



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

MASTER OFICIAL EN
INGENIERÍA AMBIENTAL

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA
PRODUCCIÓN DE BIOBUTANOL A
PARTIR DE BAGAZO DE CERVEZA.**

Autor:

Del Olmo Carrasco, Raúl

Tutor Académico:

Coca Sanz, Mónica
Departamento de Ingeniería
Química y Tecnología del Medio
Ambiente

Valladolid, Septiembre de 2017



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



RESUMEN

Se estima que el 30 por ciento del grano de la cebada utilizado por las industrias cerveceras se convierte en bagazo de cerveza. Por lo que estas industrias junto con la necesidad de introducir energías renovables generan gran interés en la valorización y reutilización de dicho subproducto. El bagazo de cerveza es capaz de generar nuevos productos de valor añadido, como es el caso del biobutanol, un combustible renovable que puede llegar a ser muy rentable utilizarlo como fuente de energía. El proceso consta de cuatro etapas: etapa de pretratamiento, etapa de hidrólisis enzimática, etapa de fermentación y etapa de separación.

En este trabajo, mediante el software Simapro, se ha llevado a cabo el análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso de producción de biobutanol y su separación a partir de un subproducto lignocelulósico (bagazo de cerveza). Se han comparado tres metodologías de evaluación de impacto, escogiéndose la más actualizada y la que mejor cumple los objetivos de estudio (IMPACT 2002+). Con esta metodología, se analiza el proceso de producción de butanol para la unidad funcional: 1 kg de butanol producido. En dicho análisis se concluye que la etapa de pretratamiento es la que mayores impactos ambientales genera, debido a altos consumos de vapor de agua y electricidad.

Para reducir dichos consumos se propone un análisis de sensibilidad en el que se plantean dos alternativas: un nuevo mix eléctrico 100% renovable y aprovechar la energía generada por la caldera de biomasa para reducir al 50% el consumo de vapor en la etapa de pretratamiento. Con dichas alternativas se consigue disminuir un 40% los impactos ambientales asociados al cambio climático, reduciéndose de 1330 kg CO₂ eq. a 822 kg CO₂ eq.

Palabras clave: Biocombustible, renovable, butanol, ACV, bagazo de cerveza



ABSTRACT

It is estimated that 30 percent of the barley grain used by breweries becomes beer bagasse. So these industries together with the need to introduce renewable energy generated great interest in the recovery and reuse of the product. Beer bagasse is capable of generating new value added products, as it is the case of the biobutanol, a renewable fuel that can be very profitable to use it as a source of energy. The process consists of four stages: pretreatment, enzymatic hydrolysis stage, stage of fermentation and separation stage.

In this work, using the software Simapro, is carried out the analysis of life cycle (LCA) of the production of biobutanol process and separation from a by-product lignocellulosic (beer bagasse).

We compared three methods of impact assessment, whichever is the most up-to-date and which best meets the objectives of study (IMPACT 2002+). With this methodology, analysed the process of production of butanol to the functional unit: 1 kg of produced butanol. In this analysis, it is concluded that the pre-treatment stage is which generates greater environmental impacts, due to high consumption of electricity and water vapor.

To reduce such consumption proposes a sensitivity analysis in which there are two alternatives: a new electrical mix 100% renewable and take advantage of the energy generated by the boiler of biomass to reduce to 50% the consumption of steam at the stage of pre-treatment. With such alternatives are able to decrease a 40% of environmental impacts associated with climate change, reducing of 1330 kg CO₂ eq. to 822 kg CO₂ eq.

Keywords: Biofuels, renewable, butanol, ACV, bagasse of beer.



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ÍNDICE

1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	9
2. INTRODUCCIÓN	10
2.1 Los Biocombustibles	10
2.1.1 Biocombustibles de primera generación	11
2.1.2 Biocombustibles de segunda generación.....	11
2.1.3 Biocombustibles de tercera y cuarta generación.....	12
2.2 Butanol	12
2.3 Producción de Biobutanol con Clostridium.....	14
2.4 El Bagazo de cerveza como materia prima	15
2.5 Análisis del ciclo de vida	17
3. OBJETIVOS	19
4. CONSIDERACIONES DE CÁLCULO.....	20
4.1 Definición de la corriente de entrada de bagazo de cerveza	20
4.2 Diagrama de flujo. Breve descripción de proceso	20
4.2.1 Descripción detallada del proceso	24
4.2.1.1 Etapa de pre-tratamiento	24
4.2.1.2 Etapa de hidrólisis enzimática	26
4.2.1.3 Etapa de detoxificación.....	28
4.2.1.4 Etapa de fermentación ABE.....	29
4.2.1.5 Etapa de destilación convencional.....	32
4.3 Simapro. Base de datos.....	34
4.4 Metodologías de evaluación.....	35
4.5 Mix eléctrico.....	39
5. ALCANCE DEL ESTUDIO.....	41
5.1 Unidad Funcional	41
5.2 Límites de sistema	41



6. ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA43

6.1 Definición de componentes de entrada. Flujos de materia y datos de proceso.....44

6.2 Consumos energéticos 49

7. EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA (EICV)....53

7.1 Comparativa de metodologías53

7.1.1 CML 2 Baseline 200053

7.1.2 Eco.Indicator 99 (E).....55

7.1.3 IMPACT 2002+57

7.2 Metodología seleccionada 59

8. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS60

8.1 Comparación del impacto generado por el uso de vapor y consumo eléctrico de la planta61

8.2 Análisis de Sensibilidad..... 64

8.2.1 Comparación de energías convencionales con energías renovables propuestas en el análisis de sensibilidad66

8.2.1.1 MÍX ELÉCTRICO66

8.2.1.2 Integración de los consumos de vapor.....68

8.2.1.3 Comparación con la implantación de ambas alternativas.69

8.2.2 Resumen resultados del análisis de sensibilidad70

9. CONCLUSIONES72

10. BIBLIOGRAFÍA74

ANEXO I. DIAGRAMA DE PROCESOS.....77



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de las propiedades del butanol como carburante.[5]
..... 13

Tabla 2 Concentración de nutrientes para llevar a cabo la fermentación. 23

Tabla 3: Resumen de datos a la entrada y salida de los procesos unitarios en el pretratamiento..... 26

Tabla 4: Resumen de datos a la entrada y salida de los procesos unitarios en la etapa de hidrólisis..... 28

Tabla 5: Resumen composición de los datos a la salida de la detoxificación..... 29

Tabla 6: Composición de el caldo de fermentación 31

Tabla 7: Resumen de la composición de las corriente de salida de la fermentación 32

Tabla 8: Clasificación de categoría de impacto en daños asociados según la metodología IMPACT 2002+ 39

Tabla 9: Mix eléctrico Español en el año 2016. Fuente REE y UNESA ¡Error! Marcador no definido.

Tabla 10: Unidad Funcional..... 41

Tabla 11: Datos de entrada en el tanque de homogeneización (etapa pretratamiento)..... ¡Error! Marcador no definido.

Tabla 12: Datos de entradas y salidas en el proceso de hidrolisis acida (etapa pretratamiento) 44

Tabla 13: Datos de entradas y salidas en el proceso de centrifugación (etapa pretratamiento) 45

Tabla 14: Datos de entradas y salidas en el de hidrólisis acida (etapa hidrólisis acida)..... 46

Tabla 15: Datos de entradas y salidas en la centrifugación (etapa hidrólisis acida)..... 46

Tabla 16: Datos de entradas y salidas en la detoxificación (etapa fermentación) ¡Error! Marcador no definido.

Tabla 17: Datos de entradas en la fermentación (etapa fermentación)..... 48



Tabla 18: Datos de salidas en la fermentación (etapa fermentación)..... 48

Tabla 19: Datos de entrada en la separación convencional (etapa separación)..... 49

Tabla 20: Flujos energéticos de los procesos de la etapa de pretratamiento..... 50

Tabla 21: Flujos energéticos de los procesos de hidrólisis enzimática. .. 50

Tabla 22: Flujos energéticos de los procesos de fermentación. 50

Tabla 23. Flujos energéticos de los procesos de separación..... 51

Tabla 24: Resumen flujos energéticos de cada etapa y consumo total... 51

Tabla 25: Resumen flujos energéticos de cada etapa para la producción de 1 kg de butanol..... 52

Tabla 26: Comparativa de impactos asociados al cambio climático en kilogramos de Dióxido de carbono equivalente. Fuente: SimaPro 58

Tabla 27: Datos de resultados asociados al agotamiento de los recursos naturales. Fuente: SimaPro..... 60

Tabla 28: Sustancias emitidas asociados a la categoría de calentamiento global. Fuente: SimaPro. ¡Error! Marcador no definido.

Tabla 29. Reducción AL 50% del consumo de vapor como alternativa de mejora 65

Tabla 30: Producción de energías renovables como alternativa de mejora 65

Tabla 31. Disminución kg CO2 eq con la alternativa MIX ELECTRICO. Fuente: SimaPro 67

Tabla 32. Disminución kg CO2 eq con la alternativa Integración de los consumos de vapor. Fuente: SimaPro 68

Tabla 33. Disminución kg CO2 eq con ambas alternativas. Fuente: SimaPro 70

Tabla 34. Resumen de los porcentajes de reducción de consumo generados..... 70

Tabla 35. Resumen de la disminución de kg CO2 eq emitidos con cada alternativa 70



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo del proceso	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2: Diagrama de la etapa de pretratamiento.....	24
Figura 3: Diagrama de la etapa de Hidrólisis enzimática.	27
Figura 4: Diagrama de la detoxificación.....	29
Figura 5: Diagrama de la fermentación	30
Figura 6: Diagrama de flujo de separación tras fermentación ABE.	33
Figura 7: Simplificación de categorías en Impact 2002+..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 8: Procedimiento del análisis de inventario según la norma..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9: Caracterización en CML Baseline 2000. Fuente: SimaPro	54
Figura 10: Normalización en CML Baseline 2000. Fuente: SimaPro.....	54
Figura 11: Caracterización en Eco-indicator 99. Fuente: SimaPro.....	55
Figura 12: Normalización en Eco-indicator 99. Fuente: SimaPro	56
Figura 13: Caracterización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro	57
Figura 14: Normalización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro	58
Figura 15: Normalización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro.	60
Figura 16: Análisis de los componentes destacados de la sección de pretratamiento. Fuente: SimaPro.....	62
Figura 17: Normalización del análisis en sección de pretratamiento. Fuente: SimaPro	62
Figura 18: Producción neta de energía con respecto al calentamiento global. Fuente: SimaPro	63
Figura 19: Producción neta de energía con respecto al uso de energías no renovables. Fuente: SimaPro	64
Figura 20: Caracterización en la comparación de alternativa MIX ELECTRICO. Fuente: Simapro.	66
Figura 21: Evaluación del daño en la comparación de alternativa MIX ELECTRICO. Fuente: SimaPro	67



Figura 22: Evaluación del daño en la comparación de alternativa integración de los consumos de vapor. Fuente: SimaPro	68
Figura 23: Caracterización en la comparación de alternativas Fuente: Simapro.	69
Figura 24: Evaluación del daño en la comparación de alternativas. Fuente: Simapro.	69



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente el consumo humano desmedido de combustibles fósiles está provocando un aumento significativo de la temperatura del planeta, emitiendo grandes cantidades de gases de efecto invernadero, siendo el dióxido de carbono el más relevante. Estos contaminantes están acelerando y modificando los procesos naturales del planeta de forma drástica, cambiando las condiciones climatológicas rápidamente. Estas emisiones lejos de disminuir, cada vez son mayores con el aumento de la población mundial y el incremento de emisiones de los países en desarrollo industrial.

Debido a mi formación académica y lo preocupantes que son estos datos, he decidido realizar mi Trabajo de Fin de Máster en un tema relacionado con la búsqueda de energías renovables y combustibles menos dañinos para el medio ambiente. Lo que me llevó a interesarme en la producción de nuevos carburantes mas amigables con el medio, como es el caso del biobutanol. Además, se trata de un biocarburante elaborado a partir de un subproducto de fabricación (bagazo de cerveza) que se genera en grandes cantidades, y debido al gran interés económico que tiene para las industrias, pienso que en un futuro próximo conseguirá desplazar a los actuales combustibles fósiles y disminuirá los impactos ambientales que genera la humanidad actualmente.



2. INTRODUCCIÓN

2.1 Los Biocombustibles

Los biocombustibles existen desde antes de la invención de los automóviles llegando incluso a ser utilizados para hacer funcionar los primeros motores diesel diseñados por Henry Ford a principios del siglo XX. Se diferencian de los combustibles fósiles en que estos últimos provienen de plantas y animales que han estado enterrados durante millones de años, mientras que los biocombustibles se fabrican a partir de biomasa.

La quema de combustibles fósiles emite grandes cantidades de dióxido de carbono, gas de efecto invernadero causante del calentamiento global. Dicho gas es absorbido por los vegetales mientras crecen. Se puede decir que los cultivos destinados a la fabricación de biocombustible absorben tanto dióxido de carbono como el que emiten al quemarse. A diferencia de las reservas petrolíferas subterráneas, los biocombustibles son un recurso renovable.

Por lo tanto, los biocombustibles son una alternativa a los combustibles fósiles que comprenden una gran variedad de productos tales como el bioetanol, biobutanol, biodiésel, metano, entre otros.

En función del origen de la biomasa y las tecnologías utilizadas para la elaboración del biocombustible se clasifican tres grupos:



2.1.1 Biocombustibles de primera generación

Los biocombustibles de primera generación son aquéllos que tienen su origen en cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana. Se producen a partir de materiales azucarados, materiales amiláceos, aceites vegetales o grasas animales y las tecnologías de producción son las más simples y económicas. [2]

Las ventajas de su producción es que se podría repetir indefinidamente, pero actualmente presentan gran controversia en cuanto a su producción, ya que se necesitan altos porcentajes de suelos fértiles y sus costes de generación son relativamente altos. Estas limitaciones han favorecido la búsqueda de biomasa no comestible para generar biocombustibles. [3]

2.1.2 Biocombustibles de segunda generación

Se diferencian de los de primera generación en que no compiten con la producción de alimentos. Son aquellos producidos a partir de residuos lignocelulósicos como la paja de cereal, cáscaras, cortezas de frutos, madera, residuos sólidos.

Son muy abundantes y baratos, y además, pueden ser cultivados en tierras no destinadas para el consumo humano.

Sin embargo, presentan algunos inconvenientes como el coste del uso de enzimas para la degradación de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina; requieren equipos complejos; tienen bajos rendimientos y el coste de las hidrólisis es muy elevado. Esto dificulta su producción a gran escala. [4]



2.1.3 Biocombustibles de tercera y cuarta generación

Son vegetales no destinados a la alimentación, con una gran capacidad de crecimiento rápido y potencial energético. La principal diferencia con los de segunda generación es que no se obtienen a partir de residuos.

Actualmente su producción se obtiene principalmente a partir de algas, las cuales, presentan altos rendimientos de generación de combustibles partiendo de una menor cantidad de materia prima. Los inconvenientes de este tipo de producción es que requiere condiciones muy controladas de temperatura, y la aplicación de nutrientes. [5]

En cuanto a los biocombustibles de cuarta generación son aquellos que incluyen la modificación genética de micro-algas para la producción de energías renovables.

2.2 Butanol

El butanol (alcohol butílico o 1-butanol) es un alcohol primario constituido por 4 carbonos cuya fórmula es $C_4H_{10}O$. Es un líquido inflamable, incoloro, con un olor característico que irrita las membranas mucosas produciendo un efecto narcótico en altas concentraciones. El butanol es miscible en solventes orgánicos comunes y parcialmente miscible en agua. [5]

La producción biológica del butanol (biobutanol) se produce de forma natural en algunas especies de microorganismos, como las bacterias *Butyribacterium methylotrophicum*, *Clostridium butyricum* y la arquea *Hyperthermus butylicus*. Pero el género más estudiado es el de *Clostridium* ya que son capaces de convertir diversas fuentes de carbono, como la glucosa, galactosa, celobiosa, manosa, xilosa y arabinosa, en combustibles y químicos como el butanol, acetona y etanol. [6]



Actualmente, se utiliza el etanol como principal biocombustible, pero su bajo contenido energético, una alta presión de vapor (lo cual ocasiona que se evapore fácilmente), y que es altamente higroscópico; han provocado un incremento del uso del biobutanol como combustible. Por su parte el biobutanol tiene un contenido energético muy similar al de la gasolina (véase Tabla 1) y su presión de vapor es 11 veces menor que la del etanol.

La capacidad higroscópica de un combustible es de particular importancia, la tendencia del etanol a mezclarse con el agua ambiental hace imposible que éste sea agregado al combustible con mucha anterioridad a su uso. Por lo que el etanol debe ser transportado de forma independiente, implicando un coste adicional. Además, se usa en mezclas con gasolina en baja proporción (E10) sin modificación del motor o en alta proporción (E85, E100) con modificación del motor. Sin embargo, el butanol es miscible con la gasolina en cualquier proporción y no requiere modificaciones en el motor ni en el sistema de distribución. [7]

Tabla 1. Comparación de las propiedades del butanol como carburante. [5]

	Butanol	Gasolina	Etanol
Densidad de energía (MJ/L)	29.2	32	19.6
Proporción aire-combustible	11.2	14.6	9
Calor de vaporización (MJ/Kg)	0.43	0.36	0.92
Número de octanos de investigación	96	91-96	129
Número de octanos en motor	78	81-89	102

A la vista de la tabla se puede apreciar que el butanol tiene un número de octanos bastante menor que el del etanol, pero esto no supone una desventaja, ya que los valores son similares a los de la gasolina.

En definitiva, el butanol presenta mayores ventajas como carburante respecto al etanol puesto que alcanza un 96% de energía en comparación con 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 sin tener que hacer adaptaciones en los motores; es menos corrosivo;



y tiene menor presión de vapor que el etanol, por lo que se puede mezclar directamente con la gasolina y es más seguro de transportar. [8]

2.3 Producción de Biobutanol con Clostridium

La producción industrial de biobutanol se realiza mediante la fermentación bacteriana ABE (fermentación aceto-butílica-etílica o fermentación acetona-butanol-etanol). Habitualmente se usan bacterias del género *Clostridium* siendo las especies más destacadas: *Clostridium acetobutylicum*, *Clostridium beijerinckii*, *Clostridium saccharobutylicum* y *Clostridium saccharobutylaceticum*.

