potencia	Peso	Medidas
	mm	Tm/h	kW	kg	mm
500F300	300	1,5-2,5	15	950	1000x1500x2000

### 5.1.4. Dimensionado Reactores de Fermentación

- ✓ Relación Inicial (Diámetro: Altura) = 1: 1,2
- ✓ Diseño del reactor = Forma cilíndrica con tapa plana y fondo semielíptico.
- ✓ Con agitación.

Tabla 19. Especificaciones del reactor de Fermentación.

Elemento	Descripción
Tapa	(1) Tapa plana de acero inoxidable serie 304.
	Diámetro de 4,58 m y espesor de 7 mm
	Con orificios
Fondo	(1) Fondo semielíptico de acero inoxidable
	Altura de la elipse de 1,14 m
	Espesor de 15 mm
Tanque	Tanque cilíndrico de acero inoxidable serie 304
	Espesor de 15 mm
	Diámetro de 4,6 m
	Volumen del reactor 100 m <sup>3</sup>
	Presión 1 bar
	Altura de 5,5 m
	(3) Reactores
Agitadores	Tipo turbina Rushton de 4 paletas
	(1) Disco, (1) soporte
	(2) turbinas por reactor para homogeneización
	Demanda energética tomada por cada 0,4 kW/m <sup>3</sup>

#### 5.1.4.1. Reactores de preparación de inóculo

También se incluyen los reactores para preparar inóculos. Su diseño va ligado a las dimensiones de los reactores de fermentación. Los volúmenes y el número de reactores empleados en esta actividad se describen en la tabla 20.

Tabla 20. Especificaciones de reactores de preparación de inóculo en la etapa de fermentación.

Características	Unidades	Reactor	
		Acondicionamiento	Preparación
Volumen	m <sup>3</sup>	9,0643	0,9064
Cantidad de reactores		3	3
Tapa y Fondo		Elíptica	

## 5.2. Inventario de ciclo de vida (ICV)

El siguiente inventario se ha calculado para obtener 8 kg de butanol. En él se incluyen la cantidad de acero inoxidable, los flujos másicos y volumétricos de entradas y salidas, los gastos energéticos demandados por cada etapa, la ocupación total de la planta de producción y por último los flujos de referencia que se deben incluir en el software. La necesidad de material viene dada por los reactores, centrífuga, los agitadores y sus motores. La tabla 24 contiene los flujos de referencia que corresponden a la producción de 1 kg de butanol en la salida del fermentador, a incluir en SimaPro. Los flujos de entrada y salida para cada etapa del proceso de las tablas 21, 22 y 22 comprenden los gastos energéticos y los diferentes componentes de adecuación del proceso para 8 kg de butanol.

### 5.2.1. Materiales: Acero inoxidable correspondiente a 8 kg de Butanol

Los kg de acero inoxidable de la tabla 21 comprenden el total de acero necesario para la fabricación de reactores más el material requerido por los agitadores y motores.

Tabla 21. kg de Acero inoxidable en toda la producción.

Acero Inoxidable		
Pre-tratamiento	kg	57
Hidrólisis enzimática		23000
P. Enzimas		404
Centrífuga		950
Fermentación		44000
P. Inóculo		5000
TOTAL (kg)		<b>73411</b>

### 5.2.2. Balances de materia y energía: Flujos de correspondientes a 8 kg de butanol

Los siguientes flujos corresponden a balances de materia y energía calculados para la producción de biobutanol a partir de 100 kg de pulpa de remolacha.

### 5.2.2.1. Energía eléctrica (kWh)

La tabla 22 relaciona la energía eléctrica consumida en las actividades que se desarrollan en cada etapa del proceso. A continuación, se detallan los gastos energéticos para la sección de fermentación. Los datos resultados se establecen en unidades de potencia y se calculan a electricidad.

Tabla 22. Energía de entrada a las etapas del proceso.

Etapa	kW	kWh
Pretratamiento	63,3	7,91
Hidrólisis		
Fermentación		
Separación		
Preparación de enzimas	7,2	0,90
Agitadores HE	69,7	8,71
Agitadores FER	123,8	15,48
<b>TOTAL, ENERGÍA (kWh)</b>	<b>264</b>	<b>33</b>

### 5.2.2.2. Necesidades de agua, vapor, nutrientes, regulador pH, gases y refrigerante correspondientes a 8 kg de butanol

Los flujos máxicos de la tabla 23 se relacionan con los datos iniciales de la tabla 14. Sin embargo, para este análisis es necesario identificar todos los flujos de entradas y salidas que se involucren en el sistema y puedan generar impactos ambientales. Los flujos máxicos añadidos fueron calculados a partir de los datos simulados en [19], entre ellos están: vapor de 690 y 380 kPa, fosfato (PO<sub>4</sub>) como nutriente de FER, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como flujo residual de FER y las aguas de refrigeración (water cooling) de los intercambiadores de calor en HE y FER.

Tabla 23. Flujos de materiales de la sección de fermentación.

FLUJOS MÁXICOS			
Pretratamiento	Agua de proceso	kg/h	1666,67
	Vapor 690 kPa		340
P.Enzimas	Amonia		12,4
	SO <sub>2</sub>		1,06
	Ammonium sulfate		2,48
	Potassium Phosphate		3,55
	Magnesium sulfate		0,53
	Calcium chloride		0,71

Hidrólisis	NaOH		0,02
Separación	Pulpa agotada		25,44
P. inóculo	Fosfato (PO <sub>4</sub> )		2,16
Fermentación	Vapor 380 kPa		1,25
	NaOH		174,32
	CO <sub>2</sub>		21,313
<b>FLUJO VOLUMÉTRICO</b>			
Fermentación e Hidrólisis	Water cooling TOTAL	m <sup>3</sup> /h	12,813

### 5.2.3. Ocupación de la planta (m<sup>2</sup>)

Las instalaciones de la planta de producción de biobutanol comprenderá un área distribuida de:

- 1) Superficie ocupada por los equipos de la sección de fermentación: intercambiadores de calor, reactores, centrífuga, mezclado de flujos, entre otros equipos. La distancia aproximada entre cada equipo está estimada en 3 metros de equipo a equipo y 4 metros de equipo a pared.
- 2) Zona de almacenamiento de materia prima y pesaje.
- 3) Superficie de área administrativa y parqueo de vehículos
- 4) Almacenamiento del caldo de fermentación.
- 5) Caldera para la producción de vapor

Estas instalaciones ocuparán un área total de 1500 m<sup>2</sup>. El producto representativo de esta superficie en el software SimaPro se encontrará como “*Wastewater treatment plant, clase 4*”. Este producto representa el impacto de construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual se toma como referencia para la planta de producción de biobutanol en este ACV.

### 5.2.4. Flujos de referencia para 1 kg de butanol

La tabla 25 contiene los flujos de referencia en cada proceso de producción según sus unidades (energía, máxicos, volumétricos y piezas). Estos datos son introducidos en el software con el fin de simplificar la información basados a una unidad funcional. Las tablas anteriores son datos de gastos calculados a 100 kg de pulpa de remolacha convertida. La unidad funcional (1 kg de butanol) requiere de 12,5 kg de pulpa de remolacha para su producción. Por lo que es necesario recalcular los consumos correspondientes a 8 kg de butanol a 1 kg de butanol a la salida.

Tabla 24. Flujos de referencia para SimaPro.

FLUJOS DE REFERENCIA			
Energía			
Energía PROCESO PRE-TR	3,2	33	kWh/kg Butanol
Energía PROCESO HE	9,4		
Energía PROCESO FER	19,1		
Energía PROCESO SEP	1,88		
Flujos másicos de entrada y salida			
Flujo PROCESO PRE-TR	Agua	208,33	kg/kg Butanol
	Vapor 690 Kpa	42,5	
Flujo PROCESO HE	NH <sub>3</sub>	1,551	
	SO <sub>2</sub>	0,133	
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,31	
	K <sub>3</sub> O <sub>4</sub> P	0,443	
	MgSO <sub>4</sub> - 7H <sub>2</sub> O	0,066	
	CaCl <sub>2</sub>	0,089	
	NaOH	0,003	
Flujo PROCESO SEP	Pulpa agotada	3,18	
Flujo PROCESO FER	NaOH	0,343	
	Fosfato	0,27	
	Vapor 380 kPa	1,25	
	CO <sub>2</sub>	2,664	
	Water cooling	1601,625	
Número de piezas de equipos			
Equipos	Unidades	Flujo referencia	Pieza/kg Butanol
Reactor de PRE-TR	1	1,74E-06	
Reactor de HE	3	5,21E-06	
Centrifuga	1	1,74E-06	
Reactor de FER	9	1,56E-05	
Ocupación de Planta	1	1,74E-06	

## **6. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA (EICV)**

La primera fase de evaluación consta de una comparativa de metodologías en la que se pretende determinar cuál de los resultados de los cálculos es el más conveniente para identificar indicadores de cambio climático. Para determinarlo, primero se analizan los resultados de las categorías de impacto (caracterización) y adicionalmente una categoría de referencia (normalización). La categoría principal escogida para este ACV es la de “*Global Warming*” con resultados en kg de CO<sub>2</sub> eq por unidad funcional. Los impactos mayores deberían ser a causa de la emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo, no quiere decir que no se produzcan otros impactos mayores relacionados con vertidos, emisión de otro tipo de gases y el consumo de recursos naturales. La segunda fase consiste en la evaluación de la etapa y componentes que producen mayores impactos durante la producción de biobutanol. El propósito es determinar las causas por las que esta etapa influye significativamente en el ciclo de vida del producto.

### **6.1. Comparativa de Metodologías**

Las gráficas comparativas ayudarán a determinar qué etapas del proceso generan mayores impactos con respecto a la categoría escogida.

#### **6.1.1. CML 2 Baseline 2000**

Contiene 10 categorías de impactos y el uso de recursos y emisiones se clasifican en términos con valores equivalentes de acuerdo con los impactos ambientales potenciales. Existe otra base de datos relacionada con la metodología CML, llamada CML 2001, que contiene categorías de impacto más explícitas, pero no es objeto de estudio ya que a diferencia de Baseline 2000, ésta tiene datos reales para una producción en los Países Bajos.

Caracterización:

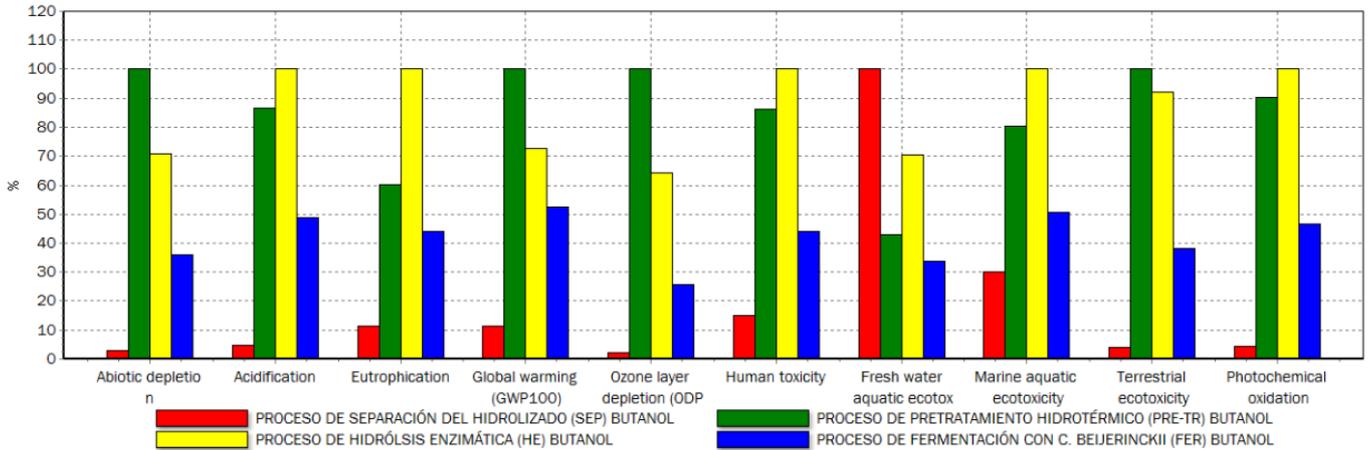


Figura 6. Caracterización en CML Baseline 2000. Fuente: SimaPro.

Como puede observarse en la Figura 6, respecto a la categoría de impacto GWP 100 Potencial de calentamiento global, la etapa que mayores impactos genera es la de pretratamiento. Respecto a las categorías de eco-toxicidad, acidificación y eutrofización, la etapa de hidrólisis enzimática define importantes impactos, mayores que los de la etapa de pretratamiento.

Normalización:

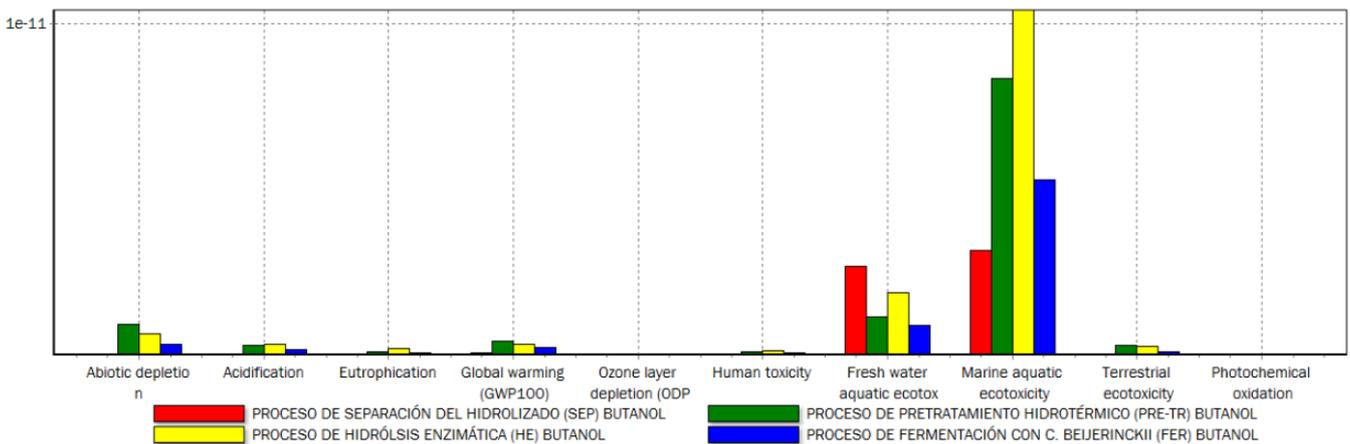


Figura 7. Normalización en CML Baseline 2000. Fuente: SimaPro.

El método CML 2000 no calcula indicadores finales, ya que éstos son representados por las mismas categorías de impacto (figura 7). El resultado de normalización determina que las categorías de mayor influencia en el impacto ambiental del proceso se deben a la eco-

toxicidad del agua marina, principalmente por la etapa de hidrólisis enzimática debido a la utilización de nutrientes durante la preparación de enzimas. El impacto ambiental del proceso de producción de biobutanol sobre el calentamiento global es mucho menor con respecto a los efectos que ejerce sobre la eco-toxicidad en agua en Europa. Esta metodología concluye que el proceso no genera impactos ambientales significativos al indicador de cambio climático.

