

**EVALUACIÓN EXERGÉTICA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
BIOETANOL A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL DE LA MICROALGA  
*Chlorella vulgaris***

**JEBERTH ANDREHY BAUTISTA BUENO  
ANGEL JHOAN SIERRA AVENDAÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2012**

**EVALUACIÓN EXERGÉTICA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
BIOETANOL A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL DE LA MICROALGA  
*Chlorella vulgaris***

**JEBERTH ANDREHY BAUTISTA BUENO  
ANGEL JHOAN SIERRA AVENDAÑO**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero Químico**

**Director:  
Dr.Sc. Viatcheslav Kafarov  
Profesor Titular Universidad Industrial de Santander**

**Co-directoras  
Ing. Yeimmy Yolima Peralta Ruiz  
Ing. Yeniffer Pardo Cárdenas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2012**

## DEDICATORIA

A mi **Madre** por apoyarme en mis decisiones brindándome todo su comprensión y confianza, demostrándome la fortaleza necesaria para triunfar, por todo esto le agradezco de todo corazón el que este conmigo, brindándome todo su amor.

A mi **Novia** por su comprensión y apoyo en todos los momentos que hemos compartido juntos. Por haber llegado a mi vida y compartir momentos agradables y tristes, esos instantes son los que nos hacen crecer y valorar las cosas.

A mi **Tío**, a quién quiero como un padre, por estar a mi lado, escuchándome y ayudándome en cualquier momento.

A mis **Abuelos** por haberme enseñado a no desfallecer ante nada y siempre perseverar en el camino.

A toda mi **Familia** quienes con su ayuda, cariño y comprensión han sido parte fundamental en mi vida.

A todos mis **Amigos** por acompañarme durante esta etapa tan importante, por el arduo trabajo y el disfrute de algunos de esos momentos, gracias por ser mis amigos.

***Jeberth Andrehy Bautista Bueno***

## **DEDICATORIA**

*A mis padres.*

*Nacimos ángeles*

Árbol que nace torcido  
la ciencia te lo endereza  
bendito quien su fortuna  
va en corazón y cabeza.

Quien lleva luz se acostumbra  
a que la sombra le acecha  
y aunque se inventó la bala  
jamás se olvida la flecha.

Si el cielo te manda limones  
repártenos la semilla  
pero a vender limonada  
y a llorar a la capilla...

Y siempre listas las alas  
para aterrizar en pista  
que camarón que se duerme  
se lo comen los turistas.

*Buena Fe.*

**Angel Jhoan Sierra Avendaño**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía – CIDES y a su director Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov por su valiosa colaboración y sus aportes durante el desarrollo de este proyecto.

Y a todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Química por contribuir a nuestra formación integral.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES	19
1.1. CARBOHIDRATOS EN LAS MICROALGAS	19
1.2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE MICROALGAS	20
1.2.1. Pretatamiento.	20
1.2.2. Hidrólisis y Fermentación.	21
1.2.3. Separación	23
1.3 ANÁLISIS EXERGÉTICO	23
2. SIMULACIÓN DE LAS RUTAS EN ASPEN PLUS™	26
2.1. PRETRATAMIENTO CON ÁCIDO DILUIDO	27
2.2. HIDRÓLISIS DE CELULOSA	28
2.3 TECNOLOGÍAS SHF, SHCF y SSCF	29
2.4 DESTILACIÓN Y TAMICES MOLECULARES	31
3. DESARROLLO METODOLÓGICO DE LA EVALUACIÓN EXERGÉTICA.	32
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
5. CONCLUSIONES	38
6. RECOMENDACIONES	39
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	49

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición modelada de la microalga <i>Chlorella sp.</i>	20

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema etapa de Pretratamiento para las tres rutas.	27
Figura 2. Esquema etapa de Neutralización para las tres rutas.	28
Figura 3. Esquema etapa de Hidrólisis Enzimática	29
Figura 4. Esquema etapa de fermentación RUTA 1 y RUTA 2	30
Figura 5. Esquema etapa de fermentación RUTA 3	30
Figura 6. Esquema etapa de destilación	31
Figura 7. Resultados del análisis exergético	35
Figura 8. Irreversibilidades y eficiencias exergéticas por etapas y globales	36
Figura 9. Irreversibilidades por kilogramo de etanol en cada etapa.	37

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. COMPOSICIÓN DE CARBOHIDRATOS EN VARIAS ESPECIES DE MICROALGA	49
ANEXO B. COMPONENTES DE LAS RUTAS Y EXERGÍAS QUÍMICAS ESPECÍFICAS	50
ANEXO C. ESQUEMA GENERAL DE LAS RUTAS	51
ANEXO D. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN DEL PRETRATAMIENTO	53
ANEXO E. PARAMETROS DE LA SIMULACIÓN DE LA HIDROLISIS ENZIMÁTICA	54
ANEXO F. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS SHF, SHCF Y SSCF	55
ANEXO G. ESQUEMA DE LA SIMULACIÓN DE LOS TAMICES MOLECULARES	59
ANEXO H. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE TODAS LAS CORRIENTES PARA LAS TRES RUTAS	60
ANEXO I. FLUJOS MOLARES POR COMPONENTE PARA LAS TRES RUTAS	63
ANEXO J. FLUJOS DE EXERGÍA LAS CORRIENTES PARA LAS TRES RUTAS	66

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN EXERGÉTICA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL DE LA MICROALGA *Chlorella vulgaris*.<sup>1</sup>

**AUTORES:** JEBERTH ANDREHY BAUTISTA BUENO, ANGEL JHOAN SIERRA AVENDAÑO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Bioetanol, microalgas, *Chlorella vulgaris*, análisis exergético, biocombustibles, simulación, Aspen Plus.

Tres rutas tecnológicas para la producción de bioetanol a partir de los carbohidratos contenidos en la biomasa residual de la microalga *Chlorella vulgaris* fueron evaluadas aplicando la metodología de Análisis Exergético con el fin de identificar posibles mejoras en el uso eficiente de la energía. Las tres rutas fueron diseñadas usando el software de simulación Aspen Plus<sup>TM</sup> con un flujo de alimento de 78,9 t/año de carbohidratos (composición de celulosa, almidón y hemicelulosa de 53,5%, 31,1% y 15,4% respectivamente), el mismo tipo de pretratamiento con ácido diluido y la misma configuración en la etapa de destilación. La Ruta 1 usó la tecnología SHF y *Saccharomyces cerevisiae* en la fermentación, la Ruta 2 empleó la tecnología SHCF con *Zymomonas mobilis recombinante* y Ruta 3 utilizó la tecnología SSCF con el organismo *Zymomonas mobilis recombinante*.

Como resultado se obtuvo una producción de etanol (99,5% pureza) de 24,9 t/año, 27,9 t/año y 28,2 t/año en las rutas 1, 2 y 3 respectivamente. La Ruta 3 presentó la eficiencia exergética global más alta (31,8%) y las menores irreversibilidades por kilogramo de etanol (57,8 MJ/kg etanol), seguida por la Ruta 2 (30,4%, 61,7 MJ/kg etanol) y la Ruta 1 (27,7%, 70,4 MJ/kg etanol). La hidrólisis enzimática (Rutas 1 y 2) y la fermentación SSCF (Ruta 3) presentaron las menores eficiencias exergéticas por etapa (52,5% y 55,8% respectivamente) debido principalmente a la localización de un flujo importante de residuos en dichas etapas. La evaluación exergética realizada también permitió identificar la reducción de los desechos de proceso y de los requerimientos de servicios industriales como dos factores clave para garantizar un uso eficiente de la energía.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov. Co-directoras: Yeimmy Yolima Peralta Ruiz, Yeniffer Pardo Cárdenas.

## ABSTRACT

**TITLE:** EXERGETIC ASSESSMENT OF BIOETHANOL PRODUCTION PROCESS FROM RESIDUAL MICROALGAL BIOMASS OF *Chlorella vulgaris*.\*

**AUTHORS:** JEBERTH ANDREHY BAUTISTA BUENO, ANGEL JHOAN SIERRA AVENDAÑO.\*\*

**KEYWORDS:** Bioethanol, microalgae, *Chlorella vulgaris*, exergy analysis, biofuels, Aspen Plus.

Three technologies for bioethanol production from carbohydrates of *Chlorella vulgaris* microalgae residual biomass were evaluated using the exergy analysis method in order to identify potential improvements from the energy point of view. Routes were simulated using industrial process simulation software, taking as feedstock 78.9 tons per year of carbohydrates (cellulose 53.5%, starch 31.1% and hemicellulose 15.4%), using the same steps at pretreatment and distillation. Route 1 used SHF technology and *Saccharomyces cerevisiae*, Route 2 and Route 3 used SHCF and SSCF technology both with the recombinant bacterium *Zymomonas mobilis*.

As result were obtained a bioethanol production (99.5% of ethanol) of 24.9 t/yr, 27.9 t/yr and 28.2 t/yr on Route 1, 2 and 3 respectively. Route 3 had the highest exergetic efficiency (31.8%) and the lowest irreversibilities per kilogram of ethanol (57.8 MJ / kg ethanol), followed by Route 2 (30.4%, 61.7 MJ / kg ethanol) and Route 1 (27.7 % 70.4 MJ / kg ethanol). Enzymatic hydrolysis (Routes 1 and 2) and SSCF fermentation (Route 3) had the lowest exergy efficiencies (52.5% and 55.8% respectively) mainly due to the localization of a large waste stream in those steps. The exergetic evaluation also identified on waste reduction process and industrial service requirements as two key factors to ensure the efficient use of energy.

---

\* Bachelor degree proyect.

\*\* Physical-Chemical Engineering College. Chemical Engineering Department. Advisors: Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov. M.Sc. student research assistants: Yeimmy Yolima Peralta Ruiz, Yeniffer Pardo Cárdenas.

## INTRODUCCIÓN

Sólo a través de la exposición detallada e imparcial de las interacciones de la ciencia y la sociedad en el curso de la historia, es como se puede empezar a comprender lo que significa la ciencia y lo que se puede esperar de su futuro [1]. En este sentido, para entender la creciente preocupación por el desarrollo de nuevas tecnologías renovables es necesario conocer las razones por las cuales países líderes en investigación científica como Estados Unidos han venido impulsando, desde los años 70's del siglo pasado, estrategias para disminuir la dependencia energética hacia el petróleo [2]. Una de esas razones tiene que ver con el *pico petrolero* que se presentó en la producción de crudo en el año 1970 [3], hecho que representó un llamado a diversificar las fuentes de energía con el fin de garantizar la seguridad energética y así evitar crisis en los precios o en el suministro de combustibles [2]. Por otro lado, el deterioro del medio ambiente debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la quema de combustibles fósiles empezaba a preocupar a los países [4]. Esta situación que involucraba aspectos sociales, ambientales y económicos resultó en la formulación, en 1987, de un nuevo concepto conocido como *Desarrollo Sostenible*. El Informe Brundtland definió el Desarrollo Sostenible como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades” [5].

El avance hacia un desarrollo sostenible en la industria es posible a través del uso de energías renovables provenientes de recursos naturales como el viento, el sol, las corrientes de agua, las olas del mar, el calor de la tierra, etc. Dentro de las fuentes de energía renovable se encuentra la biomasa, el material biológico más abundante en la Tierra, susceptible de ser usada para producir biocombustibles como el etanol, un alcohol que puede servir como combustible oxigenante de la

gasolina [6]. Según datos de la organización norteamericana Renewable Fuels Association la producción mundial de etanol en el año 2009 llegó a 19,53 billones de galones siendo USA y Brasil los más importantes con el 56,0% y el 33,7% del total de la producción, respectivamente (Colombia fue octava con el 0,4%) [7]. Es importante mencionar que la industria de los biocombustibles no sólo representa una opción para reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles, sino también puede servir a aquellos países que buscan impulsar la economía rural y mejorar la calidad del aire [6].

Actualmente las materias primas más comunes para la producción de bioetanol son el maíz y la caña de azúcar. También existen otras fuentes de biomasa menos extendidas como remolacha, sorgo, trigo, cebada, arroz, madera, desechos celulósicos, residuos agrícolas y agroindustriales, etc. [6]. Aquellos combustibles fabricados a partir de estas materias primas se clasifican como biocombustibles de primera y segunda generación, y se caracterizan los primeros por hacer parte también de la economía alimenticia y los segundos por haber sido fabricados a partir de biomasa lignocelulósica difícil de procesar debido a su alto contenido de celulosa y lignina [8]. Sin embargo, existe también una tercera generación de biocombustibles que logra superar estos inconvenientes al utilizar microorganismos como las microalgas para obtener energía [8].

El cultivo de microalgas como materia prima alternativa para la producción de biocombustibles ha recibido un gran interés debido a su rápido crecimiento y su capacidad para acumular en sus células grandes cantidades de lípidos y carbohidratos aptos para producir biodiesel y bioetanol respectivamente [9]. Sin embargo, dicho interés hasta ahora se ha dirigido principalmente hacia el estudio de la extracción de lípidos [9].

Después de la extracción de lípidos, la biomasa residual de la microalga aún contiene suficientes niveles de carbohidratos capaces de producir bioetanol a

través de fermentación anaeróbica [10, 11]. No obstante son muy pocas las investigaciones que se han publicado acerca del proceso de producción de bioetanol de tercera generación, hecho que hace necesario desarrollar propuestas que no solamente ayuden a entender las nuevas ventajas y limitaciones inherentes al proceso, sino que garanticen también un uso eficiente de la energía.

Un método útil para analizar, diseñar y mejorar el uso de la energía es el Análisis Exergético, una herramienta que basada en el primer y segundo principio de la termodinámica permite estimar las irreversibilidades de un proceso y así evaluar la eficiencia y sostenibilidad del mismo [12].

La presente investigación, desarrollada en el Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía CIDES de la Universidad Industrial de Santander, tiene como propósito evaluar, mediante la aplicación de la metodología de Análisis Exergético, diferentes alternativas tecnológicas (simuladas en el software Aspen Plus<sup>TM</sup>) para la producción de bioetanol a partir de los carbohidratos presentes en la biomasa residual de la microalga *Chlorella vulgaris* (la especie de alga verde de mayor uso comercial [13]).

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. CARBOHIDRATOS EN LAS MICROALGAS

La microalga es un microorganismo unicelular compuesto principalmente por lípidos, proteínas y carbohidratos en proporciones muy diversas que dependen tanto del género y la especie como de las condiciones de cultivo aplicadas durante el crecimiento celular [13]. Todo carbohidrato es un potencial productor de bioetanol, sin embargo, las principales fuentes actualmente usadas son azúcar, almidón, celulosa y hemicelulosa [14].

Numerosas publicaciones evidencian que las algas son microorganismos extremadamente diversos, no solamente en la composición total de carbohidratos (Anexo A), sino también en el tipo y el contenido de monosacáridos presentes en su estructura celular [15 - 20]. Por lo tanto, si se pretende producir bioetanol a partir de los azúcares contenidos en la microalga es imprescindible determinar la composición precisa de los mismos ya que esto afecta sustancialmente las características del proceso [10].

La biomasa de *Chlorella sp.* puede contener cerca de 40% de proteínas, 30% de lípidos, 25% peso de carbohidratos y 5% de humedad [21]. Además, el contenido de celulosa, almidón y hemicelulosa de ese mismo género de microalgas puede alcanzar 53,5%, 31,1% y 15,4% dentro del total de carbohidratos, respectivamente [22]. En la Tabla 1 se muestran las composiciones mencionadas.

Para el caso de la microalga *Chlorella vulgaris* se ha demostrado la obtención de altos rendimientos de glucosa (y en menor proporción de galactosa, xilosa y fructosa) aplicando un tratamiento de hidrólisis ácida entre un rango de



dos polisacáridos difíciles de fermentar mediante microorganismos. Por lo tanto se requiere de una etapa que permita obtener azúcares fermentables.

El pretratamiento de la microalga es similar al proceso aplicado para materiales lignocelulósicos [14]. Sin embargo la ausencia de lignina en las microalgas representa una ventaja importante respecto a la biomasa lignocelulósica ya que la presencia de este biopolímero dificulta la etapa de pretratamiento [4].

Los métodos químicos de pretratamiento (ácidos y alcalinos) son los más extendidos debido a los bajos costos de procesamiento, a su fácil uso y también a la eficacia de la hidrólisis para obtener monosacáridos de la hemicelulosa y la celulosa [14]. En el caso de la *C. vulgaris* el pretratamiento empleando hidrólisis con ácido diluido parece ser el método que mejor resultados produce [24]. Sin embargo, durante este tipo de pretratamiento es posible que se formen pequeñas cantidades de ácidos (acético, fórmico) que junto con el ácido sulfúrico remanente de la hidrólisis pueden afectar el rendimiento de la posterior fermentación, razón por la cual se debe realizar una neutralización para retirar dichos ácidos [26]. Un método efectivo para realizar este trabajo es la neutralización con hidróxido de calcio [26].

**1.2.2. Hidrólisis y Fermentación.** La mezcla proveniente de la etapa de pretratamiento contiene azúcares (pentosas y hexosas) junto con polisacáridos que no alcanzaron a ser degradados, principalmente celulosa, lo que hace necesario implementar una etapa de hidrólisis [4].

Existen diferentes combinaciones de las etapas de hidrólisis y fermentación dependiendo de las cantidades y los tipos de monosacáridos presentes y del microorganismo utilizado para fermentar los azúcares [14]:

*Hidrólisis y fermentación separadas (SHF<sup>1</sup>):* La hidrólisis de celulosa se realiza separada de la fermentación.

*Hidrólisis y co-fermentación separadas (SHCF<sup>2</sup>):* Pentosas y hexosas son fermentadas simultáneamente pero separadas de la hidrólisis de celulosa.

*Hidrólisis y fermentación simultáneas (SSF<sup>3</sup>):* La hidrólisis de celulosa se lleva a cabo simultáneamente con la fermentación de hexosas.

*Hidrólisis y co-fermentación simultáneas (SSCF<sup>4</sup>):* La hidrólisis de celulosa y la fermentación de pentosas y hexosas se llevan a cabo simultáneamente.

La hidrólisis de celulosa y la fermentación son procesos que ya han sido estudiados ampliamente [4, 6, 27, 28]. Además se sabe que la hidrólisis de celulosa se lleva a cabo industrialmente utilizando la enzima celulasa la cual logra convertir el 90% de la celulosa en glucosa [28,29, 30]. Éste método enzimático se ha empleado en tecnologías tanto de hidrólisis y fermentación separada (SHF) [27] como en procesos con hidrólisis y fermentación simultánea (SSF) [29].

El proceso de fermentación convierte los azúcares simples en bioetanol y CO<sub>2</sub> por medio de microorganismos. La mayoría del etanol producido en el mundo se obtiene usando *Saccharomyces cerevisiae* [4], una levadura que no puede fermentar pentosas pero sí hexosas como glucosa y en menor grado galactosa [30]. Existe también una bacteria etanológica llamada *Zymomonas mobilis* incapaz de fermentar pentosas; sin embargo, avances en el campo de la ingeniería metabólica han permitido obtener *Zymomonas mobilis recombinante* apta para ser usada en procesos de co-fermentación [28, 29].