En este TFM se ha considerado se producción a partir de un residuo industrial lignocelulósico de segunda generación (bagazo de cerveza), sacarificado fermentado mediante fermentación ABE con *Clostridium beijerinckii*. Los residuos lignocelulósicos tienen una estructura compleja que requieren de tratamientos complejos para su modificación. Dichos tratamientos deben 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 azúcares fermentables de tipo pentosas (xilosas, galactosas, arabinosas) y hexosas (glucosa, fructosa, sacarosa).

El proceso de obtención de butanol a partir de bagazo de cerveza consta de **cuatro** etapas principales:

- Etapa de pre-tratamiento donde se modifica la estructura lignocelulósica que dificulta el acceso de las enzimas.
- Etapa de hidrólisis enzimática, donde se producen azúcares fermentables a partir del bagazo pretratado mediante la adición de enzimas
- Etapa de fermentación ABE
- Etapa de separación y purificación de productos de fermentación a partir del caldo mediante destilación.



Antes de la fermentación, suele ser necesaria una etapa de detoxificación para eliminar inhibidores del proceso de fermentación, ya que las bacterias usadas son muy sensibles a la presencia de estos compuestos.

2.4 El Bagazo de cerveza como materia prima

España es el 4º productor de cerveza de la UE y 11º en el mundo produciendo 33,6 millones de hectolitros al año. Con estos datos de producción se estima que se generan alrededor de 672 mil toneladas de bagazo de cerveza anuales.[9] El proceso de producción de cerveza consta de 11 etapas que se describen brevemente a continuación:

- **Malteado.** Proceso previo necesario para poder extraer los azúcares de la cebada u otros cereales que luego se transformarán en alcohol.
- **Mezcla de grano.** Esta etapa consiste en la mezcla en seco de los diversos granos que intervienen en la receta. La proporción de los constituyentes define el perfil del grano, el color y la transparencia de la cerveza.
- **Inicio de Maceración.** Inicio de maceración. Se mezcla el grano al agua a una temperatura de 67°C. La mezcla anterior se somete a una serie de operaciones destinadas a activar diversas enzimas que reducen las cadenas largas de azúcares en otras más simples y fermentables.
- **Final de maceración.** Cuando se considera que la mezcla contiene todos los elementos necesarios para su receta, se eleva la temperatura de 82°C, lo que destruye todas las enzimas.
- **Filtrado.** Es preciso retirar el grano de la mezcla. Esto se hace mediante un filtro obteniendo por una lado el mosto y por otro el grano separado (bagazo de cerveza).



- **Cocción y adiciones de lúpulo.** Esta cocción sirve principalmente para destruir todos los microorganismos que hayan podido introducirse en el mosto. Tiene también otras funciones técnicas como el control del pH.
- **Refrigeración.** Al no poderse inocular la levadura a temperaturas más altas de 35°C, y que es una forma de evitar que cualquier otro microorganismo entre en el mosto, se enfría lo más rápidamente posible.
- **Inoculación de la levadura.** Se introduce el cultivo de la levadura que es diferente en función de quien sea el elaborador.
- **Fermentación.** La levadura primero se reproduce muy activamente consumiendo el oxígeno contenido en el mosto provocando gran cantidad de espuma y un importante burbujeo. Cuando se acaba el oxígeno, la levadura empieza a consumir el azúcar y lo transforma en alcohol y anhídrido carbónico.
- **Segundas fermentaciones.** Las cervezas más artesanas son envasadas con adiciones de azúcar (o de mosto) y de levadura fresca. Esto provoca una segunda fermentación en la botella, responsable de la efervescencia de la cerveza.
- **Maduración.** Normalmente, las mejores cervezas reciben un tiempo prudencial de maduración en ambientes controlados para favorecer la segunda fermentación y el desarrollo adecuado de gustos y aromas. El tiempo de maduración puede ir de dos semanas a tres meses. Algunos tipos de cerveza ya hechos para ser madurados durante mucho tiempo pueden ser sometidos a maduraciones de hasta tres años

El bagazo es el mayor subproducto de la industria de cervecera, representando alrededor del 85% de los subproductos generados. Se produce aproximadamente 20 kg de bagazo (80% humedad en peso) por cada 100 litros de cerveza fabricados. Es la fracción sólida resultante de la filtración del mosto en la fase de macerado, tras la cual, se separa el mosto dulce de la fracción insoluble. [10]



La composición promedio del bagazo de cerveza, dependiendo del tipo es: [11]

- 12-25% Celulosa
- 20-25% Hemicelulosa
- 19-30% de proteína
- 12-28% lignina
- 10% lípidos
- 2-5% cenizas

Además de para producir biocombustibles, el bagazo de cerveza tiene otros usos como abono de tierras de cultivo y como alimento del ganado. El problema es que su alto contenido en humedad provoca que se degrade rápidamente.

2.5 Análisis del ciclo de vida

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es un método objetivo que permite estimar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando los procesos de fabricación, transporte operación y desmontaje del producto. Analiza el uso de materia, energía y las emisiones al entorno, para determinar el impacto asociado y poder proponer estrategias de mejora ambiental.

Se trata de una herramienta de diagnóstico que también puede ser utilizada para la comparación de las cargas ambientales de productos o servicios, proporcionando la posibilidad de poder definir acciones de mejora en las etapas del proceso con el objetivo de disminuir los impactos ambientales asociados. Esta herramienta requiere recopilar e identificar de forma detallada todas las etapas y consumos del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su eliminación.



Un ACV no tiene que comprender el ciclo de vida completo de un producto o actividad obligatoriamente, puede abarcar procesos explícitos, siempre y cuando se especifiquen los motivos. La definición del alcance de estudio de un ACV es una parte muy importante en esta metodología.

La preparación del inventario engloba todas las entradas y salidas de flujos, debe ser detallada y simplificada. Una vez recopilados estos datos se validará su importancia estableciéndose una unidad funcional.

La unidad funcional es el elemento clave del ACV y ha de ser definido claramente. Es la medida de la función del sistema estudiado y da una referencia de cuáles son las entradas y salidas relacionadas. Esto permite la comparación de dos sistemas diferentes. [12]



3. OBJETIVOS

El objetivo del presente TFM es la realización de un análisis del ciclo de vida que analice el impacto ambiental asociado de cada etapa de producción de biobutanol a partir de un subproducto de la industria cervecera: bagazo de cerveza.

Para cumplir con éste objetivo global, se plantean los siguientes objetivos parciales:

1. Plantear un modelo de ciclo de vida del proceso productivo para obtener 1 kg de butanol puro.
2. 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.
3. Comparar e identificar la etapa de mayor impacto ambiental en la producción de biobutanol.
4. Evaluar los resultados de impactos asociados con la metodología escogida.
5. Proponer acciones de mejora para disminuir los impactos del ciclo de vida asociados.
6. Realizar un análisis de sensibilidad que modifique la distribución del mix eléctrico español con una tecnología 100% basada en energías renovables. Reducir el consumo eléctrico de la etapa de mayor consumo en un 30% de su valor inicial.



4. CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Los datos de inventario para la realización del este ACV se han obtenido a partir del TFG -Evaluación técnica de alternativas de pretratamiento y sacarificación de bagazo de cerveza- de la universidad de Valladolid realizado por Héctor Fraile en 2017. Para el diseño y simulación de este ACV se ha utilizado el software Simapro.

4.1 Definición de la corriente de entrada de bagazo de cerveza

Para la simulación con el software se ha considerado una cantidad de bagazo de cerveza a la entrada del proceso de producción de 2000 kg de materia seca al día (MS/día). El bagazo de cerveza original contiene una humedad del 70% w/w, por lo que tendrá que alimentarse una mayor cantidad de bagazo húmedo para tener 2000 kg de MS/día.

Es decir, para conseguir dicha cantidad de bagazo de cerveza seco a la entrada del proceso, se tiene alimentar 278 kg/h de bagazo de cerveza húmedo (83,33 kg MS/h). Esto equivale a 6672 kg BSG/día (4670 kg H₂O y 2000 kg MS/día). La composición del bagazo en base seca es la siguiente:

- Glucano 23,1%
- Xilano 12,5%
- Arabinano 7,4%
- Lignina insoluble en ácido 14,1%
- Lignina soluble en ácido 4,9%
- Proteína 15,1%
- Ceniza 3,5%
- Extractivos 15%

La corriente de entrada se encuentra a una temperatura de 20°C y una presión de 1 bar.

4.2 Diagrama de flujo. Breve descripción de proceso.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo del proceso seguido de una breve descripción del proceso. [1]

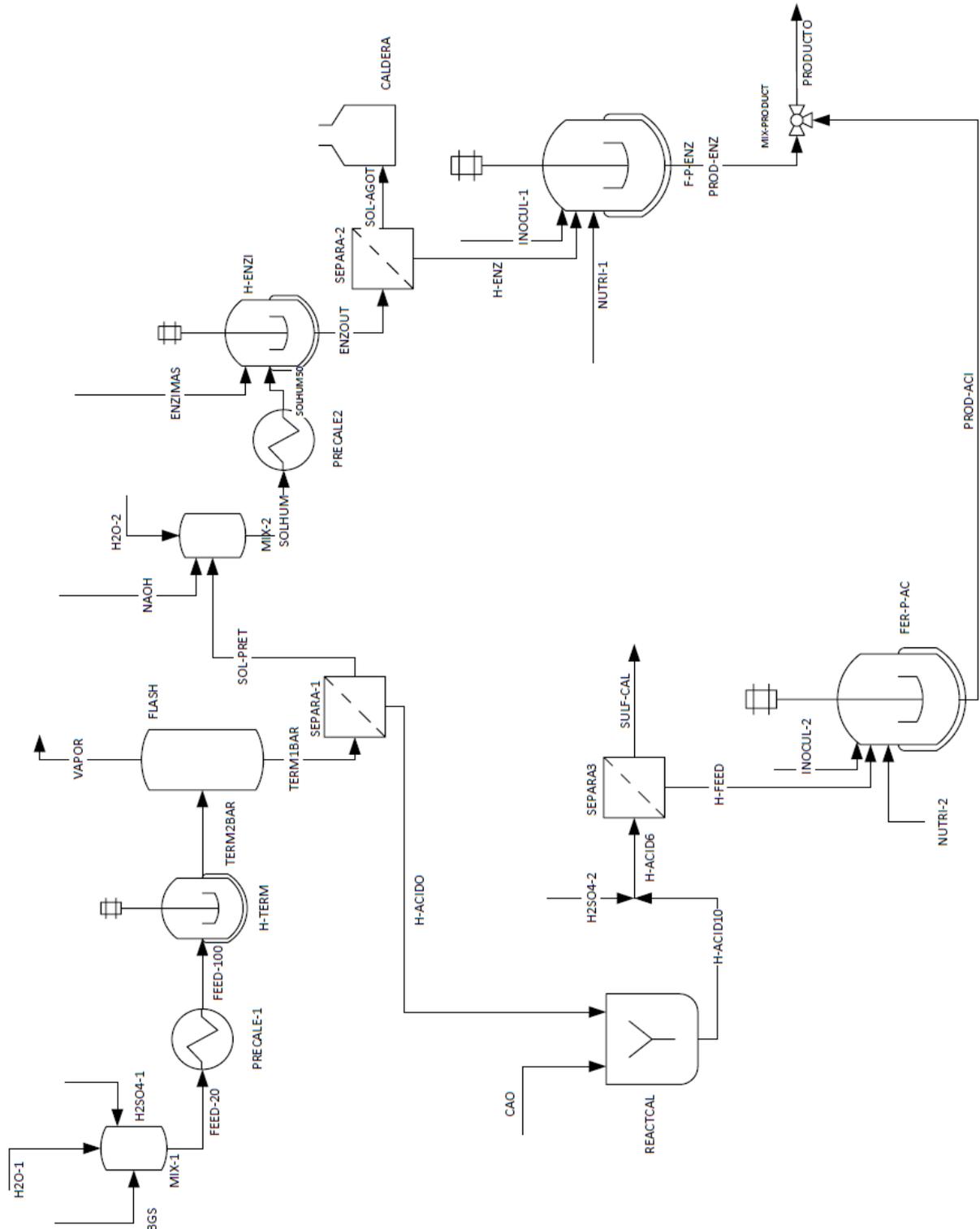


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso [1]



En primer lugar, se mezcla el BSG con agua hasta alcanzar una concentración de sólidos del 15% w/w, que se ha fijado para llevar a cabo el pretratamiento. A continuación se añade ácido sulfúrico concentrado hasta alcanzar pH1 y se precalienta en un intercambiador de calor hasta 100°C, temperatura a la que se introduce en el reactor de pre-tratamiento donde se lleva a cabo la hidrólisis térmica a 120°C durante 30 min.

Al finalizar la hidrólisis térmica, se reduce la presión de la corriente (alrededor de 2 bar) hasta 1 bar en un flash. La fase líquida y sólida se conduce a una centrífuga donde se separa el sólido del hidrolizado. Aquí el proceso se divide en dos rutas, por una parte se va a tratar el sólido resultante de la hidrólisis térmica, y por otro lado se va a acondicionar el hidrolizado resultante de la hidrólisis térmica para la fermentación.

Ruta sólido hidrólisis térmica

El sólido resultante de la hidrólisis térmica (pH 1,5) es neutralizado con sosa hasta alcanzar un pH 5,3 (pH óptimo para llevar a cabo la hidrólisis enzimática) y se le añade agua hasta alcanzar una concentración de sólidos de 10% w/w. Después de enfriar la corriente hasta 50°C, se le añaden enzimas Celluclast 1.5L (0,27g/g MS) y Novozyme 188 (0,04g/g MS) y se introduce en el reactor de hidrólisis enzimática. La hidrólisis enzimática se lleva a cabo a 50°C durante 48h con agitación a 150rpm.

El resultado de la hidrólisis enzimática se centrifuga. El sólido resultante o sólido agotado se conduce a una caldera donde es quemado para un aprovechamiento energético. El hidrolizado enzimático se lleva a fermentación

Ruta hidrolizado térmico

El hidrolizado térmico (líquido) es detoxificado con cal para la eliminación de los inhibidores formados. Se aumenta el pH hasta 10 en un tanque con agitación durante 15min. Posteriormente se neutraliza con ácido sulfúrico hasta un pH 6 y se filtra para eliminar el sulfato de calcio sólido que se haya podido formar.



Los líquidos resultantes de la hidrólisis enzimática e hidrolizado de pre-tratamiento detoxificado se mezclan para proceder con una fermentación. A ésta corriente se le añade una serie de nutrientes (macro/micro) con el fin de acondicionar el medio de fermentación. Se pueden observar en la tabla 2 los compuestos añadidos.

Tabla 2 Concentración de nutrientes para llevar a cabo la fermentación

Nutriente	Concentración g/L
Acetato de amonio	2,2
Sulfato de magnesio	0,4
Sulfato de manganeso	0,015
Cloruro sódico	0,01
Cloruro de potasio	0,06
sulfato de hierro	0,05
Fosfato ácido dipotásico	0,5
Fosfato ácido monopotásico	0,5
Acido para amino benzoico	0,00001

Fermentación

Los hidrolizados de pre-tratamiento y enzimático, junto con el inóculo y los nutrientes se introducen en los reactores de fermentación, usando tres reactores en paralelo. La fermentación se lleva a cabo a 35°C durante 96h y con una agitación de 175rpm. [1]

Separación

Tras este proceso, nos encontramos con un caldo que contiene butanol de gran pureza, pero se encuentra muy diluido. La etapa de separación consiste en separar las impurezas y recuperar en una corriente aparte el butanol mediante destilación convencional.

El caldo de alimentación entra por la corriente. Se comienza con una secuencia indirecta de separación, es decir, separar primeramente los más pesados. De tal manera, se obtiene en la primera torre por colas agua pura y por cabezas la mezcla ternaria.

La mezcla correspondiente se separa mediante otra torre, obteniendo por cabezas el compuesto más liviano, la acetona pura. Por colas, sale el azeótropo heterogéneo butanol agua.

El azeótropo se separa mediante un decantador, aprovechando la inmiscibilidad parcial de sus componentes. Además, ahora será posible trabajar simultáneamente en las dos zonas del diagrama.

Mediante las últimas dos torres se consigue separar totalmente el butanol y el agua puros por los fondos de las columnas

En ambas columnas se obtiene por cabezas el azeótropo, que se recircula al decantador para poder separar todo el butanol.

4.2.1 Descripción detallada del proceso

4.2.1.1 Etapa de pre-tratamiento

Esta primera etapa engloba la mezcla de los componentes iniciales (BSG y agua), el precalentamiento hasta 100 °C , hidrólisis en el reactor de pre-tratamiento térmico ácido (a 120°C), reducción de presión mediante flash y la posterior centrifugación de la corriente de salida. Esta salida genera dos corrientes: el sólido pretratado húmedo y el hidrolizado de pre-tratamiento. (véase Figura 2)

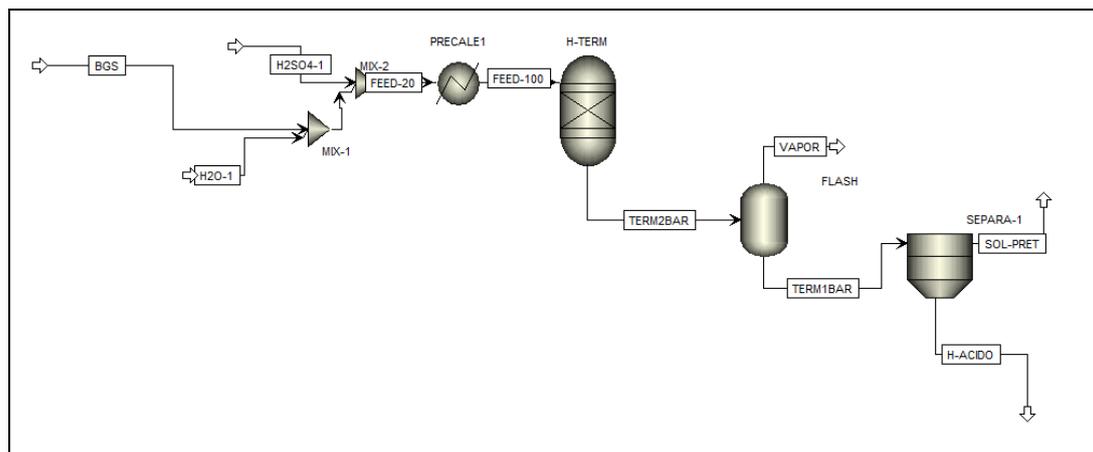


Figura 2: Diagrama de la etapa de pretratamiento [1]



Como se ha explicado en el apartado 4.1, los datos de entrada son de 2000 kg MS/día, con una humedad del 70% w/w. Al BSG se le añade agua hasta un porcentaje de materia seca del 15% w/w y se le añade ácido sulfúrico hasta pH 1.