### 6.1.2. Eco-Indicator 99 (E)

Contiene 11 categorías de impacto y a diferencia de CML esta metodología expresa los resultados en relación a los daños o efectos. No tiene un indicador final que relacione los aportes de calentamiento global al cambio climático, sino que la categoría es el indicador. Sin embargo, las unidades de dicha categoría no se expresan en kg de CO<sub>2</sub> equivalente, sino en unidades DALY (*Año de Vida Ajustado a la Discapacidad*) y está relacionado con el indicador final *Human health*. Esta medida comprende la carga mundial de las enfermedades atribuidas al cambio climático por lo que en *Eco-indicator 99* no se mide la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, sino los daños a la salud humana que conllevaría su emisión.

*Caracterización:*

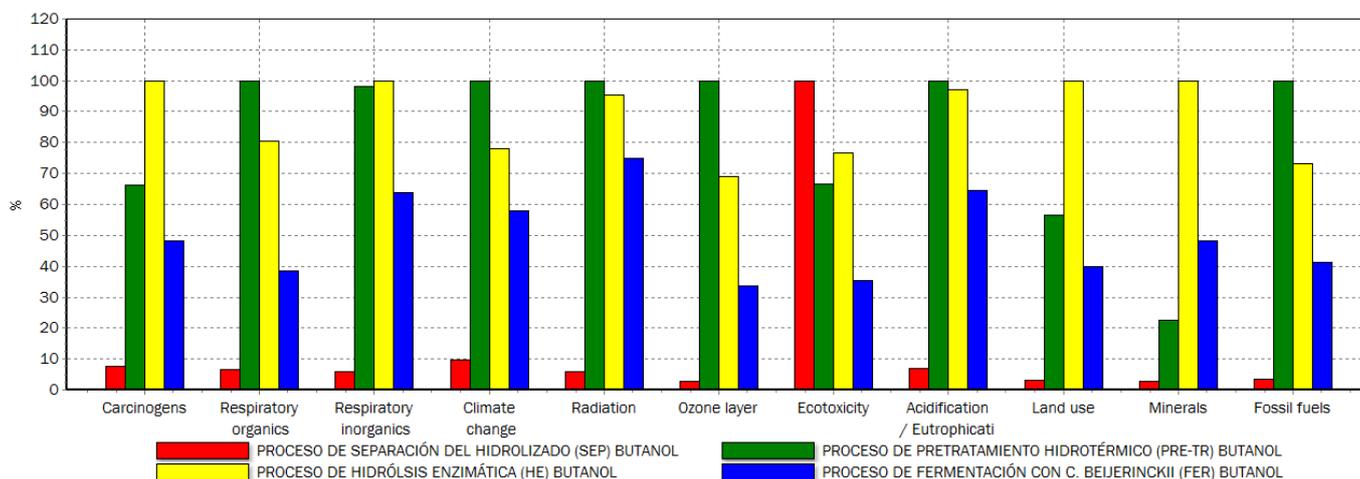


Figura 8. Caracterización en Eco-indicator 99. Fuente: SimaPro.

Las seis primeras categorías de la figura 8 están referidas a los daños que se ocasionan en la salud humana (unidades DALY), entre ellas la de cambio climático. De la figura 8 se desprende que las etapas de pretratamiento e hidrólisis enzimática son los que generan

mayores impactos al medio ambiente, siendo el pretratamiento la que mayores afecciones provoca.

*Normalización:*

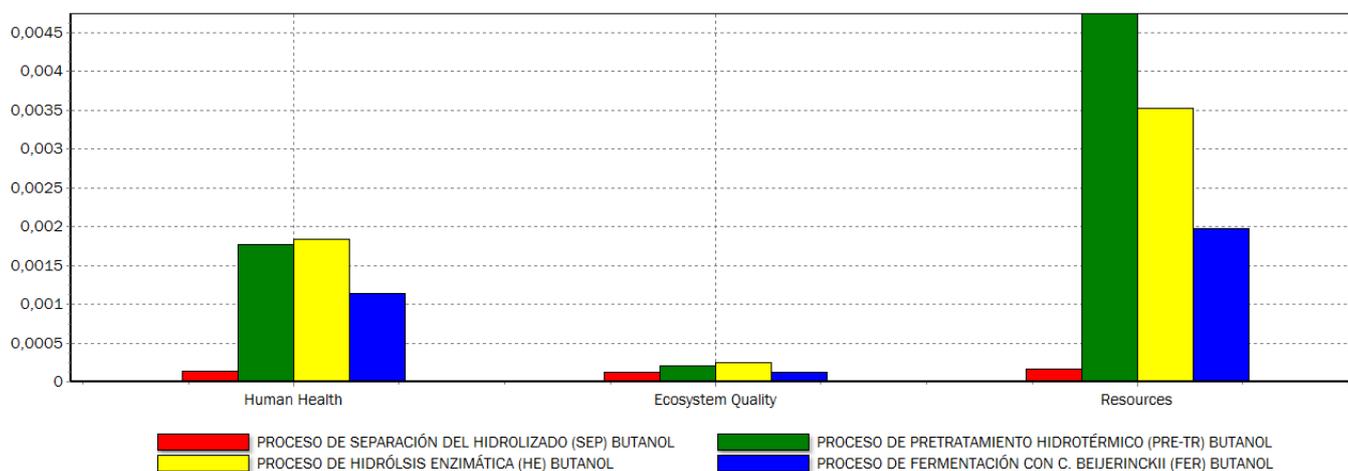


Figura 9. Normalización en Eco-indicator 99. Fuente: SimaPro.

Esta metodología, sólo tiene tres indicadores finales de categoría. Los resultados de la figura 9 de normalización indican que las categorías de impacto que contribuyen a los daños significativos en relación a Europa, se encuentran en el indicador *Resources* (Agotamiento de los Recursos). Este indicador incluye las categorías de extracción de minerales y uso de combustibles fósiles. El aporte de daños ocasionados se debe fundamentalmente a la etapa de pretratamiento, debido probablemente a su elevado consumo energético.

### 6.1.3. IMPACT 2002+

Impact 2002+ incluye 15 categorías. Los datos bibliográficos de Global Warming tiene como fuente de datos (IPCC) [25]. Los indicadores finales de categoría en normalización se dividen en 4: Human Health, Resources, Climate Change y Ecosystem Quality y en ello se le atribuyen más aspectos ambientales a evaluar por el cual se considera como una de las metodologías más completas del software. Impact 2002+ es el compendio de varias metodologías anteriores e instituciones de reconocido prestigio [25].

Caracterización:

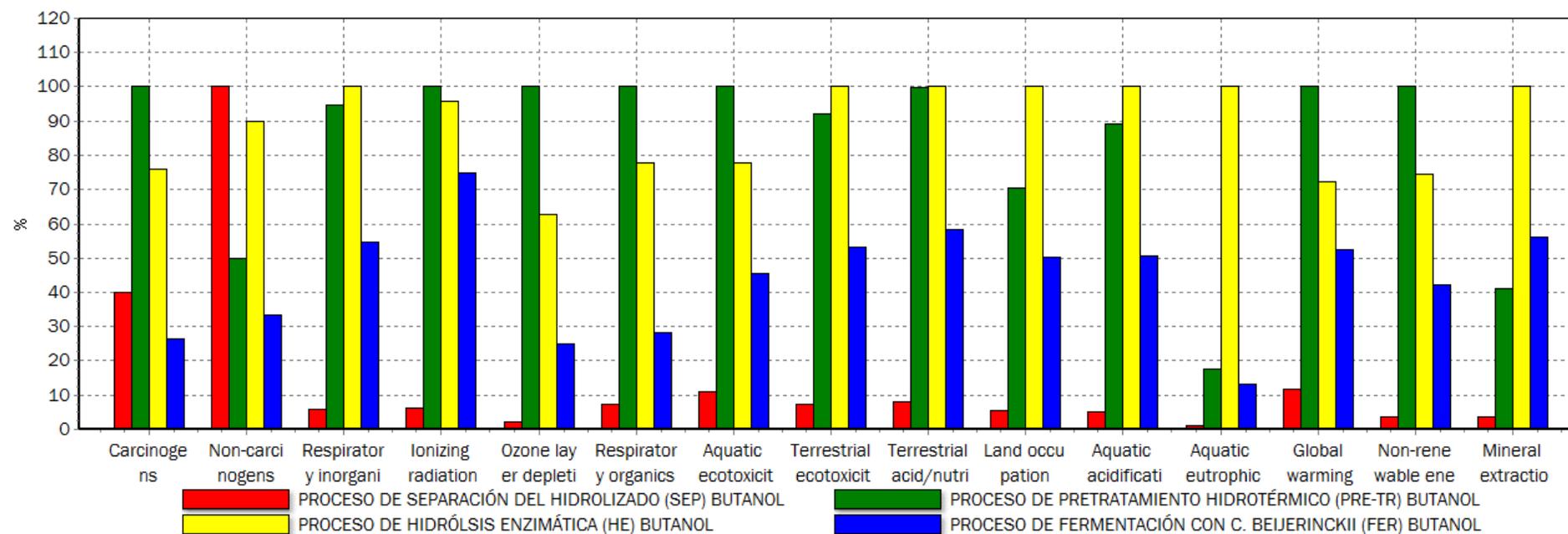


Figura 10. Caracterización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro.

La categoría Global Warming confirma que el pretratamiento es la etapa del proceso que mayores impactos genera, siendo un 30% mayor que la Hidrólisis enzimática según la figura 10. Al comparar los resultados, se observa que los datos de emisión de gases de efecto invernadero vienen expresados en kg de CO<sub>2</sub> eq, igual que la metodología CML Baseline 2000. La tabla 25, resume los resultados de emisiones al aire en dos de las metodologías, observándose una similitud en el total de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera. La diferencia de cada una se debe al enfoque metodológico de cada categoría. CML resuelve en cantidades por impactos ambientales potenciales, mientras que IMPACT arroja valores reales de emisión. Puede decirse que los kg de CO<sub>2</sub> eq emitidos a la atmósfera equivalen a 30.

Tabla 25. Comparativa de impactos asociados al cambio climático en kg de Dióxido de carbono equivalente.  
Fuente: SimaPro

Categoría de impacto	Unidad	PROCESO DE PRETRATAMIENTO HIDROTÉRMICO (PRE-TR) BUTANOL	PROCESO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA (HE) BUTANOL	PROCESO DE SEPARACIÓN DEL HIDROLIZADO (SEP) BUTANOL	PROCESO DE FERMENTACIÓN CON C. BEIJERINCKII (FER) BUTANOL	TOTAL, KG DE CO2 EQ
Global warming - IMPACT 2002+	kg CO2 eq	10,5	7,88	2,09	8,38	28,85
Global warming (GWP100) CML Baseline 2000	kg CO2 eq	10,9	8,25	2,14	8,83	30,12

Normalización:

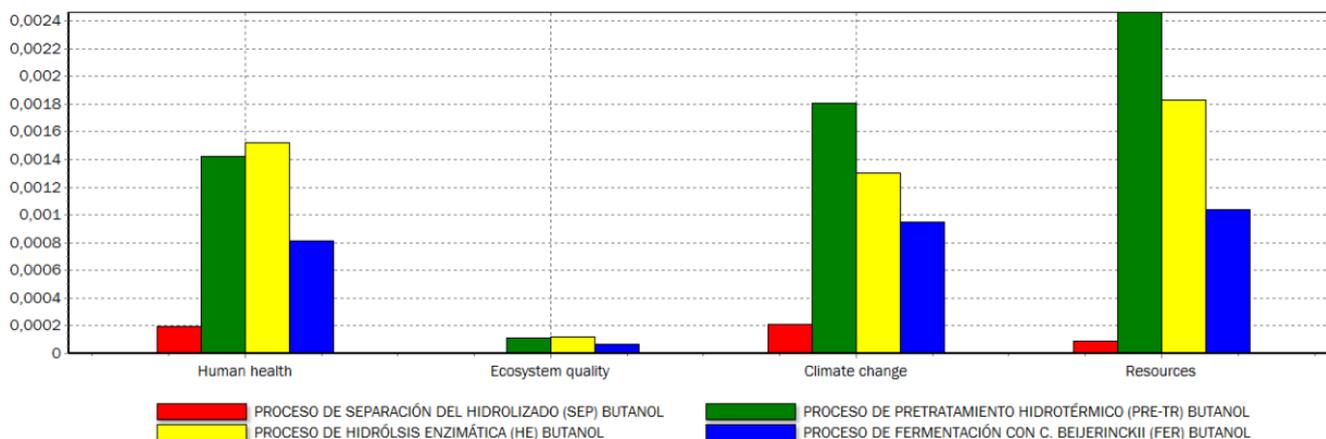


Figura 11. Normalización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro.

La normalización de datos de la figura 11 atribuye al agotamiento de los recursos naturales como el indicador de categoría de esta metodología, en él se encuentran los mayores impactos al territorio europeo. El cambio climático y la salud humana juegan también un papel importante en la evaluación. Según esta metodología, la etapa de pretratamiento es la de mayor impacto. Eco-indicator e Impact 2002+ coincidieron en señalar al

pretratamiento como la etapa de mayor impacto por su influencia en el agotamiento de recursos naturales.

## 6.2. Metodología seleccionada

A partir de los resultados mostrados, se escoge la metodología IMPACT 2002+ ya que proporciona resultados completos en relación a los gases de efecto invernadero en su contribución al cambio climático, así como la definición de otros impactos que se generan en esta producción. Es una estrategia completa de evaluación, la categoría de Global warming se alinea a los estudios de prevención del cambio climático con la aceptación internacional de los indicadores y modelos de caracterización que ésta contiene. Con esta metodología se analizarán los componentes del proceso que generen mayores impactos ambientales, así como también plantear una evaluación en la eficiencia energética propuesta en un análisis de sensibilidad. Las redes de flujo para 1 kg de butanol se encuentran recogidas en el ANEXO [II] de este TFM y han sido calculadas utilizando también esta metodología.

## 7. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

De la caracterización comparativa de etapas de proceso se concluye que la categoría de mayor influencia en los impactos ambientales se debe al uso de energías no renovables. La tabla 26 muestra las categorías de mayores impactos de los resultados en las metodologías Impact 2002+ y Eco-indicator 99, en el que se distingue una diferencia del tipo de energías usadas, (*Primary*) uso de energías primarias, una energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida, y (*Surplus*) de un excedente de energía o energía residual. Los diferentes tipos de energía es la causa de la diferencia de MJ totales. La energía residual o excedente no tiene la misma magnitud de impactos que la energía primaria.

Tabla 26. Datos de resultados asociados al agotamiento de los recursos naturales. Fuente: SimaPro.

Categoría de impacto	Unidad	PROCESO DE PRETRATAMIENTO HIDROTÉRMICO (PRE-TR) BUTANOL	PROCESO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA (HE) BUTANOL	PROCESO DE SEPARACIÓN DEL HIDROLIZADO (SEP) BUTANOL	PROCESO DE FERMENTACIÓN CON C. BEIJERINCKII (FER) BUTANOL	TOTAL, ENERGÍA (MJ)
Non-renewable energy Impact 2002+	MJ primary	197	156	13,2	135	501,2
Fossil Fuels Eco-indicator 99	MJ surplus	14,1	9,35	0,562	5,65	29,66

De las tres metodologías, se concluye que existen factores de contribución al cambio climático presentadas principalmente en la etapa de pretratamiento (Tabla 27). Dichos factores, indican una importante emisión de dióxido de carbono por la quema de combustibles fósiles, superando los 10,40 kg en emisión de CO<sub>2</sub> sólo durante la etapa de pretratamiento, seguido de la etapa de fermentación con 8,38 kg. Estos datos han sido calculados en el software por el que se identifican otros gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera.