---

<sup>1</sup> *Separate Hydrolysis and Fermentation.*

<sup>2</sup> *Separate Hydrolysis and co-Fermentation.*

<sup>3</sup> *Simultaneous Saccharification and Fermentation.*

<sup>4</sup> *Simultaneous Saccharification and co-Fermentation.*

**1.2.3. Separación.** Los caldos de cultivo resultantes de los procesos de fermentación oscilan entre 2,5 y 10% peso de etanol por lo que es necesario concentrar el etanol hasta valores mayores a 99% peso. Comúnmente esta separación se lleva a cabo mediante un proceso de destilación convencional que eleva la concentración en el caldo hasta un 45-50% peso y luego se envía ésta corriente a una columna de rectificación de donde se obtiene un destilado que puede llegar al 90-92% peso de etanol [6].

Debido a las propiedades físico-químicas de la mezcla alcohol-agua es imposible retirar completamente el agua a presión atmosférica ya que la formación de una mezcla azeotrópica sólo permite llevar a cabo la separación, bajo condiciones normales, hasta concentraciones cercanas a 95,6% peso (89,4% molar). Por tal razón se hace necesario implementar un proceso de separación no convencional [6].

Entre los procesos de separación no convencionales se encuentra la destilación a bajas presiones, la destilación azeotrópica, la destilación extractiva, la adsorción con tamices moleculares y la pervaporación. Sin embargo, por razones principalmente de costos energéticos la adsorción de agua con los llamados tamices moleculares ha sido la tecnología que más se ha venido desarrollando en la industria de los biocombustibles, reemplazando tecnologías como la destilación azeotrópica [6].

### **1.3 ANÁLISIS EXERGÉTICO**

La exergía (disponibilidad, energía disponible) es una propiedad termodinámica que determina el máximo trabajo útil que se puede obtener de una cantidad de energía con respecto a un ambiente de referencia [31]. Entre mayor sea la desviación del sistema en relación al ambiente de referencia, mayor será la

exergía y por lo tanto mayor la energía del sistema que podrá ser aprovechada [32].

El Análisis Exergético es una técnica basada en la segunda ley de la termodinámica que permite calcular eficiencias exergéticas útiles para estimar posibles mejoras en un proceso, identificando claramente las causas y la localización de las pérdidas termodinámicas [33].

En esencia, el análisis exergético establece las limitaciones teóricas debidas a las irreversibilidades del sistema real, evidenciando claramente que ningún sistema real puede conservar la exergía y que sólo una porción de la exergía que entra puede ser recuperada [33]. La irreversibilidad, también llamada exergía destruida o pérdida exergética, se calcula realizando un balance entre todos los flujos de exergía asociados al tránsito de materia, calor y trabajo que entra y sale del sistema [12].

La exergía de un flujo de materia  $Ex_{flujo}$  es la suma de la exergía cinética ( $Ex_{kin}$ ), potencial ( $Ex_{pot}$ ), química ( $Ex_{ch}$ ) y física ( $Ex_{ph}$ ) [33] como se expresa en la ecuación (1):

$$Ex_{flujo} = Ex_{ph} + Ex_{ch} + Ex_{kin} + Ex_{pot} \quad (1)$$

Normalmente se desprecia el efecto de las exergías cinética y potencial mientras que las exergías química y física sí son significativas y se calculan según las ecuaciones (2) y (3) respectivamente [34]:

$$Ex_{ch} = n \sum_i (x_i E_t^{ch} + RT_0 x_i \ln(x_i)) \quad (2)$$

$$Ex_{ph} = m \sum_i ((h-h_0) - T_0 (s-s_0)) \quad (3)$$

Donde: m: Flujo másico.

n: Flujo molar  
x<sub>i</sub>: Fracción molar de la especie i en el flujo.  
h: Entalpía  
h<sub>0</sub>: Entalpía en el estado de referencia  
s: Entropía  
s<sub>0</sub>: Entropía en el estado de referencia.  
E<sub>t</sub><sup>ch</sup>: Exergía química específica (Ver Anexo B)  
T<sub>0</sub>: Temperatura de referencia

La exergía asociada al trabajo y a la electricidad es igual al valor de la energía. Sin embargo, en el caso de la exergía térmica se aplica un *factor de eficiencia de Carnot* que hace que sólo una parte del flujo de calor pueda convertirse en trabajo dependiendo de la temperatura de la fuente y la temperatura de referencia [33]. La exergía térmica E<sub>Q</sub> asociada con la transferencia de calor a temperatura constante está dada por la ecuación (4):

$$E_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (4)$$

Donde:

Q: Calor transferido.  
T: Temperatura de la fuente.  
T<sub>0</sub>: Temperatura de referencia.

## 2. SIMULACIÓN DE LAS RUTAS EN ASPEN PLUS™

Para el planteamiento del proceso de producción de bioetanol de tercera generación se simularon tres rutas: RUTA 1 usando la tecnología SHF y *Saccharomyces cerevisiae* en la fermentación, RUTA 2 empleando la tecnología SHCF con *Zymomonas mobilis Recombinante*, y RUTA 3 utilizando la tecnología SSCF con el organismo *Zymomonas mobilis recombinante*. Las tres rutas fueron simuladas usando un flujo de alimento de 9138,06 kg/h de carbohidratos (composición de celulosa, almidón y hemicelulosa de 53,5%, 31,1% y 15,4% respectivamente), el mismo tipo de pretratamiento con ácido diluido y la misma configuración en la etapa de destilación. Las simulaciones se realizaron en el software Aspen Plus™ utilizando el modelo NRTL para el cálculo de los coeficientes de actividad en fase líquida y la Ley de Henry para los gases disueltos.

Aspen Plus™ posee amplias bases de datos con propiedades de componentes puros. Sin embargo, debido a que algunas sustancias no se encuentran especificadas en el software, fue necesario recurrir a la base de datos del Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés) donde se encuentra información para simular las propiedades de algunas sustancias utilizadas en la industria de los biocombustibles [35]. El Anexo B contiene la lista de los componentes utilizados en las rutas simuladas.

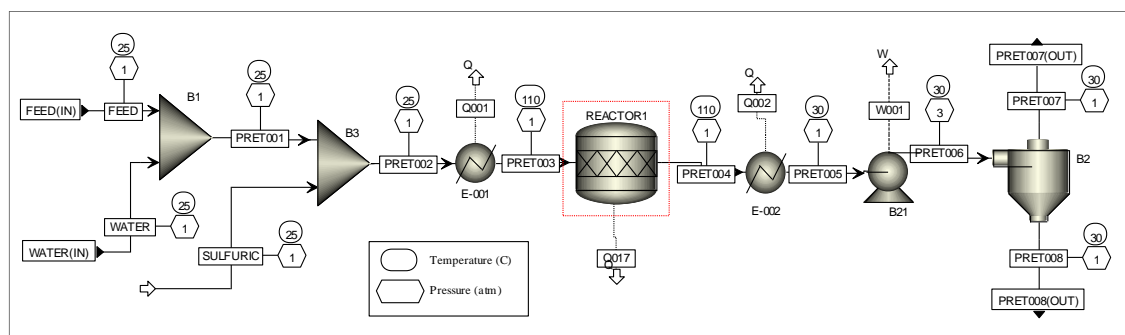
Los procesos de producción de bioetanol fueron simulados en estado estacionario y fueron divididos mediante jerarquías (etapas del proceso) como se puede observar en el Anexo C.

## 2.1. PRETRATAMIENTO CON ÁCIDO DILUIDO

En las tres rutas se simuló el mismo pretratamiento con ácido diluido debido a que no fue posible conocer de la literatura más información experimental de otros tipos de pretratamientos que permitiera estimar las condiciones de operación ni las posibles reacciones químicas involucradas en el procesamiento de la microalga *Chlorella vulgaris* para la obtención de etanol.

Las condiciones de operación del reactor de pretratamiento y las reacciones químicas y conversiones empleadas para simular las tres rutas se incluyen en el Anexo D. Éstas se estimaron con fundamento en tres consideraciones: los resultados experimentales obtenidos por Lee *et al.* 2011 [23], quienes realizaron una hidrólisis con ácido diluido a una muestra de biomasa de *Chlorella vulgaris* obteniendo una temperatura óptima de 110°C y rendimientos de 0,12 g glucosa/g biomasa, 0,033 g xilosa/g biomasa, 0,047 g galactosa/g biomasa y 0,007g fructosa/g biomasa [23]; la composición de polisacáridos de la biomasa de *Chlorella sp.* (35,25% celulosa, 10,19% hemicelulosa y 20,52% almidón) determinada por Zhou *et al.* 2011 [22]; y la conversión óptima de almidón a glucosa de 42% aplicando hidrólisis ácida lograda por Bej *et al.* 2008 [39].

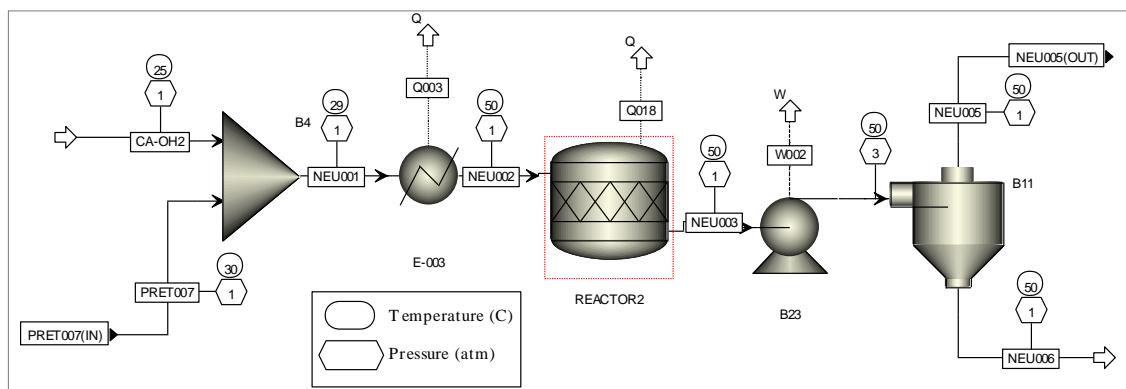
**Figura 1. Esquema etapa de Pretratamiento para las tres rutas.**



Fuente: AUTORES

El esquema del pretratamiento simulado en Aspen Plus™ se muestra en la Figura 1. En el proceso inicialmente se mezclan los carbohidratos de la biomasa residual de microalga con agua y ácido sulfúrico y se calienta la mezcla hasta 110°C para ser llevada después al reactor de pretratamiento. Luego de la hidrólisis ácida, la corriente se enfría y se impulsa hacia un hidrociclón el cual separa los productos sólidos (para enviarlos a la etapa de hidrólisis enzimática) de los líquidos. Estos últimos deberán ingresar al proceso de neutralización que se muestra en la Figura 2. En el reactor de neutralización el ácido presente en la mezcla reacciona a 50°C con hidróxido de calcio formando sulfato de calcio dihidrato (yeso), un sólido que se retira del proceso. La corriente libre de ácidos continúa a la etapa de fermentación.

**Figura 2. Esquema etapa de Neutralización para las tres rutas.**



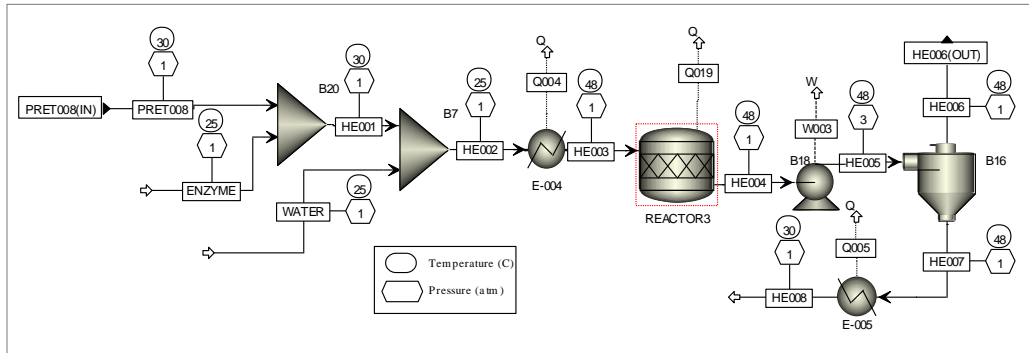
Fuente: AUTORES

## 2.2. HIDRÓLISIS DE CELULOSA

La RUTA 1 y RUTA 2 emplean ambas tecnologías de hidrólisis y fermentación separadas por lo cual se incluyó en las dos simulaciones una etapa de hidrólisis enzimática para convertir la celulosa que no alcanzó a reaccionar en el pretratamiento. En el Anexo E se incluyen las condiciones del reactor de hidrólisis enzimática, las conversiones y reacciones asumidas de acuerdo a los estudios

elaborados por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos [29].

**Figura 3. Esquema etapa de Hidrólisis Enzimática**



Fuente: AUTORES

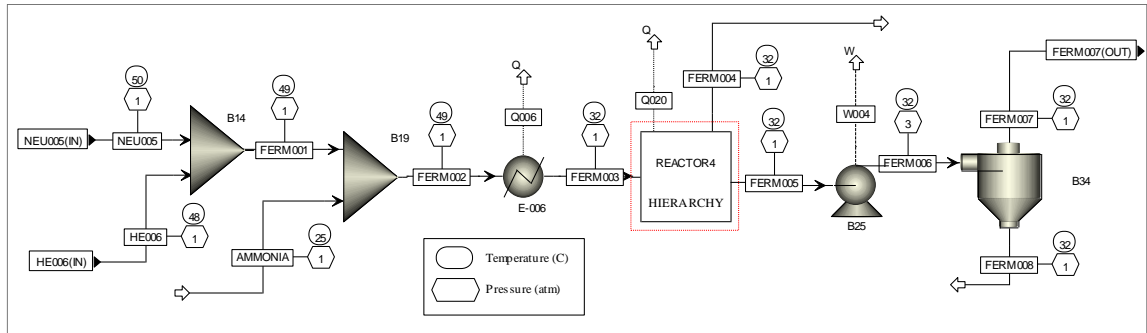
La etapa de hidrólisis enzimática diseñada para las rutas 1 y 2 que se presenta en la Figura 3 inicia con una corriente proveniente del pretratamiento a la que se le adiciona agua y la enzima celulasa, luego se calienta la mezcla hasta la temperatura de hidrólisis (48°C) para posteriormente ingresar al reactor. La mezcla rica en glucosa se separa de los sólidos remanentes y se envía a la etapa de fermentación.

### 2.3 TECNOLOGÍAS SHF, SHCF y SSCF

La RUTA 1 y la RUTA 2 emplean la tecnología de hidrólisis y fermentación separadas y se diferencian solamente por el tipo de microorganismo empleado en la fermentación: mientras que la RUTA 1 utiliza la levadura *Saccharomyces cerevisiae* para la fermentación, la RUTA 2 usa la bacteria *Zymomonas mobilis recombinante* (organismo capaz de fermentar pentosas y hexosas simultáneamente [28]). Como se puede observar en la Figura 4, las corrientes provenientes de la hidrólisis enzimática y la neutralización se mezclan con

amoniaco (fuente de nitrógeno) para ingresar al reactor de fermentación que opera a 32°C. Posteriormente se obtienen dos corrientes: una gaseosa compuesta principalmente por CO<sub>2</sub> y un caldo con el etanol producido y sólidos remanentes (los cuales se retiran del proceso).

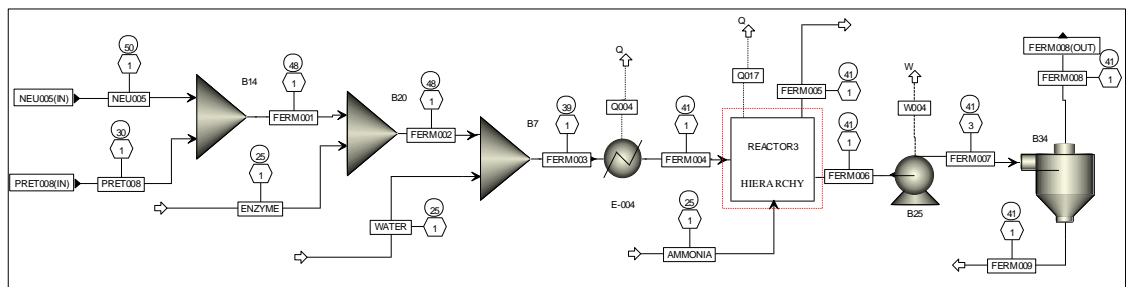
**Figura 4. Esquema etapa de fermentación RUTA 1 y RUTA 2**



Fuente: AUTORES

En la RUTA 3 la hidrólisis de celulosa y la fermentación de hexosas y pentosas se realizan simultáneamente en una sola etapa empleando celulasa y *Zymomonas mobilis recombinante* según el proceso desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos [29]. Como se puede observar en la Figura 5, el esquema de la simulación de la RUTA 3 es similar al de las otras dos rutas. Se diferencia, en términos generales, sólo en la adición de celulasa y en la temperatura del reactor de fermentación SSCF (41°C).

**Figura 5. Esquema etapa de fermentación RUTA 3**



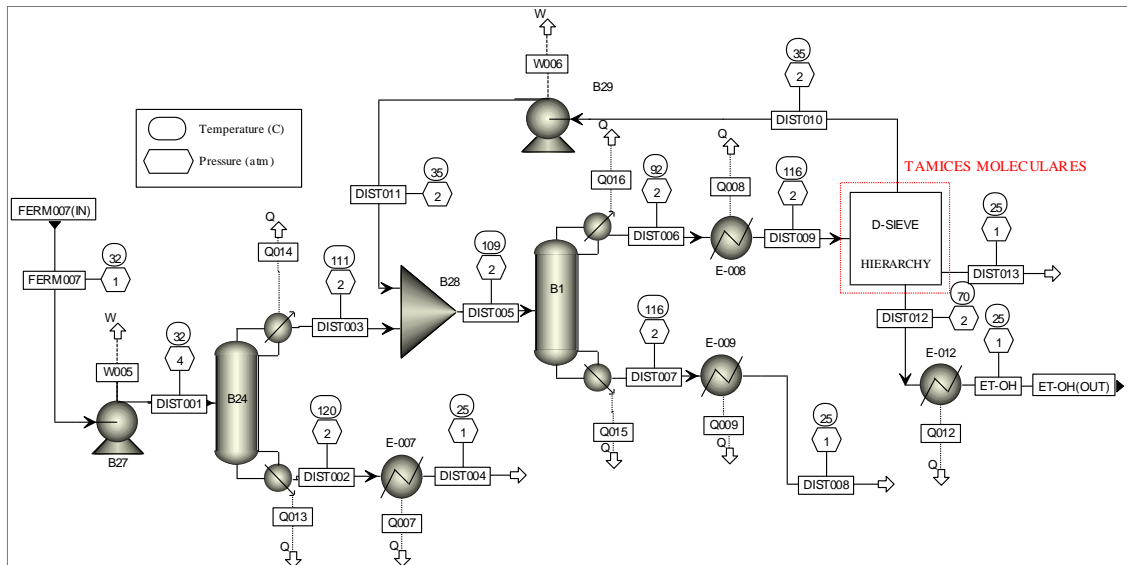
Fuente: AUTORES

En el Anexo F se incluye las condiciones de operación y las reacciones y conversiones que ocurren en el reactor de fermentación para las tres rutas.