La cantidad de inhibidores formados es de 2 kg/h de acético, 0,05 kg/h de furfural y 0,06 kg/h de HMF. La recuperación de sólidos es del 46,9%. En el pretratamiento térmico o hidrólisis acida el pH a la entrada es de 1 y a la salida se mantiene en torno a 1,5.

A la salida de la hidrólisis se sitúa un flash para disminuir la presión de 2 a 1 bar, en el cual se desprenden 19,7 kg/h de vapor que está compuesto principalmente por vapor de agua (99,74%) y una pequeña parte de acético (0,25%). La etapa de centrifugación posterior separa el sólido pretratado del hidrolizado de pretratamiento.

En la tabla 3 se muestran los flujos de los compuestos en las corrientes de entradas y salida las etapas de pretratamiento, hidrólisis ácida y centrifugación.

Tabla 3: Resumen de datos a la entrada y salida de los procesos unitarios en el pretratamiento.

	Unidades	FEED-100	TERM2BAR	SOL-PRET	H-ACIDO
		(entrada hidrólisis acida)	(salida hidrólisis acida)	(salida centrif. solidos)	(Salida centrif. liquidos)
Temperature	C	100	120	100.03	100.03
Pressure	bar	1.01	2.02	1	1
Mass Liquid Fraction		0.85	0.93	0.7	1
Mass Solid Fraction		0.15	0.07	0.3	0
Mass Flows	kg/h	558.81	558.81	126.63	412.52
GLUCAN	kg/h	19.52	10.04	10.04	0
GLUCOSE	kg/h	0	9.48	1.68	7.8
XYLAN	kg/h	13.1	2.31	2.31	0
XYLOSE	kg/h	0	10.79	1.91	8.88
ARABINAN	kg/h	6.25	1.21	1.21	0
ARABINOS	kg/h	0	5.04	0.89	4.15
AIL	kg/h	11.92	11.26	11.26	0
ASL	kg/h	4.14	2.54	2.54	0
LIGNIN	kg/h	0	2.04	0.36	1.68
PROTEIN	kg/h	12.76	9.15	9.15	0
ASH	kg/h	2.96	1.49	1.49	0
ASHSOL	kg/h	0	1.47	0.26	1.21
EXTRACTI	kg/h	12.68	0	0	0
EXTRASOL	kg/h	0	12.68	2.24	10.44
H2SO4	kg/h	0	0	0	0
WATER	kg/h	472.22	475.12	80.57	374.95
HMF	kg/h	0	0.06	0.01	0.05
FURFURAL	kg/h	0	0.06	0.01	0.05
ACETICO	kg/h	0	2.07	0.36	1.66

4.2.1.2 Etapa de hidrólisis enzimática.

En esta etapa entran los sólidos resultantes de la salida de separación por centrifugación. Este sólido pretratado se acondiciona, incrementando su pH hasta 5,3 con NaOH y añadiendo agua hasta alcanzar una concentración de sólidos de 10% w/w. Después se enfría de 53°C hasta 50°C y se le agregan enzimas Celluclast 1.5L (0,27g/g MS) y Novozyme 188 (0,04 g/g MS).

El tiempo de hidrólisis es de 48h. Posteriormente se separa el sólido agotado y el hidrolizado enzimático por centrifugación, quedando el sólido con una humedad del 70%. En la siguiente imagen se muestra el diagrama de flujo de la etapa de hidrólisis enzimática.

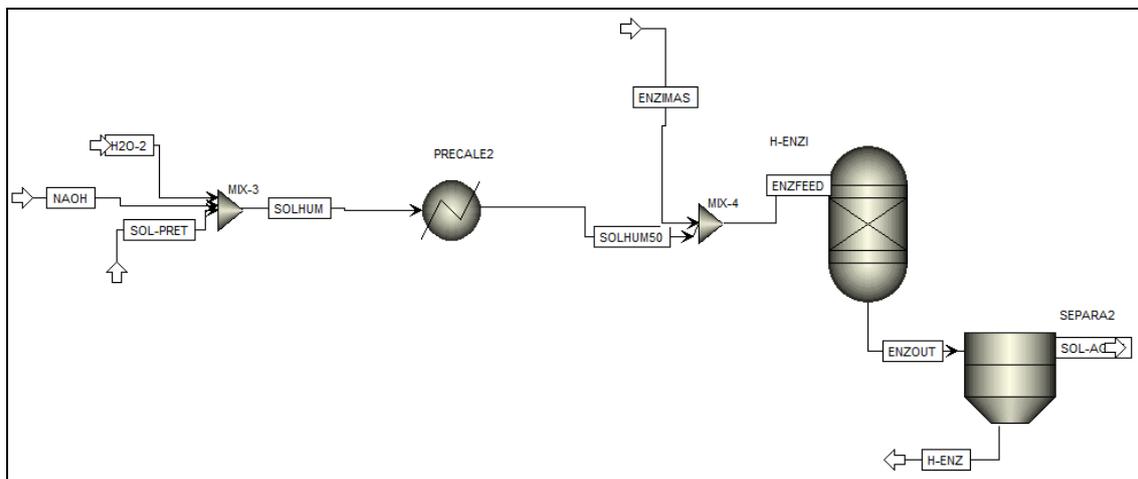


Figura 3: Diagrama de la etapa de Hidrólisis enzimática. [1]

Los flujos de las corrientes de salida de la centrifugación se recogen en la tabla 4. El sólido resultante está compuesto principalmente por lignina en más de un 50% w/w, que posteriormente se puede llevar a una caldera donde su combustión proporcionará energía útil.

En la siguiente tabla se muestran los valores de salida de la centrifugación y los valores de entrada y salida de la hidrólisis enzimática.



Tabla 4: Resumen de datos a la entrada y salida de los procesos unitarios en la etapa de hidrólisis.

	Unidades	ENZFEED	ENZOUT	SOL-AGOT	H-ENZ
		(entrada hidrólisis)	(salida hidrólisis)	Salida centrf. a caldera	Salida centrf. a fermentacion
Temperature	C	50	50	50	50
Pressure	bar	1	1	1	1
Mass Liquid Fraction		0.9	0.9	0.7	1
Mass Solid Fraction		0.1	0.1	0.3	0
Mass Flows	kg/h	380.24	392.01	128.68	263.33
GLUCAN	kg/h	10.04	1	1	0
GLUCOSE	kg/h	1.68	10.71	2.73	7.98
XYLAN	kg/h	2.31	0.69	0.69	0
XYLOSE	kg/h	1.91	3.52	0.9	2.63
ARABINAN	kg/h	1.21	0.73	0.73	0
ARABINOS	kg/h	0.89	1.38	0.35	1.03
AIL	kg/h	11.26	11.25	11.25	0
ASL	kg/h	2.54	2.54	2.54	0
LIGNIN	kg/h	0.36	0.36	0.09	0.27
PROTEIN	kg/h	9.15	9.14	9.14	0
ASH	kg/h	1.49	1.48	1.48	0
ASHSOL	kg/h	0.26	0.26	0.07	0.19
EXTRASOL	kg/h	2.24	2.25	0.57	1.67
H2SO4	kg/h	0	0	0	0
WATER	kg/h	333.9	333.54	85.01	248.52
GLUDASA	kg/h	0	0	0	0
CELULASA	kg/h	0	0	0	0
HMF	kg/h	0.01	0.02	0	0.01
FURFURAL	kg/h	0.01	0.02	0.01	0.02
ACETICO	kg/h	0.04	0.4	0.1	0.3

4.2.1.3 Etapa de detoxificación

A la corriente líquida del pretratamiento de hidrolizado ácido se le añade óxido de calcio (CaO) hasta conseguir un pH 10 dentro de un reactor agitado durante 15 min. Posteriormente se adiciona ácido sulfúrico para neutralizar el pH hasta 6 y se centrifuga para eliminar el sulfato de calcio que haya precipitado. El proceso necesita una temperatura alta, suficiente con la temperatura de entrada de la corriente de hidrolizado de pretratamiento (56°C). Los inhibidores de fermentación formados en el pretratamiento son eliminados en esta etapa.

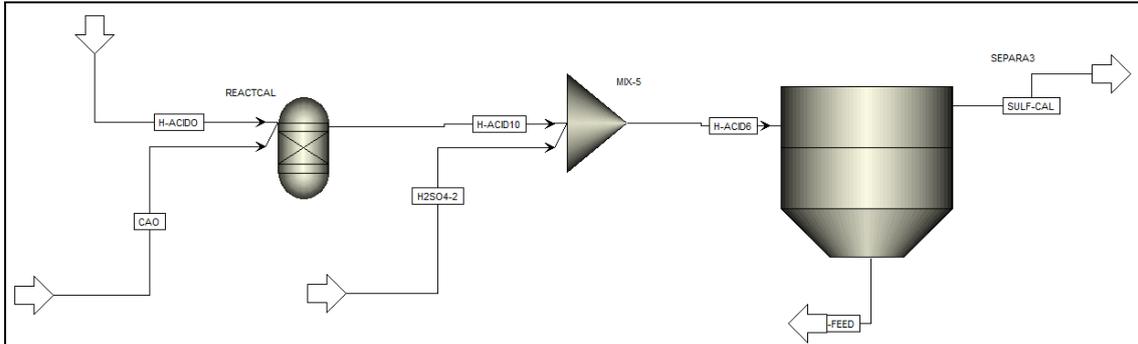


Figura 4: Diagrama de la detoxificación. [1]

La siguiente tabla muestra las composiciones de las corrientes del sulfato de calcio centrifugado y del hidrolizado detoxificado.

Tabla 5: Resumen composición de los datos a la salida de la detoxificación.

	Unidades	H-FEED	SULF-CAL
Temperature	C	56.32	56.32
Pressure	bar	1	1
Mass Liquid Fraction		1	0.7
Mass Solid Fraction		0	0.3
Mass Flows	kg/h	407.25	7.13
GLUCOSE	kg/h	7.71	0.09
XYLOSE	kg/h	8.78	0.11
ARABINOS	kg/h	4.1	0.05
LIGNIN	kg/h	1.66	0.02
ASHSOL	kg/h	1.2	0.01
EXTRASOL	kg/h	10.31	0.13
WATER	kg/h	370.97	4.54
HMF	kg/h	0.05	0
FURFURAL	kg/h	0.05	0
SULFCALC	kg/h	0	2.14

4.2.1.4 Etapa de fermentación ABE

En la figura 5 se representa la etapa de fermentación con los tres fermentadores en paralelo. Las corrientes hidrolizadas resultantes de las etapas anteriores se mezclan para generar una corriente única que se lleva al proceso de fermentación. También se le añaden los nutrientes necesarios indicados en la tabla 2.

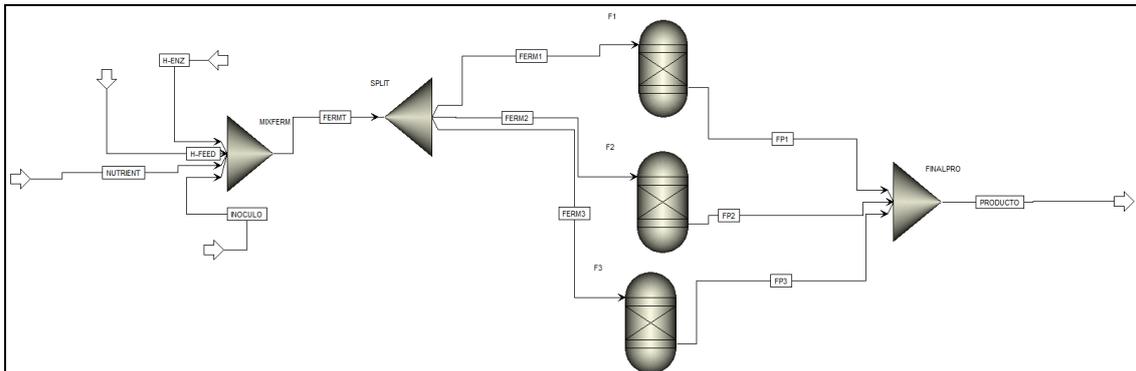


Figura 5: Diagrama de la fermentación. [1]

La tabla 6 muestra la composición del caldo de fermentación. El motivo de que la fermentación se realice en tres reactores en paralelo en vez de en uno de mayor tamaño es que éstos requieren menor potencia de agitación y son más fáciles de controlar. Por lo tanto, la corriente de caldo de fermentación se divide en tres flujos iguales que alimentan a cada uno de los reactores en paralelo.

Cada una de estas tres corrientes presenta la misma composición, recogida en la tabla 6 correspondiente a la alimentación del proceso de fermentación. La tabla 7 resume la composición de las corrientes de la salida de la etapa de fermentación.



Tabla 6: Composición del caldo de fermentación

	Unidades	FERMT	FERM1-2-3
Temperature	C	36.95	36.95
Pressure	bar	1	1
Mass Liquid Fraction		1	1
Mass Solid Fraction		0	0
Mass Flows	kg/h	678.507	226.169
GLUCOSE	kg/h	15.632	5.211
XYLOSE	kg/h	11.3	3.767
ARABINOS	kg/h	5.078	1.693
LIGNIN	kg/h	1.905	0.635
ASHSOL	kg/h	1.377	0.459
EXTRASOL	kg/h	11.854	3.951
WATER	kg/h	614.26	204.753
ZYMO	kg/h	0.07	0.023
HMF	kg/h	0.065	0.022
FURFURAL	kg/h	0.061	0.02
MGSO4	kg/h	0.281	0.094
MNSO4	kg/h	0.011	0.004
NACL	kg/h	0.007	0.002
KCL	kg/h	0.042	0.014
FESO4	kg/h	0.035	0.012
K2HPO4	kg/h	0.351	0.117
KH2PO4	kg/h	0.351	0.117

Se puede observar cómo entran a cada fermentador 226,169 kg/h de disolución de azúcares, con una cantidad de azúcares fermentables de 10,671kg/h cada corriente.



Tabla 7: Resumen de la composición de las corrientes de salida de la fermentación

	Unidades	FP1	PRODUCTO
Temperature	C	35	35
Pressure	bar	1	1
Mass Liquid Fraction		1	1
Mass Flows	kg/h	226.169	678.507
GLUCOSE	kg/h	0.047	0.141
XYLOSE	kg/h	0.376	1.127
ARABINOS	kg/h	0.235	0.704
LIGNIN	kg/h	0.635	1.905
ASHSOL	kg/h	0.459	1.377
EXTRASOL	kg/h	3.951	11.854
WATER	kg/h	212.511	637.534
BIOMASS	kg/h	0.235	0.704
HMF	kg/h	0.022	0.065
FURFURAL	kg/h	0.02	0.061
BUTIRIC	kg/h	0.47	1.409
BUTANOL	kg/h	1.596	4.789
ACETONE	kg/h	0.587	1.761
ACETICO	kg/h	1.285	1.854

La composición de la corriente de salida la producción final es de 4,789 kg/h de butanol; 1,854 kg/h de ácido acético; 1,760 kg/h de acetona y 1,4086 kg/h de ácido butírico.

4.2.1.5 Etapa de destilación convencional

Esta etapa se lleva a cabo tras el proceso de fermentación y es de suma importancia para la separación y purificación de los compuestos. En la figura 6 se muestra un diagrama del proceso de recuperación mediante destilación..

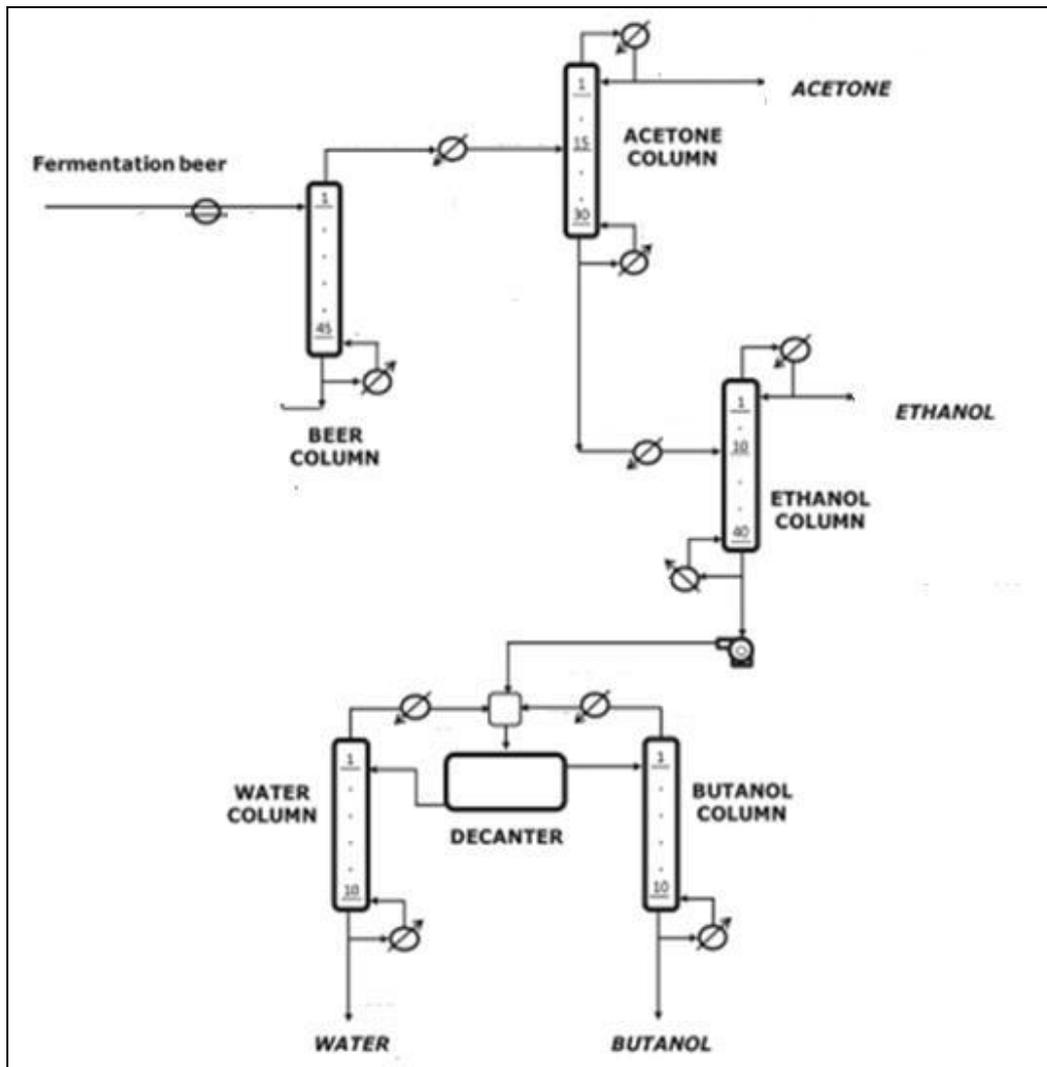


Figura 6: Diagrama de flujo de separación tras fermentación ABE.