Tabla 27. Sustancias emitidas asociados a la categoría de calentamiento global. Fuente: SimaPro.

Sustancia	Compartimento	Unidad	PROCESO DE SEPARACIÓN DEL HIDROLIZADO (SEP) BUTANOL	PROCESO DE PRETRATAMIENTO HIDROTÉRMICO (PRE-TR) BUTANOL	PROCESO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA (HE) BUTANOL	PROCESO DE FERMENTACIÓN CON C. BEIJERINCKII (FER) BUTANOL
Total		kg CO2 eq	2,09	10,50	7,88	8,38
Substancias remanentes		kg CO2 eq	0,00	0,03	0,04	2,68
<b>Carbon dioxide, fossil</b>	<b>Aire</b>	<b>kg CO2 eq</b>	<b>2,06</b>	<b>10,40</b>	<b>7,68</b>	<b>5,50</b>
Methane, fossil	Aire	kg CO2 eq	0,00880	0,14862	0,10532	0,08784
Dinitrogen monoxide	Aire	kg CO2 eq	0,01219	0,02203	0,03973	0,05821

## 7.1. Comparación del impacto generado por el uso de vapor y consumo eléctrico de la planta.

Para establecer medidas que disminuyan los impactos ambientales, se debe hacer un análisis de los componentes que se destacan en la valoración de los impactos ambientales de la sección de fermentación, que como se ha dicho anteriormente, incluye las etapas de pretratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación. Los factores contribuyentes al cambio climático se deben principalmente al consumo eléctrico de un mix español y la generación de vapor.

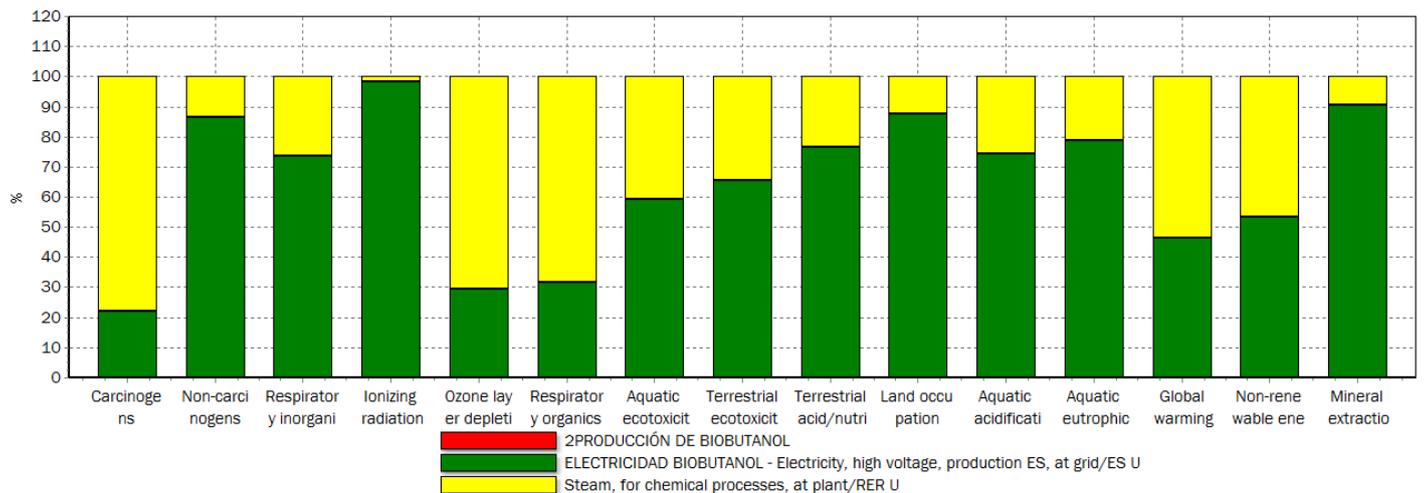


Figura 12. Análisis de los componentes destacados de la sección de fermentación. Fuente: SimaPro.

De la figura 12, se observa que de la mayoría de los impactos en la sección de fermentación se deben al consumo de electricidad, asumiendo gran parte de los porcentajes de los resultados de evaluación de daños. Sin embargo, el vapor de proceso, en las categorías de calentamiento global y energías no renovables, representa un 50 % del valor total, concluyendo que estos factores (energía eléctrica y vapor) contribuyentes al cambio climático, deben ser sometidos a modificaciones en su origen para llevar a cabo procesos de producción más sostenibles.

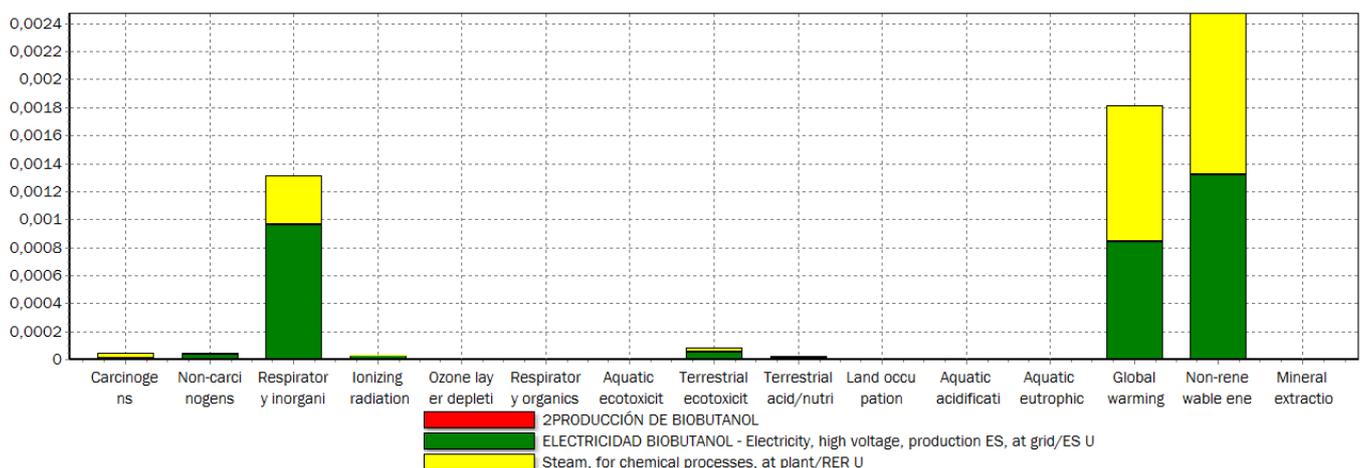


Figura 13. Normalización del análisis en sección de fermentación. Fuente: SimaPro.

Los resultados de la figura 13 de normalización sólo distingue 3 categorías de impacto con respecto a los daños ocasionados en el territorio europeo. El uso de energías no renovables en las calderas de vapor y el mix eléctrico son la causa principal de los

impactos ambientales durante la etapa productiva de biobutanol. Un mix eléctrico basado en energías poco o nada renovables, aumenta las emisiones. El propósito de las siguientes figuras 14 y 15 es tratar de justificar por qué la categoría de energías no renovables sobresale siempre en los resultados a pesar de utilizar un mix eléctrico que contiene dentro de distribución el 36% de energías sostenibles.

La figura 14 muestra la distribución de producción neta de energía en España con respecto al indicador de cambio climático. Como principal contaminante, destaca las energías provenientes de combustibles fósiles (carbón, gas natural, fuelóleo). Esta figura también permite visualizar las energías sostenibles más destacables de la distribución del mix español, entre éstas la energía hidroeléctrica y la cogeneración con biogás.

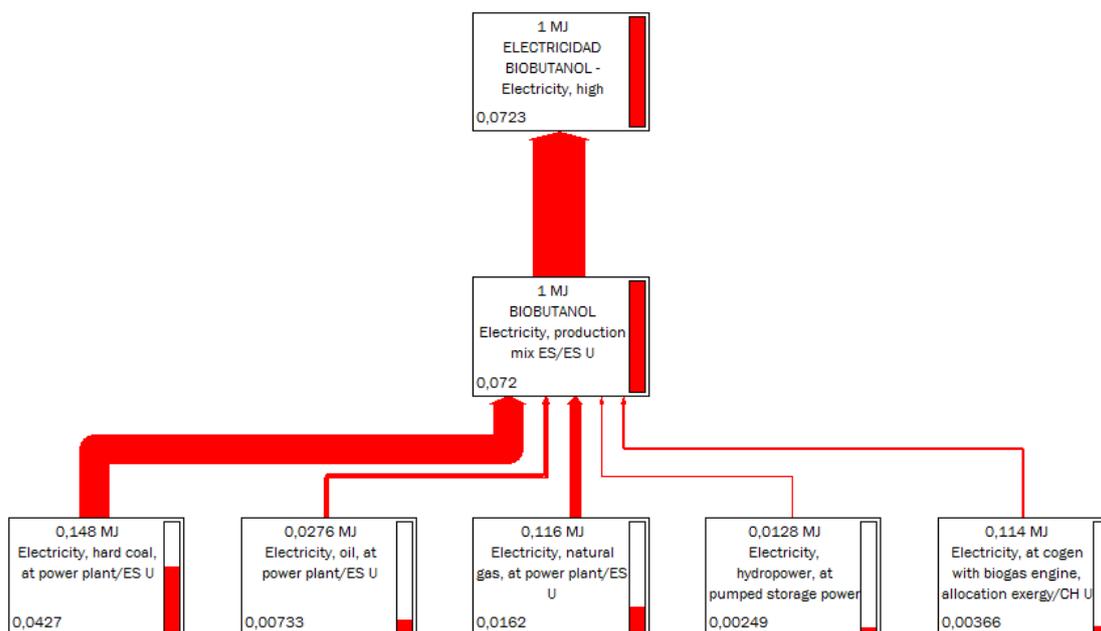


Figura 14. Producción neta de energía con respecto al calentamiento global. Fuente: SimaPro.

La figura 15 también muestra la distribución de producción de energía, pero en este caso de la categoría “Non-energy renewable” que comprende el 64% de energías no renovables en el mix. Con respecto a esto se puede decir que el aporte de energía nuclear supera a la del carbón.

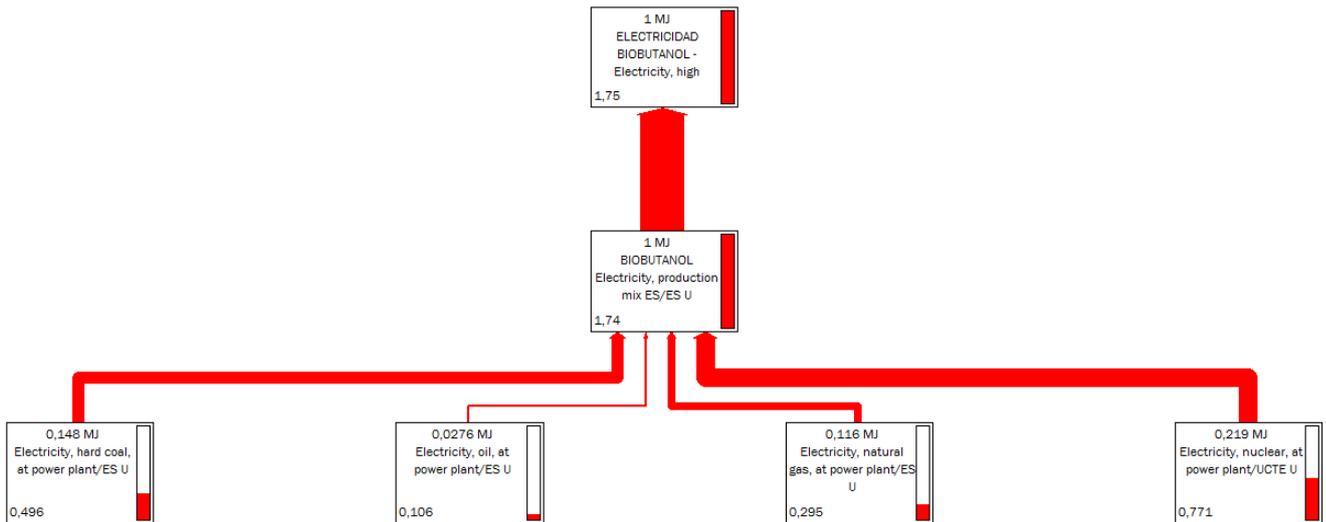


Figura 15. Producción neta de energía con respecto al uso de energías no renovables. Fuente: SimaPro.

La producción de vapor en calderas también produce impactos ambientales significativos y la reducción de estos parámetros de entrada al proceso aumentaría la eficacia de producción, y disminuirían los impactos.

## 7.2. Análisis de Sensibilidad

La normativa española a través del *Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático* [32] establece unos objetivos para 2020 en materia de energías renovables, eficiencia energética y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Dentro de este marco normativo, se aplicarán métodos eficientes de reducción de impactos ambientales relacionados con las emisiones y uso de energías renovables. Como medidas de control en la disminución de los impactos, se llevará a cabo una reducción del uso de vapor en el pretratamiento al 50% de su uso total actual, evitando calentar la alimentación de la corriente directamente de 20 a 120 °C con las calderas de vapor. La reducción de esta producción de vapor consiste en emplear una técnica de integración con calor residual proveniente de la sección de separación o destilación necesaria para calentar la corriente de 20 hasta 90 °C. En consecuencia, la caldera de vapor de esta etapa sólo producirá vapor para calentar una corriente de 90 a 120 °C en el reactor de pretratamiento. Esta reducción del consumo de vapor mediante integración energética implica un porcentaje de hasta 50% menor que el valor inicial. La reducción de vapor se reduciría de 340 kg/h a 170 kg/h, teniendo como flujo de referencia a este flujo de 21,25 kg. Un resumen de cálculo para este flujo se encuentra en la tabla 28.

Tabla 28. Reducción del consumo de vapor como alternativa de mejora. Fuente: anexo I.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD - VAPOR		
CONSUMO DE VAPOR NORMAL	kg/h	340
CONSUMO DE VAPOR EFICIENTE	kg/h	170
Vapor equivalente a (1 carga)	kg	28,33
Días del año		300
# Cargas del año		43200
Gasto de Vapor al año	kg/año	1224000
Gasto de Vapor/ vida útil	kg/vida útil	12240000
Gasto de Vapor/kg Butanol	kg/kg Butanol	21,25

Por otra parte, dentro de la propuesta de reducción de emisiones, se plantea un escenario energético renovable para la producción de energía que demanda la planta de producción de biobutanol. El mix eléctrico español actual es comparado con una propuesta de escenario de energía sostenible (100% renovable) con el propósito de reducir significativamente los impactos. Los porcentajes de distribución energético del escenario propuesto puede verse en la tabla 29.