## 2.4 DESTILACIÓN Y TAMICES MOLECULARES

La etapa de destilación simulada en Aspen Plus™ (Figura 6) se diseñó teniendo en cuenta el proceso utilizado en la separación de etanol a partir de maíz desarrollado por Humbird *et al.* 2011 [27].

Figura 6. Esquema etapa de destilación



Fuente: AUTORES

En esta etapa el caldo proveniente de la etapa de fermentación ingresa a la primera torre donde se destila hasta alcanzar una concentración de ~50% peso de etanol. En una segunda torre de rectificación se termina de concentrar el etanol hasta ~92% peso, ingresando luego al sistema de tamices moleculares (Anexo G) de donde resultan tres corrientes: una principalmente con gases, otra con un contenido de etanol cercano al 54% peso (corriente de reciclo) y otra con el producto deseado con una concentración cercana al 99,5% peso de etanol.

### 3. DESARROLLO METODOLÓGICO DE LA EVALUACIÓN EXERGÉTICA.

Una vez simuladas las tres rutas en Aspen Plus™, y habiendo definido las condiciones de temperatura y presión del estado de referencia en 25°C y 1 atm respectivamente, se procedió a realizar los cálculos de los diferentes tipos de exergía teniendo en cuenta algunas variables de los flujos de materia y energía de los procesos como entalpía, entropía, temperatura, composición, etc. Para calcular dichas variables en el estado de referencia fue necesario computar nuevamente cada corriente bajo las condiciones de presión y temperatura de referencia (25°C y 1 atm). Los cálculos de las exergías física, química y térmica se realizó con base en las ecuaciones (2), (3) y (4) presentadas en la sección 1.3 de este trabajo, respectivamente (El Anexo B contiene las exergías químicas específicas usadas en el cálculo de la exergía química de las corrientes). La exergía asociada a la electricidad consumida por las bombas corresponde a la misma cantidad de energía calculada por el simulador.

Dado que es posible establecer un balance exergético global en un sistema partiendo de las corrientes de exergía que entran y salen del mismo [40], se planteó en cada etapa de las rutas simuladas el siguiente balance de exergía (5) [41]:

$$Ex_{in}-Ex_{out}\pm Ex_Q\pm Ex_W=Irreversibilidades \quad (5)$$

Donde

$Ex_{in}$ : Exergía asociada a los flujos de materia que entran al sistema

$Ex_{out}$ : Exergía asociada a los flujos de materia que salen al sistema

$Ex_Q$ : Exergía asociada a la transferencia de calor

$Ex_W$ : Exergía asociada al trabajo

La eficiencia exergética  $\Psi$  de cada etapa y la eficiencia global se calcularon mediante la ecuación (6) [12]:

$$\Psi = 1 - \frac{\text{Irreversibilidades}}{\text{Total exergía ingresada al sistema}} \quad (6)$$

Además de las exergías de las corrientes, también se calcularon las exergías asociadas a la utilización de servicios industriales. Suponiendo el uso de agua de enfriamiento a 15°C y vapor de baja presión (5 bar, 152°C) se calcularon los flujos requeridos en los procesos de enfriamiento y calentamiento de las rutas.

Finalmente, para poder establecer una unidad de comparación se dividieron las irreversibilidades del proceso por la cantidad de etanol producido en cada ruta.

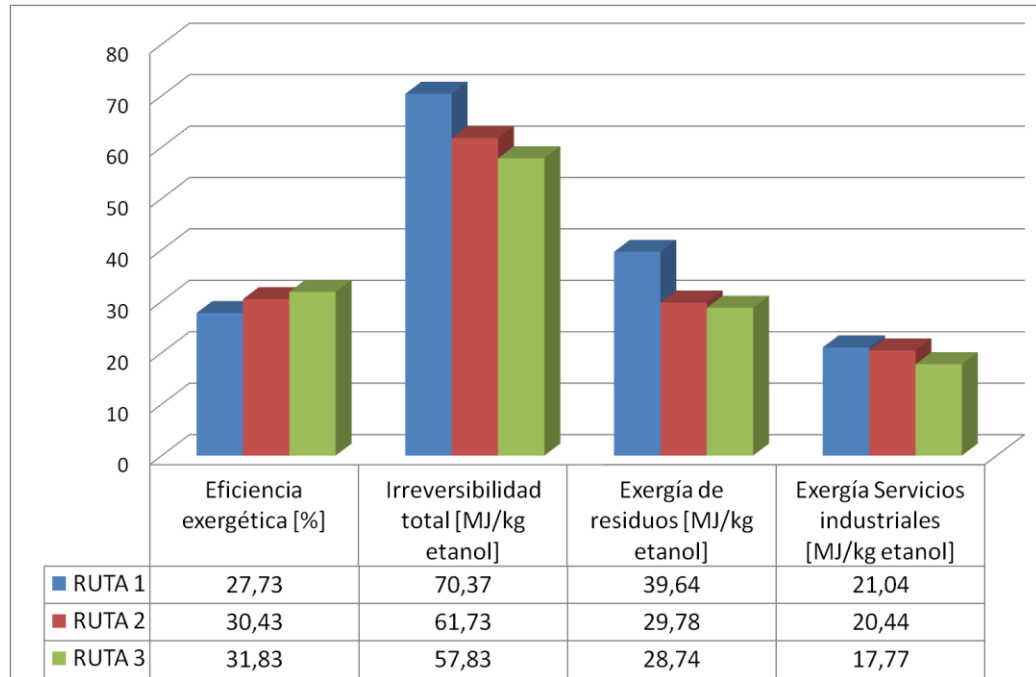
#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las rutas simuladas en esta investigación se realizaron partiendo de un flujo de biomasa residual de microalga equivalente a 9.138,06 kg/h (78.952,84 t/año) compuesta por celulosa (53,5% peso), almidón (31,1% peso) y hemicelulosa (15,4% peso). Al final de los procesos se obtuvo una producción de etanol de 24.887,43 t/año, 27.893,29 t/año y 28.213,83 t/año en la RUTA 1, RUTA 2 y RUTA 3 con un 99,5% de pureza respectivamente, lo que significa que el mayor rendimiento alcanzado fue de 0,357 kg de etanol por kg de biomasa residual para la RUTA 3 (0,315 kg etanol/kg biomasa para la RUTA 1 y 0.353 kg etanol/kg biomasa para la RUTA 2). Si se tiene en cuenta que los carbohidratos representan el 25% de la biomasa de *Chlorella sp.* [21], se puede afirmar que la RUTA 3 produce 109,6 litros de bioetanol por cada tonelada de biomasa de microalga alimentada antes del proceso de extracción de lípidos y proteínas.

En los Anexos H, I y J se incluye la información de las propiedades termodinámicas de todas las corrientes, los flujos molares por componente y los flujos de exergía física y química para las tres rutas simuladas, respectivamente.

Como se puede observar en la Figura 7, la ruta que tuvo mayor eficiencia fue la RUTA 3 con un valor de 31,83%, seguida por la RUTA 2 y la RUTA 1 con 30,43% y 27,73% respectivamente. Estos resultados también muestran la exergía de los requerimientos de vapor y agua de enfriamiento y de los residuos. Dependiendo del uso que se le dé a los residuos y del grado de integración energética aplicado sería posible aumentar la eficiencia exergética de las rutas ya que la reducción de la exergía de residuos y la exergía por servicios industriales disminuiría las irreversibilidades de los procesos.

**Figura 7. Resultados del análisis exergético**



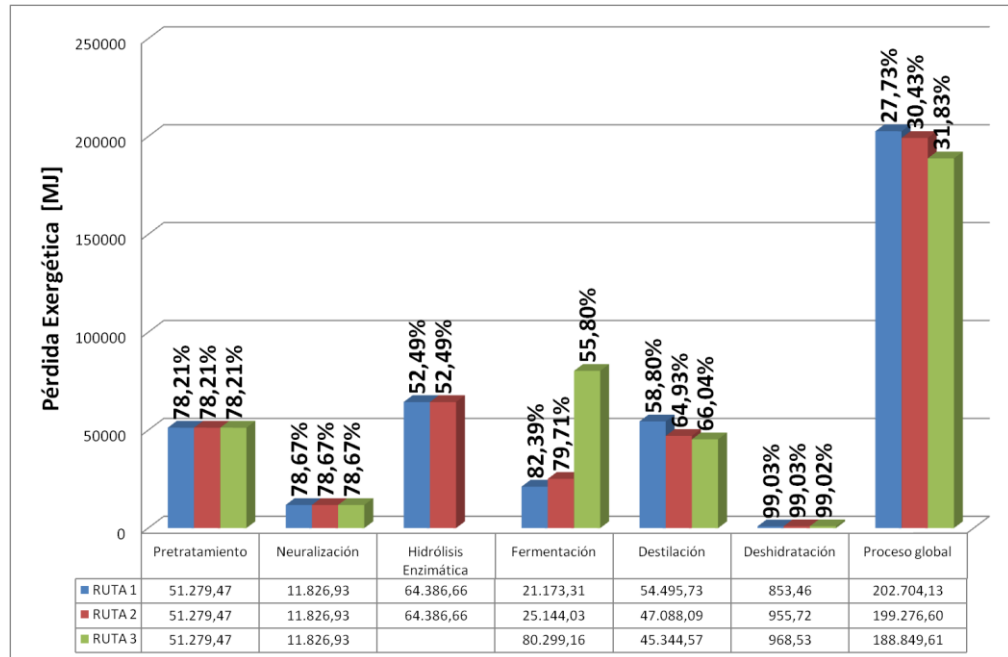
Fuente: AUTORES

Los resultados de la evaluación exergética expuestos en las Figuras 8 y 9 permiten identificar las etapas que presentaron mayores pérdidas exergéticas y menores eficiencias, es decir, las etapas que requieren algún tipo de perfeccionamiento para mejorar el uso de la energía en el proceso.

Según se indica en la Figura 9, las etapas que presentan mayores irreversibilidades por kilogramo de etanol, y por lo tanto requieren mayores mejoras, son la hidrólisis enzimática para el caso de las rutas 1 y 2 (22,353 y 19,944 MJ/kg etanol respectivamente), y la fermentación SSCF para el caso de la RUTA 3 (24,590 MJ/kg etanol). Son justamente en estas etapas donde se produce un flujo que contiene carbohidratos, nitrógeno, enzimas y organismos remanentes que representan unas pérdidas exergéticas por kilogramo de etanol de 14,989 MJ, 17,089 MJ y 18,795 MJ para las rutas 1, 2 y 3, respectivamente. Si se le asigna un uso a estos residuos podría mejorarse el uso eficiente de la energía. Existen

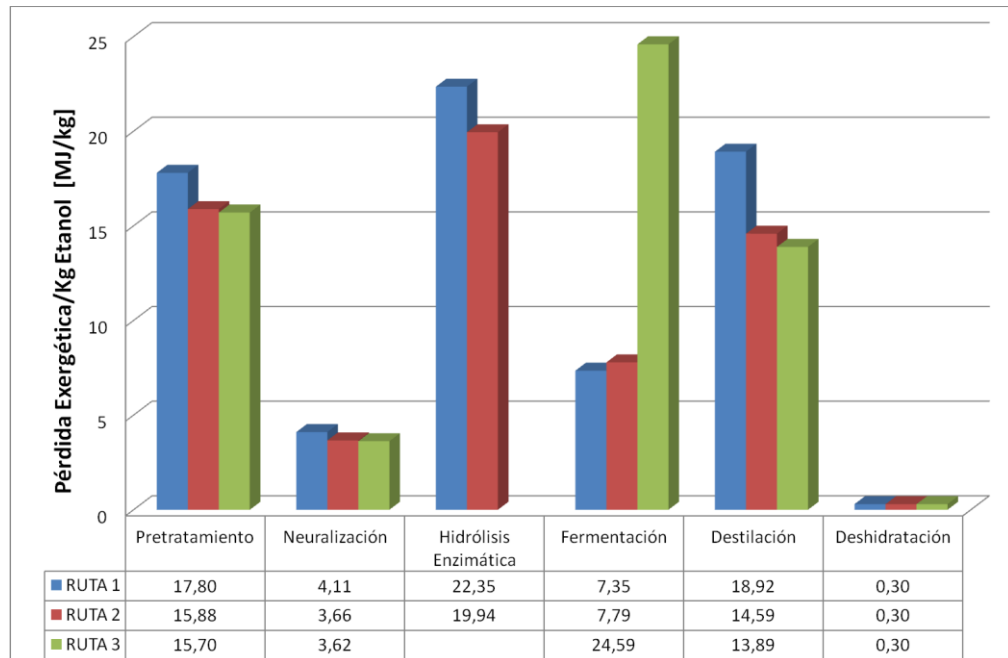
múltiples formas de aprovechar la biomasa residual de microalga obtenida luego de la extracción de lípidos y proteínas, la más simple de ellas es destinarla para la producción de abono y acondicionadores para la tierra gracias a su alto contenido de nitrógeno y materia orgánica [10].

**Figura 8. Irreversibilidades y eficiencias exergeticas por etapas y globales**



Fuente: AUTORES

**Figura 9. Irreversibilidades por kilogramo de etanol en cada etapa.**



Fuente: AUTORES

Después de la hidrólisis enzimática (Rutas 1 y 2) y la fermentación SSCF (RUTA 3), la etapa que menores eficiencias presentó fue la destilación (58,80%, 64,93% y 66,04% para las rutas 1, 2 y 3 respectivamente) debido a la demanda energética requerida por las torres de destilación que operan a presiones por arriba de la atmosférica. En la etapa de destilación también llama la atención la eficiencia exergética superior al 99% alcanzada en el proceso de deshidratación usando tamices moleculares, hecho que permite valorar el uso eficiente de la energía de este método de separación no convencional [6].

## 5. CONCLUSIONES

El proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa residual de *Chlorella vulgaris* propuesto en la RUTA 3 fue el que presentó la eficiencia exergética global más alta (31,83%), la mayor cantidad de etanol producido (0,357 kg Etanol/kg Biomasa residual) y la menor pérdida exergética por kilogramo de etanol (57,832 MJ/kg etanol)), seguida por la RUTA 2 (30,43%, 0,353 kg etanol/kg biomasa, 61,726 MJ/kg etanol) y la RUTA 1 (27,73%, 0,315 kg etanol/kg biomasa, 70,371 MJ/kg etanol).

Las etapas del proceso que presentaron menor eficiencia exergética fueron la hidrólisis enzimática (para el caso de la RUTA 1 y RUTA 2) y la fermentación SSCF (para el caso de la RUTA 3) con valores de 52,49% y 55,80% respectivamente debido principalmente a la existencia en dicha etapa de un flujo importante de residuos.

La evaluación exergética realizada a tres rutas tecnológicas para la producción de bioetanol a partir de biomasa residual de microalgas indica que la reducción de los desechos de proceso y de los requerimientos de servicios industriales podría servir para incrementar la eficiencia exergética del proceso.

## 6. RECOMENDACIONES

Analizar la viabilidad de la utilización de las corrientes de residuo como co-producto, las cuales son susceptible de ser usadas en alimentación animal y elaboración de abono, debido a su alto contenido de materia orgánica y nitrógeno. Realizar una integración energética con el objetivo de disminuir el consumo de servicios industriales responsables de parte de las pérdidas exergéticas debido al uso de vapor y agua de enfriamiento.

Determinar información experimental más precisa sobre el proceso de producción de bioetanol a partir de microalgas, especialmente sobre la etapa de pretratamiento ya que actualmente son muy pocas las publicaciones sobre el tema que se encuentran en la literatura científicas.

Se sugiere la implementación de modelos combinados de Análisis de Ciclo de Vida, Integración Energética y Análisis Económico que permitan una evaluación más completa del proceso.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFIA

1. **Bernal, J.** 1979. Surgimiento y carácter de la ciencia. En: La ciencia en la historia. Traducido por Eli de Gortari. México, México. Editorial Nueva Imagen.
2. **National Renewable Energy Laboratory.** 2002. Research Review. U.S. Department of Energy's.
3. **Brown, L.** 2011. World on the edge: How to prevent environmental and economic collapse. New York, United States. Earth Policy Institute
4. **Olsson, L., et al.** 2004. Bioethanol production from lignocellulosic material. En: Polysaccharides: Structural diversity and functional versatility. Second Ed. New York, United States. Marcel Dekker Inc.
5. **United Nations.** 1987. Our common future. Report of the world commission on environment and development.
6. **Sánchez-Toro, O., Gutiérrez-Mosquera, L. y Cardona-Alzate, C.** 2009. Diseño conceptual de procesos: Producción de biocombustibles. Manizales, Colombia. Editorial Universidad Nacional de Colombia.
7. **Renewable Fuels Association.** 2010. Climate of Opportunity. Ethanol industry outlook. Washington, United States.
8. **Tanner, S.** 2009. Do microalgae solve the energy problem?. En: Biofuels of the third generation. Zurich, Switzerland. Escuela Politécnica Federal de Zurich.
9. **Lam, M. and Lee K.** 2012. Microalage biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. En: Biotechnology Advances, 30: 673-690.
10. **Energy Efficiency and Renewable Energy.** 2010. National algal biofuels technology roadmap. U.S. Department of Energy's.
11. **Rojan, P., et al.** 2011. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. En: Bioresource technology, 102: 186-193.

12. **Cornelissen, R.** 1997. The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. En: Thermodynamics and sustainable development. Enschede, Netherlands. Febodruk BV.
13. **Richmond, A.** 2004. Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology. Ames, Iowa, United States. Blackwell Publishing Company.
14. **Harun, R., et al.** 2010. Microalgal biomass as a cellulosic fermentation feedstock for, bioethanol production. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, in press.
15. **Brown, M., Jeffrey, S. and Garland, C.** 1989. Nutritional aspects of microalgae used in mariculture; a literature review. Tasmania, Australia. CSIRO Marine Laboratories Report 205.
16. **Brown, M., et al.** 1997. Nutritional properties of microalgae for mariculture. En: Aquaculture, 151: 315-331.
17. **Pugh, N., et al.** 2001. Isolation of three high molecular weight polysaccharide preparations with potent immunostimulatory activity from *Spirulina platensis*, *Aphanizomenon flos-aquae* and *Chlorella pyrenoidosa*. En: Planta Med, 67: 737-742.
18. **Harun, R. and Danguah, M.** 2011. Influence of acid pre-treatment on microalgal biomass for bioethanol production. En: Process Biochemistry, 46: 304-309.
19. **Miranda, J., Passarinho, P. and Gouveia L.** 2012. Pre-treatment optimization of *Scenedesmus obliquus* microalga for bioethanol production. En: Bioresource Technology, 104: 342-348.
20. **AguaFUELS.** 2009. Report on biology and biotechnology of algae with indication of criteria for strain selection. En: Algae and aquatic biomass for sustainable production of 2<sup>nd</sup> generation biofuels.
21. **Peralta-Ruiz, Y., González-Delgado, A. and Kafarov V.** 2012. Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. En: Applied Energy, in press.