A la vista del esquema, la corriente de entrada (Fermentación beer o caldo de fermentación) entra a la primera torre de destilación, donde se retiran por colas la mayor cantidad de agua posible de forma que el butanol, la acetona, y el etanol salgan íntegramente por la corriente destilada.

En la segunda torre se separa por cabezas toda la acetona con el grado de pureza (mínimo del 99,5%) deseado para su posterior venta.



La tercera torre tiene la misión de retirar todo el etanol posible. Dicho compuesto forma un azeótropo homogéneo con el agua que no es eliminado al 100%. Para conseguir eliminarlo y obtener una pureza mayor sería necesario estudiar incluir otros métodos, como una destilación azeotrópica o una adsorción mediante tamices moleculares. Sin embargo, este objetivo está fuera de rango en este TFM.

Por último, a las dos últimas torres llega una mezcla de butanol y agua que no es posible separar completamente con una torre simple de destilación, debido a que ambas sustancias forman un azeótropo heterogéneo.

Para conseguir hacer efectiva la separación, la mezcla de butanol y agua se introduce en un decantador, y cada corriente saliente se envía a una torre distinta, donde se obtiene por colas el butanol y el agua respectivamente. Por cabezas se obtiene la mezcla azeotrópica en forma de vapor, la cual se condensa y se envía de nuevo al decantador. Esa recirculación es la que posibilita la separación efectiva de ambos compuestos. [21]

4.3 Simapro. Base de datos

Este trabajo se ha realizado mediante el 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 que proporciona datos de proceso documentados para una gran cantidad de productos.



4.4 Metodologías de evaluación

En este ACV se han seleccionado los métodos de evaluación CML 2000, Eco-Indicator 99 (E) e IMPACT 2002+ para evaluar comparativamente los impactos ambientales de la producción de biobutanol. El objetivo 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 el software SimaPro están adaptados a las normas de estandarización (ISO 14040:2006) e (ISO 14044:2006). A continuación se describen dichos métodos:

CML 2 Baseline 2000:

Este método ha sido desarrollado por el Centro de estudios Medio Ambientales de la Universidad de Leiden, NL, 2000; y trata de proporcionar 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 [13].

Los impactos calculados por este método se clasifican como potenciales en vez de reales, porque cuantifican la posición intermedia entre el punto de intervención ambiental y el daño causado.



Eco-Indicator 99 (E):

Es uno de los métodos de evaluación de impacto más utilizados, es el sucesor del Eco-indicador 95. Se trata del primer método de evaluación del impacto final, que permitió que la carga ambiental de un producto se expresara en una sola puntuación. [14]

Este método modela el daño producido por emisiones con el objetivo de realizar 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: Daño a la salud humana, a la calidad del ecosistema y a los recursos. Con estas tres categorías se obtiene un indicador. [15]

Además, también contiene categorías de impacto como ozone layer, radiation o acidification/eutrophication.

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 7. Tiene categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización aceptados internacionalmente

Este método y el Eco-indicador 99 son metodologías de planteamientos orientados a los daños causados, mientras que CML 2000 tiene un planteamiento enfocado a los problemas ambientales. IMPACT 2002+ tiene más categorías de daño con respecto a los anteriores.

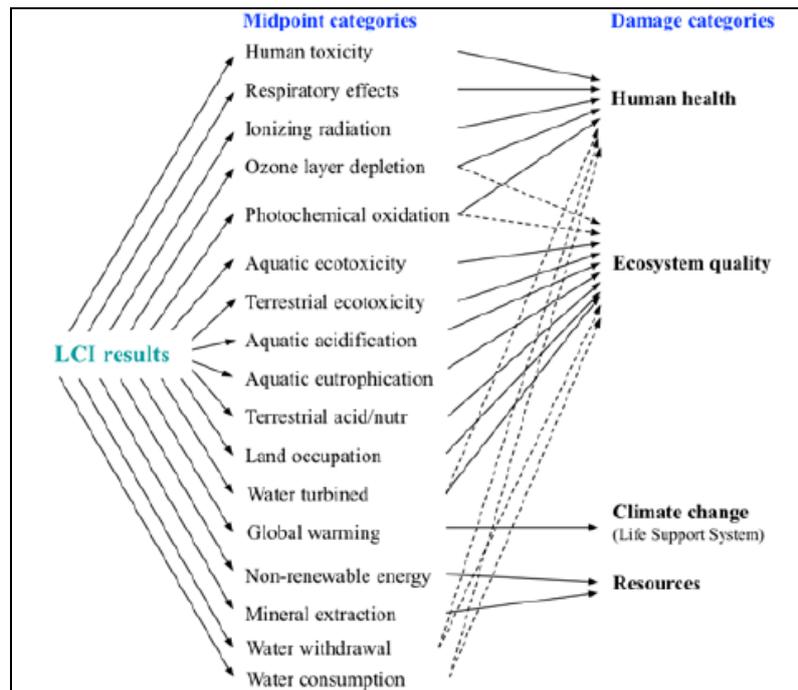


Figura 6: Simplificación de categorías en Impact 2002+.

Para la realización de este ACV se debe escoger las categorías de impacto y el modelo de caracterización que sea más coherente con los objetivos del estudio. En este estudio se ha elegido como categoría de impacto las emisiones de gases de efecto invernadero y su contribución al cambio climático. Esta categoría viene referenciada en el ámbito de la convención marco del compromiso de reducción de emisiones publicada en el año 2008 que comprende el *Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático 2013-2020* en España. [16]

Para la interpretación de resultados, hay que 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.

- Enfoque de punto final

Se diferencia del anterior en que el enfoque está orientado a daños. El término "Punto final" hace referencia a un indicador final que ya está reflejado en un problema.. El indicador final traduce el impacto de la categoría, en función de "Human Health", "Ecosystem Quality", "Resources".

Los métodos de "IMPACT 2002+ y Eco-indicador 99" son indicadores de punto final mientras que el método de "CML 2 Baseline 2000" presentan en un enfoque de punto intermedio.

Según la norma *UNE-EN ISO 14044, de gestión ambiental y análisis de ciclo de vida*, la evaluación de impactos de ciclo de vida (EICV) debe contener algunos elementos obligados y otros opcionales. [16] La *normalización, ponderación y puntuación única* son elementos opcionales mientras que la *caracterización* es un elemento obligatorio.

La caracterización consiste en aplicar de forma escalada 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 [17].

La normalización consiste en agrupar las categorías de impacto en un problema ambiental global y su objetivo es el de comparar categorías de impacto con las mismas unidades estándar para toda Europa, ya que dichas categorías en función del estudio contienen diferentes unidades y no todas

provocan los mismos efectos o daños. Cabe destacar que *Ecoinvent* es una base de datos de referencia en Europa [17]. Los elementos de ponderación y puntuación única no se evaluarán en este ACV.

En la tabla 8 se muestran categorías de impacto del método ``IMPACT 2002+`` clasificados en daños o efectos normalizados.

Tabla 8: Clasificación de categoría de impacto en daños asociados según la metodología IMPACT 2002+

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

4.5 Mix eléctrico

La expresión mix energético se describe como la combinación de las diferentes fuentes de energía existentes que se utilizan para cubrir la demanda eléctrica de un país.

En España, que en el año 2015 tuvo una demanda nacional de 263,1 TWh, las centrales generadoras pertenecen, en su mayoría, a las diferentes comercializadoras de electricidad, las cuales la introducen posteriormente en la red de transporte a través del operador del sistema eléctrico nacional. [18].



El mix de producción de energía en España se encuentra actualmente distribuido con un porcentaje de energías renovable del 39%, según el balance energético [19]. La fuente de energía renovable propuesta en este estudio sería el uso de butanol como combustible.

La distribución del mix energético español en el año 2016 se muestra en la tabla 9.

Tabla 9: Mix eléctrico Español en el 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%)



5. ALCANCE DEL ESTUDIO

5.1 Unidad Funcional

La elección de la unidad funcional es una parte muy importante del planteamiento para realizar un ACV, puesto que con ella se referencian los sistemas de flujos de entrada y salida; y es la herramienta que permite comparar dos sistemas diferentes.

Para la realización de este trabajo se ha escogido 1 kg de butanol producido como unidad funcional.

Tabla 10: Unidad Funcional

DATOS BÁSICOS		
UNIDAD FUNCIONAL	1	kg de Butanol
A la salida de los fermentadores el Butanol producido es prácticamente puro, pero es necesario añadir una nueva etapa de separación para obtener un producto limpio y listo para comercializarse.		

5.2 Límites del sistema

La realización del análisis de ciclo de vida para la producción de biobutanol a partir de bagazo de cerveza se centra en la evaluación y comparación de las cuatro etapas de producción; de estas etapas, tres de ellas son las habituales de una fermentación ABE: **etapa de pre-tratamiento, etapa de hidrólisis enzimática, y etapa de fermentación.**

El biobutanol producido al final de las anteriores etapas está muy diluido, lo que lleva a incluir la cuarta y última etapa, la **etapa de separación.** Se ha seleccionado el método de destilación convencional.



En cuanto a los límites de trabajo establecidos para realizar el ACV, se resumen a continuación:

- No se tendrá en cuenta el transporte, almacenamiento, procesos de reciclado, reutilización, ni flujos y materiales de acondicionamiento previos al pre-tratamiento ni tras el proceso de separación.
- No se tendrá en cuenta los consumos del proceso de producción de bagazo de cerveza.
- No se tendrá en cuenta la construcción de la planta.
- Se comparan los impactos asociados de cada etapa para la producción de 1 kg de butanol.
- De los procesos unitarios descritos para la elaboración de biobutanol no se tendrán en cuenta para la realización del análisis: el proceso flash ni el proceso de lavado en la etapa de hidrólisis enzimática..
- El ACV se ha diseñado en función de los consumos requeridos para producir 1 kg de butanol, no se ha tenido en cuenta el tiempo.

6. ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

El análisis de inventario permite ver de forma clara los datos introducidos en el programa así como la identificación y evaluación de las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida de una actividad o producto.

Según la norma UNE-EN ISO 14044:2006, previamente a la realización del análisis es necesario realizar las actividades que se describen en la figura 8.

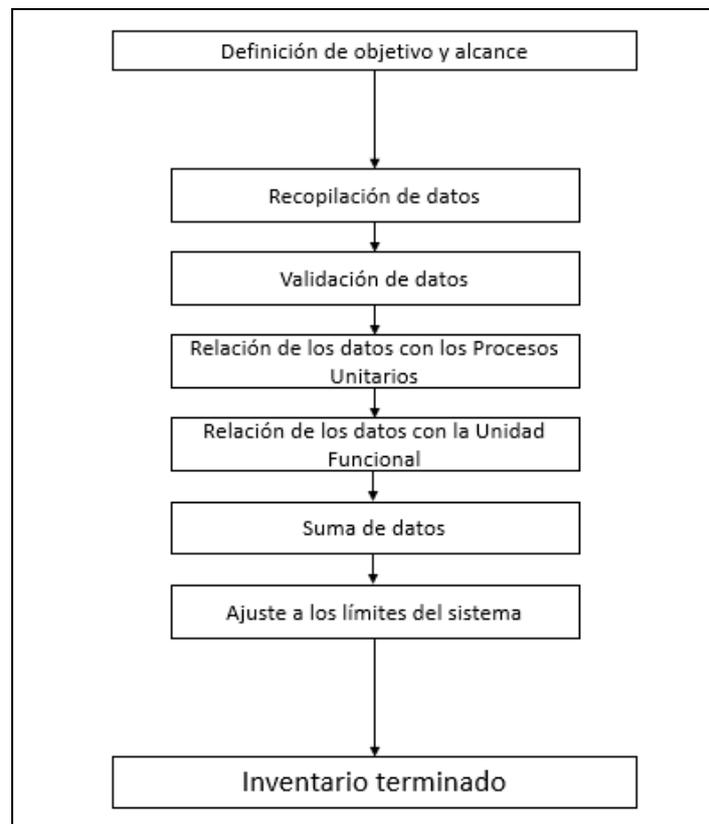


Figura 8: Procedimiento del análisis de inventario según la norma. Fuente: NORMA UNE-EN ISO 14044, 2006 [16].

Este procedimiento indica que antes de determinar los límites del sistema, es necesario recopilar los datos cualitativos o cuantitativos para cada proceso unitario, éstos cuantificarán las entradas y salidas del proceso. En estas entradas y salidas debe incluirse los consumos de energía y materias



primas, residuos, productos, emisiones a la atmósfera...etc. Además, deberá incluir un cálculo en el que se relacionen los datos con la unidad funcional para incluirlos en el programa de cálculo Simapro.

6.1 Definición de componentes de entrada. Flujos de materia y datos de proceso

Estos datos han sido obtenidos a partir de los TFGS *“Evaluación Técnica de Alternativas de Pretratamiento y Sacarificación de Bagazo de Cerveza”* [1] y *“Biocombustibles a partir de residuos agroalimentarios: aumento de la sostenibilidad del proceso mediante el desarrollo de estrategias de separación”* [21] y han sido recalculados para nuestra unidad funcional, 1 kg de biobutanol generado.

En las siguientes tablas 11-16 se recogen los datos de entradas y salidas de los procesos unitarios del proceso de producción del butanol, que están comprendidos en las etapas de pretratamiento, hidrolisis enzimática, fermentación y separación

Tabla 11: Datos de entrada en el tanque de homogeneización (etapa pretratamiento)

	Unidades	IMPUT
Bagazo de cerveza	kg/h	19.060
Agua	kg/h	49.530

Tabla 12: Datos de entradas y salidas en el proceso de hidrolisis acida (etapa pretratamiento)

	Unidades	SOL-PRET	H-ACIDO
Mass Flows	kg/h	28.954	94.322
GLUCAN	kg/h	2.297	0.000
GLUCOSE	kg/h	0.384	1.785
XYLAN	kg/h	0.529	0.000
XYLOSE	kg/h	0.437	2.032
ARABINAN	kg/h	0.277	0.000
ARABINOS	kg/h	0.204	0.950
AIL	kg/h	2.577	0.000
ASL	kg/h	0.581	0.000
LIGNIN	kg/h	0.082	0.384
PROTEIN	kg/h	2.094	0.000



Tabla 12.1: Continuación tabla Datos de entradas y salidas en el proceso de hidrolisis acida (etapa pretratamiento)

	Unidades	SOL-PRET	H-ACIDO
ASH	kg/h	0.341	0.000
ASHSOL	kg/h	0.059	0.277
EXTRACTI	kg/h	0.000	0.000
EXTRASOL	kg/h	0.513	2.389
H2SO4	kg/h	0.000	0.000
WATER	kg/h	18.437	85.801
HMF	kg/h	0.002	0.011
FURFURAL	kg/h	0.002	0.011
ACETICO	kg/h	0.082	0.380

Tabla 13: Datos de entradas y salidas en el proceso de centrifugación (etapa pretratamiento)

	Unidades	SOL-PRET	H-ACIDO
Mass Flows	kg/h	28.954	94.322
GLUCAN	kg/h	2.297	0.000
GLUCOSE	kg/h	0.384	1.785
XYLAN	kg/h	0.529	0.000
XYLOSE	kg/h	0.437	2.032
ARABINAN	kg/h	0.277	0.000
ARABINOS	kg/h	0.204	0.950
AIL	kg/h	2.577	0.000
ASL	kg/h	0.581	0.000
LIGNIN	kg/h	0.082	0.384
PROTEIN	kg/h	2.094	0.000
ASH	kg/h	0.341	0.000
ASHSOL	kg/h	0.059	0.277
EXTRACTI	kg/h	0.000	0.000
EXTRASOL	kg/h	0.513	2.389
H2SO4	kg/h	0.000	0.000
WATER	kg/h	18.437	85.801
HMF	kg/h	0.002	0.011
FURFURAL	kg/h	0.002	0.011
ACETICO	kg/h	0.082	0.380

Tabla 14: Datos de entradas y salidas en el de hidrólisis acida (etapa hidrólisis acida)

		ENZFEED	ENZOUT
		(entrada hidrólisis)	(salida hidrólisis)
Mass Flows	kg/h	87.011	89.705
GLUCAN	kg/h	2.297	0.229
GLUCOSE	kg/h	0.384	2.451
XYLAN	kg/h	0.529	0.158
XYLOSE	kg/h	0.437	0.805
ARABINAN	kg/h	0.277	0.167
ARABINOS	kg/h	0.204	0.316
AIL	kg/h	2.577	2.574
ASL	kg/h	0.581	0.581
LIGNIN	kg/h	0.082	0.082
PROTEIN	kg/h	2.094	2.092
ASH	kg/h	0.341	0.339
ASHSOL	kg/h	0.059	0.059
EXTRASOL	kg/h	0.513	0.515
H2SO4	kg/h	0.000	0.000
WATER	kg/h	76.407	76.325
GLUDASA	kg/h	0.000	0.000
CELULASA	kg/h	0.000	0.000
HMF	kg/h	0.002	0.005
FURFURAL	kg/h	0.002	0.005
ACETICO	kg/h	0.009	0.092

Tabla 15: Datos de entradas y salidas en la centrifugación (etapa hidrólisis acida)

		SOL-AGOT	H-ENZ
		Salida centr. a caldera	Salida centr. a fermentacion
Mass Flows	kg/h	29.446	60.259
GLUCAN	kg/h	0.229	0.000
GLUCOSE	kg/h	0.625	1.826
XYLAN	kg/h	0.158	0.000
XYLOSE	kg/h	0.206	0.602
ARABINAN	kg/h	0.167	0.000
ARABINOS	kg/h	0.080	0.236
AIL	kg/h	2.574	0.000
ASL	kg/h	0.581	0.000
LIGNIN	kg/h	0.021	0.062
PROTEIN	kg/h	2.092	0.000



Tabla 15.1: Continuación tabla Datos de entradas y salidas en la centrifugación (etapa hidrólisis acida)

		SOL-AGOT	H-ENZ
		Salida centr. a caldera	Salida centr. a fermentacion
ASH	kg/h	0.339	0.000
ASHSOL	kg/h	0.016	0.043
EXTRASOL	kg/h	0.130	0.382
H2SO4	kg/h	0.000	0.000
WATER	kg/h	19.453	56.870
GLUDASA	kg/h	0.000	0.000
CELULASA	kg/h	0.000	0.000
HMF	kg/h	0.000	0.002
FURFURAL	kg/h	0.002	0.005
ACETICO	kg/h	0.023	0.069