Tabla 29. Producción de energías renovables como alternativa de mejora.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD "MIX RENOVABLE"	
Hidráulica (25%)	Solar fotovoltaica (25%)
Cogeneración y residuos (50%)	

### 7.1.2. Comparación de energías convencionales con energías renovables propuestas en el análisis de sensibilidad

Se crea el proceso (PRODUCCIÓN DE BIOBUTANOL RENOVABLE) para el análisis de sensibilidad, en el que se reduce el flujo de vapor de proceso generado hasta el 50% (de 42 kg a 21 kg) y se crea un mix eléctrico 100% renovable en el que se incluyen las energías fotovoltaicas, de cogeneración con biomasa e hidroeléctricas dentro del flujo energético creado en el software. Luego, se compara con los resultados de PRODUCCIÓN DE BIOBUTANOL convencional de la evaluación de impactos. Los resultados son recogidos en las figuras 16 y 17.

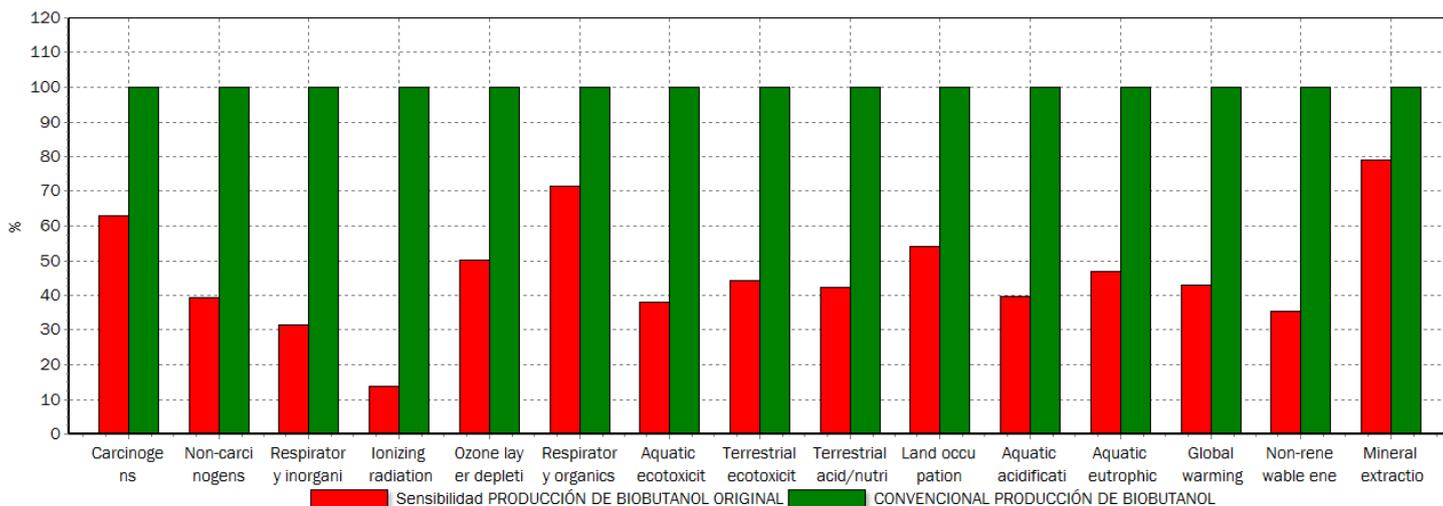


Figura 16. Caracterización en la comparación de alternativas. Fuente: Simapro.

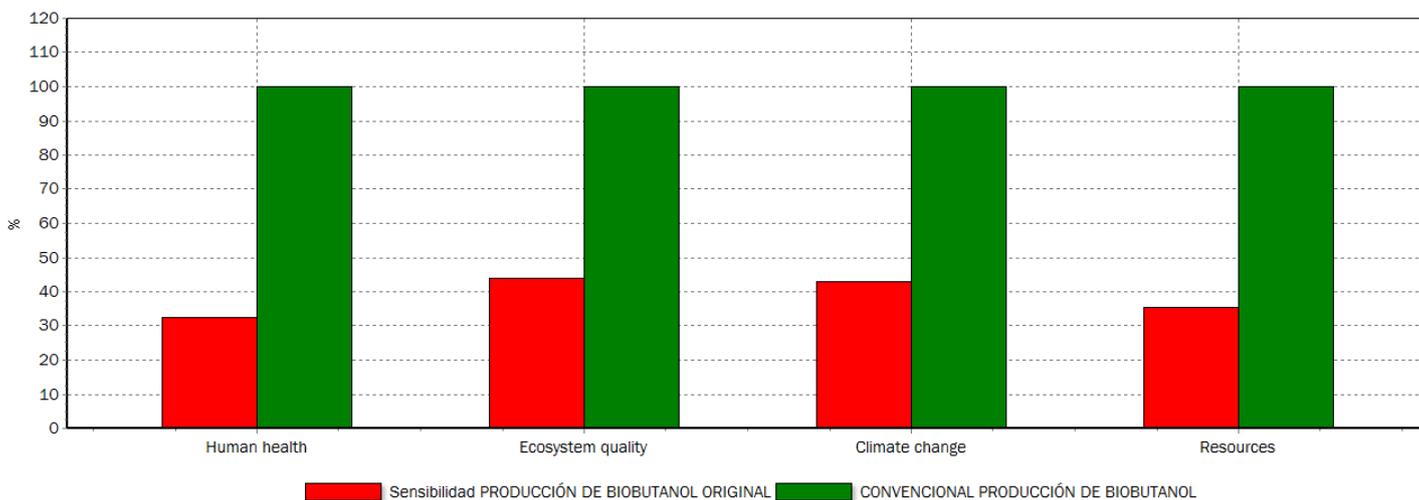


Figura 17. Evaluación del daño en la comparación de alternativas. Fuente: SimaPro

De la figura 16 puede observarse que la variación del origen de la energía renovable (de 36 a 100%) ha influido en los resultados, disminuyendo los impactos producidos en el proceso de producción de biobutanol para todas las categorías de impacto. La categoría Global Warming del indicador de cambio climático, disminuye un 57%. La tabla 30 refiere la disminución de los kg de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera con la aplicación de estas alternativas en el mismo proceso, los resultados son para 1 kg de butanol.

Tabla 30. Datos comparativos de alternativas de mejora. Fuente: SimaPro

Categoría de impacto	Unidad	CONVENCIONAL PRODUCCIÓN DE BIOBUTANOL	Sensibilidad PRODUCCIÓN DE BIOBUTANOL	DISMINUCIÓN KG DE CO <sub>2</sub> EQ
Climate Change	kg CO <sub>2</sub> eq	30	7,7	22,3

En la evaluación de daños de la figura 17, las afecciones en los indicadores totales confirman la disminución de hasta un 60% de los impactos ambientales en la sección de fermentación al aplicar una reducción en el vapor generado en la etapa de pretratamiento y un cambio de energías renovables.

Se pueden optar por muchas alternativas de reducción de emisiones en el uso de la energía en una planta de producción de biobutanol, ya sea por la modificación de las energías de entrada, el aprovechamiento de corrientes residuales o el desarrollo de otras tecnologías. Un ejemplo de ello es el planteamiento señalado en el análisis de ciclo de vida de producción de butanol en biorrefinerías de caña de azúcar [33] por fermentación ABE con *Clostridium beijerinckii*. En esta bibliográfica se plantea dos escenarios de optimización con uso de materias primas de primera y segunda generación (1GMS y 1G2GMS) para obtener butanol a partir de cultivos de caña de azúcar y bagazo de caña. En esta referencia bibliográfica, las emisiones de dióxido de carbono por tonelada de caña de azúcar procesado fueron 28,73 kg (1GMS) y 10,53 kg (1G2GMS) de dióxido de carbono, considerando las emisiones de la etapa de separación o destilación, que el presente TFM no tuvo en cuenta.

## 8. CONCLUSIONES

El presente TFM presenta el análisis de ciclo de vida para la producción de biobutanol, a partir de residuos lignocelulósicos provenientes de los subproductos generados en la industria azucarera con remolacha de azúcar, teniendo en cuenta la etapa de construcción y operación de la sección de fermentación de la planta basada en fermentación de tipo ABE.

A partir de la evaluación de impactos ambientales de esta planta de producción de biocombustibles de segunda generación se concluye lo siguiente:

- 1) Se realizó una búsqueda completa de información necesaria para la cuantificación en el análisis de inventario teniendo en cuenta todos los componentes de la planta de producción de butanol.
- 2) De los datos completados en el análisis de inventario se calcularon los flujos correspondientes a la producción de 1 kg de butanol a la salida del fermentador (unidad funcional).
- 3) En la comparación de metodologías bibliográficas se seleccionó el método IMPACT 2002+ por sus resultados relacionados a los objetivos de este ACV.
- 4) La etapa de proceso que aporta uno de los mayores impactos ambientales es la del pretratamiento. Sus aportes se deben a la producción de vapor en caldera. Seguido del vapor, cabe destacar por su importante impacto el consumo de energía con el

mix eléctrico español demandado para toda la sección de fermentación. Se concluye que el consumo de energía eléctrica y el vapor son los dos componentes más influyentes en el impacto ambiental del proceso. Además, reseñar que la etapa de hidrólisis enzimática genera impactos por el uso de nutrientes durante la preparación de las enzimas.

- 5) El análisis de sensibilidad que se planteó en este ACV disminuyó hasta un 60% las cargas ambientales generadas en la etapa de pretratamiento, con las técnicas de integración energética y uso de energías sostenibles. Las bases de esta integración se basan en la reutilización de corrientes de vapor residual provenientes de la etapa de destilación o separación. El mix eléctrico renovable propuesto debe cubrir la demanda eléctrica del sistema y al diseñar estas estrategias se tuvo en cuenta todas las condiciones de implementación.
- 6) Se podría optar por otras opciones de mejora del proceso mediante el desarrollo de tecnologías de pretratamiento que no utilicen vapor durante su producción o cuyo consumo sea menor.
- 7) También se desprende de este estudio que los factores de eco toxicidad, acidificación y eutrofización definen impactos importantes en la etapa de hidrólisis enzimática del proceso. El motivo de la aparición de estos impactos ambientales es debido a la producción de nutrientes necesarios durante la preparación de celulosa, la enzima responsable de llevar a cabo la hidrólisis.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

[1] Salinas, E., Gasca, V., 2009. *Los biocombustibles*. El cotidiano Fecha de consulta: 16 de junio de 2017. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009> ISSN 0186-1840

[2] Demirbas, A., 2011. *Competitive liquid biofuels from biomass*. Applied Energy 88, 17-28.

[3] Biomasa, neutra en emisiones de CO<sub>2</sub>. Fecha de consulta: 16 de junio de 2017. Disponible en: <http://www.levenger.es/index.php/es/noticias/61-biomasa-neutra-en-emisiones-de-co2>

[4] Nigam, P.S., Singh, A., 2011. *Production of liquid biofuels from renewable resources*. Progress in Energy and Combustion Science, 52-68.

[5] *Tipos de combustibles: Combustibles de primera, segunda y tercera generación*. Fecha de consulta: 18 de mayo de 2017. Disponible en: <http://www.energiasrenovablesinfo.com/biomasa/tipos-biocombustibles/>

[6] Características y usos del butanol. Fecha de consulta: 18 de mayo de 2017. Disponible en: <https://www.ecured.cu/Butanol>

[7] Rajchenberg, E, Rodríguez, J.A., Juárez, K., Martínez, A., Morales, S., *Producción microbiológica del butanol*. 2009. Biotecnología, Vol 13, Fecha de consulta: 19 de mayo de 2017. Disponible en: [http://www.smbb.com.mx/revista/Revista\\_2009\\_3/Butanol.pdf](http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Butanol.pdf)

[8] Poder calorífico de combustibles líquidos, gaseosos y sólidos para la generación de energía eléctrica. Fecha de consulta: 16 de junio de 2017. Disponible en: <http://www.antoniolima.web.br.com/>

[9] Ezeji, T. C., Qureshi, N., Blaschek, H. P., 2007. *Bioproduction of butanol from biomass: from genes to bioreactors*, Current Opinion in Biotechnology 18, 220-227.

[10] Jaramillo, J.J., Ariel, C., 2011. *Análisis de la producción de biobutanol en la fermentación acetobutílica con Clostridium saccharoperbutylacetonicum (N1-4 ATCC13564)*, Facultad de

Ingeniería, Universidad de Antioquia. Fecha de consulta: 18 de mayo de 2017. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43021467004> ISSN 0120-6230

[11] Garcia, V., Pakkila, J., Ojamo, H., Muurinen, E., Keiski, R. L., 2011. *Challenges in biobutanol production: how to improve the efficiency* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 15, 964-980.

[12] El cultivo de la remolacha azucarera. Servicio de estadística, estudios y planificación agraria. Fecha de consulta: 24 de mayo de 2017. Disponible en: <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/9/403/Remolacha%203.pdf>

[13] Azucarera. Sector azucarero de España. Fecha de consulta: 19 de junio de 2017. Disponible en: <http://www.azucarera.es/pdf/conoce/Dossier-Prensa-Azucarera.pdf>

[14] Bellido, C., Infante, C., Coca, M., González-Benito, G., Lucas, S., García-Cubero, M.T., 2015. *Efficient Acetone-Butanol-Ethanol production by Clostridium beijerinckii from sugar beet pulp*. Bioresource Technology, 190, 332-338.

[15] Bellido, C., Pinto, M.L., Coca, M., González-Benito, G., García-Cubero, M.T., 2014. *Acetone-Butanol-Ethanol (ABE) production by Clostridium beijerinckii from wheat straw hydrolysates: efficient use of penta and hexa carbohydrates*. Bioresource Technology, 167, 198-205.

[16] Bellido, C., Bolado, S., Coca, M., Lucas, S., González-Benito, G., García-Cubero, M.T., 2011. *Effect of inhibitors formed during wheat straw pretreatment on ethanol fermentation by Pichia stipitis*. Bioresour. Technol. 102, 10868-10874.

[17] ECOIL- *Life Cycle Assessment as a decision support tool for the eco-production of olive oil*. (LIFE04 ENV/GR/110). Fecha de consulta 6 de junio de 2017. Disponible en: <http://www.ecoil.tuc.gr/LCA-2.pdf>

[18] García, L. 2008-06. *Análisis de ciclo de vida en la aplicación intensiva de energías renovables en el ciclo de agua*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 501. Fecha de consulta 24 de junio de 2017. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/5502>

[19] Infante, C, 2016. *Evaluación técnico-económica de la producción de biocombustibles oxigenados a partir de subproductos industriales*. Departamento de Ingeniería química y tecnología de medio ambiente, España.

[20] Bailey, J. E., Ollis D.F., 1986. *Biochemical engineering fundamentals*, Singapore, McGraw Hill, 2nd Edition.

[21] SMILE, *Energy and LCA evaluation of the present dynamics of investigated case studies*, Project FP7-SSH-2007-1. Fecha de consulta 26 de junio de 2017. Disponible en: <http://www.smile-fp7.eu/deliverables/SMILE%20D14%20Energy%20and%20LCA%20evaluation.pdf>

[22] Dewulf, J., Van Langenhove, H., 2006. *Renewables-Based Technology*, Inglaterra, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-02241-8

[23] Vilorio, M., 2015, *Metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental aplicada al ciclo de vida de proyectos de infraestructura en Colombia*, Universidad Nacional de Colombia, Fecha de consulta: 22 de junio de 2017. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/54620/1/1095802426.2015.pdf>

[24] Goedkoop, M., Spriensma, R., 2000. *The Eco-Indicator 99: A damage oriented for Life Cycle Impact Assessment, methodology report*, Países Bajos, PRé Consultans B.V.