22. **Zhou, N., et al.** 2011. Hydrolysis of *Chlorella* biomass for fermentable sugars in the presence of HCl and MgCl<sub>2</sub>. En: Bioresource Technology, 102: 10158-10161.
23. **Lee, S., et al.** 2011. Converting carbohydrates extracted from marine algae into ethanol using various ethanolic *Escherichia coli* strains. En: Biochem Biotechnol, 164: 878-888.
24. **Ho, S., et al.** 2012. Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock. En: Bioresource Technology, in press.
25. **Cheng, Y.** 2010. Comparative study of *Chlorella* carbohydrates and associated biological processes for biofuel production. University of California Editorial, 233: AAT 3444001.
26. **Pandey, A.** 2009. Handbook of plant-based biofuels. Boca Raton, United States. CRC Press.
27. **National Renewable Energy Laboratory.** 2011. Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. U.S. Department of Energy's.
28. **Hamelinck, C., Hooijdonk, G. and Faaij, A.** 2003. Prospects for ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance as development progresses. Utrecht, Netherlands. Utrecht University.
29. **National Renewable Energy Laboratory.** 2002. Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. U.S. Department of Energy's.
30. **Mousdale, D.** 2008. Biotechnology of bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. Biofuels: Biotechnology, chemistry and sustainable development. Boca Raton, United States. CRC Press.
31. **Sato, N.** 2004. Chemical energy and exergy: An introduction to chemical thermodynamics for engineers. Sapporo, Japan. Elsevier Science and Technology Books.

32. **Wall, G.** 1986. Exergy: A useful concept. Gothenburg, Sweden. Chalmers University of Technology and University of Gothenburg.
33. **Dincer, I. and Rosen M.** 2007. Exergy: energy, environment and sustainable development. Burlington, United States. Elsevier Ltd.
34. **Talens, L., Villalba, G. and Gabarrell, X.** 2007. Exergy analysis applied to biodiesel production. En: Resources, conservation and recycling, 51: 397-407.
35. **Wooley, R. and Putsche V.** 1996. Development of Aspen Plus physical property database for biofuels components. U.S. Department of Energy's.
36. **Sohel, M. and Jack, M.** 2011. Thermodynamic analysis of lignocellulosic biofuel production via a biochemical process: Guiding technology selection and research focus. En: Bioresource Technology, 102: 2617-2622.
37. **Ojeda, K.** 2011. Aplicación de análisis exergético para la evaluación de procesos de producción de bioetanol de segunda generación. Tesis doctoral en Ingeniería Química. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.
38. **Ojeda, K. et al.** 2011. Exergy analysis and process integration of bioethanol production from acid pre-treated biomass: Comparison of SHF, SSF and SSCF pathways. En: Chemical Engineering Journal, 176-177: 195-201.
39. **Bej, B., Basu, R. and Ash, S.** 2008. Kinetic studies on acid catalysed hydrolysis of starch. En: Journal of Scientific and Industrial Research, 67: 295-298
40. **Sorin, M., Lambert, J. and Paris, J.** 1998. Exergy flows analysis in chemical reactors. En: Trans IChem<sup>E</sup>, 76: Part A.
41. **Moran, M. and Shapiro, H.** 2006. Fundamentals of engineering thermodynamics. Quinta Ed. Chinchester, England. Jhon Wiley and Sons Ltd.

## BIBLIOGRAFÍA

**AguaFUELS.** 2009. Report on biology and biotechnology of algae with indication of criteria for strain selection. En: Algae and aquatic biomass for sustainable production of 2<sup>nd</sup> generation biofuels.

**Bej, B., Basu, R. and Ash, S.** 2008. Kinetic studies on acid catalysed hydrolysis of starch. En: Journal of Scientific and Industrial Research, 67: 295- 298

**Bernal, J.** 1979. Surgimiento y carácter de la ciencia. En: La ciencia en la historia. Traducido por Eli de Gortari. México, México. Editorial Nueva Imagen.

**Brown, L.** 2011. World on the edge: How to prevent environmental and economic collapse. New York, United States. Earth Policy Institute

**Brown, M., Jeffrey, S. and Garland, C.** 1989. Nutritional aspects of microalgae used in mariculture; a literature review. Tasmania, Australia. CSIRO Marine Laboratories Report 205.

**Brown, M., et al.** 1997. Nutritional properties of microalgae for mariculture. En: Aquaculture, 151: 315-331.

**Cornelissen, R.** 1997. The use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. En: Thermodynamics and sustainable development. Enshede, Netherlands. Febodruk BV.

**Cheng, Y.** 2010. Comparative study of *Chlorella* carbohydrates and associated biological processes for biofuel production. University of California Editorial, 233: AAT 3444001.

**Dincer, I. and Rosen M.** 2007. Exergy: energy, environment and sustainable development. Burlington, United States. Elsevier Ltd.

**Energy Efficiency and Renewable Energy.** 2010. National algal biofuels technology roadmap. U.S. Department of Energy's.

**Hamelinck, C., Hooijdonk, G. and Faaij, A.** 2003. Prospects for ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance as development progresses. Utrecht, Netherlands. Utrecht University.

**Harun, R. and Danguah, M.** 2011. Influence of acid pre-treatment on microalgal biomass for bioethanol production. En: Process Biochemistry, 46: 304-309.

**Harun, R., et al.** 2010. Microalgal biomass as a cellulosic fermentation feedstock for, bioethanol production. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews, in press.

**Ho, S., et al.** 2012. Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock. En: Bioresource Technology, in press.

**Lam, M. and Lee K.** 2012. Microalgal biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. En: Biotechnology Advances, 30: 673-690.

**Lee, S., et al.** 2011. Converting carbohydrates extracted from marine algae into ethanol using various ethanolic *Escherichia coli* strains. En: Biochem Biotechnol, 164: 878-888.

**Miranda, J., Passarinho, P. and Gouveia L.** 2012. Pre-treatment optimization of *Scenedesmus obliquus* microalga for bioethanol production. En: Bioresource Technology, 104: 342-348.

**Moran, M. and Shapiro, H.** 2006. Fundamentals of engineering thermodynamics. Quinta Ed. Chinchester, England. Jhon Wiley and Sons Ltd.

**Mousdale, D.** 2008. Biotechnology of bioethanol production from lignocellulosic feedstocks. Biofuels: Biotechnology, chemistry and sustainable development. Boca Raton, United States. CRC Press.

**National Renewable Energy Laboratory.** 2011. Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. U.S. Department of Energy's.

**National Renewable Energy Laboratory.** 2002. Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. U.S. Department of Energy's.

**National Renewable Energy Laboratory.** 2002. Research Review. U.S. Department of Energy's.

**Ojeda, K.** 2011. Aplicación de análisis exergético para la evaluación de procesos de producción de bioetanol de segunda generación. Tesis doctoral en Ingeniería Química. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander.

**Ojeda, K. et al.** 2011. Exergy analysis and process integration of bioethanol production from acid pre-treated biomass: Comparison of SHF, SSF and SSCF pathways. En: Chemical Engineering Journal, 176-177: 195-201.

**Olsson, L., et al.** 2004. Bioethanol production from lignocellulosic material. En: Polysaccharides: Structural diversity and functional versatility. Second Ed. New York, United States. Marcel Dekker Inc.

**Pandey, A.** 2009. Handbook of plant-based biofuels. Boca Raton, United States. CRC Press.

**Peralta-Ruiz, Y., González-Delgado, A. and Kafarov V.** 2012. Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. En: Applied Energy, in press.

**Pugh, N., et al.** 2001. Isolation of three high molecular weight polysaccharide preparations with potent immunostimulatory activity from *Spirulina platensis*, *Aphanizomenon flos-aquae* and *Chlorella pyrenoidosa*. En: Planta Med, 67: 737-742.

**Renewable Fuels Association.** 2010. Climate of Opportunity. Ethanol industry outlook. Washington, United States.

**Richmond, A.** 2004. Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology. Ames, Iowa, United States. Blackwell Publishing Company.

**Rojan, P., et al.** 2011. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. En: Bioresource technology, 102: 186-193.

**Sato, N.** 2004. Chemical energy and exergy: An introduction to chemical thermodynamics for engineers. Sapporo, Japan. Elsevier Science and Technology Books.

**Sánchez-Toro, O., Gutiérrez-Mosquera, L. y Cardona-Alzate, C.** 2009. Diseño conceptual de procesos: Producción de biocombustibles. Manizales, Colombia. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

**Sohel, M. and Jack, M.** 2011. Thermodynamic analysis of lignocellulosic biofuel production via a biochemical process: Guiding technology selection and research focus. En: *Bioresource Technology*, 102: 2617-2622.

**Sorin, M., Lambert, J. and Paris, J.** 1998. Exergy flows analysis in chemical reactors. En: *Trans IChem<sup>E</sup>*, 76: Part A.

**Talens, L., Villalba, G. and Gabarrell, X.** 2007. Exergy analysis applied to biodiesel production. En: *Resources, conservation and recycling*, 51: 397-407.

**Tanner, S.** 2009. Do microalgae solve the energy problem?. En: *Biofuels of the third generation*. Zurich, Switzerland. Escuela Politécnica Federal de Zurich.

**United Nations.** 1987. Our common future. Report of the world commission on environment and development.

**Wall, G.** 1986. Exergy: A useful concept. Gothenburg, Sweden. Chalmers University of Technology and University of Gothenburg.

**Wooley, R. and Putsche V.** 1996. Development of Aspen Plus physical property database for biofuels components. U.S. Department of Energy's.

**Zhou, N., et al.** 2011. Hydrolysis of *Chlorella* biomass for fermentable sugars in the presence of HCl and MgCl<sub>2</sub>. En: *Bioresouce Technology*, 102: 10158-10161.

## ANEXOS

### ANEXO A. COMPOSICIÓN DE CARBOHIDRATOS EN VARIAS ESPECIES DE MICROALGA

Especie de Alga	Carbohidratos % peso
<i>Scenedesmus obliquus</i>	10 – 17
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	21 – 52
<i>Chlorella vulgaris</i>	12 – 17
<i>Spirogyra sp.</i>	33 – 64
<i>Dunaliella bioculata</i>	4
<i>Dunaliella salina</i>	32
<i>Euglena gracilis</i>	14 – 18
<i>Prymnesium parvum</i>	25 – 33
<i>Porphyridium cruentum</i>	40 – 57
<i>Spirulina platensis</i>	8 – 14
<i>Spirulina máxima</i>	13 – 16
<i>Synechoccus sp.</i>	15
<i>Anabaena cylindrical</i>	25 – 30

Fuente [14]

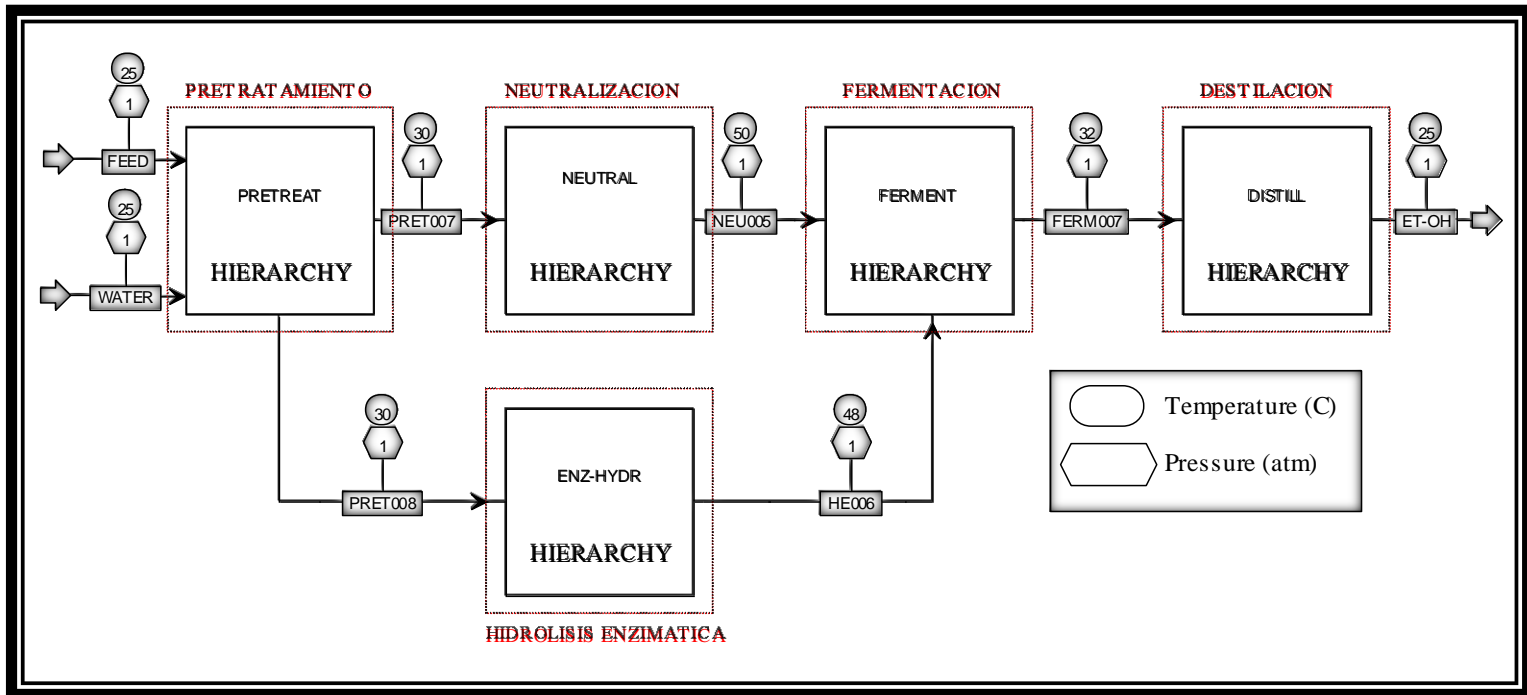
**ANEXO B. COMPONENTES DE LAS RUTAS Y EXERGÍAS QUÍMICAS  
ESPECÍFICAS**

Componente	Formula	Exergía Específica kJ/kmol
Ácido Acético	$C_2H_4O_2$	908.000
Almidón	$C_6H_{10}O_5$	3.404.430
Amoniaco	$NH_3$	337.900
Hidróxido de calcio	$Ca(OH)_2$	53.700
Sulfato de calcio dihidrato (Yeso)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	8.600
Celulasa	$CH_{1,57}N_{0,29}O_{0,31}$	145.650
Celulosa	$C_6H_{10}O_5$	3.404.430
Dioxido de carbono	$CO_2$	19.096
Etanol	$C_2H_6O$	1.250.980
Fructosa	$C_6H_{12}O_6$	2.777.400
Galactosa	$C_6H_{12}O_6$	2.777.400
Glucosa	$C_6H_{12}O_6$	2.793.200
Glicerol	$C_3H_8O_3$	1.705.660
Hemicelulosa	$C_5H_8O_4$	2.826.640
Ácido Láctico	$C_3H_6O_3$	1.541.720
Oxigeno	$O_2$	3.970
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	$CH_{1,64}N_{0,39}O_{0,23}$	2.671.960
Ácido Succínico	$C_4H_6O_4$	1.609.400
Ácido Sulfúrico	$H_2SO_4$	108.570
Agua	$H_2O$	900,5
Xilitol	$C_5H_{12}O_5$	2.568.800
Xilosa	$C_5H_{10}O_5$	1.835.310
<i>Zymomonas mobilis</i>	$CH_{1,8}O_{0,5}N_{0,2}$	317.586

Fuente: [35 - 38]

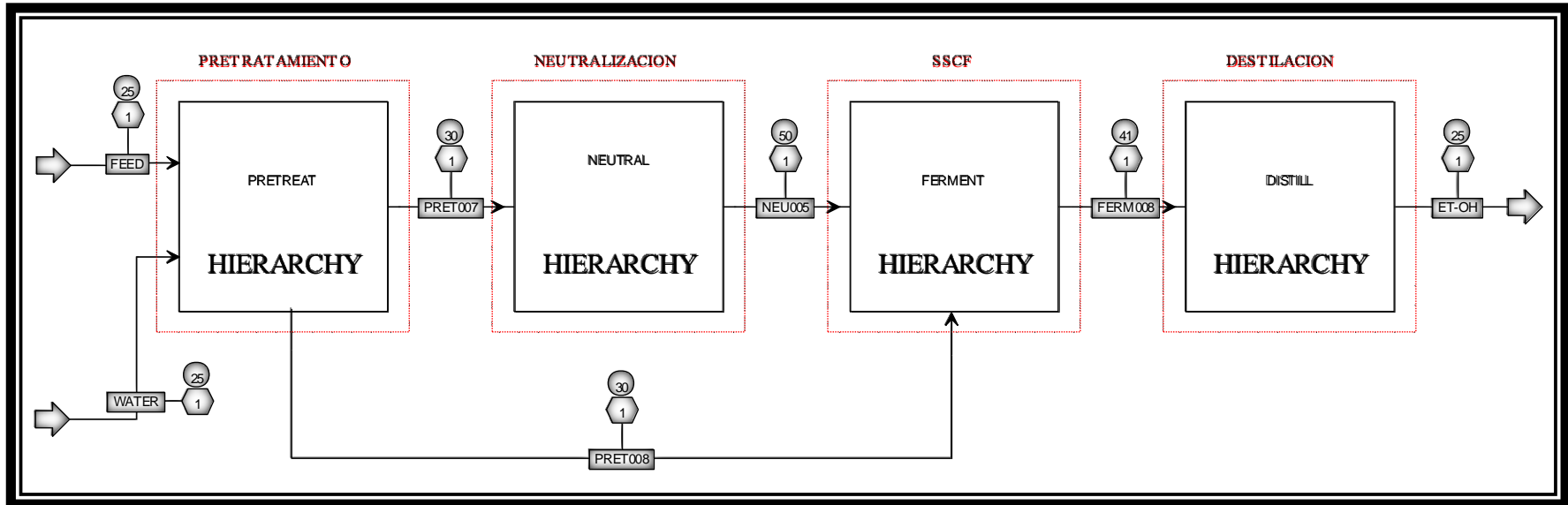
## ANEXO C. ESQUEMA GENERAL DE LAS RUTAS

Figura C.1. Esquema general: RUTA 1 Y RUTA 2



Fuente: AUTORES

Figura C.2. Esquema general: RUTA 3



Fuente: AUTORES

## ANEXO D. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN DEL PRETRATAMIENTO

**Tabla D.1.** Condiciones del reactor de pretratamiento

Concentración de Ácido Sulfúrico	5% v/v
Tiempo de reacción	2 horas
Temperatura	110°C
Presión	1 atm
Carga total de sólidos	30% peso

Fuente: [23, 27]

**Tabla D.2.** Conversiones y reacciones asumidas en el pretratamiento con ácido diluido

Reacción	Reactivo	% Convertido a producto
Almidón + Agua → Glucosa	Almidón	42,0%
Celulosa + Agua → Glucosa	Celulosa	6,2%
Hemicelulosa + Agua → Xilosa	Hemicelulosa	28,5%
6 Hemicelulosa + 6 Agua → 5 Galactosa	Hemicelulosa	40,6%
6 Hemicelulosa + 6 Agua → 5 Fructosa	Hemicelulosa	6,0%

Fuente: [22, 23, 27, 30], modificado por los autores.