Tabla 16: Datos de entradas y salidas en la detoxificación (etapa fermentación)

	Unidades	H-FEED	SULF-CAL
Mass Flows	kg/h	93.19	1.63
GLUCOSE	kg/h	1.76	0.02
XYLOSE	kg/h	2.01	0.03
ARABINOS	kg/h	0.94	0.01
LIGNIN	kg/h	0.38	0.00
ASHSOL	kg/h	0.27	0.00
EXTRASOL	kg/h	2.36	0.03
WATER	kg/h	84.89	1.04
HMF	kg/h	0.01	0.00
FURFURAL	kg/h	0.01	0.00
SULFCALC	kg/h	0.00	0.49



Tabla 17: Datos de entradas en la fermentación (etapa fermentación)

	Unidades	FERMT
Mass Flows	kg/h	155.265
GLUCOSE	kg/h	3.577
XYLOSE	kg/h	2.586
ARABINOS	kg/h	1.162
LIGNIN	kg/h	0.436
ASHSOL	kg/h	0.315
EXTRASOL	kg/h	2.713
WATER	kg/h	140.563
ZYMO	kg/h	0.016
HMF	kg/h	0.015
FURFURAL	kg/h	0.014
MGSO4	kg/h	0.064
MNSO4	kg/h	0.003
NACL	kg/h	0.002
KCL	kg/h	0.010
FESO4	kg/h	0.008
K2HPO4	kg/h	0.080
KH2PO4	kg/h	0.080

Tabla 18: Datos de salidas en la fermentación (etapa fermentación)

	Unidades	FP1
Mass Flows	kg/h	149.140
GLUCOSE	kg/h	0.031
XYLOSE	kg/h	0.248
ARABINOS	kg/h	0.155
LIGNIN	kg/h	0.419
ASHSOL	kg/h	0.303
EXTRASOL	kg/h	2.606
WATER	kg/h	140.134
BIOMASS	kg/h	0.155
HMF	kg/h	0.014
FURFURAL	kg/h	0.013
BUTIRIC	kg/h	0.310
BUTANOL	kg/h	1.053
ACETONE	kg/h	0.387
ACETICO	kg/h	0.408



Tabla 19: Datos de entrada en la separación convencional (etapa separación)

	Unidades	PRODUCTO
Mass Flows	kg/h	447.42
GLUCOSE	kg/h	0.09297799
XYLOSE	kg/h	0.7425057
ARABINOS	kg/h	0.46357207
LIGNIN	kg/h	1.25619205
ASHSOL	kg/h	0.90801914
EXTRASOL	kg/h	7.81740518
WATER	kg/h	420.402309
BIOMASS	kg/h	0.46357207
HMF	kg/h	0.04221277
FURFURAL	kg/h	0.04089493
BUTIRIC	kg/h	0.92846157
BUTANOL	kg/h	3.15861427
ACETONE	kg/h	1.1612358
ACETICO	kg/h	0.58797131

6.2 Consumos energéticos.

En este apartado vamos a describir los consumos energéticos necesarios para intercambiar calor durante los distintos procesos de producción de biobutanol. Estos equipos intercambian calor o consumen electricidad y se pueden clasificar en cuatro tipos de equipos.

- Intercambiadores de calor
- Reactores
- Centrífugas
- Caldera biomasa

A continuación, las tablas 20-23 reflejan los aportes de energía eléctrica y el consumo de servicios auxiliares, vapor y agua de refrigeración de las cuatro etapas y de todos los procesos unitarios que intervienen:.

Tabla 20: Flujos energéticos de los procesos de la etapa de pretratamiento.

		ETAPA PRETRATAMIENTO		
		PRECALE 1	H-TERM	SEPARA-1
	Unidades	Intercambiador de calor	Reactor hidrolisis	Centrifuga
Balance de energía	kw	27.28	28.74	-
Tº entrada	ºC	20	70	-
Tº salida	ºC	70	121	-
Consumo vapor de agua	kg/h	44.8	50.86	-
Electricidad	kW		0.34	15

Tabla 21: Flujos energéticos de los procesos de hidrólisis enzimática.

		ETAPA HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA			
		PRECALE 2	H-ENZI	SEPARA-2	CALDERA
	Unidades	Intercambiador de calor	Reactor hidrolisis	Centrifuga	Caldera
Balance de energía	kw	-1,35	2,951	-	-122
Tº entrada	ºC	53,5	50	-	20
Tº salida	ºC	50	50	-	825
Consumo vapor de agua	kg/h	116,49	-	-	-
Electricidad	kW		9,02	15	-
Consumo agua de refrigeración	kg/h	-	254,35	-	-

Tabla 22: Flujos energéticos de los procesos de fermentación.

		ETAPA FERMENTACION					
		REACTCA L	F1	F2	F3	FERMT	SEPARA-3
	Unid.	Detox.	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor único	Centrifuga
Balance de energía	kw	-	-24,9	-24,9	-24,9	-74,7	-
Tº entrada	ºC	90	36,9	36,9	36,9	36,9	-
Tº salida	ºC	90	35	35	35	35	-
Electricidad	kW	0,32	11,33	11,33	11,33	33,99	15
Consumo agua de refrigeración	kg/h	-	2149,55	2149,55	2149,55	6448,65	-

Tabla 23. Flujos energéticos de los procesos de separación.

		ETAPA DE SEPARACION					
		WATERC 1	WATER C2	C2	H1	H2	BUTANOL
	Unidades	Torre 1	Torre 3	Torre 2	Conden.	Conden.	Torre 4
Balance de energía	kw	862,249	12,427	-3,64	-18,946	-9,726	22,09
Consumo vapor de agua	kg/h	2191,728	21,640	96,438	-	-	38,467
Electricidad	kw	0,37		0,19	-	-	-
Consumo agua refrigeración	kg/h	30763,43	-	4578,32	1470,52	754,929	-

En la etapa de Hidrolisis enzimática, la caldera consume 129kg/h de biomasa húmeda o, 38,8 kg/h (MS), que generan 122 kW de energía. Lo que nos provoca que en esta etapa se libere energía en vez de consumirse.

La tabla 24 muestra un resumen con los consumos energéticos completos de cada etapa.

Tabla 24: Resumen flujos energéticos de cada etapa y consumo total.

		CONSUMOS POR ETAPA				CONSUMO COMPLETO
		E. PRETRATAMIENTO	E. HIDRÓLISIS ENZIMATICA	E. FERMENTACION	E. SEPARACIO	
Balance de energía	kw	56,02	-120,39	74,7	864,454	877,475
Consumo vapor de agua	kg/h	95,66	116,49		2348,273	2560,423
Electricidad	kW	15,34	24,02	49,31	0,56	89,23
Consumo agua de refrigeración	kg/h		254,35	6448,65	37567,199	44270,199



Tabla 25: Resumen flujos energéticos de cada etapa para la producción de 1 kg de butanol

		CONSUMOS POR ETAPA			
		E. PRETRATAMIENTO	E. HIDRÓLISIS ENZIMATICA	E. FERMENTACION	E. SEPARACION
Balace de energía	kw	12,819	28,902	17,094	10,752
Consumo vapor de agua	kg/h	21,890	26,657	0,000	29,207
Electricidad	kW	3,510	5,497	11,284	0,007
Consumo agua de refrigeración	kg/h	0,000	58,204	1475,664	467,254



7. EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA (EICV)

La primera fase de evaluación consta de una comparativa de metodologías para determinar cuáles son los indicadores de cambio climático mas convenientes. 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 CO₂ 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.

7.1 Comparativa de metodologías

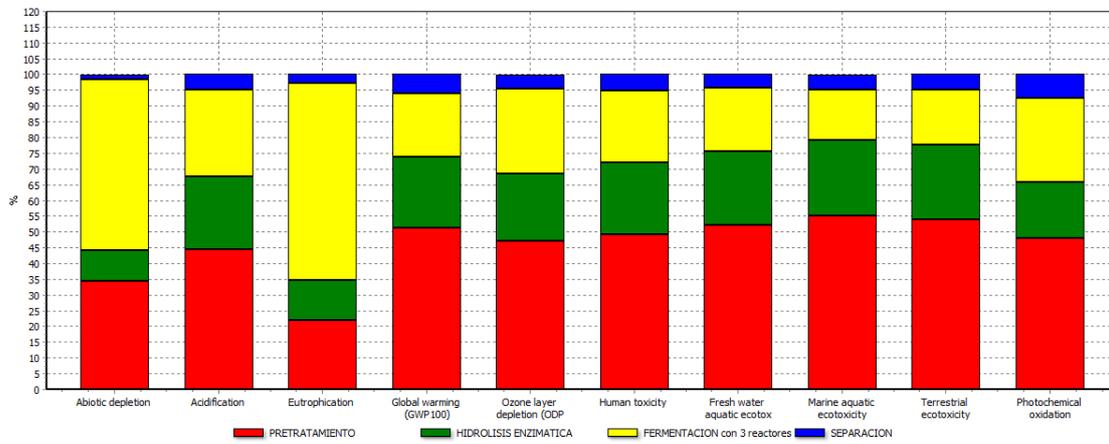
A continuación vamos a analizar con las metodologías de análisis mas importantes, las categorías de impacto caracterización y normalización. Con el fin de elegir cuál es la metodología que mejor se adapta al estudio.

7.1.1. CML 2 Baseline 2000

Contiene 10 categorías de impactos y el uso de recursos y emisiones se clasifica 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, tiene datos reales para una producción en los Países Bajos.

Caracterización:

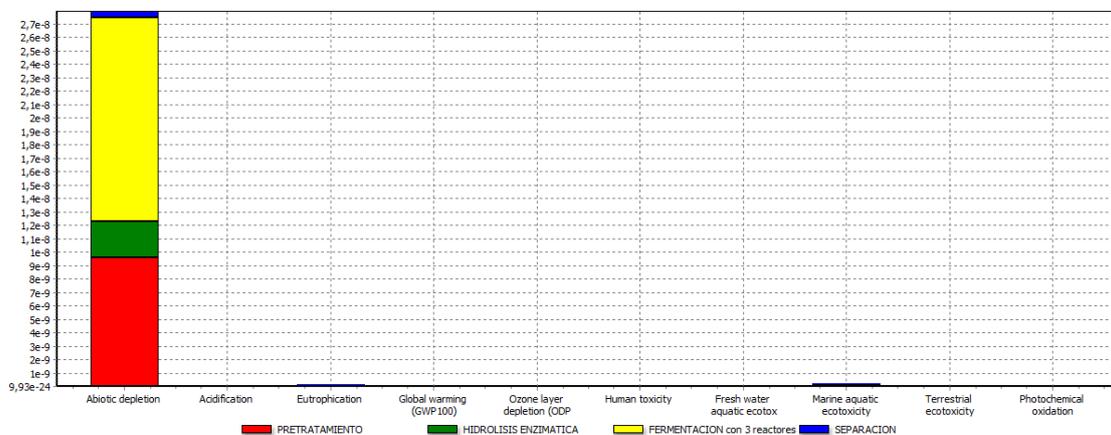


Analizando 1 p 'ANALISIS 1 KG BIIBUTANOL (3 RF); Método: CML 2 baseline 2000 V2.05 / World, 1990 / Caracterización / Excluyendo los procesos de infraestructura / Excluyendo las emisiones a largo plazo

Figura 9: Caracterización en CML Baseline 2000. Fuente: SimaPro.

En la Figura 9 se comprueba que excepto en las categorías de impacto agotamiento abiótico y eutrofización, la etapa que genera mayores impactos es el pretratamiento.

Normalización:



Analizando 1 p 'ANALISIS 1 KG BIIBUTANOL (3 RF); Método: CML 2 baseline 2000 V2.05 / World, 1990 / Normalización / Excluyendo los procesos de infraestructura / Excluyendo las emisiones a largo plazo

Figura 10: 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 10). El resultado de normalización determina que la categoría de mayor influencia en el impacto ambiental del proceso es el agotamiento de recursos abióticos. Con esto, podemos deducir que el impacto ambiental del proceso de producción de biobutanol sobre el calentamiento global es despreciable en comparación con los efectos que ejerce sobre los recursos naturales no vivos en Europa. [22]

7.1.2. 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 CO₂ equivalente, sino en unidades DALY (Año de Vida Ajustado a la Discapacidad) y está relacionado con el indicador final Human Health. El cuál, comprende la carga mundial de las enfermedades atribuidas al cambio climático por lo que Eco-indicator 99 no mide la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera, sino los daños a la salud humana que conllevaría su emisión.

Caracterización:

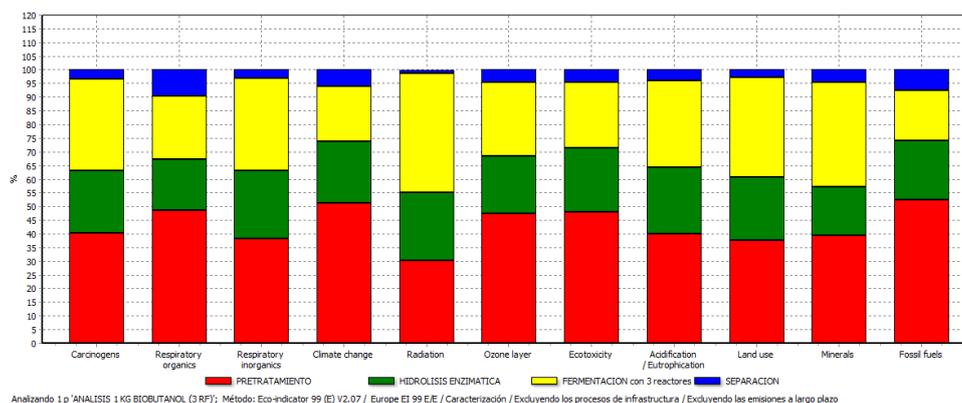


Figura 11. Caracterización en Eco-indicator 99. Fuente: SimaPro.

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 11 se puede apreciar que las etapas de fermentación y pretratamiento son las que generan mayores impactos al medio ambiente.

Normalización:

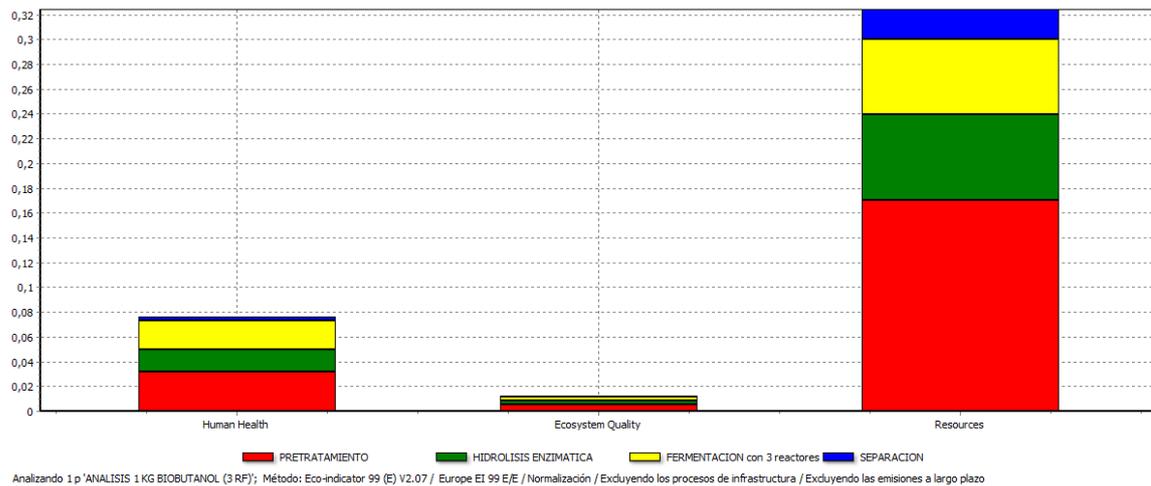


Figura 12. Normalización en Eco-indicator 99. Fuente: SimaPro.

Esta metodología, sólo tiene tres indicadores finales de categoría. Los resultados normalizados de la figura 12 indican que las categorías de impacto que contribuyen a daños significativos en 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.

7.1.3. IMPACT 2002+

Impact 2002+ incluye 15 categorías. Los datos bibliográficos del indicador Global Warming, tienen como fuente de datos: Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC) [23]. Los indicadores finales de categoría en normalización son 4: Human Health, Resources, Climate Change y Ecosystem Quality. Presenta más aspectos ambientales a evaluar, por lo que se le considera como una de las metodologías más completas del software. Impact 2002+ es el compendio de varias metodologías anteriores e instituciones de reconocido prestigio [23].

Caracterización:

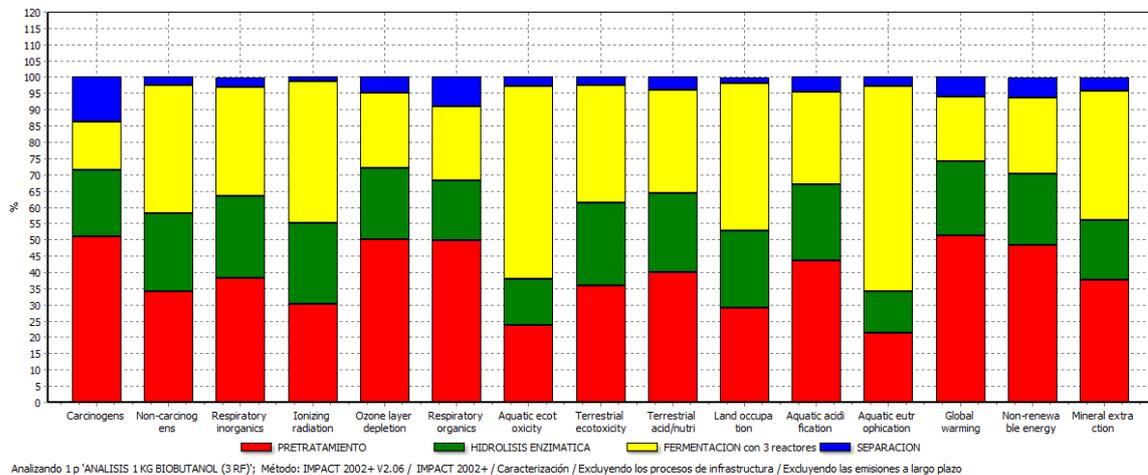


Figura 13. Caracterización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro.