[25] Humbert, S., An De Shryver., Bengoa, X., Margni, M., Jolliet, O., 2012, *Impact 2002+ User guide*, Quantis, Sustainability counts, versión Q2.21. Fecha de consulta: 4 de julio de 2017. Disponible en: [https://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002\\_UserGuide\\_for\\_vQ2.21.pdf](https://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf)

[26] AEN/CTN 150, UNE-EN ISO 14044, 2006, *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices*, AENOR.

[27] Hamzah, A., Zalina, N., Halim, A., 2012, *Uncovering the Relation Between Environmental Damage and the Rate of Rainfall Received Through a Life Cycle Assessment (LCA) Study on Potable Water Production in Malaysia*, Sustainable Development - Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management, InTech, DOI: 10.5772/45851. Fecha de consulta: 8 de julio de 2017, Disponible en: <https://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/38094.pdf>

[28] *Mix energético en España*, 2015. Fecha de consulta: 4 de julio de 2017. Disponible en: <http://www.killmybill.es/mix-energetico-espana/>

[29] *BALANCE ENERGÉTICO 2016 Y PERSPECTIVAS 2017*. Fecha de consulta: 4 de julio 2017. Disponible en: [www.enerclub.es/file/7LgZ5MDRyUdtQ69apst6xw](http://www.enerclub.es/file/7LgZ5MDRyUdtQ69apst6xw)

[30] Objetivos de Desarrollo Sostenible (7) *Energía asequible y no contaminante*. Fecha de consulta: 27 de junio de 2017. Disponible en: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

[31] Humbird, D., Davis, R., Tao, L., Kinchin, C., Hsu, D. and Aden, A., Schoen, P., Lukas, J., Olthof, B., Worley, M., Sexton, D., Dudgeon, D., 2011, *Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover*, National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5100-47764.

[32] *Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático 2013-2020*, Mapama 2017. Fecha de consulta: 10 de julio de 2017. Disponible en: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es)

[33] Pereira, L., Mateus, F., Marina, O.S., Otávio, C., Bomoni, A., 2013, *Life cycle assessment of butanol production in sugarcane biorefineries in Brazil*, Journal of cleaner Production, 96, 557-568.

[34] The American Society Of Mechanical Engineers, 2010, *Properties (Metric), ASME Boiler and Pressure Vessel Code: An international Code*, Section (II) Part D (Metric). Estados Unidos, 2010 Edition. Pág 10.

[35] León, J.M., 2001, *Diseño y cálculo de recipientes a presión*. Fecha de consulta 24 de mayo de 2017. Disponible en: <http://www.inglesa.com.mx/books/DYCRP.PDF>

[36] The American Society Of Mechanical Engineers, *Rules For Construction Of Pressure Vessels*, ASME Boiler and Pressure Vessel Code: An international Code Division 1 VIII, Estados Unidos, 2004 Edition.

[37] Fondos conformados en frío. Fondo elíptico 2:1 FONDEYUR. Fecha de consulta: 31 de mayo de 2017. Disponible en: <http://www.fondeyur.com/fondos-elipticos-2-1.aspx>

# I. ANEXO. MEMORIA DE CÁLCULO

## 1. PARÁMETROS DE ENTRADA

Tabla XXXI. Caracterización de los Procesos Unitarios del sistema.

PROCESO PRE-TRATAMIENTO			PROCESO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA			PROCESO SEPARACIÓN			PROCESO DE FERMENTACIÓN					
Flujos másicos de entrada	Agua	Pulpa	Flujos másicos de entrada	Flujo PRE-TR	NaOH 6M	Enzimas	Flujos másicos de entrada	Flujo HE	Pulpa Agotada	Hidrolizado	Flujos másicos de entrada	Flujo SEP	NaOH 6M	Inóculo
	kg/h			kg/h				kg/h				kg/h		
	1666,67	100		1766,67	0,02	5,91		1772,6	25,44	1747,16		1747,16	174,32	-
Caudal de entrada	m <sup>3</sup> /h		Caudal de entrada	m <sup>3</sup> /h			Caudal de entrada	m <sup>3</sup> /h			Caudal de entrada	m <sup>3</sup> /h		
	1,767			1,773				1,762				1,89		
Temperatura en el reactor	°C		Temperatura en el reactor	°C			Temperatura en la centrífuga	°C			Temperatura en el reactor	°C		
	120			50				50				35		
Presión	bar		Presión	bar			Presión	bar			Presión	bar		
	1			1				1				1		
Tiempo de residencia	min		Tiempo de residencia	horas			Tiempo de residencia	-			Tiempo de residencia	horas		
	10			72				-				120		
pH	4,2		pH	5			pH	3,3			pH	6		

## 2. REACTORES EN LOS PROCESOS DE (PRE-TR), (HE) Y (FER)

### 2.1. DISEÑO DE REACTORES

Antes de iniciar el dimensionamiento de un reactor son calculados los espesores basándose en el Código ASME de la Sección VIII, División 1 para el diseño y fabricación de recipientes a presión.

#### I. Espesor de la CARCASA CILÍNDRICA de un recipiente vertical

1. Se selecciona la composición nominal del material y su forma con el fin de especificar datos y mediante tabla II se escoge el máximo esfuerzo permitido (S):

Tabla XXXII. Características representativas del material (Acero Inoxidable)

CARACTERÍSTICA DEL MATERIAL (ACERO)
Tipo de material: Acero Inoxidable Austeníticos ASME SA-240-304 [34]
Especificación del material: Ferrosos (Acero Inoxidable resistente a la corrosión).
Clase de material: (UHA) Aceros de alta aleación.
Tipo de construcción: (UW) Acero en soldadura.
Estructura del material: (UG 23) en placas (Plate).

2. Debido al tipo de material y la temperatura en la que trabajará el reactor (PRE-TR) (120 °C) se interpola para materiales ferrosos entre las temperaturas (100 °C y 125 °C) y se establece el valor de esfuerzo máximo permitido. Todos los datos son tomados de la tabla 1A No. 2 (CONT'D) del código ASME-II [34].

$$\text{Interpolación} = \frac{134 + (120 - 125)}{(100 - 125) * (137 - 134)} = 134,60$$

Tabla XXXIII. Interpolación de esfuerzo permitido (S) a 120 °C

CÓDIGO ASME					
Línea del material	TEMPERATURA ( °C)			ACERO INOXIDABLE DE ALTA ALEACIÓN (SA-240/304)	REACTOR PRE-TR
	100	125	120		
	Máximo esfuerzo permitido (S) en (Mpa)				
25	137	134	134,60		

El resultado en la Tabla II del máximo esfuerzo permitido en un reactor que traslada de 20 a 120 °C su temperatura tiene un valor máximo de (S) = **134,60 Mpascales** = 19522,079 lb/pulg<sup>2</sup>.

El Esfuerzo permitido de los reactores de HIDRÓLISIS y FERMENTACIÓN calculado de la misma forma es de (S) = **138 Mpascales** = 20015,34 lb/pulg<sup>2</sup>.

3. Se calculan las dimensiones del reactor de PRE-TR:

$$Q = 1,76\text{m}^3/\text{h}$$

$$T_{\text{residencia}} = 10 \text{ minutos} = 0,166 \text{ h}$$

$$\text{Volumen} = Q * t$$

$$\text{Volumen} = \frac{1,76\text{m}^3}{\text{h}} * 0,166 \text{ h} = 0,29 \text{ m}^3$$

En este caso el diámetro del reactor será igual a su altura, por lo que:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * D ; V = \frac{\pi}{4} * D^3 ; D = \left(\frac{4 * V}{\pi}\right)^{1/3}$$

$$\text{Diámetro} = \left(\frac{4 * 0,29 \text{ m}^3}{\pi}\right)^{1/3} = 0,717 \text{ m}$$

**Diámetro = 0,721 m**

A la altura se le agrega un 20% del valor del diámetro:

$$H = D + 20\%D$$

$$H = 0,721 \text{ m} + 20\% * 0,721 \text{ m}$$

**H = 0,86 m**

Pero, el volumen interior de la torre cilíndrica será:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * h; \text{ es el volumen de un cilindro}$$

$$V = \frac{\pi}{4} * (0,721 \text{ m})^2 * 0,86 \text{ m}$$

**V = 0,3531 m<sup>3</sup>**

En el diseño de los reactores de Hidrólisis y Fermentación también se realiza el mismo procedimiento, teniendo como resultados los de la tabla IV:

Tabla XXXIV. Parámetros de diseño de reactores en HE y FER

REACTOR (HE)		REACTOR (HE)	
# de reactores	2	# de reactores	3
Volumen líquido(m <sup>3</sup> )	63,8	Volumen líquido(m <sup>3</sup> )	75,5
Diámetro (m)	4,3	Diámetro (m)	4,6
Altura (m)	5,2	Altura (m)	5,5
Volumen torre cilíndrica (m <sup>3</sup> )	76,6	Volumen torre cilíndrica (m <sup>3</sup> )	90,6

4. Se determinan los espesores de la parte cilíndrica del reactor:

Tabla XXXV. Parámetros iniciales de diseño para hallar el espesor del recipiente vertical en (PRE-TR)

COLUMNA PRE-TR	
Diámetro (m)	0,72
Radio ó L en (m)	0,36
Radio ó L en (pulg)	14,2
Altura de la columna (pulg)	34,06
Esfuerzo permitido (S) en PSI	19522,079
Presión de operación (Po) en bares	1
Presión de operación (Po) en PSI	14,50

Presión de diseño (P) en PSI	43,51
Eficiencia de soldadura (E) [35]	0,85
Peso específico del acero (lb/pulg <sup>3</sup> )	0,2854

Para hallar la presión de diseño de un recipiente cilíndrico vertical:

Existen dos formas de calcular la presión de diseño:  
 $P = 1.1 * P_o$  si  $P_o > 20 \text{ bares}$   
 $P = P_o + 2 \text{ bares}$  si  $P_o \leq 20 \text{ bares}$

Pero como se trata de una columna vertical, debe tenerse en cuenta la presión hidrostática ejercida en la superficie interior, la presión de diseño será la siguiente:

Presión Hidrostática ( $P_H$ ) = Peso específico del material \* Altura

$$\text{Presión Hidrostática } (P_H) = 0,2854 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^3} * 34,066 \text{ pulg}$$

$$(P_H) = 9,72 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$$

$$P = P_o + P_H + 2 \text{ bares}$$

$$P = 14,50 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} + 9,72 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} + 30 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$$

$$P = 54,22 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} \approx 4 \text{ bares}$$

Para hallar el espesor del cuerpo cilíndrico

El punto óptimo de eficiencia de soldadura (E) para el cuerpo cilíndrico del reactor es (E = 0,85) ya que generalmente se trabaja para espesores que no son muy grandes y donde el coste de radiografiado es relativamente bajo [35]. Según el apartado "Espesor De Las Capas Bajo Presión Interna" (UG-27) - sección (C) [36], el cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico del reactor de PRE-TR es el siguiente:

$$t = \frac{PL}{SE - 0,6P}$$

Donde:

P = presión de diseño del recipiente en PSI ó  $\left(\frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}\right)$

L = Radio interior del cilindro en (pulg)

S = Esfuerzo máximo permitido en  $\left(\frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}\right)$

E = Eficiencia de soldadura (adimensional)

$$t = \frac{\left(54,22 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} * 14,2 \text{ pulg}\right)}{\left(19522,079 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2} * 0,85\right) - \left(0,6 * 54,22 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}\right)}$$

$$t = 0,0464 \text{ pulg} = 1,17 \text{ mm} \approx 2 \text{ mm}$$

El espesor de los cuerpos cilíndricos de los reactores de HE son:

$$t \approx 13 \text{ mm}$$

El espesor de los cuerpos cilíndricos de los reactores de FER son:

$$t \approx 15 \text{ mm}$$

### Espesor de cabezales y tapas

Los cabezales y fondos que encierran los reactores hacen parte importante del diseño. Sin embargo, debido a que los reactores son verticales y en los fondos se ejercerá una mayor presión hidrostática no se realiza el cálculo de espesores en cabezales y fondos de la sección (f) de "Cabezas Formadas, Secciones y Presión en Lado Del Concave" (UG-32) del código ASME. Los fondos tendrán el mismo espesor del cuerpo cilíndrico calculado anteriormente, mientras que los cabezales serán la mitad del espesor. La siguiente tabla VI, muestra las características y espesores para cada reactor de la sección de fermentación:

Tabla XXXVI. Espesores de cabezales y fondos de los reactores.

REACTOR (PRE-TR)		REACTOR (HE)		REACTOR (HE)	
# de reactores	1	# de reactores	2	# de reactores	3
Espesor Fondo (mm)	2	Espesor Fondo (mm)	13	Espesor Fondo (mm)	15
Espesor Cabezales (mm)	1	Espesor Cabezales (mm)	6,5	Espesor Cabezales (mm)	7,5

#### II. Cantidad de acero inoxidable para fabricar un reactor

##### REACTOR (PRE-TR)

1. Se determina la cantidad de acero inoxidable utilizado para la fabricación de la capa cilíndrica y las tapas semiesféricas de este reactor. Por diferencia de volumen (interior y exterior) obtenemos el volumen del acero del cilindro.

A. Diámetro exterior del cilindro

$$D_e = D_{interior} + 2 * \text{Espesor}$$

$$D_e = 0,721 \text{ m} + (2 * 0,002 \text{ m})$$

$$D_e = 0,725 \text{ m}$$

B. Volumen exterior del cilindro

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * h = \frac{\pi}{4} * 0,725^2 * 0,86 \text{ m}$$

$$V_e = 0,355 \text{ m}^3$$

C. Volumen de acero

$$V_{acero} = V_e - V_i$$

$$V_{acero} = 0,357 \text{ m}^3 - 0,3531 \text{ m}^3$$

$$V_{acero} = 0,00399 \text{ m}^3$$

D. kg de acero

La densidad del acero inoxidable es  $7930 \text{ kg/m}^3$ .

$$d = \frac{m}{V}; m = d * V$$

$$\text{kg}_{acero} = 7930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,00399 \text{ m}^3$$

$$\text{kg}_{acero} = 31,6 \text{ Kg}$$

Acero de las tapas semiesféricas.  
Diámetro interior del cilindro = 0,721 m

Radio interior de la tapa = 0,3605 m  
Espesor de la tapa = 0,001 m

A. Volumen interior de una semiesfera

$$V_i = \frac{2}{3}\pi * r^3$$

$$V_i = \frac{2}{3}\pi * (0,3605m)^3$$

$$V_i = 0,0981 \text{ m}^3$$

B. Diámetro y radio exterior del cilindro

$$D_e = D_{\text{interior}} + 2 * \text{Espesor}$$

$$D_e = 0,721 \text{ m} + (2 * 0,001 \text{ m})$$

$$D_e = 0,723 \text{ m}$$

$$R_e = 0,3615 \text{ m}$$

C. Volumen exterior de la semiesfera

$$V_e = \frac{2}{3}\pi * (0,3615m)^3$$

$$V_e = 0,099 \text{ m}^3$$

E. Volumen de acero

$$V_{\text{acero}} = V_e - V_i$$

$$V_{\text{acero}} = 0,099 \text{ m}^3 - 0,0981 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{acero}} = 0,00164 \text{ m}^3$$

D. kg de de acero

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 7930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,00164 \text{ m}^3$$

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 13,4 \text{ kg}$$

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 13,4 \text{ kg} * 2 \text{ tapas}$$

$$\mathbf{\text{Kg}_{\text{acero}} = 26 \text{ kg}}$$

**TOTAL Acero PRE – TR = 58 kg**

#### REACTOR (HE)

2. Se determina la cantidad de acero inoxidable para la fabricación de la capa cilíndrica, tapa plana y fondo semielíptico de los reactores de HE. Por diferencia de volumen interior y exterior, obtenemos el volumen del acero del cilindro.