## ANEXO E. PARAMETROS DE LA SIMULACIÓN DE LA HIDROLISIS ENZIMÁTICA

**Tabla E.1.** Condiciones del reactor de hidrólisis enzimática

Temperatura	48°C
Tiempo de residencia	1,5 días
Presión	1 atm
Carga de celulasa	20% peso
Carga total sólidos	20 mg celulasa/g celulosa

Fuente: [27]

**Tabla E.2.** Conversiones y reacciones asumidas en la hidrólisis enzimática

Reacción	Reactivo	% Convertido a producto
Celulosa + Agua → Glucosa	Celulosa	90%

Fuente: [27]

**ANEXO F. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS SHF,  
SHCF Y SSCF**

**Tabla F.1.** Condiciones del reactor de fermentación SHF

Organismo	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Temperatura	32°C
Presión	1 atm
Tiempo de residencia	1,5 días
Nivel inicial de sólidos	20% peso

Fuente: [27]

**Tabla F.2.** Conversiones y reacciones asumidas en la fermentación SHF

Reacción	Reactivo	% Convertido a producto
$\text{Glucosa} \rightarrow 2 \text{ Etanol} + 2 \text{ CO}_2$	Glucosa	95%
$\text{Glucosa} + 1,38 \text{ NH}_3 \rightarrow 6 \text{ S. Cerev.} + 3,15 \text{ H}_2\text{O} + 0,255 \text{ O}_2$	Glucosa	2%
$\text{Glucosa} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Glicerol} + \text{O}_2$	Glucosa	0,4%
$\text{Glucosa} + 2 \text{ CO}_2 \rightarrow 2 \text{ Ac. Succinic} + \text{O}_2$	Glucosa	0,6%
$\text{Galactosa} \rightarrow 2 \text{ Etanol} + 2 \text{ CO}_2$	Galactosa	41,4%
$\text{Galactosa} + 1,38 \text{ NH}_3 \rightarrow 6 \text{ S. Cerev.} + 3,15 \text{ H}_2\text{O} + 0,255 \text{ O}_2$	Galactosa	1%
$\text{Galactosa} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Glicerol} + \text{O}_2$	Galactosa	0,2%
$\text{Galactosa} + 2 \text{ CO}_2 \rightarrow 2 \text{ Ac. Succinic} + \text{O}_2$	Galactosa	0,3%
$\text{Fructosa} \rightarrow 2 \text{ Etanol} + 2 \text{ CO}_2$	Fructosa	95%
$\text{Fructosa} + 1,38 \text{ NH}_3 \rightarrow 6 \text{ S. Cerev.} + 3,15 \text{ H}_2\text{O} + 0,255 \text{ O}_2$	Fructosa	2%
$\text{Fructosa} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Glicerol} + \text{O}_2$	Fructosa	0,4%
$\text{Fructosa} + 2 \text{ CO}_2 \rightarrow 2 \text{ Ac. Succinic} + \text{O}_2$	Fructosa	0,6%

Fuente: [27, 30]

**Tabla F.3.** Condiciones del reactor de fermentación SHCF

Organismo	<i>Zymomonas mobilis</i> Recombinante
Temperatura	32°C
Presión	1 atm
Tiempo de residencia	1,5 días
Nivel inicial de sólidos	20% peso

Fuente: [27]

**Tabla F.2.** Conversiones y reacciones asumidas en la fermentación SHCF

Reacción	Reactivo	% Convertido a producto
Glucosa → 2 Etanol + 2 CO <sub>2</sub>	Glucosa	95%
Glucosa + 1,2 NH <sub>3</sub> → 6 <i>Z. mobilis</i> + 2,4 H <sub>2</sub> O + 0,3 O <sub>2</sub>	Glucosa	2%
Glucosa + 2 H <sub>2</sub> O → 2 Glicerol + O <sub>2</sub>	Glucosa	0,4%
Glucosa + 2 CO <sub>2</sub> → 2 Ac. Succinic + O <sub>2</sub>	Glucosa	0,6%
Galactosa → 2 Etanol + 2 CO <sub>2</sub>	Galactosa	90%
Galactosa + 1,2 NH <sub>3</sub> → 6 <i>Z. mobilis</i> + 2,4 H <sub>2</sub> O + 0,3 O <sub>2</sub>	Galactosa	1,95%
Galactosa + 2 H <sub>2</sub> O → 2 Glicerol + O <sub>2</sub>	Galactosa	0,35%
Galactosa + 2 CO <sub>2</sub> → 2 Ac. Succínico + O <sub>2</sub>	Galactosa	0,75%
Fructosa → 2 Etanol + 2 CO <sub>2</sub>	Fructosa	95%
Fructosa + 1,38 NH <sub>3</sub> → 6 <i>Z. mobilis</i> + 3,15 H <sub>2</sub> O + 0,255 O <sub>2</sub>	Fructosa	2%
Fructosa + 2 H <sub>2</sub> O → 2 Glicerol + O <sub>2</sub>	Fructosa	0,4%
Fructosa + 2 CO <sub>2</sub> → 2 Ac. Succínico + O <sub>2</sub>	Fructosa	0,6%
3 Xilosa → 5 Etanol + 5 CO <sub>2</sub>	Xilosa	85%
Xilosa + NH <sub>3</sub> → 5 <i>Z. mobilis</i> + 2 H <sub>2</sub> O + 0,25 O <sub>2</sub>	Xilosa	1,9%
3 Xilosa + 5 H <sub>2</sub> O → 5 Glicerol + 2,5 O <sub>2</sub>	Xilosa	0,3%
3 Xilosa + 5 CO <sub>2</sub> → 5 Ac. Succínico + 2,5 O <sub>2</sub>	Xilosa	0,9%
Xilosa + H <sub>2</sub> O → Xylitol + 0,5 O <sub>2</sub>	Xilosa	4,6%

Fuente: [27, 28]

**Tabla F.5.** Condiciones del reactor de fermentación SSCF

Organismo	<i>Zymomonas mobilis</i> Recombinante
Temperatura	41°C
Presión	1 atm
Tiempo de residencia	1,5 días
Nivel inicial de sólidos	20% peso

Fuente: [29]

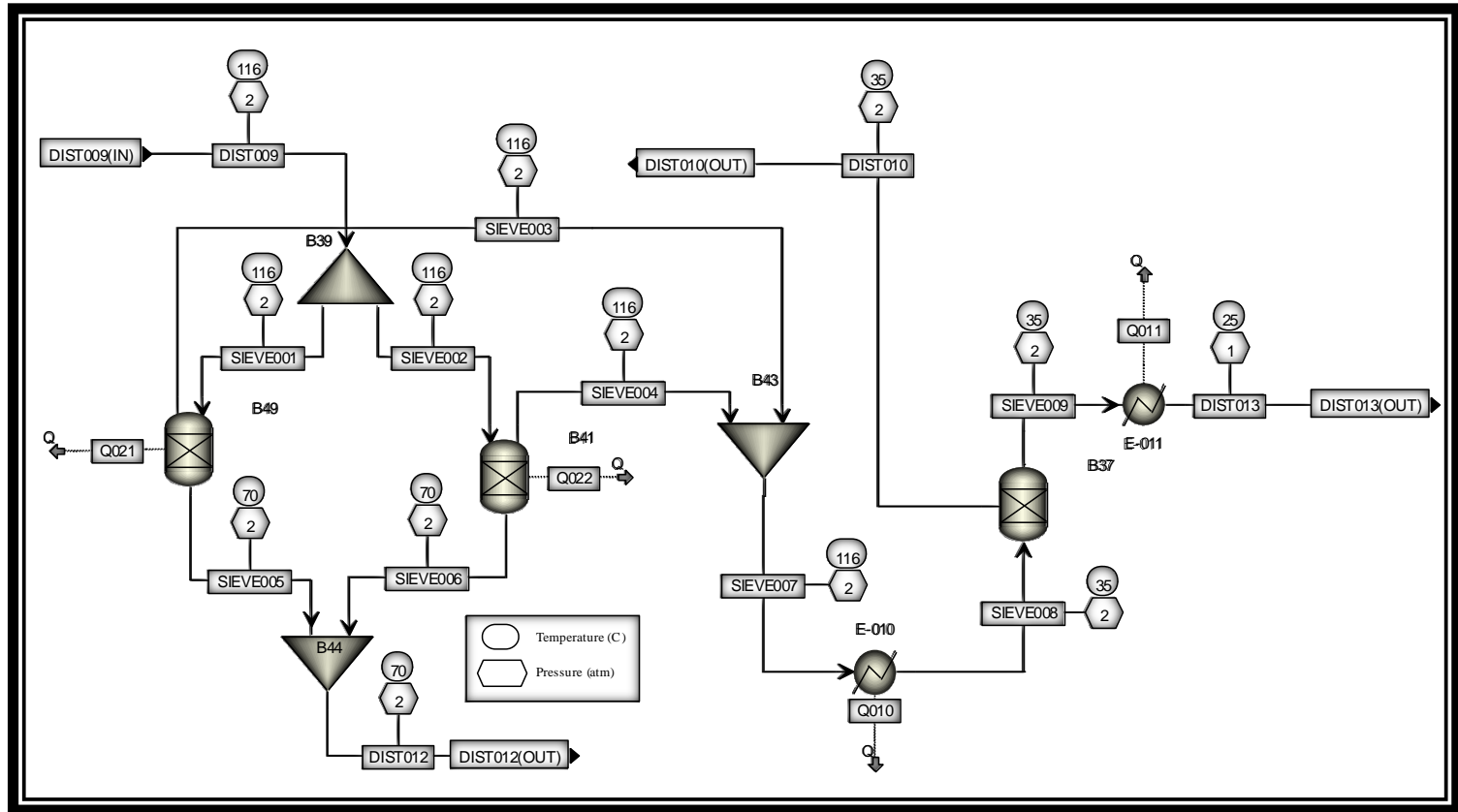
**Tabla F.6.** Conversiones y reacciones asumidas en la fermentación SSCF

Reacción	Reactivo	% Convertido a producto
Celulosa + H <sub>2</sub> O → Glucosa	Celulosa	90%
Glucosa → 2 Etanol + 2 CO <sub>2</sub>	Glucosa	95%
Glucosa + 1,2 NH <sub>3</sub> → 6 <i>Z. mobilis</i> + 2,4 H <sub>2</sub> O + 0,3 O <sub>2</sub>	Glucosa	2%
Glucosa + 2 H <sub>2</sub> O → 2 Glicerol + O <sub>2</sub>	Glucosa	0,4%
Glucosa + 2 CO <sub>2</sub> → 2 Ac. Succinic + O <sub>2</sub>	Glucosa	0,6%
Glucosa + 3 Ac. Acético	Glucosa	1,5%
Glucosa + 2 Ac. Láctico	Glucosa	0,2%
Galactosa → 2 Etanol + 2 CO <sub>2</sub>	Galactosa	90%
Galactosa + 1,2 NH <sub>3</sub> → 6 <i>Z. mobilis</i> + 2,4 H <sub>2</sub> O + 0,3 O <sub>2</sub>	Galactosa	1,95%
Galactosa + 2 H <sub>2</sub> O → 2 Glicerol + O <sub>2</sub>	Galactosa	0,35%
Galactosa + 2 CO <sub>2</sub> → 2 Ac. Succínico + O <sub>2</sub>	Galactosa	0,75%
Galactosa + 3 Ac. Acético	Galactosa	1,45%
Galactosa + 2 Ac. Láctico	Galactosa	0,2%
Fructosa → 2 Etanol + 2 CO <sub>2</sub>	Fructosa	95%
Fructosa + 1,38 NH <sub>3</sub> → 6 <i>Z. mobilis</i> + 3,15 H <sub>2</sub> O + 0,255 O <sub>2</sub>	Fructosa	2%
Fructosa + 2 H <sub>2</sub> O → 2 Glicerol + O <sub>2</sub>	Fructosa	0,4%
Fructosa + 2 CO <sub>2</sub> → 2 Ac. Succínico + O <sub>2</sub>	Fructosa	0,6%
Fructosa + 3 Ac. Acético	Fructosa	1,5%

Reacción	Reactivo	% Convertido a producto
Fructosa + 2 Ac. Láctico	Fructosa	0,2%
3 Xilosa → 5 Etanol + 5 CO <sub>2</sub>	Xilosa	85%
Xilosa + NH <sub>3</sub> → 5 <i>Z.mobilis</i> + 2 H <sub>2</sub> O + 0,25 O <sub>2</sub>	Xilosa	1,9%
3 Xilosa + 5 H <sub>2</sub> O → 5 Glicerol + 2,5 O <sub>2</sub>	Xilosa	0,3%
3 Xilosa + 5 CO <sub>2</sub> → 5 Ac. Succínico + 2,5 O <sub>2</sub>	Xilosa	0,9%
Xilosa + H <sub>2</sub> O → Xylitol + 0,5 O <sub>2</sub>	Xilosa	4,6%
2 Xilosa → 5 Ac. Acético	Xilosa	1,4%
3 Xilosa → 5 Ac. Láctico	Xilosa	0,2%

Fuente: [28, 29]

## ANEXO G. ESQUEMA DE LA SIMULACIÓN DE LOS TAMICES MOLECULARES



Fuente: AUTORES

## ANEXO H. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE TODAS LAS CORRIENTES PARA LAS TRES RUTAS

**Tabla H.1.** Propiedades termodinámicas de las corrientes de la RUTA 1.

STREAM NAME	THERMODYNAMICS PROPERTIES AT CURRENT STATE									
	Enthalpy Flow KJ/HR	Mass Enthalpy KJ/KG	Mass Entropy KJ/KG-K	Mass Flow KG/HR	Molar Enthalpy KJ/KMOL	Molar Entropy KJ/KMOL-K	Mole Flow KMOL/HR	Pressure ATM	Temperature K	Volume Flow CUM/HR
Substream: ALL										
PRETREAT.FEED	-54671710,00	-5982,86	-20,01	9138,06	-937191,30	-3134,93	58,34	1,00	298,15	5,97
PRETREAT.WATER	-38122500,00	-15857,81	-9,03	21322,14	-285682,90	-162,69	1183,56	1,00	298,15	21,45
PRETREAT.SULFURIC	-12578880,00	-8088,93	-3,40	1555,07	-793358,00	-333,01	15,86	1,00	298,15	0,85
PRETREAT.PRET001	-392794200,00	-12895,32	-12,33	30460,20	-316286,30	-302,30	1241,89	1,00	298,15	27,43
PRETREAT.PRET002	-405373100,00	-12661,86	-11,87	32015,28	-322300,30	-302,13	1257,75	1,00	298,15	28,66
PRETREAT.PRET003	-350426700,00	-10945,61	-7,23	32015,28	-278614,00	-183,99	1257,75	1,00	383,15	36017,81
PRETREAT.PRET004	-349445200,00	-10914,96	-6,18	32015,25	-281885,40	-159,62	1239,67	1,00	383,15	34220,63
PRETREAT.PRET005	-401569000,00	-12543,05	-10,57	32015,25	-323931,80	-272,97	1239,67	1,00	303,15	28,07
PRETREAT.PRET006	-401560200,00	-12542,78	-10,57	32015,25	-323924,70	-272,95	1239,67	2,97	303,24	28,07
PRETREAT.PRET007	-358460100,00	-14130,24	-8,26	25368,30	-303195,80	-177,19	1182,27	1,10	303,24	23,62
PRETREAT.PRET008	-43100080,00	-6484,19	-19,39	6646,95	-750886,70	-2245,37	57,40	1,10	303,24	4,45
NEUTRAL.PRET007	-358460100,00	-14130,24	-8,26	25368,30	-303195,80	-177,19	1182,27	1,10	303,24	23,62
NEUTRAL.CA-OH2	-16934970,00	-13308,80	-3,97	1272,46	-986085,00	-294,07	17,17	1,00	298,15	0,55
NEUTRAL.NEU001	-375395100,00	-14091,00	-8,05	26640,77	-312973,60	-178,82	1199,45	1,00	303,15	24,16
NEUTRAL.NEU002	-373613100,00	-14024,11	-7,84	26640,77	-311487,90	-174,17	1199,45	1,00	323,15	24,65
NEUTRAL.NEU003	-377404500,00	-14166,43	-7,94	26640,77	-318798,50	-178,60	1183,83	1,00	323,15	23,40
NEUTRAL.NEU004	-377396000,00	-14166,11	-7,94	26640,77	-318791,40	-178,58	1183,83	2,97	323,24	23,41
NEUTRAL.NEU005	-343090800,00	-14540,76	-8,19	23595,11	-295271,70	-166,37	1161,95	1,18	323,24	22,64
NEUTRAL.NEU006	-34305220,00	-11263,66	-5,94	3045,65	-1567574,00	-826,87	21,88	1,18	323,24	0,77
ENZ-HYDR.PRET008	-43100080,00	-6484,19	-19,39	6646,95	-750886,70	-2245,37	57,40	1,10	303,24	4,45
ENZ-HYDR.ENZYME	-285958,60	-3281,29	-11,01	87,15	-74944,00	-251,36	3,82	1,00	298,15	0,06
ENZ-HYDR.WATER	-396301700,00	-15857,81	-9,03	24990,95	-285682,90	-162,69	1387,21	1,00	298,15	25,14
ENZ-HYDR.HE001	-43386030,00	-6442,74	-19,27	6734,10	-708753,80	-219,33	61,21	1,00	303,16	4,51
ENZ-HYDR.HE002	-439687700,00	-13859,32	-11,20	31725,05	-303563,10	-245,37	1448,42	1,00	298,57	29,67
ENZ-HYDR.HE003	-437261200,00	-13782,84	-10,96	31725,05	-301887,80	-240,00	1448,42	1,00	321,15	30,24
ENZ-HYDR.HE004	-437098700,00	-13777,73	-9,14	31725,02	-306900,40	-203,56	1424,24	1,00	321,15	29,14
ENZ-HYDR.HE005	-437088900,00	-13777,42	-9,14	31725,02	-306893,40	-203,54	1424,24	2,97	321,24	29,15
ENZ-HYDR.HE006	-418133200,00	-14396,84	-8,32	29043,40	-301176,20	-174,06	1388,33	1,10	321,24	27,28
ENZ-HYDR.HE007	-18955700,00	-7068,76	-17,99	2681,62	-527977,90	-1343,47	35,90	1,10	321,24	1,86
ENZ-HYDR.HE008	-19032200,00	-7097,29	-18,08	2681,62	-530108,90	-1350,31	35,90	1,00	303,15	1,86
FERMENT.NEU005	-343090800,00	-14540,76	-8,19	23595,11	-295271,70	-166,37	1161,95	1,18	323,24	22,64
FERMENT.HE006	-418133200,00	-14396,84	-8,32	29043,40	-301176,20	-174,06	1388,33	1,10	321,24	27,28
FERMENT.AM MONIA	-43504,16	-2695,04	-5,81	16,14	-45898,00	-98,94	0,95	1,00	298,15	23,19
FERMENT.FERM001	-761224000,00	-14461,35	-8,26	52638,52	-298486,00	-170,53	2550,28	1,10	322,13	49,93
FERMENT.FERM002	-761267500,00	-14457,74	-8,26	52654,66	-298392,20	-170,48	2551,23	1,00	322,32	49,96
FERMENT.FERM003	-764584700,00	-14520,74	-8,46	52654,66	-299692,40	-174,62	2551,23	1,00	305,15	49,09
FERMENT.FERM004	-39871510,00	-10430,38	-2,01	3822,63	-342307,40	-66,11	116,48	1,00	305,15	1701,39
FERMENT.FERM005	-727712000,00	-14902,35	-8,71	48832,03	-286734,40	-167,57	2537,93	1,00	305,15	49,43
FERMENT.FERM006	-727696300,00	-14902,03	-8,71	48832,03	-286728,30	-167,55	2537,93	2,97	305,24	49,43
FERMENT.FERM007	-720063700,00	-14954,53	-8,68	48150,21	-286303,90	-166,21	2515,03	1,11	305,24	48,93
FERMENT.FERM008	-7632595,00	-11194,48	-10,57	681,82	-333343,30	-314,89	22,90	1,11	305,24	0,50
DISTILL.FERM007	-720063700,00	-14954,53	-8,68	48150,21	-286303,90	-166,21	2515,03	1,11	305,24	48,93
DISTILL.DIST001	-720040900,00	-14954,06	-8,68	48150,21	-286294,80	-166,18	2515,03	4,00	305,36	48,93
DISTILL.DIST002	-641567800,00	-15131,24	-7,74	42400,20	-279818,30	-143,07	2292,80	1,93	392,70	46,69
DISTILL.DIST003	-52465900,00	-9124,50	-3,26	5750,01	-236086,60	-84,29	222,23	1,93	383,66	3624,97
DISTILL.DIST004	-658200400,00	-15523,52	-8,86	42400,20	-287072,60	-163,87	2292,80	1,00	298,15	42,13
DISTILL.DIST005	-58803210,00	-9255,74	-3,70	6353,15	-240340,00	-96,02	244,67	1,93	382,52	3561,30
DISTILL.DIST006	-19893170,00	-5700,05	-4,37	3490,00	-231995,30	-177,89	85,75	1,70	365,47	1512,65
DISTILL.DIST007	-44305400,00	-15474,32	-7,93	2863,16	-278793,10	-142,80	158,92	1,70	388,74	3,18
DISTILL.DIST008	-45400280,00	-15856,72	-9,03	2863,16	-285682,60	-162,69	158,92	1,00	298,15	2,88
DISTILL.DIST009	-19751770,00	-5659,53	-4,26	3490,00	-230346,20	-173,52	85,75	1,70	389,15	1610,66
DISTILL.DIST010	-6337213,00	-10507,07	-8,03	603,14	-282476,30	-215,95	22,43	1,70	308,15	0,69
DISTILL.DIST011	-6337158,00	-10506,98	-8,03	603,14	-282473,80	-215,94	22,43	1,93	308,18	0,69
DISTILL.DIST012	-17129470,00	-5946,73	-7,11	2880,49	-271548,90	-324,76	63,08	1,53	343,15	3,87
DISTILL.DIST013	-66750,29	-10469,86	-7,78	6,38	-286409,00	-212,81	0,23	1,00	298,15	0,05

Fuente: AUTORES

**Tabla H.2. Propiedades termodinámicas de las corrientes de la RUTA 2.**

STREAM NAME	THERMODYNAMICS PROPERTIES AT CURRENT STATE									
	Enthalpy Flow KJ/HR	Mass Enthalpy KJ/KG	Mass Entropy KJ/KG-K	Mass Flow KG/HR	Molar Enthalpy KJ/KMOL	Molar Entropy KJ/KMOL-K	Mole Flow KMOL/HR	Pressure ATM	Temperature K	Volume Flow CUM/HR
Substream: ALL										
PRETREAT.FEED	-54671710,00	-5982,86	-20,01	9138,06	-937191,30	-3134,93	58,34	1,00	298,15	5,97
PRETREAT.WATER	-338122500,00	-15857,81	-9,03	21322,14	-285682,90	-162,69	1183,56	1,00	298,15	21,45
PRETREAT.SULFURIC	-12578880,00	-8088,93	-3,40	1555,07	-793358,00	-333,01	15,86	1,00	298,15	0,85
PRETREAT.PRET001	-392794200,00	-12895,32	-12,33	30460,20	-316286,30	-302,30	1241,89	1,00	298,15	27,43
PRETREAT.PRET002	-405373100,00	-12661,86	-11,87	32015,28	-322300,30	-302,13	1257,75	1,00	298,15	28,66
PRETREAT.PRET003	-350426700,00	-10945,61	-7,23	32015,28	-278614,00	-183,99	1257,75	1,00	383,15	36017,81
PRETREAT.PRET004	-349445200,00	-10914,96	-6,18	32015,25	-281885,40	-159,62	1239,67	1,00	383,15	34220,63
PRETREAT.PRET005	-401569000,00	-12543,05	-10,57	32015,25	-323931,80	-272,97	1239,67	1,00	303,15	28,07
PRETREAT.PRET006	-401560200,00	-12542,78	-10,57	32015,25	-323924,70	-272,95	1239,67	2,97	303,24	28,07
PRETREAT.PRET007	-358460100,00	-14130,24	-8,26	25368,30	-303195,80	-177,19	1182,27	1,10	303,24	23,62
PRETREAT.PRET008	-431000800,00	-6484,19	-19,39	6646,95	-750886,70	-2245,37	57,40	1,10	303,24	4,45
NEUTRAL.PRET007	-358460100,00	-14130,24	-8,26	25368,30	-303195,80	-177,19	1182,27	1,10	303,24	23,62
NEUTRAL.CA-OH2	-16934970,00	-13308,80	-3,97	1272,46	-986085,00	-294,07	17,17	1,00	298,15	0,55
NEUTRAL.NEU001	-375395100,00	-14091,00	-8,05	26640,77	-312973,60	-178,82	1199,45	1,00	303,15	24,16
NEUTRAL.NEU002	-373613100,00	-14024,11	-7,84	26640,77	-311487,90	-174,17	1199,45	1,00	323,15	24,65
NEUTRAL.NEU003	-377404500,00	-14166,43	-7,94	26640,77	-318798,50	-178,60	1183,83	1,00	323,15	23,40
NEUTRAL.NEU004	-377396000,00	-14166,11	-7,94	26640,77	-318791,40	-178,58	1183,83	2,97	323,24	23,41
NEUTRAL.NEU005	-343090800,00	-14540,76	-8,19	23595,11	-295271,70	-166,37	1161,95	1,18	323,24	22,64
NEUTRAL.NEU006	-343052200,00	-11263,66	-5,94	3045,65	-1567574,00	-826,87	21,88	1,18	323,24	0,77
ENZ-HYDR.PRET008	-431000800,00	-6484,19	-19,39	6646,95	-750886,70	-2245,37	57,40	1,10	303,24	4,45
ENZ-HYDR.ENZYME	-285958,60	-3281,29	-11,01	87,15	-74944,00	-251,36	3,82	1,00	298,15	0,06
ENZ-HYDR.WATER	-396301700,00	-15857,81	-9,03	24990,95	-285682,90	-162,69	1387,21	1,00	298,15	25,14
ENZ-HYDR.HE001	-433860300,00	-6442,74	-19,27	6734,10	-708753,80	-219,33	61,21	1,00	303,16	4,51
ENZ-HYDR.HE002	-439687700,00	-13859,32	-11,20	31725,05	-30563,10	-245,37	1448,42	1,00	298,57	29,67
ENZ-HYDR.HE003	-437261200,00	-13782,84	-10,96	31725,05	-301887,80	-240,00	1448,42	1,00	321,15	30,24
ENZ-HYDR.HE004	-437098700,00	-13777,73	-9,14	31725,02	-306900,40	-203,56	1424,24	1,00	321,15	29,14
ENZ-HYDR.HE005	-437088900,00	-13777,42	-9,14	31725,02	-306893,40	-203,54	1424,24	2,97	321,24	29,15
ENZ-HYDR.HE006	-418133200,00	-14396,84	-8,32	29043,40	-301176,20	-174,06	1388,33	1,10	321,24	27,28
ENZ-HYDR.HE007	-18955700,00	-7068,76	-17,99	2681,62	-527977,90	-1343,47	35,90	1,10	321,24	1,86
ENZ-HYDR.HE008	-19032200,00	-7097,29	-18,08	2681,62	-530108,90	-1350,31	35,90	1,00	303,15	1,86
FERMENT.NEU005	-343090800,00	-14540,76	-8,19	23595,11	-295271,70	-166,37	1161,95	1,18	323,24	22,64
FERMENT.HE006	-418133200,00	-14396,84	-8,32	29043,40	-301176,20	-174,06	1388,33	1,10	321,24	27,28
FERMENT.AM MONIA	-42223,52	-2695,04	-5,81	15,67	-45898,00	-98,94	0,92	1,00	298,15	22,51
FERMENT.FERM001	-761224000,00	-14461,35	-8,26	52638,52	-298486,00	-170,53	2550,28	1,10	322,13	49,93
FERMENT.FERM002	-761266200,00	-14457,85	-8,26	52654,18	-298394,90	-170,48	2551,20	1,00	322,31	49,96
FERMENT.FERM003	-764581900,00	-14520,82	-8,46	52654,18	-299694,60	-174,62	2551,20	1,00	305,15	49,09
FERMENT.FERM004	-42834400,00	-10294,98	-1,84	4160,71	-344725,90	-61,50	124,26	1,00	305,15	1905,11
FERMENT.FERM005	-727761200,00	-15007,40	-8,80	48493,48	-286386,10	-168,00	2541,19	1,00	305,15	49,52
FERMENT.FERM006	-727745500,00	-15007,08	-8,80	48493,48	-286379,90	-167,98	2541,19	2,97	305,24	49,53
FERMENT.FERM007	-719886000,00	-15062,12	-8,77	47794,47	-285931,70	-166,42	2517,68	1,11	305,24	49,01
FERMENT.FERM008	-7859504,00	-11243,80	-11,26	699,01	-334389,00	-335,01	23,50	1,11	305,24	0,52
DISTILL.FERM007	-719886000,00	-15062,12	-8,77	47794,47	-285931,70	-166,42	2517,68	1,11	305,24	49,01
DISTILL.DIST001	-719863200,00	-15061,64	-8,76	47794,47	-285922,60	-166,39	2517,68	4,00	305,36	49,02
DISTILL.DIST002	-633872200,00	-15331,49	-7,83	41344,47	-279447,00	-142,75	2268,31	1,93	392,66	45,89
DISTILL.DIST003	-588749200,00	-9127,89	-3,26	6450,01	-236089,30	-84,23	249,38	1,93	383,67	4067,86
DISTILL.DIST004	-650315600,00	-15729,20	-8,97	41344,47	-286696,10	-163,55	2268,31	1,00	298,15	41,42
DISTILL.DIST005	-659537800,00	-9257,31	-3,70	7124,50	-240324,10	-95,94	274,44	1,93	382,53	3996,69
DISTILL.DIST006	-222748300,00	-5696,89	-4,37	3910,00	-231988,30	-178,03	96,02	1,70	365,47	1693,79
DISTILL.DIST007	-497421900,00	-15474,31	-7,93	3214,50	-278793,10	-142,80	178,42	1,70	388,74	3,57
DISTILL.DIST008	-509714300,00	-15856,71	-9,03	3214,50	-285682,60	-162,69	178,42	1,00	298,15	3,23
DISTILL.DIST009	-22116400,00	-5656,37	-4,26	3910,00	-230338,30	-173,66	96,02	1,70	389,15	1803,55
DISTILL.DIST010	-70786800,00	-10495,02	-8,03	674,48	-282466,50	-216,14	25,06	1,70	308,15	0,78
DISTILL.DIST011	-707861800,00	-10494,93	-8,03	674,48	-282464,10	-216,13	25,06	1,93	308,18	0,78
DISTILL.DIST012	-191974900,00	-5946,46	-7,11	3228,39	-271548,10	-324,78	70,70	1,53	343,15	4,33
DISTILL.DIST013	-74558,19	-10457,91	-7,78	7,13	-286385,00	-212,98	0,26	1,00	298,15	0,06

Fuente: AUTORES

**Tabla H.3. Propiedades termodinámicas de las corrientes de la RUTA 3.**

STREAM NAME	THERMODYNAMICS PROPERTIES AT CURRENT STATE									
	Enthalpy Flow	Mass Enthalpy	Mass Entropy	Mass Flow	Molar Enthalpy	Molar Entropy	Mole Flow	Pressure	Temperature	Volume Flow
Substream: ALL	KJ/HR	KJ/KG	KJ/KG-K	KG/HR	KJ/KMOL	KJ/KMOL-K	KMOL/HR	ATM	K	CUM/HR
PRETREAT.FEED	-54671710,00	-5982,86	-20,01	9138,06	-937191,30	-3134,93	58,34	1,00	298,15	5,97
PRETREAT.WATER	-338122500,00	-15857,81	-9,03	21322,14	-285682,90	-162,69	1183,56	1,00	298,15	21,45
PRETREAT.SULFURIC	-12578880,00	-8088,93	-3,40	1555,07	-793358,00	-333,01	15,86	1,00	298,15	0,85
PRETREAT.PRET001	-392794200,00	-12895,32	-12,33	30460,20	-316286,30	-302,30	1241,89	1,00	298,15	27,43
PRETREAT.PRET002	-405373100,00	-12661,86	-11,87	32015,28	-322300,30	-302,13	1257,75	1,00	298,15	28,66
PRETREAT.PRET003	-350426700,00	-10945,61	-7,23	32015,28	-278614,00	-183,99	1257,75	1,00	383,15	36017,81
PRETREAT.PRET004	-349445200,00	-10914,96	-6,18	32015,25	-281885,40	-159,62	1239,67	1,00	383,15	34220,63
PRETREAT.PRET005	-401569000,00	-12543,05	-10,57	32015,25	-323931,80	-272,97	1239,67	1,00	303,15	28,07
PRETREAT.PRET006	-401560200,00	-12542,78	-10,57	32015,25	-323924,70	-272,95	1239,67	2,97	303,24	28,07
PRETREAT.PRET007	-358460100,00	-14130,24	-8,26	25368,30	-303195,80	-177,19	1182,27	1,10	303,24	23,62
PRETREAT.PRET008	-43100080,00	-6484,19	-19,39	6646,95	-750886,70	-2245,37	57,40	1,10	303,24	4,45
NEUTRAL.PRET007	-358460100,00	-14130,24	-8,26	25368,30	-303195,80	-177,19	1182,27	1,10	303,24	23,62
NEUTRAL.CA-OH2	-16934970,00	-13308,80	-3,97	1272,46	-986085,00	-294,07	17,17	1,00	298,15	0,55
NEUTRAL.NEU001	-375395100,00	-14091,00	-8,05	26640,77	-312973,60	-178,82	1199,45	1,00	303,15	24,16
NEUTRAL.NEU002	-373613100,00	-14024,11	-7,84	26640,77	-311487,90	-174,17	1199,45	1,00	323,15	24,65
NEUTRAL.NEU003	-377404500,00	-14166,43	-7,94	26640,77	-318798,50	-178,60	1183,83	1,00	323,15	23,40
NEUTRAL.NEU004	-377396000,00	-14166,11	-7,94	26640,77	-318791,40	-178,58	1183,83	2,97	323,24	23,41
NEUTRAL.NEU005	-343090800,00	-14540,76	-8,19	23595,11	-295271,70	-166,37	1161,95	1,18	323,24	22,64
NEUTRAL.NEU006	-34305220,00	-11263,66	-5,94	3045,65	-1567574,00	-826,87	21,88	1,18	323,24	0,77
FERMENT.NEU005	-343090800,00	-14540,76	-8,19	23595,11	-295271,70	-166,37	1161,95	1,18	323,24	22,64
FERMENT.PRET008	-43100080,00	-6484,19	-19,39	6646,95	-750886,70	-2245,37	57,40	1,10	303,24	4,45
FERMENT.AM MONIA	-42627,15	-2695,04	-5,81	15,82	-45898,00	-98,94	0,93	1,00	298,15	22,72
FERMENT.ENZYME	-286698,60	-3281,29	-11,01	87,37	-74944,00	-251,36	3,83	1,00	298,15	0,06
FERMENT.WATER	-262990400,00	-15857,81	-9,03	16584,28	-285682,90	-162,69	920,57	1,00	298,15	16,69
FERMENT.FERM001	-386190900,00	-12769,99	-10,65	30242,06	-316719,00	-264,19	1219,35	1,10	321,37	27,06
FERMENT.FERM002	-386477600,00	-12742,66	-10,65	30329,44	-315962,90	-264,06	1223,17	1,00	321,34	27,12
FERMENT.FERM003	-649468000,00	-13843,88	-10,07	46913,72	-302960,00	-220,45	2143,74	1,00	311,97	43,82
FERMENT.FERM004	-649118500,00	-13836,43	-10,05	46913,72	-302797,00	-219,93	2143,74	1,00	314,15	43,91
FERMENT.FERM005	-40385090,00	-10017,65	-1,40	4031,39	-348119,60	-48,63	116,01	1,00	314,15	2058,51
FERMENT.FERM006	-614718600,00	-14329,73	-9,25	42898,12	-289826,40	-187,00	2120,99	1,00	314,15	43,50
FERMENT.FERM007	-614704900,00	-14329,41	-9,24	42898,12	-289819,90	-186,98	2120,99	2,97	314,24	43,51
FERMENT.FERM008	-593893600,00	-14846,09	-8,65	40003,36	-285523,90	-166,33	2080,01	1,10	314,24	41,54
FERMENT.FERM009	-20811290,00	-7189,29	-17,48	2894,76	-507891,90	-1235,23	40,98	1,10	314,24	1,97
DISTILL.FERM008	-593893600,00	-14846,09	-8,65	40003,36	-285523,90	-166,33	2080,01	1,10	314,24	41,54
DISTILL.DIST001	-593873600,00	-14845,59	-8,65	40003,36	-285514,30	-166,29	2080,01	4,00	314,37	41,55
DISTILL.DIST002	-510265800,00	-15275,88	-7,85	33403,36	-279796,80	-143,86	1823,70	1,93	392,71	37,07
DISTILL.DIST003	-605325300,00	-9171,59	-3,24	6600,00	-236167,10	-83,51	256,31	1,93	383,84	4182,84
DISTILL.DIST004	-523496800,00	-15671,98	-8,99	33403,36	-287051,90	-164,66	1823,70	1,00	298,15	33,46
DISTILL.DIST005	-676147400,00	-9291,13	-3,67	7277,34	-240290,00	-95,04	281,39	1,93	382,71	4111,19
DISTILL.DIST006	-22462470,00	-5686,71	-4,38	3949,99	-231965,90	-178,49	96,84	1,70	365,46	1708,19
DISTILL.DIST007	-51461550,00	-15466,22	-7,92	3327,35	-278844,50	-142,81	184,55	1,70	388,75	3,69
DISTILL.DIST008	-52733050,00	-15848,35	-9,02	3327,35	-285734,10	-162,69	184,55	1,00	298,15	3,35
DISTILL.DIST009	-22302390,00	-5646,19	-4,27	3949,99	-230312,70	-174,11	96,84	1,70	389,15	1818,91
DISTILL.DIST010	-7082252,00	-10455,95	-8,02	677,34	-282434,70	-216,75	25,08	1,70	308,15	0,78
DISTILL.DIST011	-7082190,00	-10455,86	-8,02	677,34	-282432,20	-216,75	25,08	1,93	308,18	0,78
DISTILL.DIST012	-19415240,00	-5945,58	-7,11	3265,49	-271545,80	-324,82	71,50	1,53	343,15	4,38
DISTILL.DIST013	-74617,03	-10420,27	-7,77	7,16	-286376,70	-213,54	0,26	1,00	298,15	0,06
DISTILL.ET-OH	-19848350,00	-6078,22	-7,52	3265,49	-277603,30	-343,43	71,50	1,00	298,15	4,08
DISTILL.D-SIEVE.DIST009	-22302390,00	-5646,19	-4,27	3949,99	-230312,70	-174,11	96,84	1,70	389,15	1818,91
DISTILL.D-SIEVE.DIST010	-7082252,00	-10455,95	-8,02	677,34	-282434,70	-216,75	25,08	1,70	308,15	0,78
DISTILL.D-SIEVE.DIST012	-19415240,00	-5945,58	-7,11	3265,49	-271545,80	-324,82	71,50	1,53	343,15	4,38
DISTILL.D-SIEVE.DIST013	-74617,03	-10420,27	-7,77	7,16	-286376,70	-213,54	0,26	1,00	298,15	0,06
DISTILL.D-SIEVE.SIEVE001	-11151190,00	-5646,19	-4,27	1975,00	-230312,70	-174,11	48,42	1,70	389,15	909,46
DISTILL.D-SIEVE.SIEVE002	-11151190,00	-5646,19	-4,27	1975,00	-230312,70	-174,11	48,42	1,70	389,15	909,46
DISTILL.D-SIEVE.SIEVE003	-2982675,00	-8714,87	-3,30	342,25	-235447,10	-89,16	12,67	1,70	389,15	237,95

Fuente: AUTORES

# ANEXO I. FLUJOS MOLARES POR COMPONENTE PARA LAS TRES RUTAS

## Tabla I.1. Flujos molares por componente para la RUTA 1.

STREAM NAME	COMPONENT MOLE FLOW																				
	AMMONIA	CASOH2	CASO4-01	CELLULAS	CELLULOS	CO2	ETHANOL	FRUCTOSE	GALACTO	GLUCOSE	GLYCEROL	HEMICELL	LACTE	O2	SACCHARO	SUCCINIC	SULFURIC	WATER	XYLOSE	STARCH	
Substream: ALL	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	
PRETREAT FEED	0	0	0	30.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.68	0	0	0	0	0	17.52	
PRETREAT WATER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1183.56	0	0
PRETREAT SULFURIC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.86	0	0	0
PRETREAT PRET001	0	0	0	30.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.68	0	0	0	0	1183.56	0	17.52
PRETREAT PRET002	0	0	0	30.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.68	0	0	0	0	15.86	1183.56	17.52
PRETREAT PRET003	0	0	0	30.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.68	0	0	0	0	15.86	1183.56	17.52
PRETREAT PRET004	0	0	0	28.27	0	0	0	0.54	3.61	9.22	0	2.66	0	0	0	0	0	15.86	1166.31	3.04	10.16
PRETREAT PRET005	0	0	0	28.27	0	0	0	0.54	3.61	9.22	0	2.66	0	0	0	0	0	15.86	1166.31	3.04	10.16
PRETREAT PRET006	0	0	0	28.27	0	0	0	0.54	3.61	9.22	0	2.66	0	0	0	0	0	15.86	1166.31	3.04	10.16
PRETREAT PRET007	0	0	0	1.29	0	0	0	0.53	3.56	9.08	0	0.13	0	0	0	0	0	15.61	1148.47	3	0.5
PRETREAT PRET008	0	0	0	26.87	0	0	0	0.01	0.06	0.14	0	2.53	0	0	0	0	0	0.24	17.84	0.05	9.66
NEUTRAL PRET007	0	0	0	1.89	0	0	0	0.53	3.56	9.08	0	0.13	0	0	0	0	0	15.61	1148.47	3	0.5
NEUTRAL CA-OH2	0	17.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NEUTRAL NI.U001	0	17.17	0	0	1.89	0	0	0.53	3.56	9.08	0	0.13	0	0	0	0	0	15.61	1148.47	3	0.5
NEUTRAL NI.U002	0	17.17	0	0	1.89	0	0	0.53	3.56	9.08	0	0.13	0	0	0	0	0	15.61	1148.47	3	0.5
NEUTRAL NI.U003	0	1.54	15.61	0	1.39	0	0	0.53	3.56	9.08	0	0.13	0	0	0	0	0	15.61	1148.47	3	0.5
NEUTRAL NI.U004	0	1.54	15.61	0	1.39	0	0	0.53	3.56	9.08	0	0.13	0	0	0	0	0	15.61	1148.47	3	0.5
NEUTRAL NI.U005	0	0.08	0.78	0	0.07	0	0	0.53	3.56	9.05	0	0.01	0	0	0	0	0	1144.88	2.99	0.03	0.48
NEUTRAL NI.U006	0	1.48	14.83	0	1.32	0	0	0	0.01	0.03	0	0.12	0	0	0	0	0	0	2.55	0.01	0.48
ENZ-HYDR PRET008	0	0	0	0	26.87	0	0	0	0.01	0.06	0.14	0	2.53	0	0	0	0	0.24	17.84	0.05	9.66
ENZ-HYDR ENZYME	0	0	0	3.82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ENZ-HYDR WATER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1387.23	0	0
ENZ-HYDR HE001	0	0	0	3.82	26.87	0	0	0	0.01	0.04	0.14	0	2.53	0	0	0	0	0.24	17.84	0.05	9.66
ENZ-HYDR HE002	0	0	0	3.82	26.87	0	0	0	0.01	0.04	0.14	0	2.53	0	0	0	0	0.24	1405.05	0.05	9.66
ENZ-HYDR HE003	0	0	0	3.82	26.87	0	0	0	0.01	0.06	0.14	0	2.53	0	0	0	0	0.24	1405.05	0.05	9.66
ENZ-HYDR HE004	0	0	0	3.82	2.69	0	0	0	0.01	0.06	24.33	0	2.53	0	0	0	0	0.24	1380.87	0.05	9.66
ENZ-HYDR HE005	0	0	0	3.82	2.69	0	0	0	0.01	0.06	24.33	0	2.53	0	0	0	0	0.24	1380.87	0.05	9.66
ENZ-HYDR HE006	0	0	0	0.18	0.13	0	0	0.01	0.05	24.03	0	0.13	0	0	0	0	0	0.24	1362.05	0.05	0.48
ENZ-HYDR HE007	0	0	0	3.63	2.55	0	0	0	0	0.11	0	2.4	0	0	0	0	0	0	17.82	0	9.19
ENZ-HYDR HE008	0	0	0	3.63	2.55	0	0	0	0	0.11	0	2.4	0	0	0	0	0	0	17.82	0	9.19
FERMENT NI.U005	0	0.08	0.78	0	0.07	0	0	0.53	3.55	9.05	0	0.01	0	0	0	0	0	1144.88	2.99	0.03	0.48
FERMENT HE.U006	0	0	0	0.19	0.13	0	0	0	0.01	0.03	24.01	0	0.12	0	0	0	0	0.24	1363.05	0.05	0.48
FERMENT AMMONIA	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FERMENT FER.M001	0	0.08	0.78	0.19	0.2	0	0	0.54	3.6	33.07	0	0.13	0	0	0	0	0	0.24	2507.92	3.03	0.5
FERMENT FER.M002	0.95	0.08	0.78	0.19	0.2	0	0	0.54	3.6	33.07	0	0.13	0	0	0	0	0	0.24	2507.92	3.03	0.5
FERMENT FER.M003	0.95	0.08	0.78	0.19	0.2	0	0	0.54	3.6	33.07	0	0.13	0	0	0	0	0	0.24	2507.92	3.03	0.5
FERMENT FER.M004	0	0	0	0	0	0	0	64.43	1.9	0	0	0	0	0	0	0.02	0.52	0	0	0.05	0
FERMENT FER.M005	0	0.08	0.78	0.19	0.2	0.01	63.53	0.01	1.99	0.64	0.27	0.13	2.21	0	4.12	0.41	0.24	2459.62	3	0.5	0
FERMENT FER.M006	0	0.08	0.78	0.19	0.2	0.01	63.53	0.01	1.99	0.64	0.27	0.13	2.21	0	4.12	0.41	0.24	2459.62	3	0.5	0
FERMENT FER.M007	0	0	0.04	0.01	0.01	0.01	63.11	0.01	1.98	0.64	0.27	0.01	2.19	0	0.2	0.41	0.24	2442.92	2.98	0.02	0
FERMENT FER.M008	0	0.07	0.74	0.18	0.19	0	0.43	0	0	0	0	0.12	0.03	0	3.52	0	0	0	16.7	0.02	0.48
DISTILL FER.M007	0	0	0.04	0.01	0.01	0.01	63.11	0.01	1.98	0.64	0.27	0.01	2.19	0	0.2	0.41	0.24	2442.92	2.98	0.02	0
DISTILL DIST001	0	0	0.04	0.01	0.01	0.01	63.11	0.01	1.98	0.64	0.27	0.01	2.19	0	0.2	0.41	0.24	2442.92	2.98	0.02	0
DISTILL DIST002	0	0	0.04	0.01	0.01	0	0.85	0.01	1.98	0.64	0.27	0.01	2.19	0	0.2	0.41	0.24	2282.94	2.98	0.02	0
DISTILL DIST003	0	0	0	0	0	0.01	62.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	159.88	0	0
DISTILL DIST004	0	0	0.04	0.01	0.01	0	0.85	0.01	1.98	0.64	0.27	0.01	2.19	0	0.2	0.41	0.24	2282.94	2.98	0.02	0
DISTILL DIST005	0	0	0	0	0	0	69.34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	175.32	0	0
DISTILL DIST006	0	0	0	0	0	0.01	69.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.41	0	0
DISTILL DIST007	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	158.91	0	0
DISTILL DIST008	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	158.91	0	0
DISTILL DIST009	0	0	0	0	0	0.01	69.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.41	0	0
DISTILL DIST010	0	0	0	0	0	0	7.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.34	0	0
DISTILL DIST011	0	0	0	0	0	0	7.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.34	0	0
DISTILL DIST012	0	0	0	0	0	0	62.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.91	0	0
DISTILL DIST013	0	0	0	0	0	0.01	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0
DISTILL ET-OH	0	0	0	0	0	0	63.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.91	0	0
DISTILL D-SIEVE DIST009	0	0	0	0	0	0.01	69.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.41	0	0
DISTILL D-SIEVE DIST010	0	0	0	0	0	0	7.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.34	0	0
DISTILL D-SIEVE DIST012	0	0	0	0	0	0	62.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.91	0	0
DISTILL D-SIEVE DIST013	0	0	0	0	0	0.01	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE001	0	0	0	0	0	0	34.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.2	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE002	0	0	0	0	0	0	34.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.2	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE003	0	0	0	0	0	0	3.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.75	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE004	0	0	0	0	0	0	3.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.75	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE005	0	0	0	0	0	0	31.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE006	0	0	0	0	0	0	31.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE007	0	0	0	0	0	0.01	7.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.5	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE008	0	0	0	0	0	0.01	7.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.5	0	0
DISTILL D-SIEVE SIEVE009	0	0	0	0	0	0.01	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0

Fuente: AUTORES



Tabla I.3. Flujos molares por componente para la RUTA 3.

STREAM NAME	COMPONENT MOLE FLOW																						
	ACETIC	AMMONIA	CASOH2	CASOH1	CELLULOSE	CELLULOSE	CO2	ETHANOL	FRUCTOSE	GALACTO	GLUCOSE	GLYCEROL	HIMCCELL	LACTE	D2	SUCROSE	SULFURIC	WATER	XYLITOL	XYLOSE	ZMO	STARCH	
Substream: ALL	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR	KMOL/HR
PRETREAT FEED	0	0	0	0	0	30.13	0	0	0	0	0	10.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.53
PRETREAT WATER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1183.56	0	0	0	0	0
PRETREAT SULFURIC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15.86	0	0	0	0	0
PRETREAT PRET01	0	0	0	0	0	30.13	0	0	0	0	0	10.68	0	0	0	0	0	1183.56	0	0	0	0	17.53
PRETREAT PRET02	0	0	0	0	0	30.13	0	0	0	0	0	10.68	0	0	0	0	0	15.86	1183.56	0	0	0	17.53
PRETREAT PRET03	0	0	0	0	0	30.13	0	0	0	0	0	10.68	0	0	0	0	0	15.86	1183.56	0	0	0	17.53
PRETREAT PRET04	0	0	0	0	0	28.27	0	0	0.14	3.61	9.22	2.46	0	0	0	0	0	15.86	1166.31	0	3.04	0	10.16
PRETREAT PRET05	0	0	0	0	0	28.27	0	0	0.14	3.61	9.22	2.46	0	0	0	0	0	15.86	1166.31	0	3.04	0	10.16
PRETREAT PRET06	0	0	0	0	0	28.27	0	0	0.14	3.61	9.22	2.46	0	0	0	0	0	15.86	1166.31	0	3.04	0	10.16
PRETREAT PRET07	0	0	0	0	0	1.39	0	0	0.53	3.54	9.09	0	0.13	0	0	0	0	15.61	1148.47	0	3	0	0.5
PRETREAT PRET08	0	0	0	0	0	28.87	0	0	0.01	0.00	0.14	0	2.51	0	0	0	0	0.24	17.84	0	0.05	0	9.66
NEUTRAL PRET07	0	0	0	0	0	1.39	0	0	0.53	3.54	9.09	0	0.13	0	0	0	0	15.61	1148.47	0	3	0	0.5
NEUTRAL CA OH2	0	0	17.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NEUTRAL NEU01	0	0	17.17	0	0	1.39	0	0	0.53	3.54	9.09	0	0.13	0	0	0	0	15.61	1148.47	0	3	0	0.5
NEUTRAL NEU02	0	0	17.17	0	0	1.39	0	0	0.53	3.54	9.09	0	0.13	0	0	0	0	15.61	1148.47	0	3	0	0.5
NEUTRAL NEU03	0	0	1.94	15.61	0	1.39	0	0	0.53	3.54	9.09	0	0.13	0	0	0	0	0	1148.47	0	3	0	0.5
NEUTRAL NEU04	0	0	1.94	15.61	0	1.39	0	0	0.53	3.54	9.09	0	0.13	0	0	0	0	0	1148.47	0	3	0	0.5
NEUTRAL NEU05	0	0	0.88	0.78	0	0.07	0	0	0.53	3.55	9.09	0	0.01	0	0	0	0	0	1144.88	0	2.99	0	0.05
NEUTRAL NEU06	0	0	1.48	14.83	0	1.32	0	0	0.53	3.55	9.09	0	0.13	0	0	0	0	0	1144.88	0	2.99	0	0.05
FERMENT NEURO5	0	0	0.08	0.78	0	0.03	0	0	0.53	3.55	9.09	0	0.01	0	0	0	0	0	1144.88	0	2.99	0	0.05
FERMENT PRET08	0	0	0	0	0	26.97	0	0	0.01	0.00	0.14	0	2.51	0	0	0	0	0.24	17.84	0	0.05	0	9.66
FERMENT AMMONIA	0	0.83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FERMENT ENGINE	0	0	0	0	0	3.83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FERMENT WATER	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FERMENT FERMO1	0	0	0.08	0.78	0	26.94	0	0	0.54	3.4	9.2	0	2.51	0	0	0	0	0.24	1162.72	0	3.03	0	9.66
FERMENT FERMO2	0	0	0.08	0.78	0	26.94	0	0	0.54	3.4	9.2	0	2.51	0	0	0	0	0.24	1162.72	0	3.03	0	9.66
FERMENT FERMO3	0	0	0.08	0.78	0	26.94	0	0	0.54	3.4	9.2	0	2.51	0	0	0	0	0.24	1162.72	0	3.03	0	9.66
FERMENT FERMO4	0	0	0.08	0.78	0	26.94	0	0	0.54	3.4	9.2	0	2.51	0	0	0	0	0.24	1162.72	0	3.03	0	9.66
FERMENT FERMO5	0.02	0	0	0	0	72.54	1.46	0	0	0	0	0	0.01	0.71	0	0	0	0	41.21	0	0	0	0
FERMENT FERMO6	1.73	0	0.08	0.78	0	2.69	0.01	71.62	0	0.18	0.1	0.1	2.51	2.54	0	0.49	0.24	2019.25	0.13	0.17	4.64	9.66	
FERMENT FERMO7	1.73	0	0.08	0.78	0	2.69	0.01	71.62	0	0.18	0.1	0.1	2.51	2.54	0	0.49	0.24	2019.25	0.13	0.17	4.64	9.66	
FERMENT FERMO8	1.71	0	0	0.04	0.19	0.13	0.01	71.01	0	0.18	0.1	0.1	2.51	2.54	0	0.48	0.24	2001.97	0.13	0.16	0.23	0.48	
FERMENT FERMO9	0.01	0	0.07	0.74	3.64	2.56	0	0.61	0	0	0	0	2.41	0.02	0	0	0	0	17.28	0	0	4.41	9.21
DISTILL FERMO8	1.71	0	0	0.04	0.19	0.13	0.01	71.01	0	0.18	0.1	0.1	2.51	2.54	0	0.48	0.24	2001.97	0.13	0.16	0.23	0.48	
DISTILL DIST01	1.71	0	0	0.04	0.19	0.13	0.01	71.01	0	0.18	0.1	0.1	2.51	2.54	0	0.48	0.24	2001.97	0.13	0.16	0.23	0.48	
DISTILL DIST02	1.66	0	0	0.04	0.19	0.13	0	0.43	0	0.18	0.1	0.1	2.51	2.54	0	0.48	0.24	1816.3	0.13	0.16	0.23	0.48	
DISTILL DIST03	0.05	0	0	0	0	0	0	0.01	78.58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	185.87	0	0	0	0
DISTILL DIST04	1.66	0	0	0.04	0.19	0.13	0	0.43	0	0.18	0.1	0.1	2.51	2.54	0	0.48	0.24	1816.3	0.13	0.16	0.23	0.48	
DISTILL DIST05	0.05	0	0	0	0	0	0	0.01	78.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	182.22	0	0	0	0
DISTILL DIST06	0.05	0	0	0	0	0	0	0.01	78.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	182.22	0	0	0	0
DISTILL DIST07	0.05	0	0	0	0	0	0	0.01	78.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	182.22	0	0	0	0
DISTILL DIST08	0.04	0	0	0	0	0	0	0.01	78.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	184.49	0	0	0	0
DISTILL DIST09	0.04	0	0	0	0	0	0	0.01	78.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	182.22	0	0	0	0
DISTILL DIST10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.03	0	0	0	0
DISTILL DIST11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.03	0	0	0	0
DISTILL DIST12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.01	0	0	0	0
DISTILL DIST13	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0	0	0	0
DISTILL E OH	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.01	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-DIST08	0	0	0	0	0	0	0	0.01	78.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18.22	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-DIST09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17.03	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-DIST12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.01	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-DIST13	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE01	0	0	0	0	0	0	0	0	39.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.11	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE02	0	0	0	0	0	0	0	0	39.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.11	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE03	0	0	0	0	0	0	0	0	39.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.11	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE04	0	0	0	0	0	0	0	0	39.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.11	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE05	0	0	0	0	0	0	0	0	39.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.11	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE06	0	0	0	0	0	0	0	0	39.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.11	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE07	0	0	0	0	0	0	0	0	39.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.11	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE08	0	0	0	0	0	0	0	0	39.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.11	0	0	0	0
DISTILL D-SEVE-SIEVE09	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	8.12	0	0	0	0	0	0	0	0	17.21	0	0	0	0

Fuente: AUTORES

## ANEXO J. FLUJOS DE EXERGÍA LAS CORRIENTES PARA LAS TRES RUTAS

**Tabla J.1. Flujos de exergía para la RUTA 1.**

STREAM NAME	EXERGY INFO				
	Physical Exergy		Total Physical Exergy	Total Chemical Exergy	Total Exergy Stream
Substream: ALL	KJ/KG	KJ/KMOL	KJ/HR	KJ/HR	MJ/HR
PRETREAT.FEED	0	0	0	192409604,7	192409,6047
PRETREAT.WATER	0	0	0	1065795,78	1065,79578
PRETREAT.SULFURIC	0	0	0	1721920,2	1721,9202
PRETREAT.PRET001	0	0	0	193475400,5	193475,4005
PRETREAT.PRET002	0	0	0	195197320,7	195197,3207
PRETREAT.PRET003	332,834	8462,859	10655773,7	195197320,7	205853,0944
PRETREAT.PRET004	319,024	8261,5915	10213633,12	183982146,1	194195,7792
PRETREAT.PRET005	-0,1875	10,494	-6002,859375	183982146,1	183976,1432
PRETREAT.PRET006	0,0825	11,631	2641,258125	183982146,1	183984,7873
PRETREAT.PRET007	2,2725	14,0015	57649,46175	51758562,84	51816,2123
PRETREAT.PRET008	0,677	9,1175	4499,98515	132234580,3	132239,0803
NEUTRAL.PRET007	2,2725	14,0015	57649,46175	51758562,84	51816,2123
NEUTRAL.CA-OH2	0	0	0	922029	922,029
NEUTRAL.NEU001	1,4625	11,683	38962,12613	52680591,84	52719,55396
NEUTRAL.NEU002	5,741	110,9855	152944,6606	52680591,84	52833,5365
NEUTRAL.NEU003	5,941	83,237	158272,8146	50281803,14	50440,07595
NEUTRAL.NEU004	6,261	84,374	166797,861	50281803,14	50448,601
NEUTRAL.NEU005	4,2965	84,015	101376,3901	43508506,74	43609,88313
NEUTRAL.NEU006	-0,205	164,5495	-624,35825	6807340,695	6806,716337
ENZ-HYDR.PRET008	0,677	9,1175	4499,98515	132234580,3	132239,0803
ENZ-HYDR.ENZYME	0	0	0	556383	556,383
ENZ-HYDR.WATER	0	0	0	1249182,605	1249,182605
ENZ-HYDR.HE001	0,597	8,9215	4020,2577	132790963,3	132794,9836
ENZ-HYDR.HE002	-1,5815	0,685	-50173,16658	134040145,9	133989,9728
ENZ-HYDR.HE003	3,3425	74,9195	106040,9796	134040145,9	134146,1869
ENZ-HYDR.HE004	2,271	59,856	72047,52042	119266762,4	119338,81
ENZ-HYDR.HE005	2,581	60,893	81882,27662	119266762,4	119348,6447
ENZ-HYDR.HE006	3,6495	61,045	105993,8883	71020197,43	71126,19131
ENZ-HYDR.HE007	3,3735	95,569	9046,44507	48162592,61	48171,63906
ENZ-HYDR.HE008	1,677	3,915	4497,07674	48162592,61	48167,08969
FERMENT.NEU005	4,2965	84,015	101376,3901	43508506,74	43609,88313
FERMENT.NEU006	3,6495	61,045	105993,8883	71020197,43	71126,19131
FERMENT.AMMONIA	0	0	0	321005	321,005
FERMENT.FERM001	3,638	71,8115	191498,9358	114504229,8	114695,7287
FERMENT.FERM002	4,688	72,441	246845,0461	114825234,8	115072,0798
FERMENT.FERM003	1,318	6,582	69398,84188	114825234,8	114894,6336
FERMENT.FERM004	-0,7135	13,5355	-2727,446505	2989410,56	2986,683113
FERMENT.FERM005	2,228	9,9525	108797,7628	112889573,3	112998,371
FERMENT.FERM006	2,548	10,0895	124424,0124	112889573,3	113013,9973
FERMENT.FERM007	-0,3035	9,9895	-14613,58874	99110173,82	99095,56023
FERMENT.FERM008	-0,519	10,445	-353,86458	13778862,45	13778,50859
DISTILL.FERM007	-0,3035	9,9895	-14613,58874	99110173,82	99095,56023
DISTILL.DIST001	0,1665	10,145	8017,009965	99110173,82	99118,19083
DISTILL.DIST002	58,352	1052,78	2474136,47	21092415,87	23566,55234
DISTILL.DIST003	363,8975	9393,4775	2092414,264	78017757,95	80110,17221
DISTILL.DIST004	0	0	0	21092415,87	21092,41587
DISTILL.DIST005	326,635	8430,687	2075161,15	86901019,82	88976,18097
DISTILL.DIST006	199,5185	8093,169	696319,565	86745411,57	87441,73113
DISTILL.DIST007	54,435	959,2965	155856,1146	155608,255	311,4643696
DISTILL.DIST008	0	0	0	155608,255	155,608255
DISTILL.DIST009	207,242	8439,3535	723274,58	86745411,57	87468,68615
DISTILL.DIST010	0,8735	22,676	526,84279	8883261,87	8883,788713
DISTILL.DIST011	0,9635	22,1945	581,12539	8883261,87	8883,842995
DISTILL.DIST012	10,3985	508,2285	29952,77527	77774246,06	77804,19883
DISTILL.DIST013	0	0	0	87894,635	87,894635

Fuente: AUTORES

Tabla J.2. Flujos de exergía para la RUTA 2.

STREAM NAME	EXERGY INFO				
	Physical Exergy		Total Physical Exergy	Total Chemical Exergy	Total Exergy Stream
Substream: ALL	KJ/KG	KJ/KMOL	KJ/HR	KJ/HR	MJ/HR
PRETREAT.FEED	0	0	0	192409604,7	192409,6047
PRETREAT.WATER	0	0	0	1065795,78	1065,79578
PRETREAT.SULFURIC	0	0	0	1721920,2	1721,9202
PRETREAT.PRETO01	0	0	0	193475400,5	193475,4005
PRETREAT.PRETO02	0	0	0	195197320,7	195197,3207
PRETREAT.PRETO03	332,834	8462,859	10655773,7	195197320,7	205853,0944
PRETREAT.PRETO04	319,024	8261,5915	10213633,12	183982146,1	194195,7792
PRETREAT.PRETO05	-0,1875	10,494	-6002,859375	183982146,1	183976,1432
PRETREAT.PRETO06	0,0825	11,631	2641,258125	183982146,1	183984,7873
PRETREAT.PRETO07	2,2725	14,0015	57649,46175	51758562,84	51816,2123
PRETREAT.PRETO08	0,677	9,1175	4499,98515	132234580,3	132239,0803
NEUTRAL.PRETO07	2,2725	14,0015	57649,46175	51758562,84	51816,2123
NEUTRAL.CA-OH2	0	0	0	922029	922,029
NEUTRAL.NEU001	1,4625	11,683	38962,12613	52680591,84	52719,55396
NEUTRAL.NEU002	5,741	110,9855	152944,6606	52680591,84	52833,5365
NEUTRAL.NEU003	5,941	83,237	158272,8146	50281803,14	50440,07595
NEUTRAL.NEU004	6,261	84,374	166797,861	50281803,14	50448,601
NEUTRAL.NEU005	4,2965	84,015	101376,3901	43508506,74	43609,88313
NEUTRAL.NEU006	-0,205	164,5495	-624,35825	6807340,695	6806,716337
ENZ-HYDR.PRETO08	0,677	9,1175	4499,98515	132234580,3	132239,0803
ENZ-HYDR.ENZYME	0	0	0	556383	556,383
ENZ-HYDR.WATER	0	0	0	1249182,605	1249,182605
ENZ-HYDR.HE001	0,597	8,9215	4020,2577	132790963,3	132794,9836
ENZ-HYDR.HE002	-1,5815	0,685	-50173,16658	134040145,9	133989,9728
ENZ-HYDR.HE003	3,3425	74,9195	106040,9796	134040145,9	134146,1869
ENZ-HYDR.HE004	2,271	59,856	72047,52042	119266762,4	119338,81
ENZ-HYDR.HE005	2,581	60,893	81882,27662	119266762,4	119348,6447
ENZ-HYDR.HE006	3,6495	61,045	105993,8883	71020197,43	71126,19131
ENZ-HYDR.HE007	3,3735	95,569	9046,44507	48162592,61	48171,63906
ENZ-HYDR.HE008	1,677	3,915	4497,07674	48162592,61	48167,08969
FERMENT.NEU005	4,2965	84,015	101376,3901	43508506,74	43609,88313
FERMENT.HE006	3,6495	61,045	105993,8883	71020197,43	71126,19131
FERMENT.AMMONIA	0	0	0	310868	310,868
FERMENT.FERM001	3,638	71,8115	191498,9358	114504229,8	114695,7287
FERMENT.FERM002	4,648	71,841	244736,6286	114815097,8	115059,8344
FERMENT.FERM003	1,308	6,482	68871,66744	114815097,8	114883,9694
FERMENT.FERM004	2,238	15,028	9311,66898	3265502,235	3274,813904
FERMENT.FERM005	-0,4635	11,2525	-22476,72798	103359388,1	103336,9114
FERMENT.FERM006	-0,1435	11,4895	-6958,81438	103359388,1	103352,4293
FERMENT.FERM007	2,978	11,3895	142331,9317	98638468,8	98780,80073
FERMENT.FERM008	-0,519	9,645	-362,78619	4703325,735	4702,962949
DISTILL.FERM007	2,978	11,3895	142331,9317	98638468,8	98780,80073
DISTILL.DIST001	0,4765	11,545	22774,06496	98638468,8	98661,24286
DISTILL.DIST002	57,819	1047,58	2390495,911	11208183,24	13598,67915
DISTILL.DIST003	364,5575	9390,596	2351399,521	87442795,36	89794,19488
DISTILL.DIST004	0	0	0	11208183,24	11208,18324
DISTILL.DIST005	327,715	8436,461	2334805,518	97403493,92	99738,29943
DISTILL.DIST006	198,9185	8093,669	777771,335	97230325,91	98008,09725
DISTILL.DIST007	54,435	959,2965	174981,3075	173168,005	348,1493125
DISTILL.DIST008	0	0	0	173168,005	173,168005
DISTILL.DIST009	206,642	8440,7535	807970,22	97230325,91	98038,29613
DISTILL.DIST010	0,8635	23,376	582,41348	9960698,555	9961,280968
DISTILL.DIST011	0,9535	22,7945	643,11668	9960698,555	9961,341672
DISTILL.DIST012	10,3985	511,41	33570,41342	87169204,91	87202,77532
DISTILL.DIST013	0	0	0	100422,445	100,422445

Fuente: AUTORES

Tabla J.3. Flujos de exergía para la RUTA 3.

STREAM NAME	EXERGY INFO				
	Physical Exergy		Total Physical Exergy	Total Chemical Exergy	Total Exergy Stream
Substream: ALL	KJ/KG	KJ/KMOL	KJ/HR	KJ/HR	MJ/HR
PRETREAT.FEED	0	0	0	192409604,7	192409,6047
PRETREAT.WATER	0	0	0	1065795,78	1065,79578
PRETREAT.SULFURIC	0	0	0	1721920,2	1721,9202
PRETREAT.PRET001	0	0	0	193475400,5	193475,4005
PRETREAT.PRET002	0	0	0	195197320,7	195197,3207
PRETREAT.PRET003	332,834	8462,859	10655773,7	195197320,7	205853,0944
PRETREAT.PRET004	319,024	8261,5915	10213633,12	183982146,1	194195,7792
PRETREAT.PRET005	-0,1875	10,494	-6002,859375	183982146,1	183976,1432
PRETREAT.PRET006	0,0825	11,631	2641,258125	183982146,1	183984,7873
PRETREAT.PRET007	2,2725	14,0015	57649,46175	51758562,84	51816,2123
PRETREAT.PRET008	0,677	9,1175	4499,98515	132234580,3	132239,0803
NEUTRAL.PRET007	2,2725	14,0015	57649,46175	51758562,84	51816,2123
NEUTRAL.CA-OH2	0	0	0	922029	922,029
NEUTRAL.NEU001	1,4625	11,683	38962,12613	52680591,84	52719,55396
NEUTRAL.NEU002	5,741	110,9855	152944,6606	52680591,84	52833,5365
NEUTRAL.NEU003	5,941	83,237	158272,8146	50281803,14	50440,07595
NEUTRAL.NEU004	6,261	84,374	166797,861	50281803,14	50448,601
NEUTRAL.NEU005	4,2965	84,015	101376,3901	43508506,74	43609,88313
NEUTRAL.NEU006	-0,205	164,5495	-624,35825	6807340,695	6806,716337
FERMENT.NEU005	4,2965	84,015	101376,3901	43508506,74	43609,88313
FERMENT.PRET008	0,677	9,1175	4499,98515	132234580,3	132239,0803
FERMENT.AMMONIA	0	0	0	314247	314,247
FERMENT.ENZYME	0	0	0	557839,5	557,8395
FERMENT.WATER	0	0	0	828973,285	828,973285
FERMENT.FERM001	3,7055	75,356	112061,9533	175696625,6	175808,6875
FERMENT.FERM002	3,4955	75,619	106016,5575	176254465,1	176360,4816
FERMENT.FERM003	-1,114	29,742	-52261,88408	177083438,3	177031,1765
FERMENT.FERM004	0,373	37,704	17498,81756	177083438,3	177100,9372
FERMENT.FERM005	2,277	71,6895	9179,47503	3316718,685	3325,89816
FERMENT.FERM006	4,513	40,6485	193599,2156	150992766,6	151186,3658
FERMENT.FERM007	95,2895	16308,79	4087740,406	150992766,6	155080,507
FERMENT.FERM008	1,33	42,3115	53204,4688	101319792,1	101372,9966
FERMENT.FERM009	0,688	49,0525	1991,59488	49641759,6	49643,75119
DISTILL.FERM008	1,33	42,3115	53204,4688	101319792,1	101372,9966
DISTILL.DIST001	1,83	39,9855	73206,1488	101319792,1	101392,9983
DISTILL.DIST002	56,209	1053,58	1877569,462	12812836,93	14690,40639
DISTILL.DIST003	363,663	9410,148	2400175,8	88516035,2	90916,211
DISTILL.DIST004	0	0	0	12812836,93	12812,83693
DISTILL.DIST005	325,949	8470,068	2372041,696	98589258,92	100961,3006
DISTILL.DIST006	199,99	8092,1875	789958,5001	98356135,87	99146,09437
DISTILL.DIST007	54,165	962,378	180225,9128	233123,045	413,3489578
DISTILL.DIST008	0	0	0	233123,045	233,123045
DISTILL.DIST009	207,7135	8439,4905	820466,2479	98356135,87	99176,60212
DISTILL.DIST010	0,8235	19,613	557,78949	10073214,72	10073,7725
DISTILL.DIST011	0,9135	22,113	618,75009	10073214,72	10073,83347
DISTILL.DIST012	10,3985	508,9285	33956,19777	88182489,71	88216,4459
DISTILL.DIST013	0	0	0	100422,445	100,422445
DISTILLET-OH	0	0	0	88182489,71	88182,48971
DISTILL.D-SIEVE.DIST009	207,7135	8439,4905	820466,2479	98356135,87	99176,60212
DISTILL.D-SIEVE.DIST010	0,8235	19,613	557,78949	10073214,72	10073,7725
DISTILL.D-SIEVE.DIST012	10,3985	508,9285	33956,19777	88182489,71	88216,4459
DISTILL.D-SIEVE.DIST013	0	0	0	100422,445	100,422445
DISTILL.D-SIEVE.SIEVE001	207,7135	8439,4905	410234,1625	49171717,56	49581,95172
DISTILL.D-SIEVE.SIEVE002	207,7135	8439,4905	410234,1625	49171717,56	49581,95172
DISTILL.D-SIEVE.SIEVE003	333,9355	9021,9065	114289,4249	5086723,1	5201,012525

Fuente: AUTORES