La categoría Global Warming confirma que el pretratamiento es la etapa del proceso que mayores impactos genera, siendo un 30% mayor que la fermentación según la figura 13.

Al comparar los resultados, se observa que los datos de emisión de gases de efecto invernadero vienen expresados en kg de CO₂ eq, al igual que en la metodología CML Baseline 2000.

La tabla 26 resume los resultados de emisiones al aire en las metodologías IMPACT 2002+ y Baseline 2000, observándose bastante similitud en el total de CO2 emitido a la atmósfera. La diferencia de cada una se debe al enfoque metodológico de cada categoría. CML resuelve en cantidades de impactos ambientales potenciales, mientras que IMPACT arroja valores reales de emisión.

Tabla 26: Comparativa de impactos asociados al cambio climático en kilogramos de Dióxido de carbono equivalente. Fuente: SimaPro

Categoría de impacto	Unidad	PRETRATAMIENTO	HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA	FERMENTACION	SEPARACION	TOTAL kg CO2 eq
Global Warming IMPACT 2002+.	kg CO2 eq	681	304	266	80,9	1330
Global Warming GWP100) CML Baseline 2000	kg CO2 eq	709	315	277	85,3	1390

Normalización:

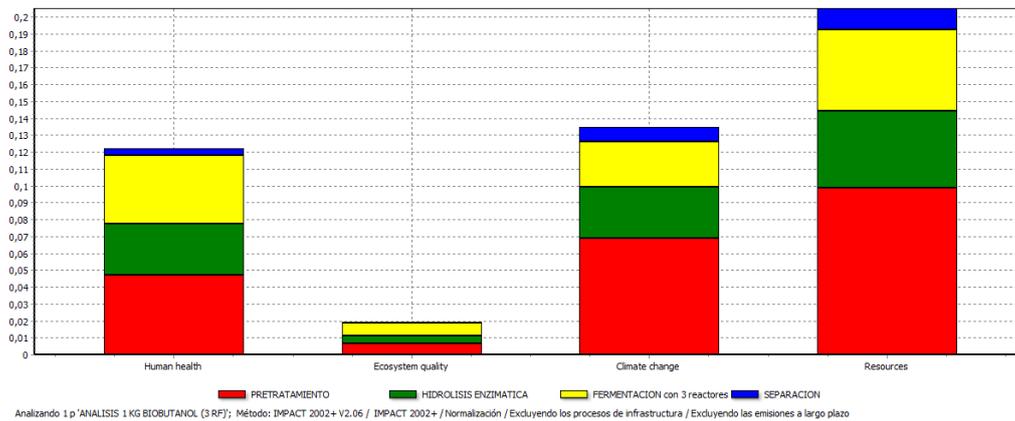


Figura 14. Normalización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro.

La normalización de datos de la figura 14 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.



La salud humana y el cambio climático juegan también un papel importante en la evaluación. En esta metodología como en las anteriores seleccionaron la **etapa de pretratamiento** como la de mayor impacto.

7.2 Metodología seleccionada

Se escoge la metodología IMPACT 2002+ porque es una estrategia completa de evaluación que proporciona resultados completos en relación a los gases de efecto invernadero y su contribución al cambio climático, así como la definición de otros impactos que se generan en esta producción. La categoría de Global warming encaja con indicadores y modelos de caracterización que se incluyen en esta metodología.

Con esta metodología se analizarán los componentes del proceso que generen mayores impactos ambientales, y se planteará una evaluación de la eficiencia energética propuesta en un análisis de sensibilidad.

Las redes de flujo para 1 kg de butanol se encuentran recogidas en el ANEXO I de este TFM y han sido calculadas con la metodología seleccionada.

8. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el análisis comparativo de las etapas de proceso concluye que la categoría de mayor influencia en los impactos ambientales es el uso de energías no renovables (figura 15) y que el indicador final de mayor impacto es *Resources* (figura 14).

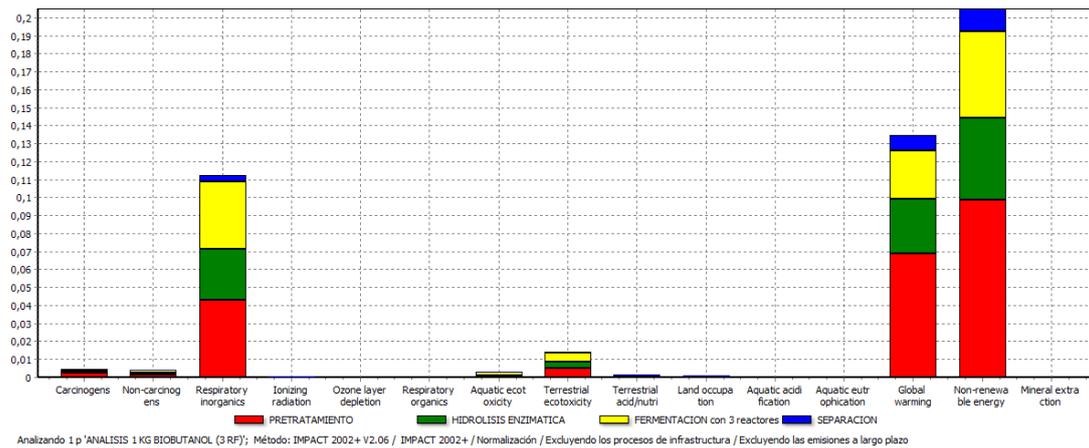


Figura 15. Normalización en IMPACT 2002+. Fuente: SimaPro.

La tabla 27 muestra las categorías de mayores impactos en los resultados de las metodologías Impact 2002+ y Eco-indicator 99. Se distingue una diferencia del tipo de energías usadas: *Primary*, uso de energías primarias (disponibles en la naturaleza antes de ser convertidas); y *Surplus*, 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 27: Datos de resultados asociados al agotamiento de los recursos naturales. Fuente: SimaPro.

Categoría de impacto	Unidad	PRETRATAMIENTO	HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA	FERMENTACION	SEPARACION	TOTAL ENERGIA (MJ)
Non renewable energy IMPACT 2002+.	MJ primary	15000	6880	7320	1950	31200
Fossil Fuels Eco-indicator 99	MJ surplus	1010	410	353	144	1910



De las tres metodologías evaluadas, se concluye que existen factores de contribución al cambio climático presentadas principalmente en la etapa de pretratamiento. Dichos factores, indican una importante emisión de dióxido de carbono por la quema de combustibles fósiles, superando los 681 kg en emisión de CO₂ sólo durante la etapa de pretratamiento seguido de la etapa de hidrólisis enzimática, con 304 kg (Tabla 28). Estos datos provienen de la metodología seleccionada *IMPACT 2002+*, e identifican otros gases de efecto invernadero, no incluidos en la tabla, que se emiten en menor medida a la atmósfera.

Tabla 28: Sustancias emitidas asociados a la categoría de calentamiento global IMPACT 2002 +. Fuente: SimaPro.

Sustancia	Comportamiento	Unidad	PRET.	H.ENZI.	FERMENT.	SEPAR.
TOTAL		kg CO ₂ eq	681	304	266	80,9
Sustancias remanentes	Aire	kg CO ₂ eq	0,808	0,467	1	0,393
Carbon dioxide	Aire	kg CO ₂ eq	x	x	x	4,74
Carbon dioxide, fossil	Aire	kg CO ₂ eq	666	298	258	74
Carbon monoxide, fossil	Aire	kg CO ₂ eq	0,984	0,303	0,614	0,0847
Dinitrogen monoxide	Aire	kg CO ₂ eq	1,88	1,34	1,95	0,107
Methane, fossil	Aire	kg CO ₂ eq	11,3	3,85	3,77	1,56

8.1 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 de la sección de pretratamiento más influyentes en los impactos ambientales. Los factores energéticos contribuyentes al cambio climático se deben al consumo eléctrico (mix español) y consumo de vapor.

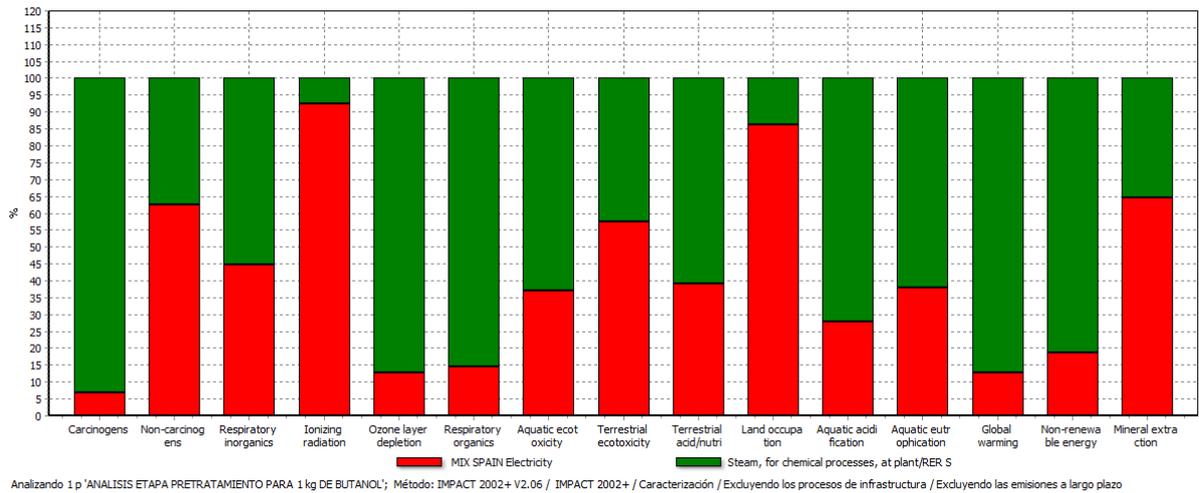


Figura 16. Análisis de los componentes destacados de la sección de pretratamiento. Fuente: SimaPro.

En la figura 16, se puede observar que la mayoría de los impactos de consumos energéticos de la etapa de pretratamiento se deben al vapor de agua utilizado. A excepción de las categorías de impacto: Non carcinogens, Ionizing radiation, terrestrial ecotoxicity, Land occupation y Mineral extraction.

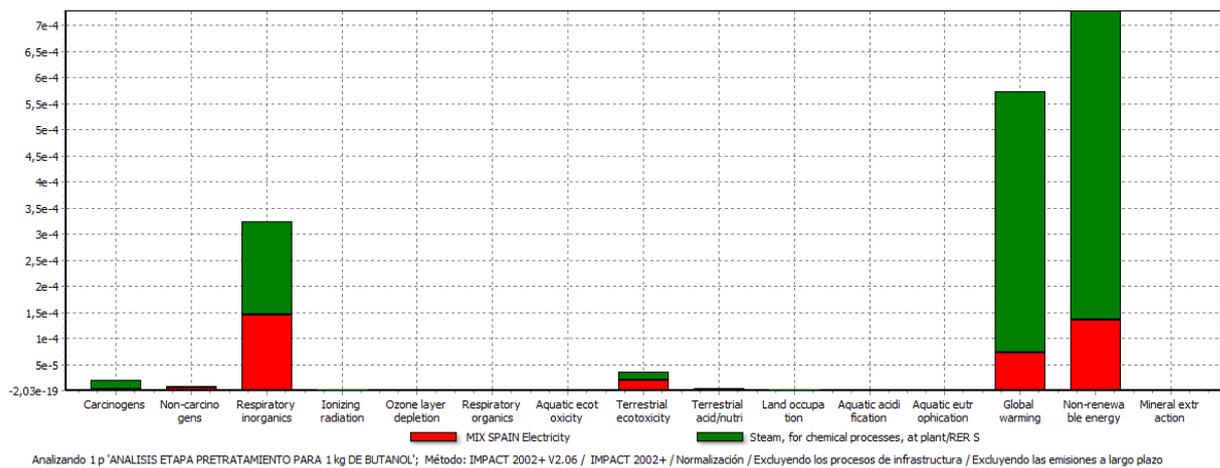


Figura 17. Normalización del análisis en sección de pretratamiento. Fuente: SimaPro.

Los resultados normalizados de la figura 17 distinguen 3 categorías de impacto importantes con respecto a los daños ocasionados en el territorio europeo, siendo la más destacada la categoría de materiales no renovables.

El uso de energías no renovables en las calderas de vapor y el mix eléctrico son la principal causa 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 18 y 19 es tratar de justificar por qué la categoría de energías no renovables sobresale siempre en los resultados, a pesar de utilizar un mix eléctrico con el 36% de energías sostenibles.

La figura 18 muestra la distribución de producción neta de energía en España con respecto al indicador de cambio climático (Global Warming). Como principal contaminante, destacan las energías provenientes de combustibles fósiles (carbón, gas natural) y como energías sostenibles destacan la cogeneración con biogás y la energía eólica.

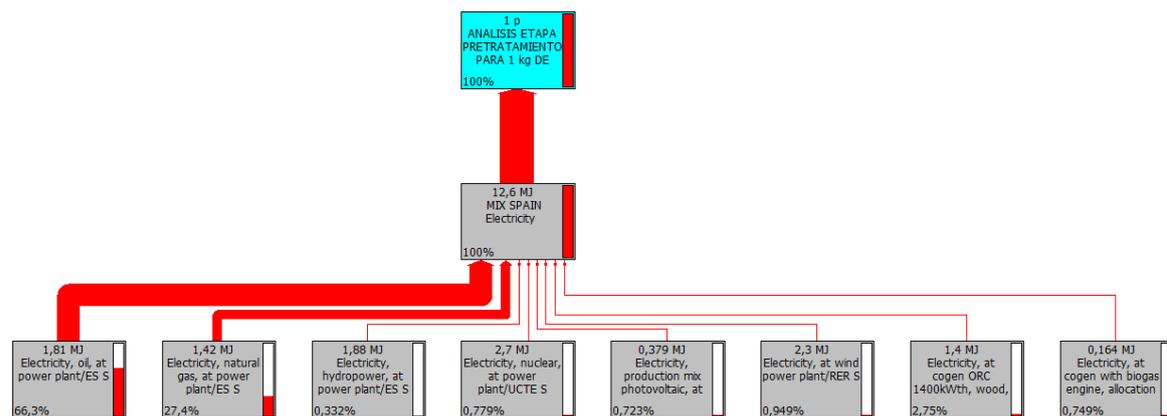


Figura 18. Producción neta de energía con respecto al calentamiento global. Fuente: SimaPro.

La figura 19 también muestra la distribución de producción de energía en España, pero en este caso con la categoría “Non-energy renewable” que comprende el 66,3% 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.

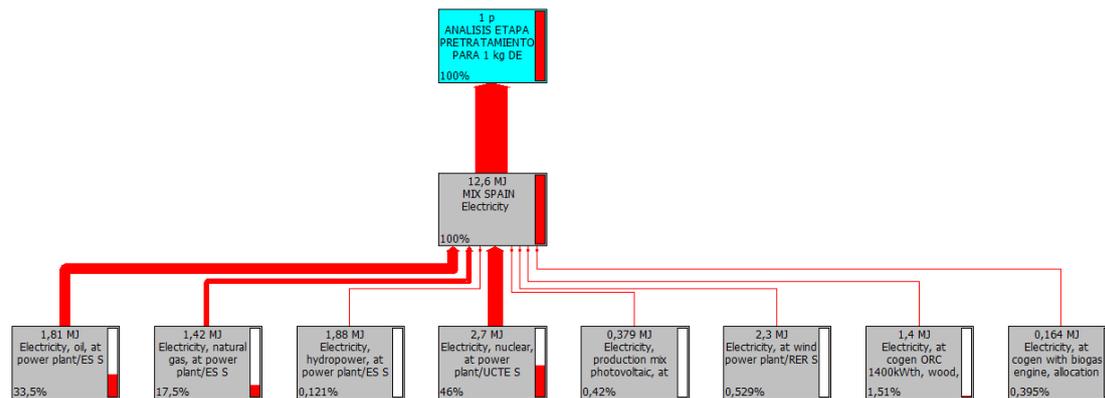


Figura 19. Producción neta de energía con respecto al uso de energías no renovables.
Fuente: SimaPro.

La producción de electricidad a partir de centrales nucleares en España es preocupante, ya que provoca prácticamente el 50% de los impactos ambientales asociados a consumos eléctricos y solo alcanza un 17 % de la producción total en el mix eléctrico.

8.2 Análisis de Sensibilidad

La normativa española a través del *Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático* [24] 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.

En primer lugar, como medida de control para disminuir los impactos, se llevará a cabo una reducción del 50% del uso de vapor en el pretratamiento. Evitando calentar la corriente de 20 a 70 °C en el intercambiador de calor y de 70 a 121°C en la hidrólisis ácida.

Se implantara una técnica de integración con calor residual proveniente de la caldera de la etapa de hidrólisis enzimática que reducirá a la mitad el consumo de vapor de agua en la etapa de pretratamiento. Es decir, el intercambiador de



calor pasara a consumir vapor solo para calentar la corriente de 45 a 70 °C y el reactor de hidrólisis ácida solo requerirá incrementar la temperatura de 95,5 a 121 °C.

El flujo de consumo de vapor se reduciría de 95,66 kg/h a 47,83 kg/h. El consumo de vapor por kg de butanol producido pasará de 21,89 kg/h a 10,945 kg/h. Un resumen de cálculo para este flujo se encuentra en la tabla 28.

Tabla 29: Reducción AL 50% del consumo de vapor como alternativa de mejora.

ANÁLISIS SENSIBILIDAD - VAPOR		
Consumo de vapor normal	kg/h	95,66
Consumo de vapor integrado	kg/h	47,83
Gasto de Vapor/kg Butanol	kg/kg Butanol	21,89
Gasto de Vapor integrado /kg Butanol	kg/kg Butanol	10,945

En segundo lugar, otra propuesta de reducción de emisiones, es un escenario energético renovable que suministre la energía demandada por la planta de producción de biobutanol. Se comparan los resultados actuales del mix eléctrico español con una propuesta de escenario de energía sostenible (100% renovable), con el propósito de reducir significativamente los impactos. Los porcentajes de distribución energética del escenario propuesto serían los siguientes:

Tabla 30. Producción de energías renovables como alternativa de mejora.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD "MIX RENOVABLE"	
Energía eólica (30 %)	Solar fotovoltaica (10%)
Cogeneración y residuos (30%)	Hidráulica (30%)

8.2.1 Comparación de energías convencionales con energías renovables propuestas en el análisis de sensibilidad

8.2.1.1 MÍX ELÉCTRICO

Se crea un proceso igual al que hemos analizado anteriormente para la producción de 1 kg de biobutanol a partir de bagazo de cerveza (ANALISIS 1 KG DE BUTANOL MIX RENOVABLE), pero en este caso se modifica el mix eléctrico a 100% renovable en el que se incluyen la energía eólica, energía fotovoltaica, energía de cogeneración con biomasa y energía hidráulica.