F. Diámetro exterior del cilindro

$$D_e = D_{\text{interior}} + 2 * \text{Espesor}$$

$$D_e = 4,33 \text{ m} + (2 * 0,013 \text{ m})$$

$$D_e = 4,357 \text{ m}$$

$$V_{\text{acero}} = V_e - V_i$$

$$V_{\text{acero}} = 77,5 \text{ m}^3 - 76,5 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{acero}} = 0,932 \text{ m}^3$$

G. Volumen exterior del cilindro

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * h = \frac{\pi}{4} * 4,357^2 * 5,2 \text{ m}$$

$$V_e = 77,5 \text{ m}^3$$

I. Cantidad de acero

La densidad del acero inoxidable es 7930 kg/m<sup>3</sup>

$$d = \frac{m}{V} ; m = d * V$$

H. Volumen de acero

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 7930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,932 \text{ m}^3$$

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 7395,17$$

Volumen del acero de los fondos semielíptico [37].

Diámetro interior del cilindro = 4,357m

Radio esférico interior = 3,92 m

Espesor de la tapa = 13 mm

A. Altura interna de la elipse

$$H = \frac{D_{\text{interior}}}{4} = \frac{4,35\text{m}}{4}$$

$$H = 1,08 \text{ m}$$

B. Volumen interior de una *semielipse*

$$V_i = \frac{\pi}{6} * (D_{\text{interior}}^2) * H$$

$$V_i = \frac{\pi}{6} * (4,33 \text{ m}^2) * 1,08 \text{ m}$$

$$V_i = 10,63 \text{ m}^3$$

C. Diámetro exterior de la *semielipse*

$$D_e = D_{\text{interior}} + 2 * \text{Espesor}$$

$$D_e = 4,33 \text{ m} + (2 * 0,013 \text{ m})$$

$$D_e = 4,35 \text{ m}$$

D. Volumen exterior de la *semielipse*

$$V_e = \frac{\pi}{6} * (4,35 \text{ m}^2) * (1,08 \text{ m} + 0,013\text{m})$$

$$V_e = 10,89 \text{ m}^3$$

J. Volumen de acero

$$V_{\text{acero}} = V_e - V_i$$

$$V_{\text{acero}} = 10,89 \text{ m}^3 - 10,63 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{acero}} = 0,26 \text{ m}^3$$

E. Cantidad de acero

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 7930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,26 \text{ m}^3$$

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 2063,58$$

Cantidad de acero de los cabezales planos.

Diámetro interior del cilindro = 4,357m

Radio interior = 2,17 m

Espesor de la tapa =  $\frac{13}{2}$  mm = 6 mm

A. Área de un disco

$$A = \frac{\pi * (D_{\text{interior}}^2)}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (4,357 \text{ m}^2)}{4}$$

$$A = 14,23 \text{ m}^2$$

$$V = A * \text{espesor}$$

$$V = 14,23 \text{ m}^2 * 0,006 \text{ m}$$

$$V = 0,085 \text{ m}^3$$

C. Cantidad de acero

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 7930 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,085 \text{ m}^3$$

$$\text{kg}_{\text{acero}} = 677,3$$

B. Volumen de un disco

**TOTAL Acero HE = 20272 kg**

### REACTORES PARA PREPARACIÓN DE ENZIMAS (FER)

Basándonos en las cantidades obtenidas del proceso de producción de enzimas para el estudio de una conversión bioquímica de biomasa lignocelulósica a etanol publicada por la National Renewable Energy Laboratory (NREL) [31] simplificaremos los siguientes resultados para nuestro proceso productivo, mediante las bases de diseño inicial de este proyecto, partiendo de los datos de la tabla VII:

Tabla XXXVII. Especificaciones del biorreactor de producción de enzimas.

Parámetros	Unidades	Datos
Volumen total	m <sup>3</sup>	300
Temperatura de operación	° C	28
Material	Acero 316SS	
Proteína total demandada	kg/h	490
Carga de celulosa	mg proteína/g celulosa	20

En 8 kg de butanol hay un 40% de celulosa en la pulpa. Ahora bien, 20 mg de proteína por cada g de celulosa es lo que se producirá en esta etapa, por lo que:

$$20 \frac{\text{mg proteína}}{\text{g celulosa}} * 40\% \frac{\text{celulosa}}{\text{g MS}} = 8 \text{ mg} \frac{\text{proteína}}{\text{g MS}} = 8 \frac{\text{g proteína}}{\text{kg MS}}$$

$$8 \frac{\text{g proteína}}{\text{kg MS}} * \frac{100 \text{ kg MS}}{\text{h}} = 800 \text{ g proteína} = \mathbf{0,8 \text{ kg proteína}}$$

En la producción de enzimas para convertir a etanol [31] son necesarios 490 kg/h de proteína. En este ACV durante la producción de biobutanol se calcula 0,8 kg de proteína. En la producción de etanol [31] se requiere de 300 m<sup>3</sup> en volumen de reactores, el volumen para 0,8 kg de proteína será de:

$$\frac{0,8 \text{ Kg proteína} * 300 \text{ m}^3}{490 \text{ kg proteína}} = 0,489 \text{ m}^3$$

Siguiendo el mismo procedimiento anterior para hallar los kg de acero de los reactores de hidrólisis enzimática con capa cilíndrica y cabezales semielíptico y plano, tenemos un total de **403,97 kg de acero**.

### REACTOR (FER)

Los kg de acero para la fermentación se realizan con el mismo procedimiento de HE. En la tabla VIII se establecen las características de diseño que se tuvo en cuenta para su cálculo.

Tabla XXXVIII. Diseño del reactor de Fermentación.

Parámetros	Unidades	Datos
Tiempo de Residencia EBRT	h	120
Caudal de diseño (Q)	m <sup>3</sup> /h	1,89
Cantidad de reactores	Unidades	3
Volumen del lecho (V)	m <sup>3</sup>	226,61

Volumen del lecho en cada torre	m <sup>3</sup>	75,54
Diámetro Interior (D)	m	4,58
Altura de la torre	m	5,50
Volumen TOTAL de cada torre cilíndrica	m <sup>3</sup>	90,64
Espesor	mm	15,36
Espesor	m	0,02
Diámetro Exterior (De)	m	4,61
Volumen Exterior (Ve)	m <sup>3</sup>	91,86
Volumen de Acero	m <sup>3</sup>	1,22
Densidad de acero	kg/ m <sup>3</sup>	7930,00
Cantidad de Acero Inoxidable por Torre	kg	9674
<b>FONDO ELÍPTICO</b>		
Diámetro Interior (Di)	m	4,58
Altura interna de la elipse (H)	m	1,15
Volumen interior de un fondo elíptico (Vi)	m <sup>3</sup>	12,59
Espesor	mm	15,36
Espesor	m	0,02
Diámetro Exterior (De)	m	4,61
Volumen exterior de un fondo elíptico (Ve)	m <sup>3</sup>	12,93
Volumen de Acero	m <sup>3</sup>	0,34
Cantidad de Acero Inoxidable de (1) fondo	kg	2700,89
<b>TAPA PLANA</b>		
Diámetro Tapa plana	m	4,51
Área del disco	m <sup>2</sup>	15,99
Espesor de la tapa	m	0,01
Volumen de un disco	m <sup>3</sup>	0,11
Acero en 1 tapa	kg	887,12
Volumen total de un Reactor	m <sup>3</sup>	103

**TOTAL Acero FER = 39787 kg**

REACTORES PARA INÓCULO (FER)

La etapa de fermentación necesita 3 reactores para el almacenamiento de microorganismos *Clostridium b.* y 3 reactores para la preparación del inóculo con temperaturas no mayores de 35 °C. Por lo que los materiales de diseño como el acero y los flujos energéticos necesarios para este subproceso serán

divididos en una décima (1/10) parte del volumen utilizado en los reactores de fermentación y de los flujos energéticos totales, quedando de la siguiente forma:

(3) Reactores fermentador	100 m <sup>3</sup>
(3) Reactores preparación inóculo	10 m <sup>3</sup>
(3) Reactores microorganismos	1 m <sup>3</sup>

La tabla IX resume los datos calculados de kg de acero necesarios en la fabricación de 6 reactores de preparación del inóculo. Teniendo en cuenta las características establecidas anteriormente de su diseño. Los kg de acero inoxidable de estos reactores se calculan con el mismo procedimiento de los reactores de fermentación con capa cilíndrica y cabezales semielíptico y plano.

Tabla XXXIX. Diseño de reactores de Inóculo de fermentación.

DISEÑO DEL REACTOR DE MICROORGANISMOS		
Parámetros	Unidades	Datos
Cantidad de reactores		3
Volumen del tanque 1	m <sup>3</sup>	9,06
Volumen de Acero	m <sup>3</sup>	0,12
Densidad de acero	kg/ m <sup>3</sup>	7930
Cantidad de Acero Inoxidable por Torre	kg	967
TOTAL, ACERO	kg	2901
TAPA ELÍPTICA		
Cantidad de tapas	Unidades	6
Volumen de (1) tapa	m <sup>3</sup>	1,26
Volumen de Acero	m <sup>3</sup>	0,03
Densidad de acero	kg/ m <sup>3</sup>	7930
Cantidad de Acero Inoxidable por tapa	kg	270
TOTAL, ACERO	kg	1620
Volumen total de un Reactor	m <sup>3</sup>	11,58
DISEÑO DEL REACTOR DEL INÓCULO		
Parámetros	Unidades	Datos
Cantidad de reactores	Unidades	3
Volumen del tanque 1	m <sup>3</sup>	0,91
Volumen de Acero	m <sup>3</sup>	0,01
Densidad de acero	kg/ m <sup>3</sup>	7930

Cantidad de Acero Inoxidable por Torre	kg	96
TOTAL, ACERO	kg	288
TAPA ELÍPTICA		
Cantidad de tapas	Unidades	6
Volumen de (1) tapa	m <sup>3</sup>	0,13
Volumen de Acero	m <sup>3</sup>	0
Densidad de acero	kg/ m <sup>3</sup>	7930
Cantidad de Acero Inoxidable por tapa	kg	27
TOTAL, ACERO	kg	162
Volumen total de un Reactor	m <sup>3</sup>	1,16

**TOTAL Acero INÓCULO = 4971 kg**

## 2.2. DISEÑO DE AGITADORES

Agitador tipo turbina de cuatro paletas paralelas al eje de agitación, diseñada para mezclar medios de baja viscosidad característico en fermentación ABE. Para la homogeneización de los reactores de HE y FER se emplearán 2 turbinas alrededor del eje con una distancia aproximada de 1,5 metros. El diseño típico de estos agitadores está basado en las medidas de un agitador de turbina Rushton [38] de la ilustración.

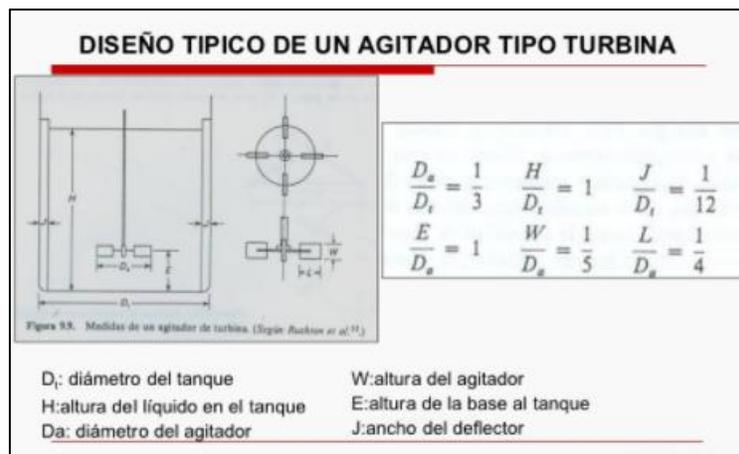


Figura XVIII. Diseño de agitadores tipo turbina. Fuente: [38]

### 2.2.1. AGITADORES DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA

Al iniciar el cálculo del dimensionado de agitadores en la etapa de hidrólisis, se tiene en cuenta los siguientes aspectos:

Diámetro del reactor (m)	4,331
Espesor paletas (m)	0,050
Diámetro del soporte (m)	0,1

a) Dimensionado de Paleta

- Diámetro del agitador

$$D_a = \frac{\text{Diámetro del reactor}}{3}$$

$$D_a = \frac{4,33 \text{ m}}{3} = 1,44 \text{ m}$$

- Ancho de la paleta

$$W = \frac{D_a}{5}$$

$$W = \frac{1,44 \text{ m}}{5} = 0,28 \text{ m}$$

- Largo de paletas

$$L = \frac{D_a}{4}$$

$$L = \frac{1,44 \text{ m}}{4} = 0,36 \text{ m}$$

- Volumen de una paleta

$$V = \text{espesor} * W * L$$

$$V = 0,05 \text{ m} * 1,44 \text{ m} * 0,36 \text{ m} = 0,00521 \text{ m}^3$$

- Cantidad de acero

$$\text{Acero} = V * \rho(\text{acero}) = 0,00521 \text{ m}^3 * 7930 \text{ kg/m}^3 = 41,32 \text{ kg}$$

$$\text{Acero para 4 paletas} = 41,32 \text{ kg} * 4 = 165,2 \text{ kg}$$

b) Dimensionado del disco

- Diámetro del disco

$$D_{\text{disco}} = D_a - L$$

$$D_{\text{disco}} = 1,44 \text{ m} - 0,36 \text{ m} = 0,98 \text{ m}$$

- Área del disco

$$A_{\text{disco}} = \frac{(D_{\text{disco}})^2}{4}$$

$$A_{\text{disco}} = \frac{(0,98 \text{ m})^2}{4} = 0,75 \text{ m}^2$$

- Volumen del disco

$$V = A_{\text{disco}} * \text{espesor}$$

$$V = 0,75 \text{ m}^2 * 0,05 \text{ m} = 0,037 \text{ m}^3$$

- Cantidad de acero

$$\text{Acero} = V * \rho(\text{acero}) = 0,037 \text{ m}^3 * 7930 \text{ kg/m}^3 = 300,78 \text{ kg}$$

$$\text{Acero para 2 discos} = 300,78 \text{ kg} * 2 = 661,15 \text{ kg}$$

c) Dimensionado del tubo de soporte

$$\text{Diámetro tubo de soporte} = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{Altura del reactor} = 5,197 \text{ m}$$

$$\text{Altura del tubo de soporte} = 5,197 \text{ m} - 1,44 \text{ m} = 3,75 \text{ m}$$

- Volumen del tubo de soporte

$$V_{\text{tubo}} = \frac{(D_{\text{tubo}})^2}{4} * H$$

$$V_{\text{tubo}} = \frac{(0,1\text{m})^2}{4} * 3,75\text{m} = 0,03\text{m}^3$$

- Cantidad de acero

$$\text{Acero} = V * \rho(\text{acero}) = 0,03\text{m}^3 * 7930 \text{ kg/m}^3 = 233,78 \text{ kg}$$

$$\text{Acero para 2 tubos} = 233,78 \text{ kg} * 2 = 467,57 \text{ kg}$$

d) Acero Para Motor De Agitación

2 MOTORES DE AGITACIÓN = 80 kg

**TOTAL Acero AGITADORES HE = 2411,89 kg**

## 2.2.2. AGITADORES DE FERMENTACIÓN

Los agitadores de esta etapa se diseñan para los 3 reactores fermentadores principales. Todos los datos relacionados en el cálculo de kg de acero de los agitadores de fermentación se encuentran en la tabla X.