Después, se realiza un análisis comparando los dos procesos de producción de biobutanol, uno con el mix Español y otro con el mix propuesto en este análisis de sensibilidad. Los resultados son recogidos en las figuras 20 y 21.

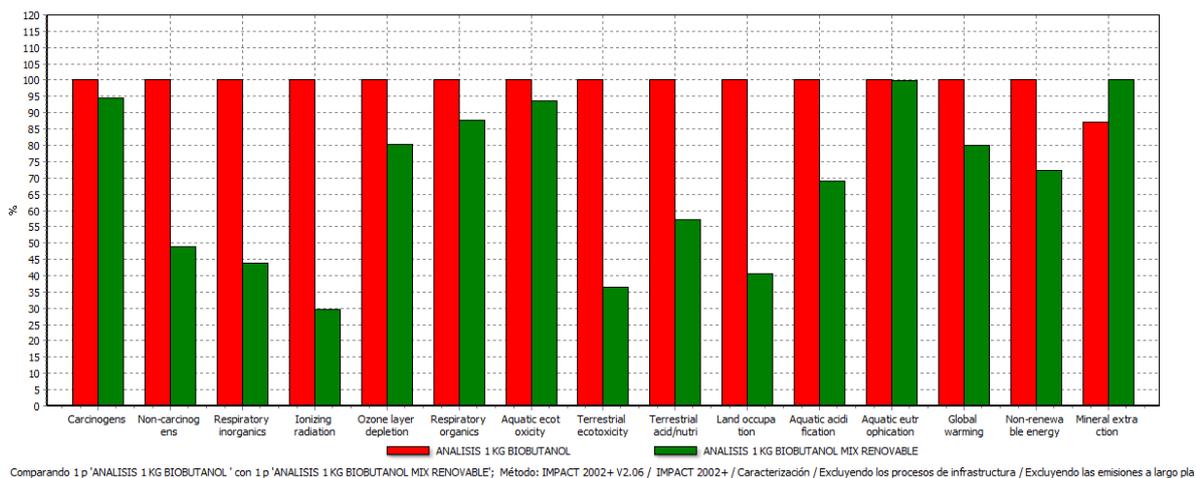
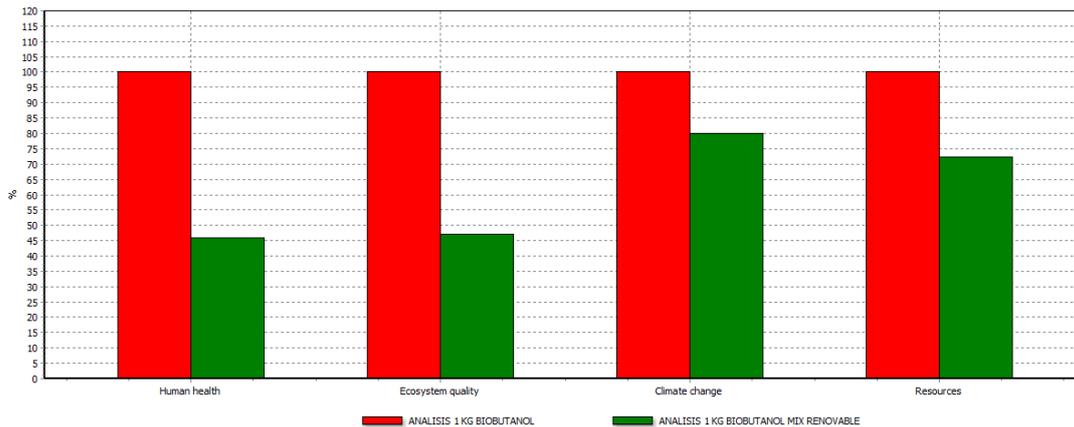


Figura 20. Caracterización en la comparación de alternativa MIX ELECTRICO. Fuente: Simapro.



Comparando 1 p 'ANÁLISIS 1 KG BIOBUTANOL' con 1 p 'ANÁLISIS 1 KG BIOBUTANOL MIX RENOVABLE'; Método: IMPACT 2002+ V2.06 / IMPACT 2002+ / Evaluación del daño / Excluyendo los procesos de infraestructura / Excluyendo las emisiones a largo

Figura 21. Evaluación del daño en la comparación de alternativa MIX ELECTRICICO.
Fuente: SimaPro

En la figura 21 se observa que la utilización de un mix energético completamente renovable ha influido en los resultados. Las categorías de salud humana y calidad del ecosistema han reducido sus impactos en más de un 50% mientras que las categorías de cambio climático y recursos han disminuido en 20% y 27,5% respectivamente. Por lo tanto, podemos decir ciertamente que con esta medida reduciríamos los daños ambientales en al menos un 20 %.

La categoría Global Warming del indicador de cambio climático, disminuye un 20%. La tabla 30 muestra la disminución de los kg de CO2 equivalentes emitidos a la atmósfera con la aplicación de esta alternativa en el mismo proceso. Los resultados son para producir 1 kg de butanol.

Tabla 31: Disminución kg CO2 eq con la alternativa MIX ELECTRICICO. Fuente: SimaPro

Categoría de impacto	Unidad	ANÁLISIS 1 KG DE BIOBUTANOL	ANÁLISIS 1 KG DE BIOBUTANOL MIX RENOVABLE
Global Warming IMPACT 2002+.	kg CO2 eq	1330	1060

8.2.1.2 Integración de los consumos de vapor

Se repite el proceso del aparatado anterior, pero esta vez se crea un nuevo escenario comparativo en el que solo se modifican los flujos de vapor de agua en la etapa de pretatamiento.

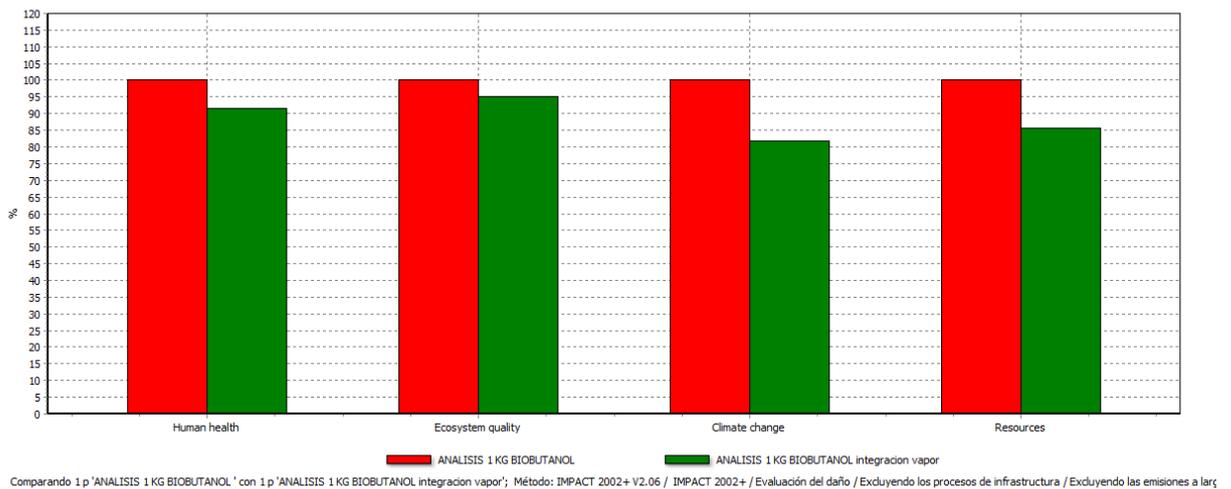


Figura 22. Evaluación del daño en la comparación de alternativa integración de los consumos de vapor. Fuente: SimaPro

Con la implantación de esta alternativa las categorías de impacto de salud humana y calidad del ecosistema se reducen en un 7,5% y 5% respectivamente. La categoría de cambio climático se reduce en 17,5 % y los recursos 15%.

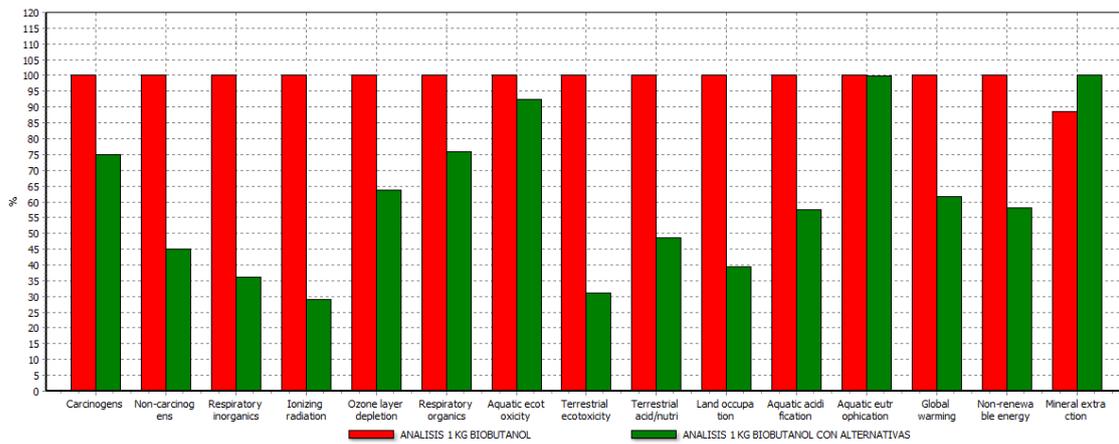
La categoría Global Warming, al igual que la categoría final Climate change disminuye un 20%.

Tabla 32: Disminución kg CO2 eq con la alternativa Integración de los consumos de vapor. Fuente: SimaPro

Categoría de impacto	Unidad	ANÁLISIS 1 KG DE BIOBUTANOL	ANÁLISIS 1 KG DE BIOBUTANOL MIX RENOVABLE
Global Warming IMPACT 2002+.	kg CO2 eq	1330	1090

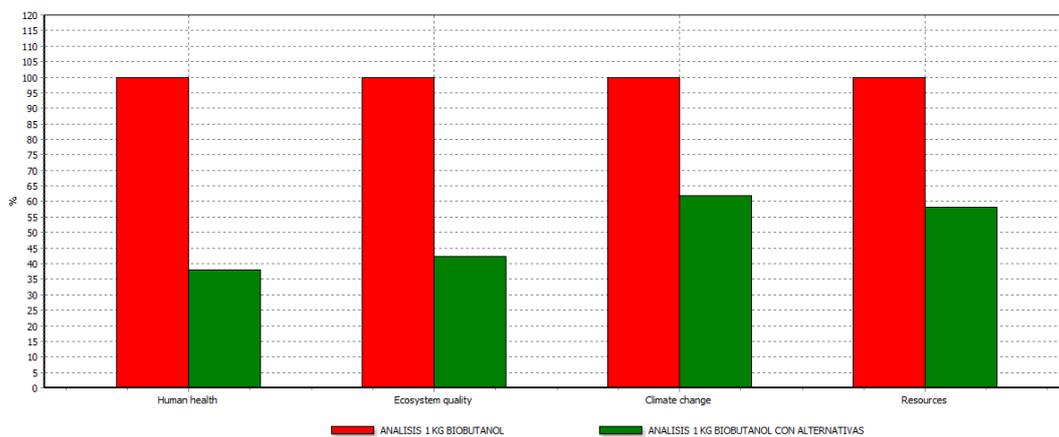
8.2.1.3 Comparación con la implantación de ambas alternativas.

Por último, realizamos un análisis comparativo entre el escenario de producción de 1 kg de butanol convencional y un nuevo escenario que incluye las dos alternativas anteriormente descritas.



Comparando 1 p 'ANALISIS 1 KG BIOBUTANOL ' con 1 p 'ANALISIS 1 KG BIOBUTANOL CON ALTERNATIVAS'; Método: IMPACT 2002+ V2.06 / IMPACT 2002+ / Caracterización / Excluyendo los procesos de infraestructura / Excluyendo las emisiones a larga

Figura 23. Caracterización en la comparación de alternativas. Fuente: Simapro



Comparando 1 p 'ANALISIS 1 KG BIOBUTANOL ' con 1 p 'ANALISIS 1 KG BIOBUTANOL CON ALTERNATIVAS'; Método: IMPACT 2002+ V2.06 / IMPACT 2002+ / Evaluación del daño / Excluyendo los procesos de infraestructura / Excluyendo las emisiones a

Figura 24. Evaluación del daño en la comparación de alternativas. Fuente: Simapro

Aplicando ambas medidas reductoras, las categorías de impacto de salud humana y calidad del ecosistema se reducen en un 62,5% y 57,5% respectivamente. La categoría de cambio climático se reduce en 37,5 % y los recursos 42,5%.



La categoría Global Warming del indicador de cambio climático, también disminuye un 40%.

Tabla 33: Disminución kg CO₂ eq con ambas alternativas. Fuente: SimaPro

Categoría de impacto	Unidad	ANÁLISIS 1 KG DE BIOBUTANOL	ANÁLISIS 1 KG DE BIOBUTANOL MIX RENOVABLE
Global Warming IMPACT 2002+.	kg CO ₂ eq	1330	822

8.2.2 Resumen resultados del análisis de sensibilidad

En las tablas 34 y 35 se puede observar los porcentajes de disminución del impacto asociado a cada categoría normalizada respecto al análisis convencional y los kg de CO₂ equivalente emitidos por cada alternativa analizada.

Tabla 34: Resumen de los porcentajes de reducción de consumo generados.

	Mix eléctrico (%)	Integración de los consumos de vapor (%)	Ambas alternativas (%)
Calidad del ecosistema	52,5	5	57,5
Salud humana	55	7,5	62,5
Cambio climático	20	17,5	37,5
Recursos	27,5	15	42,5

En la tabla 34 es posible apreciar que la alternativa Mix eléctrico genera mayores disminuciones en los impactos que la alternativa de integración de los consumos de vapor. Por lo que los gastos de electricidad en la fabricación de butanol son los consumos que mayor impacto generan. Esto se debe al alto consumo de combustibles fósiles para generar electricidad en el Mix eléctrico español.

Tabla 35: Resumen de la disminución de kg CO₂ eq emitidos con cada alternativa

	kg CO ₂ eq
Análisis convencional	1330
Mix eléctrico	1060
Integración de los consumos de vapor	1090
Ambas alternativas	822



En la categoría de impacto cambio climático, las reducciones de consumos energéticos son similares con ambas alternativas. Por lo que las emisiones de kg de CO₂ equivalente en relación con Europa son prácticamente iguales (Tabla 35). Al aplicar simultáneamente ambas alternativas, las reducciones de emisiones de CO₂ equivalente se suman. Por lo que el CO₂ emitido se reduce en casi un 40%.

Concluimos que con cada alternativa de mejora disminuimos aproximadamente un 20% el impacto asociado a la categoría cambio climático. Aplicando ambas alternativas reducimos casi un 40 % el impacto generado con los consumos de electricidad y vapor de agua para dicha categoría. La disminución en el consumo de vapor de agua solo afecta a la etapa de pretratamiento.



9. CONCLUSIONES

El presente TFM presenta el análisis de ciclo de vida para la producción de biobutanol con fermentación ABE, a partir de subproductos lignocelulósicos provenientes de los subproductos generados en la industria cervecera. Tras la evaluación de impactos ambientales de este proceso de producción de biocombustibles de segunda generación se concluye lo siguiente:

1. En el proceso de fabricación de biobutanol se distinguen 4 etapas: Etapa de pretratamiento, etapa de hidrólisis enzimática, etapa de fermentación y etapa de separación.
2. Con los datos del análisis de inventario se calcularon los flujos correspondientes a la producción de 1 kg de butanol.
3. La unidad funcional se ha fijado en 1 kg de butanol
4. En la comparación de metodologías bibliográficas se seleccionó el método IMPACT 2002+.
5. Se han utilizado las unidades de CO₂ equivalente como medio de comparación para evaluar el impacto.
6. La etapa de proceso que aporta los mayores impactos ambientales es la del pretratamiento. Sus aportes se deben al consumo eléctrico, y al vapor de agua consumido.
7. La etapa de pretratamiento es la de mayor impacto independientemente el método de evaluación utilizado.
8. Debido al mix eléctrico la categoría de consumos no renovables ha sido la de mayor importancia en la evaluación del programa.
9. El análisis de sensibilidad plantea dos alternativas:
 - Mix eléctrico 100% energías renovables.
 - Integración de los consumos de vapor de agua. Esta alternativa utiliza la energía generada en la caldera de la etapa hidrólisis enzimática para suministrar el 50% del consumo de vapor de agua en la etapa de pretratamiento.



10. La alternativa Mix eléctrico genera mayores disminuciones en los impactos que la alternativa de integración de los consumos de vapor de agua.
11. Se concluye que con cada alternativa de mejora se ha disminuido aproximadamente un 20% el impacto asociado a la categoría cambio climático. Aplicando ambas alternativas se reduce casi un 40 % el impacto generado con los consumos de electricidad y vapor de agua para dicha categoría.
12. Las emisiones de CO₂ equivalente son 1330 kg CO₂ eq. Se reducen en casi un 40% tras el análisis de sensibilidad, bajando hasta 822 kg CO₂ eq.



10. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Fraile, H. (2017). *Evaluación técnica de alternativas de pretratamiento y sacarificación de bagazo de cerveza*. Escuela de Ingenierías industriales, Universidad de Valladolid
- [2]. ELECTRO INDUSTRIA- *Biocombustibles de primera generación*. (06/2008). Fecha de consulta 2 de agosto de 2017. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=959>
- [3]. NATIONAL GEOGRAPHIC- *Biocombustibles*. (05/09/2010). Fecha de consulta 2 de agosto de 2017. Disponible en: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/biocombustibles>
- [4]. Sirajunnisa, A. R., & Surendhiran, D. (2016). Algae - Aquintessential and positive resource of Bioethanol production : A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 248-267.
- [5]. Lee SY, Park JH, Jang SH, Nielsen LK, Kim J & Jung KS (2008) *Fermentative butanol production by Clostridia*. *Biotechnol. Bioeng.* 101: 209-228.
- [6]. Ezeji TC, Qureshi N & Blaschek H (2007). *Bioproduction of butanol from biomass:from genes to bioreactors*. *Curr. Opin.Biotechnol.* 18: 220-227.
- [7]. Etienne Rajchenberg-Ceceña, José Alberto Rodríguez-Ruiz, Katy Juárez López (2009) *Producción Microbiológica de Butanol*. *BioTecnología*, Año 2009, Vol. 13 No. 3
- [8] Jaramillo, J.J., Ariel, C., 2011. *Análisis de la producción de biobutanol en la fermentación acetobutílica con Clostridium saccharoperbutylacetonicum* (N1-4 ATCC13564), Facultad de 56 Ingeniería, Universidad de Antioquia. Fecha de consulta: 05 de Agosto de 2017. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43021467004> ISSN 0120-6230
- [9] MAPAMA- (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015). Fecha de consulta: 05 de Agosto de 2017. Disponible en: http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/Memoria2015_cap.aspx
- [10] Mussatto, S., Dragone , G., & Roberto, I. (2006). Brewers' spent grain: *Generation, characteristics and potential applications*. *Journal of Cereal Science*, 43, 1-14.