Tabla XL. Dimensionado y diseño de agitadores para fermentación.

AGITADOR TIPO TURBINA			
DIMENSIONADO DE PALETAS		CANTIDAD DE ACERO EN PALETAS	
Diámetro del reactor (m)	4,58	Acero en 1 paleta (kg)	46,24
Espesor paletas (m)	0,05	Acero en 4 paletas (kg)	184,96
Diámetro del agitador (m)	1,53	Acero de paletas en 2 turbinas (kg)	369,92
Ancho de la paleta (m)	0,31	Acero de paletas en 3 Reactores (kg)	1109,75
Longitud de paletas (m)	0,38	CANTIDAD DE ACERO EN DISCO ROTATORIO	
Volumen de una paleta (m <sup>3</sup> )	0,01	Acero en 1 disco (kg)	340,33
DIMENSIONADO DEL DISCO		Acero en 2 discos (kg)	680,67
Diámetro del tubo de soporte (m)	0,10	Acero en 3 reactores (kg)	2042,01
Diámetro del disco (m)	1,05	CANTIDAD DE ACERO EN TUBO DE SOPORTE	
Área del disco (m <sup>2</sup> )	0,86	Acero en 1 tubo (kg)	247,31
Volumen de un disco (m <sup>3</sup> )	0,04	Acero en 3 reactores (kg)	741,92
DIMENSIONADO DEL TUBO DE SOPORTE		Cantidad de Acero en agitadores por reactor (kg)	1297,89
Altura del tubo (m)	3,97	Cantidad TOTAL de Acero en agitadores (kg)	3893,68
Volumen del tubo (m <sup>3</sup> )	0,03	Cantidad TOTAL de acero en motor de agitación (kg)	120,00

**TOTAL Acero AGITADORES FER = 4013,68 Kg**

## 3. BALANCE DE MATERIA: FLUJOS MÁSICOS Y VOLUMÉTRICOS

### 3.1. NECESIDADES DE AGUA

A continuación, se calcula el flujo de referencia para los consumos de agua en la preparación de la pulpa de remolacha.

$$\text{Flujo de pulpa en vida útil} = 100 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 24 \text{ horas} * 300 \text{ días} * 10 \text{ años}$$

$$\text{Flujo de pulpa en vida útil} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 7'200.000,00$$

Corriente del fermentador = 8 kg de butanol

$$\text{Relación} \frac{\text{Butanol}}{\text{Pulpa}} = \frac{8 \text{ kg}}{100 \text{ h}} = 0,08$$

$$\text{kg de Butanol obtenido en vida útil} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 7'200.000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0,08$$

$$\text{kg de Butanol} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = 576.000$$

Tabla XLI. Datos de Referencia para los flujos funcionales

<b>kg de butanol:</b>	
576.000,00	
<b>kg de pulpa utilizada en vida útil:</b>	
7'200.000,00	
<b>Fase de construcción y operación</b>	
Periodo en (años)	10

Como se indica en la tabla XI, se necesita un flujo másico de 1666,67 kg/h de agua para preparar la pulpa en la entrada al proceso de pretratamiento, con un caudal de 1,76 m<sup>3</sup>/h. 1 carga equivale a los kg de agua que entran en 10 minutos al reactor de pretratamiento.

Para determinar el flujo de referencia de las necesidades de agua:

$$\text{kg de agua equivalente a (1Carga)} = 1666,67 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0,1666 \text{ h} = 277,7 \text{ kg}$$

$$\text{Número de cargas al año} = \frac{300 \text{ días}}{1 \text{ año}} * \frac{1 \text{ carga}}{0,0069 \text{ días}} = 43200 \text{ cargas/año}$$

$$\text{Gasto de agua en un año} = 43200 \text{ cargas} * 277,7 \text{ kg} = 12.000.024 \text{ kg}$$

$$\text{Gasto de agua en vida útil} = 10 \text{ años} * 12'000.024 \text{ kg} = 120.000.240 \text{ kg}$$

$$\text{Flujo de referencia del gasto de agua} = \frac{\text{Gasto de agua en vida útil}}{\text{kg de butanol}}$$

$$\text{Flujo de referencia del gasto de agua} = \frac{120.000.240 \text{ kg}}{576.000 \text{ kg}} =$$

**Flujo de referencia del gasto de agua = 208,33 kg/kg de butanol**

### 3.2. REFRIGERANTE (WATER COOLING)

El *water cooling* son las aguas de refrigeración necesarias para enfriar corrientes y a los reactores de hidrólisis enzimática y fermentación. Estos intercambiadores de calores son necesarios para enfriar de 120 a 50 °C la corriente de hidrólisis enzimática y de 50 a 35 °C a la corriente de fermentación. El flujo volumétrico de este refrigerante para toda la sección de fermentación será de  $12,813 \frac{m^3}{h}$ , del análisis energético en [19]. El flujo comprende los gastos de las etapas. El flujo de referencia se calcula a continuación:

$$m^3 \text{ de agua equivalente a (1Carga)} = 12,813 \frac{m^3}{h} * 72h = 922,53 m^3$$

$$\text{Número de cargas al año} = \frac{300 \text{ días}}{1 \text{ año}} * \frac{1 \text{ carga}}{3 \text{ días}} = 100 \text{ cargas/año}$$

$$\text{Gasto de agua en un año} = 100 \text{ cargas} * 922,53 m^3 = 92 253 m^3$$

$$\text{Gasto de agua en vida útil} = 10 \text{ años} * 92 253 m^3 = 922 530 m^3$$

$$\text{Flujo de referencia del gasto de agua} = \frac{\text{Gasto de agua en vida útil}}{\text{kg de butanol}}$$

$$\text{Flujo de referencia del gasto de agua} = \frac{922 530 m^3}{576.000,00 \text{ kg}} =$$

$$\text{Flujo de referencia del gasto de agua} = 1,60 m^3 / Kg \text{ de butanol}$$

### 3.3. VAPOR DE PROCESO (690 kPa) Y VAPOR DE ESTERILIZACIÓN EN FERMENTACIÓN (380 kPa)

El flujo de vapor (690 kPa) será utilizado para calentar tanto la corriente de entrada al pretratamiento como el mantenimiento de la temperatura del reactor. Este flujo será de 0,340 ton/h, del análisis energético en [19]. El flujo de vapor (380 kPa) será utilizado para esterilizar los reactores de fermentación y su valor es de 10 kg/h. La tabla XII presenta el cálculo de los flujos de referencia para los dos flujos de vapor nombrados anteriormente.

Tabla XLII. Flujo de referencia de vapor (690 kPa) y (380 kPa).

VAPOR 690 KPA Pretratamiento			
Gasto de Vapor	kg/h	340	kg
Vapor equivalente a (1 carga)	kg	56,67	
Días del año		300	
# Cargas del año		43200	
Gasto de Vapor al año	kg/año	2448000	
Gasto de Vapor/ vida útil	kg/vida útil	24480000	
Gasto de Vapor/kg Butanol	kg/kg Butanol	42,5	
VAPOR 380 KPA Fermentación			
Gasto de Vapor	kg vapor/kgMS	0,1	kg
Gasto de MS	kg MS	100	
kg de vapor		10	
kg de butanol		8	
Gasto de Vapor/kg Butanol	kg/kg Butanol	1,250	

**Flujo de referencia del gasto de vapor PRE – TR = 42,5 kg/kg de butanol**

**Flujo de referencia del gasto de vapor FER = 1,25 kg/kg de butanol**

### 3.4. REGULADOR DE pH en HE y FER

El flujo de NaOH será utilizado para regular el pH de la corriente de entrada a la hidrólisis enzimática con 0,02 kg/h y a la fermentación con 174,32 kg/h. Los flujos de referencia para la etapa de hidrólisis y fermentación se indica al final de las tablas XIII y XIV.

Tabla XLIII. Flujo de referencia del NaOH en HE.

GASTO NAOH			kg
Gasto de NaOH	kg/h	0,02	
NaOH equivalente a (1 carga)	kg	1,44	
Días del año		300,00	
# Cargas del año		100,00	
Gasto de NaOH al año	kg/año	144,00	
Gasto de NaOH/vida útil	kg/vida útil	1440,00	
Gasto de NaOH/kg Butanol	kg/kg Butanol	0,0025	

**Flujo de referencia de NaOH = 0,0025 kg/kg de butanol**

Tabla XLIV. Flujo de referencia de NaOH en FER.

GASTO NAOH			kg
Gasto de Agua	kg/h	174,32	
Agua equivalente a (1 carga)	kg	329,19	
Días del año		300,00	
# Cargas del año		60,00	
Gasto de Agua al año	kg/año	19751,10	
Gasto de Agua/vida útil	kg/vida útil	197511,04	
Gasto de Agua/kg pulpa	kg/kg Butanol	0,34290	

**Flujo de referencia de NaOH = 0,3429 kg/kg de butanol**

### 3.5. OTROS GASES (CO<sub>2</sub>)

Este flujo hace parte de la corriente de salida de gases residuales que produce la fermentación, que mayoritariamente es CO<sub>2</sub>. Calculado por estequiometría de las reacciones del metabolismo de los microorganismos en la fermentación ABE. Este dato es hallado en el análisis energético del trabajo de investigación [19]. La tabla XV indica el flujo de referencia para este gas.

Tabla XLV. Flujo de referencia para el CO<sub>2</sub> emitido en la fermentación.

CANTIDAD DE CO2 EMITIDO (kg)		
Parámetro	Unidades	Datos
Cantidad másica de CO <sub>2</sub>	kg/h	21,313
CO <sub>2</sub> equivalente a (1 carga)	kg	2557,56

Días del año		300,00
# Cargas del año		60,00
CO2 al año	kg/año	153453,60
CO2/vida útil	kg/vida útil	1534536,00
CO2/kg Butanol	kg/kg Butanol	2,664125

**Flujo de referencia de CO2 = 2,66 kg/kg de butanol**

### 3.7. PULPA AGOTADA

La pulpa agotada es el flujo sólido que separa al líquido hidrolizado en una centrífuga. Dicho flujo determina una carga total de disposición por incineración. En la tabla XVII se calcula el flujo de referencia para 1 kg de butanol.

Tabla XLVI. Flujo de referencia para la pulpa agotada de separación.

CANTIDAD DE PULPA AGOTADA (kg)		
Parámetro	Unidades	Datos
PULPA AGOTADA	kg/h	25,44
P. AGOTADA equivalente a (1 carga)	kg	1831,68
Días del año		300,00
# Cargas del año		100,00
PULPA al año	kg/año	183168,00
PULPA/vida útil	kg/vida útil	1831680,00
PULPA/kg Butanol	kg/kg Butanol	3,18

**Flujo de referencia de pulpa = 3,18 kg/kg de butanol**

### 3.8. ENERGÍA ELÉCTRICA

Los flujos energéticos comprenden la energía eléctrica consumida en las diferentes etapas de la sección de fermentación. Esta energía se encuentra en unidades de potencia (kW), y el software no admite estas unidades como flujo de electricidad, por lo que se calculan a la unidad de electricidad (kWh). La siguiente tabla XVII indica los valores para 8 kg de butanol. Las filas resaltadas son valores no calculados de los datos simulados en [19] y fueron definidas por otra bibliografía.

Tabla XLVII. Energía consumida en la sección de fermentación.

Etapas	Equipo	kW
PRE-TR	Reactores	63,3
HE		
FER		
SEP	Centrífuga	
Prep. Enzi.	Reactores	7,2
Agita HE	Reactores	69,76
Agita FER	Reactores	123,87
Total, energía kW		264,13

Se calcula la electricidad en kWh que se consume en una carga. Luego, los flujos de referencia en las diferentes entradas de energía al sistema.

- Las unidades de potencia se multiplican por el tiempo de residencia de cualquiera de las etapas del proceso, en horas.

$$\# \text{ de cargas} = \frac{63,3 \text{ kW} * 0,16666 \text{ h} = 10,54 \text{ kWh}}{\frac{300 \text{ días del año}}{\text{T. residencia en días}} = \frac{300}{0,006944} \text{ días}} = 43200 \text{ cargas al año}$$

- La energía total en toda la vida útil de la planta de producción.

$$43200 \text{ cargas} * 10,54 \text{ kWh} = 455741,76 \text{ kWh/año}$$

$$455741,76 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * 10 \text{ años} = 4557417,6 \frac{\text{kWh}}{\text{vida útil}}$$

- La energía eléctrica necesaria para obtener 1 kg de butanol.

$$\frac{4557417,6 \frac{\text{kWh}}{\text{vida útil}}}{576000 \text{ kg de butanol}} = 7,91 \frac{\text{kWh}}{\text{kg de butanol}}$$

Recordemos que los tiempos de residencia de las principales etapas de producción son: pre-tratamiento, 10 minutos, hidrólisis enzimática, 72 horas y fermentación, 120 horas. Con estos tiempos de residencia se calcula la energía eléctrica consumida para 8 kg de butanol (1 carga). Otra forma de calcular los flujos de referencia, es dividir el valor de potencia de kW, de la tabla XVII en 8, así:

$$\frac{63,3 \text{ kW}}{8 \text{ kg de butanol}} = 7,91 \frac{\text{kWh}}{\text{kg de butanol}}$$

Las cargas operacionales de este sistema (electricidad) se calculan con el mismo procedimiento, por lo que la tabla XVIII, contiene los datos de cálculo de los flujos de referencia en las etapas de pretratamiento, hidrólisis enzimática y fermentación.

Tabla XLVIII. Valores de energía para cada etapa y actividad del proceso.

GASTO ENERGÉTICO EN PRE-TR			GASTO ENERGÉTICO EN HE		
Electricidad en PRE-TR	25,6	1 Carga (kW)	Electricidad en HE	75,2	1 Carga (kW)
	4,2666	kWh		5414,4	kWh
	300	Días		300	Días
	43200	Cargas		100	Cargas
	184320	kWh/año		541440	kWh/año
	1843200	kWh/vida útil		5414400	kWh/vida útil
	3,2	kWh/Kg Butanol		9,4	kWh/Kg Butanol
GASTO ENERGÉTICO EN SEP			GASTO ENERGÉTICO EN FER		
Electricidad en SEP	15	1 Carga (kW)	Electricidad en FER	152,8	1 Carga (kW)
	1080	kWh		18336	kWh
	300	Días		300	Días
	100	Cargas		60	Cargas
	108000	kWh/año		1100160	kWh/año
	1080000	kWh/vida útil		11001600	kWh/vida útil
	1,875	kWh/Kg Butanol		19,1	kWh/Kg Butanol



## **II. ANEXO. DIAGRAMAS DE PROCESOS**

## II. ANEXO. DIAGRAMAS DE PROCESOS

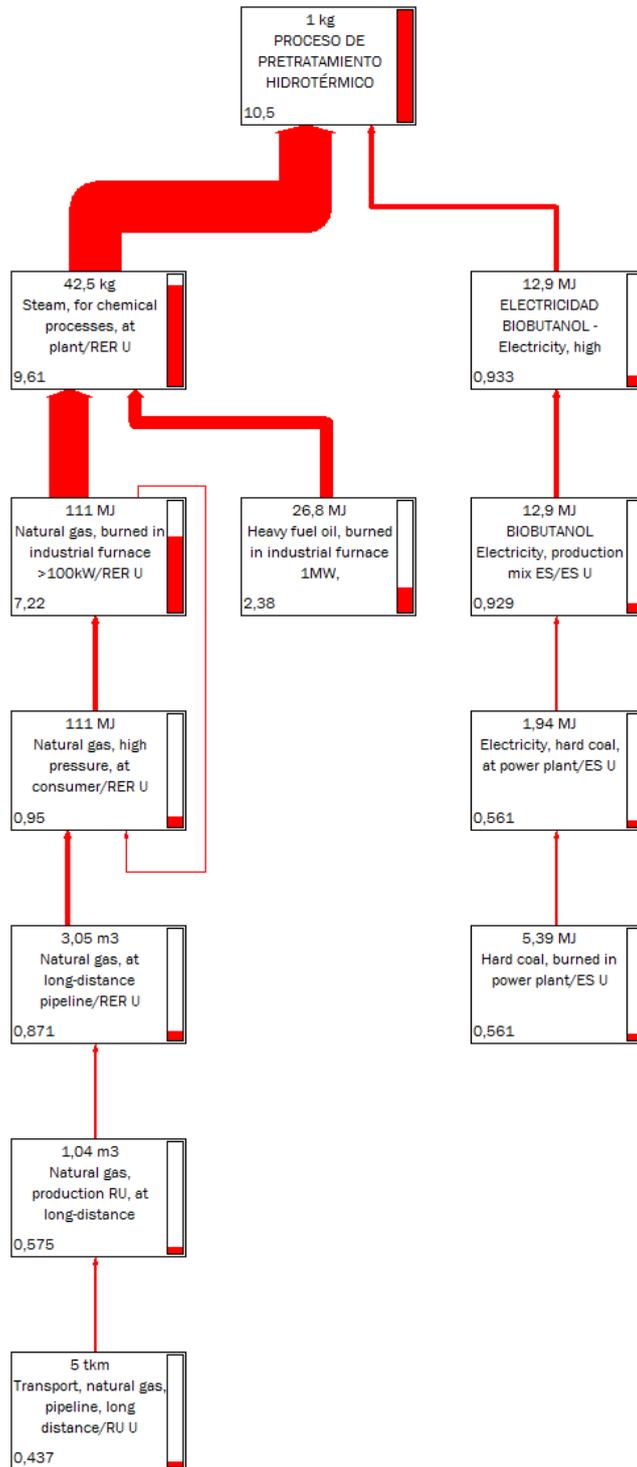


Figura XIX. Resultados de las redes de flujo en la etapa de Pre-tratamiento. Fuente: SimaPro.

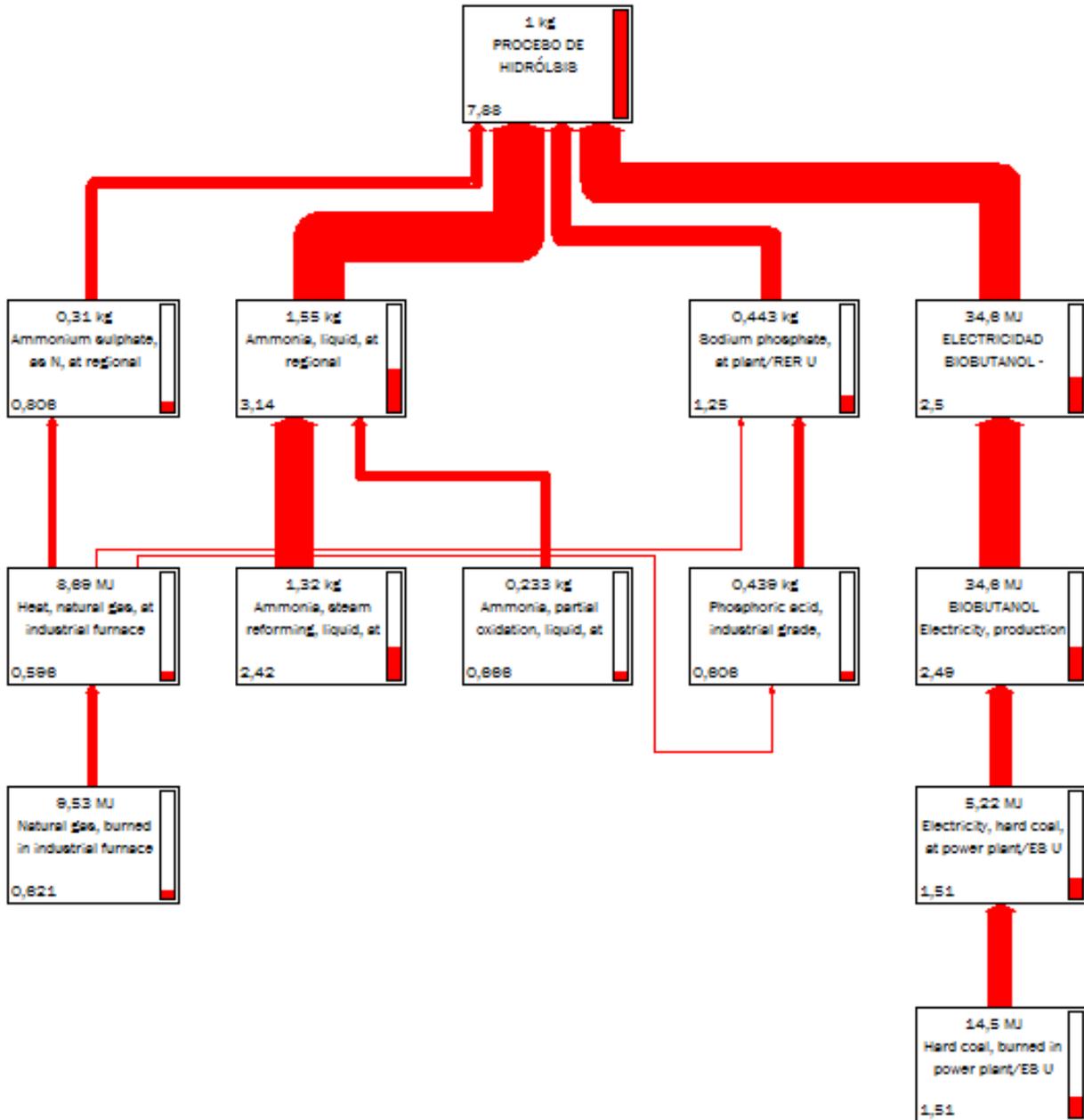


Figura XX. Resultados de las redes de flujo en la etapa de Hidrólisis Enzimática. Fuente: SimaPro.

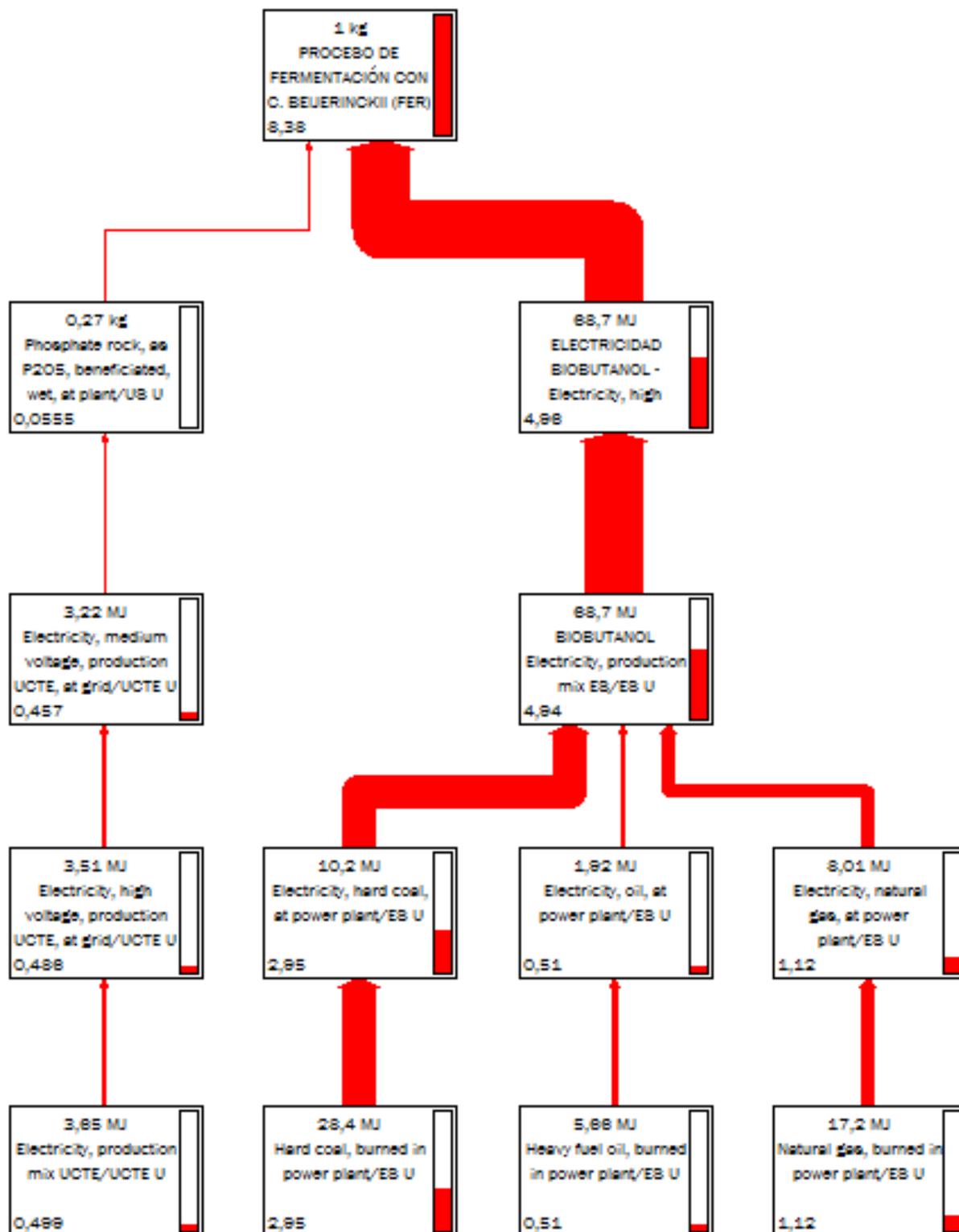


Figura XXI. Resultados de las redes de flujo en la etapa de Fermentación. Fuente: SimaPro.

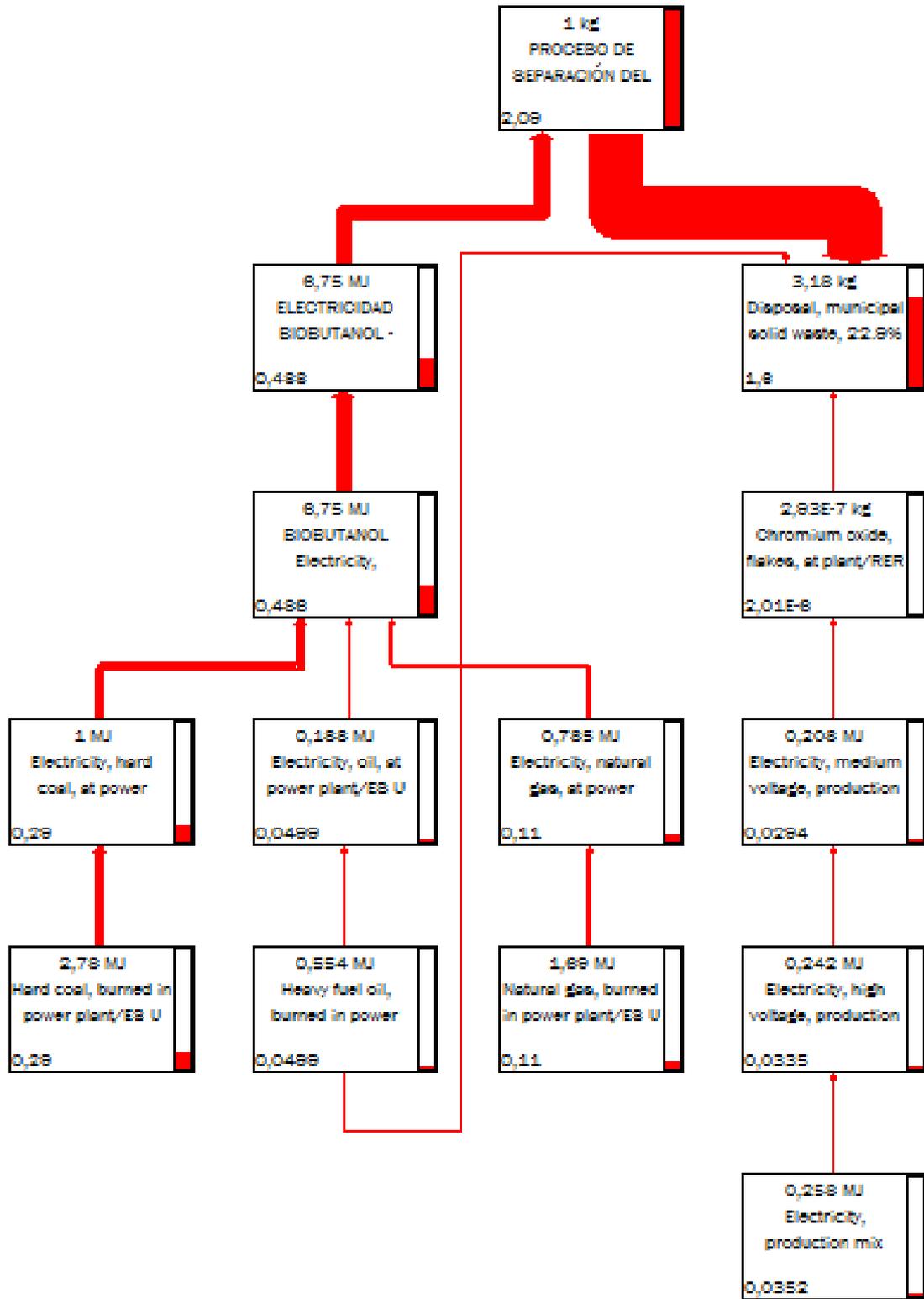


Figura XXII. Resultados de las redes de flujo en la etapa de Separación. Fuente: SimaPro.