- [11] Xiros, C., Moukouli, M., Topakas, E., & Christakopoulos, P. (2009). *Factors affecting ferulic acid release from Brewer's spent grain by Fusarium oxysporum enzymatic system*. *Bioresource Technology*, 100, 5917- 5921.
- [12] ECOIL- *Life Cycle Assessment as a decision support tool for the eco-production of olive oil*. (LIFE04 ENV/GR/110). Fecha de consulta 07 de agosto 2017. Disponible en: <http://www.ecoil.tuc.gr/LCA-2.pdf>
- [13] SMILE, Energy and LCA. *Evaluation of the present dynamics of investigated case studies*, Project FP7-SSH-2007-1. Fecha de consulta 10 de Agosto de 2017. Disponible en: <http://www.smilefp7.eu/deliverables/SMILE%20D14%20Energy%20and%20LCA%20evaluation.pdf>
- [14] PRE- Eco-indicator 99 Manuals. Fecha de consulta 12 de Agosto de 2017. Disponible en: <https://www.pre-sustainability.com/news/eco-indicator-99-manuals>
- [15] Goedkoop, M; Sprlensma, R. (22/06/2017). *The Eco-indicator 99 A damage for life Cycle Impact Assessment*. PRE nr 1999/36A
- [16] AEN/CTN 150, NORMA UNE-EN ISO 14044, 2006, *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida*. Requisitos y directrices, AENOR.
- [17] 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 10 de agosto de 2017. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/5502>
- [18] Mix energético en España, 2015. Fecha de consulta: 15 de agosto de 2017. Disponible en: <http://www.killmybill.es/mix-energetico-espana/>
- [19] BALANCE ENERGÉTICO 2016 Y PERSPECTIVAS 2017. Fecha de consulta: 15 de agosto 2017. Disponible en: www.enerclub.es/file/7LgZ5MDRyUdtQ69apst6xw
- [20] LIFE- *El análisis del ciclo de vida (ACV) es un marco metodológico para estimar y evaluar los impactos medioambientales atribuibles al ciclo de vida de un producto*. (LIFE04 ENV/GR/110).
- [21] Cristóbal, G. (2017). *Biocombustibles a partir de residuos agroalimentarios: aumento de la sostenibilidad del proceso mediante el desarrollo de estrategias de separación*. Escuela de Ingenierías industriales, Universidad de Valladolid



[22] Garraín, D., Gash, J., Franco, V., Muñoz, C., Vidal, R. *Desarrollo de factores de caracterización para el cálculo del agotamiento de los recursos abióticos en las materias primas utilizadas en la fabricación de productos cerámicos en el marco del análisis de ciclo de vida*. Grupo de Ingeniería del Diseño, Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume.

[23] 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: 29 de agosto de 2017. Disponible en: https://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002_UserGuide_for_vQ2.21.pdf

[24] *Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático 2013-2020*, Mapama 2017. Fecha de consulta: 29 de agosto de 2017. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es



ANEXO I. DIAGRAMAS DE PROCESOS

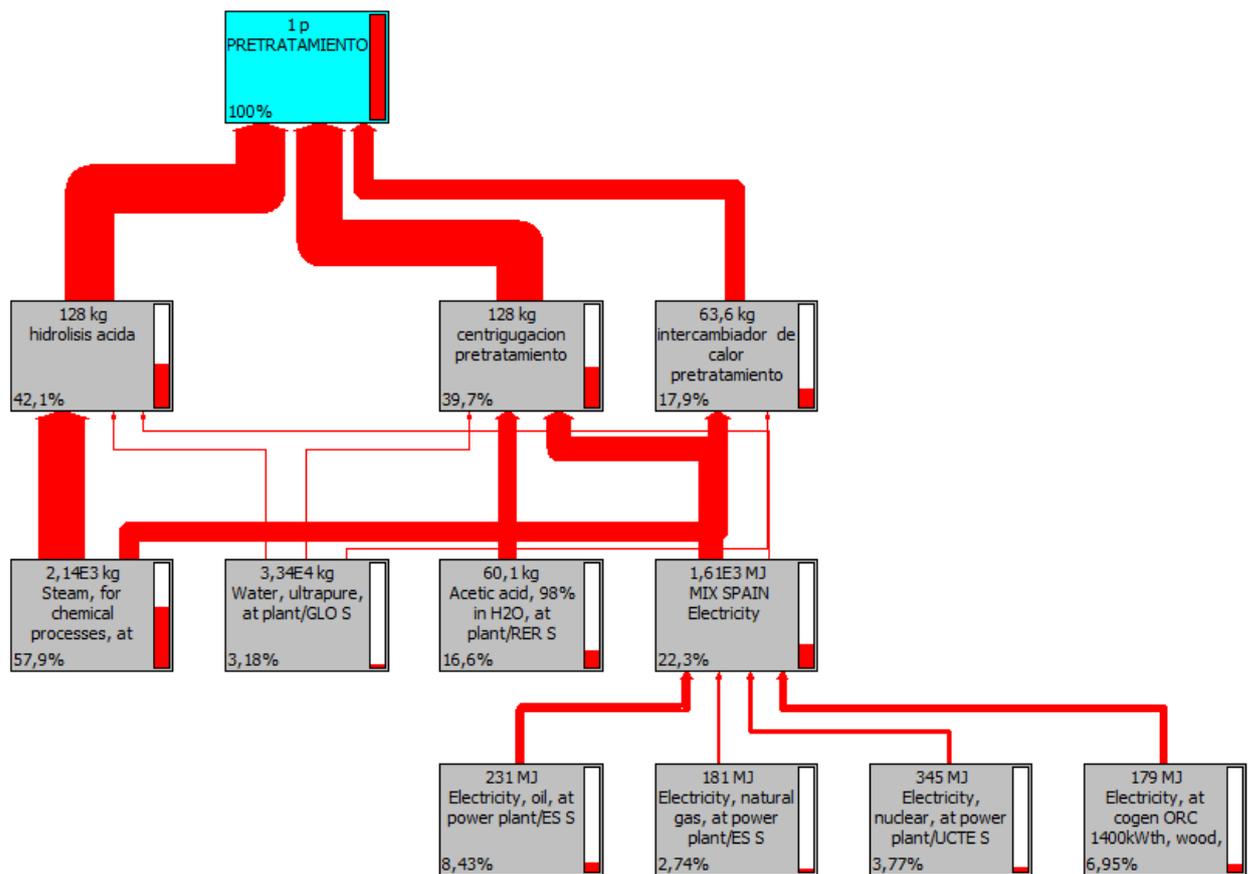


Figura I. Resultados de las redes de flujo en la etapa de Pre-tratamiento. Fuente: SimaPro.

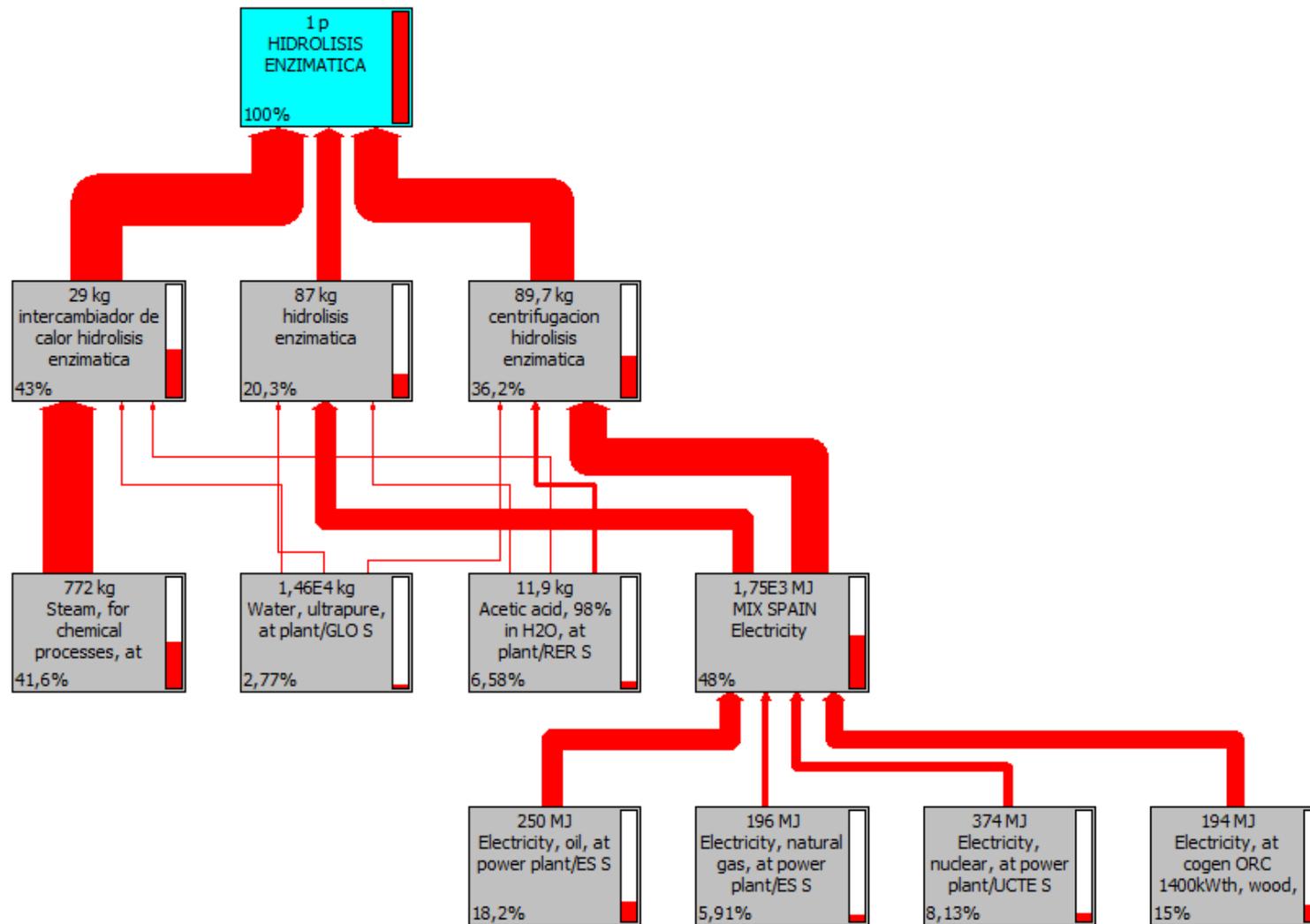


Figura II. Resultados de las redes de flujo en la etapa de Hidrólisis Enzimática. Fuente: SimaPro.

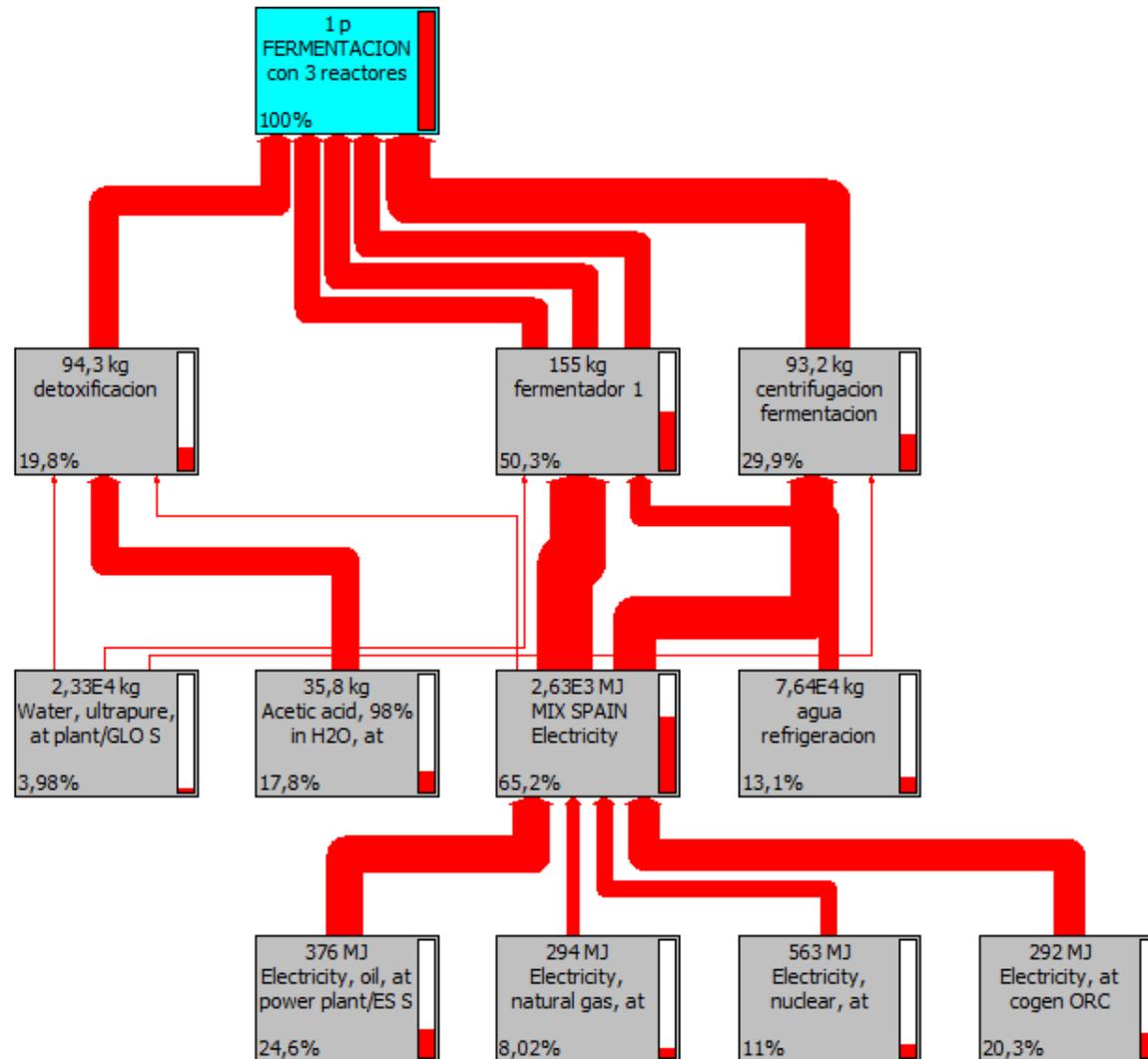


Figura III. Resultados de las redes de flujo en la etapa de Fermentación. Fuente: SimaPro.

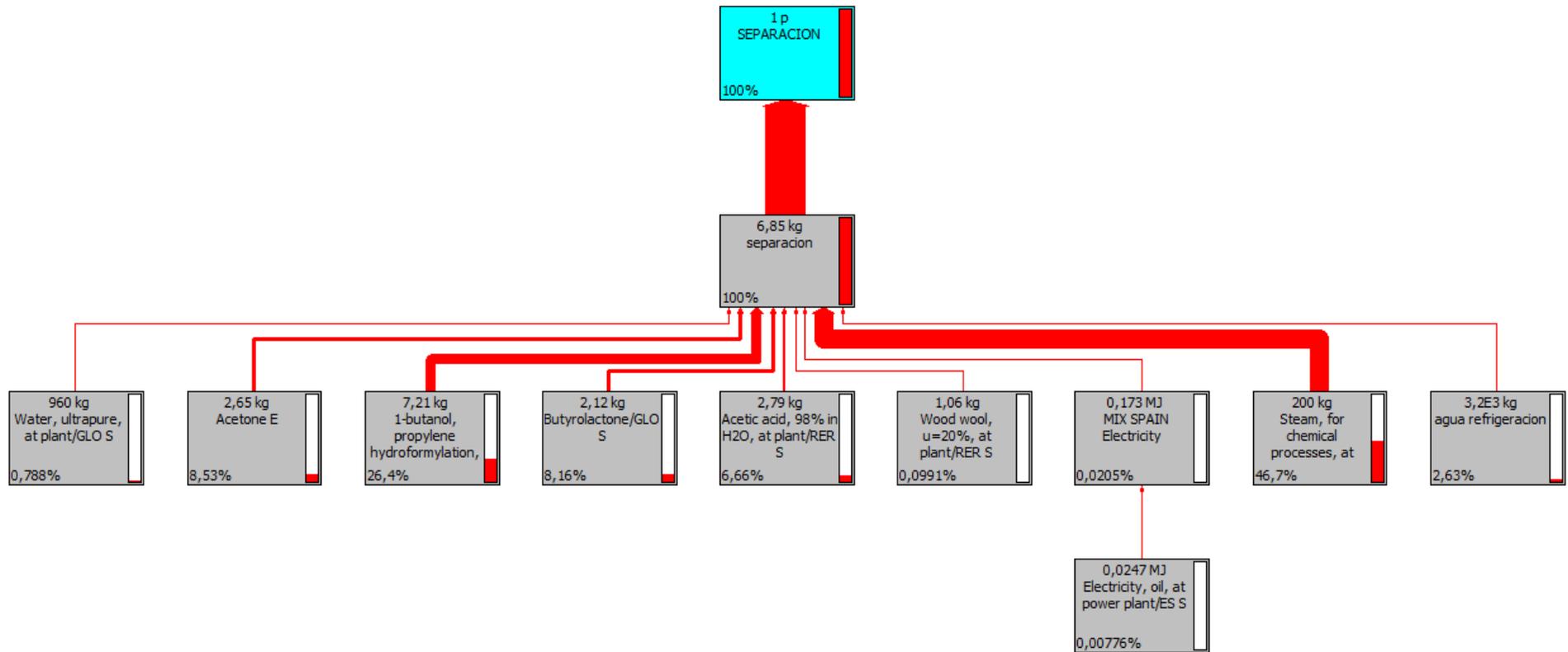


Figura IV. Resultados de las redes de flujo en la etapa de Separación. Fuente: SimaPro.



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES