

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN CONJUNTA DE BIOETANOL DE
PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN USANDO METODOLOGÍAS DE
ANÁLISIS EXERGÉTICO E INTEGRACIÓN DE PROCESOS**

Ing. XAVIER ISIDRO PEREIRA HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2013**

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN CONJUNTA DE BIOETANOL DE
PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN USANDO METODOLOGÍAS DE
ANÁLISIS EXERGÉTICO E INTEGRACIÓN DE PROCESOS**

Ing. XAVIER ISIDRO PEREIRA HERNÁNDEZ

**Tesis de maestría presentada como requisito parcial para optar por el título
de Magíster en Ingeniería Química**

Director

**Dr.Sc VIATCHESLAV KAFAROV
Escuela de Ingeniería Química-UIS**

Codirectora

**MSc. VIVIANA QUINTERO DALLOS
Escuela de Ingeniería Química-UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2013**

Teniendo en cuenta que la familia es lo más importante en la vida, dedico este trabajo a mi madre Gloria, mi padre Isidro, mi hermana Dianne y los demás integrantes de mi familia, es gracias a ellos que en gran parte hoy soy quien soy. De igual forma dedico este trabajo a mis siempre fieles y mejores amigos, Jonatan, Carlos, Chila, Cindy, Fede, Jorge, Victor y Andrés, mi vida ha sido mucho más fácil gracias a su compañía y su simple existencia. Finalmente, pero no menos importante, dedico este trabajo a Andrea Olaya, quien poco a poco me ha hecho una mejor persona y me ha dado mucha felicidad, al igual que su hermosa compañía.

XAVIER ISIDRO PEREIRA HERNÁNDEZ

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Viatcheslav Kafarov por todo el apoyo brindado durante esta etapa, al igual que al Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía (CIDES) y todos sus integrantes por el apoyo brindado y los buenos momentos de compañerismo.

De igual manera agradezco a la Universidad Industrial de Santander por el apoyo económico brindado para poder realizar mis ponencias.

También agradezco a Colciencias por el apoyo económico brindado gracias a su programa Jóvenes Investigadores e Innovadores.

Nuevamente, agradezco a toda mi familia, amigos y novia por ser un motivo de felicidad y mejora.

Finalmente, agradezco a aquel ser desconocido que llamo Dios por ser la causa de mi suerte y bendiciones.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1. GENERALIDADES.....	19
1.1.PRODUCCIÓN DE BIOETANOL.....	19
1.1.1. Producción de bioetanol de primera generación.....	20
1.1.2. Producción de bioetanol de segunda generación.....	28
1.1.3. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación.....	36
1.2.ANÁLISIS EXERGÉTICO.....	42
1.3.INTEGRACIÓN DE ENERGÉTICA.....	44
2. SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS.....	45
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
4.1.ANÁLISIS EXERGÉTICO.....	53
4.2.INTEGRACIÓN ENERGÉTICA.....	71
4. CONCLUSIONES.....	82
5. RECOMENDACIÓN.....	84
6. REFERENCIAS.....	85
7. ANEXOS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología general para el trabajo de investigación.....	18
Figura 2. Producción de bioetanol a partir de múltiples materias primas, años 2008-2010 y 2020.....	21
Figura 3. Proceso simplificado y esquemas de integración del proceso de producción de etanol a partir de material lignocelulósico.....	30
Figura 4. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SHF.....	40
Figura 5. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SSF.....	41
Figura 6. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SSCF.....	42
Figura 7. Variación de la temperatura de ebullición de soluciones agua-etanol en función de la concentración.....	45
Figura 8. Variación de la temperatura de ebullición de soluciones agua-sacarosa en función de la concentración.....	47
Figura 9. Variación de la temperatura de ebullición de soluciones agua-glucosa en función de la concentración.....	48
Figura 10. Variación de la temperatura de ebullición de soluciones agua-xilosa en función de la concentración.....	48
Figura 11. Irreversibilidades por etapas - Primera generación.....	54
Figura 12. Irreversibilidades por etapas - Segunda generación.....	57
Figura 13. Irreversibilidad por etapas - Producción conjunta.....	61
Figura 14. Irreversibilidades para las rutas con tecnología SHF.....	64

Figura 15. Irreversibilidades para las rutas con tecnología SSF.....	65
Figura 16. Irreversibilidades para las rutas con tecnología SSCF.....	66
Figura 17. Requerimientos energéticos - primera generación.....	72
Figura 18. Requerimientos energéticos de calentamiento para la segunda generación.....	73
Figura 19. Requerimientos energéticos de enfriamiento para la segunda generación.....	74
Figura 20. Requerimientos energéticos de calentamiento para la producción conjunta.....	76
Figura 21. Requerimientos energéticos de enfriamiento para la producción conjunta.....	77
Figura 22. Transferencia de energía entre corrientes.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Producción de bioetanol por planta en Colombia.....	24
Tabla 2. Composición de la caña de azúcar.....	25
Tabla 3. Composición estructural de varios materiales de biomasa lignocelulósica	29
Tabla 4. Eficiencia de la conversión de celulosa a etanol, dividida en sus dos etapas, para las tecnologías SHF, SSF y SSCF.....	37
Tabla 5. Poder calorífico superior de los principales constituyentes del bagazo de caña.....	46
Tabla 6. Producción de etanol, CO ₂ , vinazas y cantidad de agua requerida para todas las rutas de producción de bioetanol.....	52
Tabla 7. Irreversibilidades totales y por servicios industriales para la primera generación.....	55
Tabla 8. Irreversibilidades totales y por servicios industriales para la segunda generación.....	56
Tabla 9. Irreversibilidades totales y por servicios industriales para la producción conjunta de bioetanol.....	60
Tabla 10. Eficiencias exergéticas por etapas y global para la primera generación.....	68
Tabla 11. Eficiencias exergéticas por etapas y global para la segunda generación.....	69
Tabla 12. Eficiencias exergéticas por etapas y global para la producción conjunta de bioetanol.....	70
Tabla 13. Relación energía producida/energía requerida para las siete rutas de producción de bioetanol.....	80

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Diagramas de flujo para la ruta 1: general y por etapas.....	95
Anexo B. Diagramas de flujo para la ruta 2: general y por etapas.....	104
Anexo C. Diagramas de flujo para la ruta 3: general y por etapas.....	109
Anexo D. Diagramas de flujo para la ruta 4: general y por etapas.....	112
Anexo E. Diagramas de flujo para la ruta 5: general y por etapas.....	115
Anexo F. Diagramas de flujo para la ruta 6: general y por etapas.....	122
Anexo G. Diagramas de flujo para la ruta 7: general y por etapas.....	126
Anexo H. Servicios industriales para el caso base, red de intercambio de calor, curvas compuestas y gran curva compuesta para la ruta 1.....	132
Anexo I. Servicios industriales para el caso base, red de intercambio de calor, curvas compuestas y gran curva compuesta para la ruta 2.....	136
Anexo J. Servicios industriales para el caso base, red de intercambio de calor, curvas compuestas y gran curva compuesta para la ruta 3.....	140
Anexo K. Servicios industriales para el caso base, red de intercambio de calor, curvas compuestas y gran curva compuesta para la ruta 4.....	144
Anexo L. Servicios industriales para el caso base, red de intercambio de calor, curvas compuestas y gran curva compuesta para la ruta 5.....	148
Anexo M. Servicios industriales para el caso base, red de intercambio de calor, curvas compuestas y gran curva compuesta para la ruta 6.....	152
Anexo N. Servicios industriales para el caso base, red de intercambio de calor, curvas compuestas y gran curva compuesta para la ruta 7.....	156
Anexo O. Exergías químicas específicas para cada compuesto.....	160
Anexo P. Ejemplo de cálculo de las irreversibilidades para un equipo.....	161

Anexo Q. Descripción de las etapas por medio de los equipos que las conforman..... **163**

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN CONJUNTA DE BIOETANOL DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN USANDO METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS EXERGÉTICO E INTEGRACIÓN DE PROCESOS*

AUTOR: XAVIER ISIDRO PEREIRA HERNÁNDEZ**

PALABRAS CLAVES: BIOETANOL DE PRIMERA Y SEGUNDA GENERACIÓN, PRODUCCIÓN CONJUNTA DE BIOETANOL, CAÑA DE AZÚCAR, BAGAZO DE CAÑA, EXERGÍA, INTEGRACIÓN DE PROCESOS, REDES DE INTERCAMBIO DE CALOR, SIMULACIÓN , ASPEN PLUS, ASPEN ENERGY ANALYZER.

DESCRIPCIÓN:

El nacimiento de la industrial del bioetanol combustible en Colombia ocurrió en el año. Debido a esto, se comenzó a evaluar la posibilidad de utilizar el bagazo de caña para la producción de bioetanol. Se plantea el concepto de producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación teniendo en cuenta los beneficios que supondría el uso de etapas comunes a los procesos individuales. Consecuentemente, se busca evaluar su viabilidad energética por medio de las metodologías de análisis exergético e integración de procesos. Se simularon 7 rutas de producción de bioetanol con ayuda del simulador Aspen Plus 7.1. La implementación de las rutas de bioetanol de segunda generación en la industria actual contribuiría a aumentar la producción hasta alcanzar un 400% del actual. En cuanto al análisis exergético, la tecnología SSCF presenta las menores irreversibilidades y la mayor eficiencia exergética. Por otra parte, la producción conjunta con tecnología SHF disminuye las irreversibilidades por kilogramo de etanol, contrario a SSF y SSCF. En cuanto a la integración energética realizada con ayuda de Aspen Energy Analyzer 7.1., se pudo concluir que la transferencia de calor por medio de las redes de intercambio de calor fue mayor en las rutas de producción conjunta, al igual que los servicios de enfriamiento superan a los servicios de calentamiento para cada una de las 7 rutas de producción de bioetanol. Con base en lo anterior, se recomienda el uso de los procesos de producción conjunta de bioetanol para aumentar la producción de este biocombustible en el país, debido a la disminución en los requerimientos de agua, menores requerimientos de calentamiento y mejores eficiencias exergéticas que el proceso de segunda generación por aparte. En particular se recomienda el uso de la tecnología SSCF, la cual presenta mejores eficiencias exergéticas y los menores requerimientos de calentamiento.

*Tesis de maestría

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química

Director: Dr.Sc. Viatcheslav Kafarov Co-directora: MSc. Viviana Quintero Dallos

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF FIRST AND SECOND GENERATION BIOETHANOL JOINT PRODUCTION USING EXERGY ANALYSIS AND PROCESS INTEGRATION METHODOLOGIES*

AUTHOR: XAVIER ISIDRO PEREIRA HERNÁNDEZ**

KEYWORDS: FIRST AND SECOND GENERATION BIOETHANOL, BIOETHANOL JOINT PRODUCTION, SUGARCANE, SUGARCANE BAGASSE, EXERGY, PROCESS INTEGRATION, HEAT EXCHANGE NETWORK, PROCESS SIMULATION, ASPEN PLUS, ASPEN ENERGY ANALYZER.

DESCRIPTION:

The beginning of the fuel bioethanol industry in Colombia occurred in. As a result, the assessment of the use of sugarcane bagasse to produce bioethanol started. The concept of first and second bioethanol joint production is proposed, taking into account the benefits that would bring the use of common stages to the individual processes. Consequently, the objective is to assess its energetic viability through the application of exergy analysis and process integration methodologies. Seven bioethanol production paths were simulated using Aspen Plus 7.1. The implementation of the second generation bioethanol production process would contribute to increase the production to approximately 400%. Regarding exergy analysis, the SSCF technology shows the lowest irreversibilities and the highest exergetic efficiency. On the other hand, the joint production using the SHF technology reduces the irreversibilities per kilogram of ethanol compared with the individual processes, contrary to SSF and SSCF. Regarding the energetic integration, performed using Aspen Energy Analyzer 7.1., conclusions made indicate that the energy transfer through the heat exchange networks was higher in the joint production paths. Also, cooling services were higher than heating services in all 7 bioethanol production routes. Taking into account the previous information, the use of bioethanol joint production processes, in order to increase the country's production, is recommended. This is based on the facts that these provide a decrease in water requirements, present less heating services and better exergetic efficiencies than individual second generation processes. The use of the SSCF technology is particularly recommended over the other two since it exhibits higher exergetic efficiencies and less heating services.

*Master thesis

** Faculty of Physicochemical Engineerings. School of Chemical Engineering
Director: Dr.Sc. Viatcheslav Kafarov Co-director: MSc. Viviana Quintero Dallos

INTRODUCCIÓN

La industria del bioetanol se ha desarrollado rápidamente en los últimos años para hacer frente al agotamiento de los combustibles fósiles y la contaminación atmosférica derivada de su combustión.

La producción de bioetanol combustible de primera generación se comenzó a desarrollar en la década de los 70s en Brasil. Al comienzo de la década de los 80s Estados Unidos inició investigaciones en esta área. El nacimiento de la industrial del bioetanol en Colombia fue un poco tardío. En el año 2001 se estableció la ley 693 que instauró el uso de la mezcla etanol-gasolina corriente a partir de Septiembre de 2005 ("El ABC de los Alcoholes Carburantes", 2012).

Las materias primas utilizadas pueden ser azúcares fermentables (caña de azúcar, remolacha azucarera) o almidones (maíz, trigo) y dependiendo de las mismas hay más o menos etapas en la producción de bioetanol. La materia prima utilizada para la producción de bioetanol en Colombia (y también Brasil) es la caña de azúcar.

La producción de bioetanol de primera generación consta de múltiples etapas las cuales se encargan de transformar la caña de azúcar en etanol anhidro, sin embargo éstas se pueden clasificar en tres etapas principales: Molienda, Fermentación y Destilación. En Colombia, ésta se realiza en conjunto con la producción de azúcar.

Por medio de esta configuración, Colombia produjo en el 2012 cerca de 360 millones de litros de bioetanol, lo cual equivale aproximadamente a una producción de 1 250 000 litros de etanol por día (*Cifras Informativas del Sector Biocombustibles, Etanol anhidro de caña*, 2012). Sin embargo, se espera un crecimiento de esta industria a través del tiempo, de acuerdo al desarrollo de la sociedad.

Debido a esto, se comenzó a evaluar la posibilidad de utilizar el bagazo de caña residual de la etapa de molienda para la producción de bioetanol, llamado bioetanol de segunda generación. Una de los grandes beneficios que tiene la utilización de esta materia prima es la no competencia con la industria alimenticia (Ojeda, Ávila, Suárez & Kafarov, 2011). No obstante, una desventaja de la producción de bioetanol lignocelulósico son los costos de producción más elevados en comparación con bioetanol a partir de maíz o caña de azúcar (Balat, 2011).

El proceso de producción de bioetanol de segunda generación se encuentra en proceso de maduración. No obstante, existe un esquema general que se ha establecido y del cual parten las investigaciones sobre este proceso. Ésta consta de cuatro pasos principales: pretratamiento, hidrólisis, fermentación y la destilación.

El concepto de producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación radica en los beneficios que supondría el uso de etapas comunes a la producción de primera y segunda generación. Inicialmente se esperaría una reducción en el consumo energético del proceso. Sin embargo, si la producción conjunta de bioetanol se trabaja junto con el concepto de integración de procesos, igualmente se esperarían reducciones significativas en la cantidad de materia prima, el agua necesaria y los residuos que abandonan el proceso, junto con un aumento en la producción de bioetanol; como se evidencia en trabajos realizados previamente por otros autores (Akgul, Shah & Papageorgiou, 2012; Dias et al., 2009; Giarola, Zamboni & Bezzo, 2012). Considerando que éstas son tecnologías emergentes, la evaluación de éstas es una fase vital, previa a la implementación de las mismas.

De esta forma, el objetivo general de este trabajo fue: *Establecer esquemas de producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación, a partir de caña de azúcar, y evaluar su viabilidad energética por medio de las metodologías de análisis exergético e integración de procesos.*

A partir de este objetivo general nacen los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el proceso de producción de bioetanol de primera generación, a partir de caña de azúcar, con ayuda del software Aspen Plus, utilizando la metodología de análisis exergético.
- Seleccionar las configuraciones de producción de bioetanol de segunda generación evaluadas en trabajos previos por el Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía (CIDES) y establecer los esquemas de producción conjunta de bioetanol.
- Determinar la existencia de mejoras respecto a la eficiencia exergética, el rendimiento del proceso y los servicios industriales, en los esquemas establecidos de producción conjunta de bioetanol, con ayuda del software Aspen Plus, utilizando las metodologías de análisis exergético e integración energética.

Para lo anterior, la tesis fue desarrollada teniendo en cuenta una metodología de evaluación usando análisis exergético e integración de procesos, la cual puede ser observada en la figura 1. La primera permite identificar oportunidades para mejorar tecnológicamente, por medio de un análisis individual, las unidades que conforman el proceso, lo cual la convierte en una herramienta muy útil a la hora de evaluar procesos emergentes (Talens, Villalba & Gabarrell, 2007). La segunda brinda las herramientas para disminuir los requerimientos de servicios industriales, lo cual contribuye a una mejora en la sostenibilidad de un proceso (El-Halwagi, 2006).

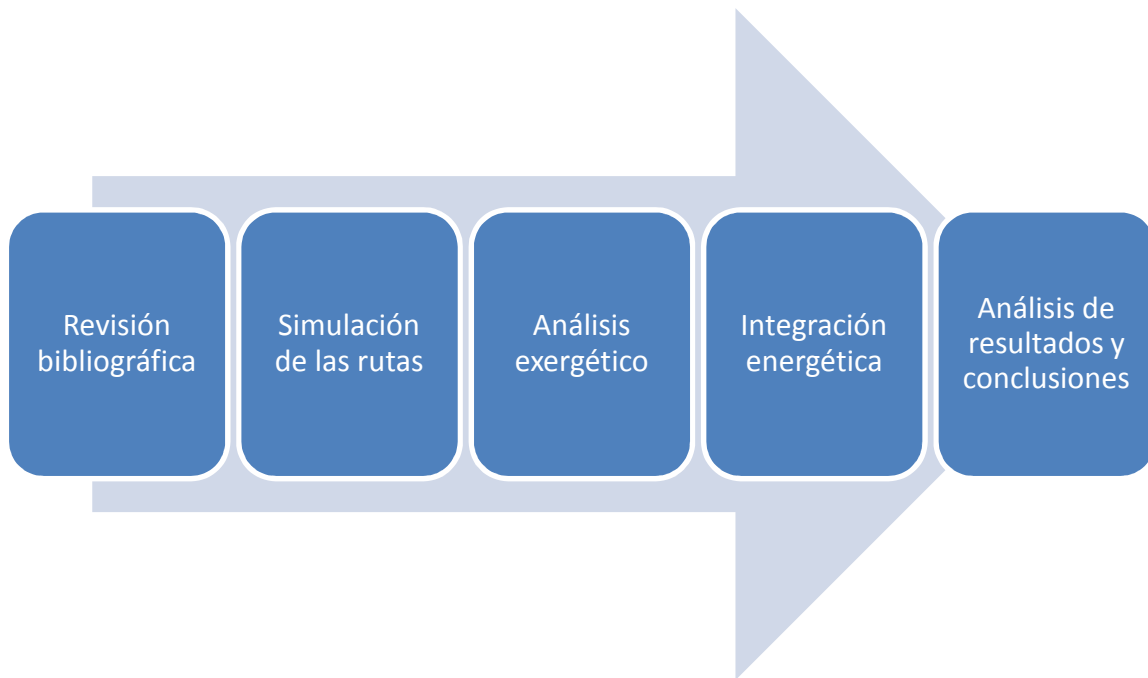


Figura 1. Metodología general para el trabajo de investigación

El proyecto contará con las siguientes limitaciones: La información relacionada con el proceso de producción de bioetanol de segunda generación proviene de la literatura, los procesos serán simulados en estado estable y los reactores utilizados para las diferentes etapas estarán basados en la conversión de la reacción.

1. GENERALIDADES

1.1. PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

La producción de bioetanol nació con el objetivo de hacer frente al agotamiento de los combustibles fósiles y a la contaminación generada por los mismos. El aumento del uso del bioetanol como combustible se observa por medio de la disminución (22%) del uso de éste en otros sectores entre 2001 y 2008. Otra muestra de este incremento es que el 80% de la producción de bioetanol en el 2008 fue utilizada para combustibles (*Guía ambiental para el subsector de la caña de azúcar*, 2010). Por lo tanto, durante los últimos años se han hecho esfuerzos por mejorar el proceso a través de sus diferentes etapas, basándose en metodologías como el análisis exergético y el análisis de ciclo de vida, que indican el buen aprovechamiento energético y el impacto ambiental ocasionado, respectivamente

Las principales materias primas utilizadas en la producción de bioetanol son el maíz y la caña de azúcar, sin embargo otras materias primas como el sorgo dulce, la remolacha, la yuca, la papa y la cebada, entre otras, también pueden ser utilizadas para la producción de bioetanol.

El bioetanol obtenido a partir de este tipo de materias primas es denominado de primera generación. No obstante, se ha generado una gran controversia por la utilización de este tipo de materias primas en la producción de bioetanol, debido a que el uso de éstas en la producción de bioetanol disminuye la disponibilidad de las mismas para la alimentación del ser humano. A raíz de esto, nació lo que se conoce como bioetanol de segunda generación, el cual utiliza materias primas que no son utilizadas para la alimentación. Entre ellas se encuentran principalmente el bagazo de caña y los residuos agrícolas y la característica principal es su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina.

También existe la producción de bioetanol a partir de biomasa de microalgas, llamado bioetanol de tercera generación, pero ésta no será tratada durante este trabajo.

1.1.1. Producción de bioetanol de primera generación

La producción de bioetanol de primera generación se comenzó a desarrollar en la década de los 70s y ha sido motivo de investigación durante el resto del siglo XX y la primera década del siglo XXI.

Las materias primas utilizadas pueden ser azúcares fermentables (caña de azúcar, remolacha azucarera) o almidones (maíz, trigo) y dependiendo de las mismas hay más o menos etapas en la producción de bioetanol. Para el caso de los almidones se requiere de una etapa adicional previa en la cual estos se transforman por medio de hidrólisis enzimática a azúcares fermentables para posteriormente pasar a la etapa de fermentación. En el caso de los azúcares fermentables se requiere extraerlos, generalmente por medio de procesos mecánicos.

La producción mundial de etanol para el 2011 se estimó aproximadamente en 84 627 millones de litros ("Global ethanol production", 2012) en el cual América es el continente con mayor producción (90%) siendo Estados Unidos y Brasil los mayores productores. Este valor fue levemente menor al pronosticado por la Alianza Global de Combustibles Renovables, GRFA por su nombre en inglés, el cual ascendía a 88 719 millones de litros.

Según la Organización para el Desarrollo y la Cooperación Económica y la Organización de la Agricultura y de los Alimentos de las Naciones Unidas (abreviados OECD y FAO, respectivamente, por sus nombres en inglés), el pronóstico de producción de bioetanol en el mundo para el año 2020 es de 154 961 millones de litros lo cual representaría un incremento cercano al 80% respecto al estimado para el 2011.

En la figura 2 se puede observar la producción de bioetanol según la materia prima utilizada para los años 2008-2010 y una proyección para el 2020. En ésta se puede ver la importancia que adquiere la producción de bioetanol de segunda generación (columna Biomasa) en el futuro, con una producción cercana a los 6 000 millones de litros de bioetanol en el año 2020. Esto denota la necesidad de investigar más profundamente en esta área.

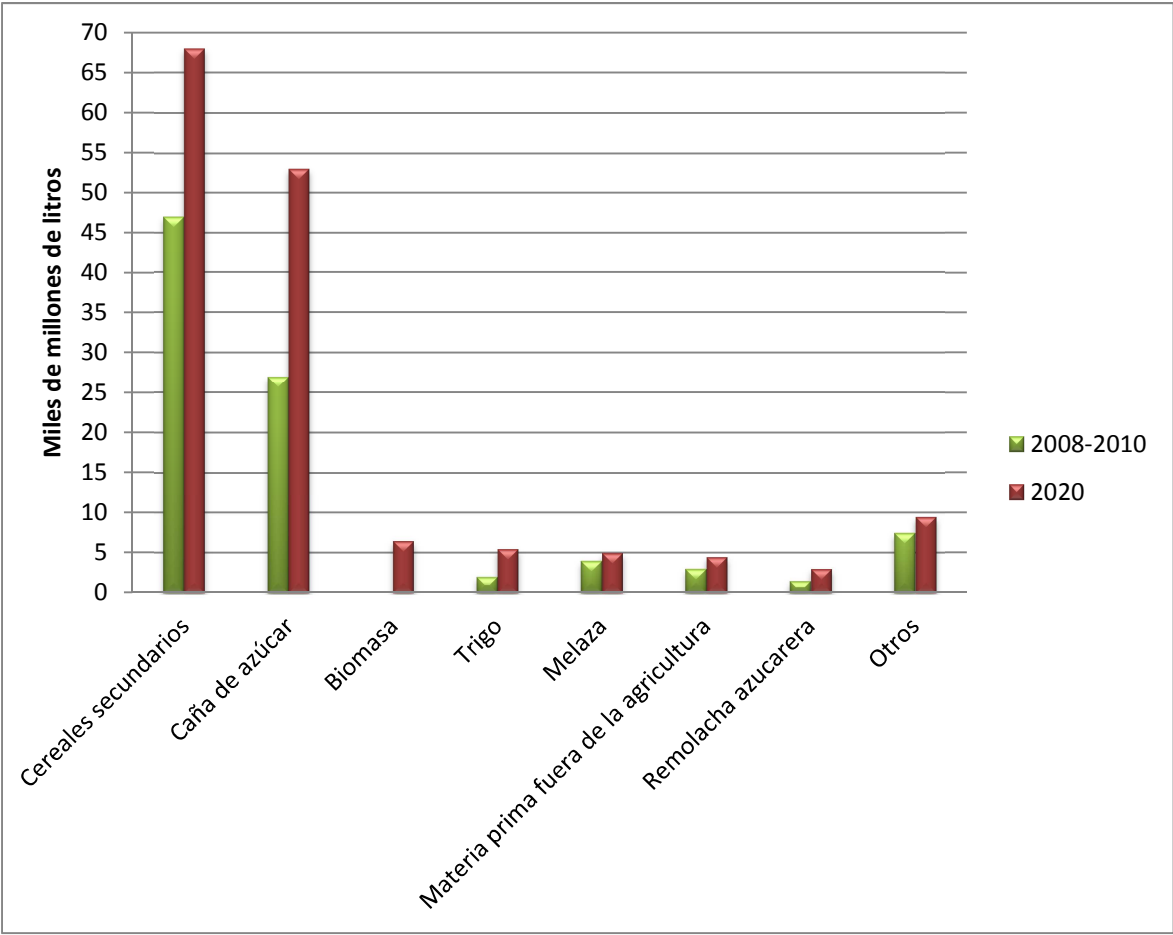


Figura 2. Producción de bioetanol a partir de múltiples materias primas, años 2008-2010 y 2020. FUENTE: Biofuels-OECD Y FAO

1.1.1.1. Escenario de Estados Unidos

Estados Unidos ha basado su producción de etanol en los cultivos de maíz principalmente ("Ethanol fuel basics", 2012). El Departamento de Energía de Estados Unidos presenta información sobre la producción de etanol en Estados

Unidos desde el año 1981, con lo cual puede observarse la evolución de su producción a través del tiempo.

En el 2011 se produjeron 52 617 millones de litros en Estados Unidos ("The Industry-Statistics", 2012) y se estima que se producirían 63 960 millones de litros en el 2020 ("Biofuels - OECD-FAO Agricultural Outlook 2011-2020", 2012), lo cual representaría un incremento de casi el 18%.

Actualmente, en Estados Unidos se encuentran construidas 209 plantas para la producción de etanol y hasta el mes de Enero de 2012 se ha alcanzado una capacidad de producción de 56 425 millones de litros ("The Industry-Statistics", 2012).

En Estados Unidos se lleva a cabo la producción de bioetanol de dos formas, molienda seca y molienda húmeda. La principal diferencia entre los dos son los diferentes procesos que se realizan en cada uno previos a la fermentación. La molienda seca no realiza procesos de separación de los diferentes componentes del maíz, contrario a la molienda húmeda ("Resource Center-How ethanol is made", 2012; Dien, Bothast, Nichols, & Cotta, 2002).

1.1.1.1.2. Escenario de Brasil

En 1975, el gobierno brasilero lanzó su Programa Nacional de Alcohol, conocido como "Proálcool". Esto conllevó la realización de grandes inversiones con el objetivo de permitir la expansión de los cultivos de caña de azúcar e introducir las destilerías de etanol. En 1984 el porcentaje general de la producción de vehículos con motores para combustión de alcohol fue de 94,4 % ("A clean, renewable fuel", 2012).

En el 2003 los vehículos Fuel-Flex fueron introducidos. Estos podrían operar con etanol, gasolina o una mezcla de los dos. Debido a esto, el etanol se convirtió en un combustible alternativo renovable para Brasil y el mundo ("Flex-Fuel: pure ethanol or mixed with gasoline", 2012).

A finales del 2007 Brasil se estableció como el productor número uno de caña de azúcar en el mundo con 7,8 millones de hectáreas, seguido por India, Tailandia y Australia. Brasil realiza dos cosechas al año, lo cual le permite producir azúcar y etanol para todo el año, tanto para el mercado interno como para exportarlo ("Sugarcane today", 2012).

Para el 2011 se estimó una producción de bioetanol equivalente a 28 805 millones de litros y para el 2020 se prevé una producción del biocombustible de 50 392 millones de litros 2020 ("Biofuels - OECD-FAO Agricultural Outlook 2011-2020", 2012), lo cual representaría un incremento de cerca del 43 %.

La tecnología utilizada en Brasil se llama proceso MelleBoinot modificado. Este proceso se lleva a cabo en semibatch con alimentación y consiste en la hidrólisis de la sacarosa para producir glucosa y fructosa, continuamente éstas son fermentadas para producir etanol, el cual ha de ser destilado (Soccol et al., 2005). Es importante mencionar que este proceso permite la recuperación de las levaduras utilizadas para la fermentación (Quintero Dallos, 2009). También existen otras destilerías las cuales utilizan un proceso continuo llamado Copersucar. Éste utiliza sistemas multietapas en el cual la primer etapa está encargada del 90% de la conversión de los azúcares (Soccol et al., 2005)

1.1.1.1.3. Escenario de Colombia

El nacimiento de la industria del bioetanol en Colombia fue un poco tardía comparada con los dos países mencionados anteriormente. En el año 2001 se estableció la ley 693 que instauró el uso de la mezcla etanol-gasolina corriente a partir de Septiembre de 2005 ("El ABC de los Alcoholes Carburantes", 2012).

En aras del crecimiento de esta industria, el gobierno colombiano implementó la ley 788 de 2002, la cual introdujo las exenciones de IVA, impuesto global y sobretasa al componente alcohol de los combustibles oxigenados, junto con las exenciones arancelarias que estuvieran relacionadas con la industria del etanol carburante y que ofrecieran una mejora a la misma ("El ABC de los Alcoholes Carburantes", 2012).

Las gasolinas que se consumen en Colombia están mezcladas con 8% de etanol que se produce en seis plantas, cinco de ellas ubicadas a lo largo del Valle del río Cauca y una en el departamento del Meta.

En la tabla 1 se puede observar la producción de etanol por planta (*Mitos y Realidades de los Biocombustibles en Colombia*, 2011). Ésta evidencia la baja producción de bioetanol, la cual asciende a un valor de 1 275 000 litros de bioetanol por día y que puede ser explicada por un desarrollo tardío de la industria en el país. Igualmente, la gran mayoría de las plantas utilizan caña de azúcar como materia prima, lo cual denota la importancia de realizar estudios sobre este proceso utilizando ésta materia prima.

Tabla 1. Producción de bioetanol por planta en Colombia

No.	Región	Inversionista	Capacidad (L/día)	Área Sembrada (ha)
1	Miranda, Cauca	Incauca	350 000	11 942*
2	Palmira, Valle	Ingenio Providencia	300 000	9 287*
3	Palmira, Valle	Manuelita	250 000	8 721*
4	Candelaria, Valle	Mayagüez	250 000	6 587*
5	La Virginia, Risaralda	Ingenio Risaralda	100 000	3 004*
6	Canta Claro, Puerto López	GPC	25 000	1 200**
Total producción			1 275 000	40 471

FUENTE: *Mitos y Realidades de los Biocombustibles en Colombia*, 2011

* Caña de azúcar ** Yuca amarga

En el 2011 Colombia presentó ventas de etanol equivalentes a 351 millones de litros (*Cifras Informativas del Sector Biocombustibles, Etanol anhidro de caña*, 2012).

Debido a que el sector azucarero y el sector del etanol carburante se destinaron para trabajar en simbiosis, se anexó la tecnología Praj-Delta T para la producción de bioetanol al proceso ya existente de producción de azúcar en los ingenios del país. Esta tecnología utiliza una mezcla entre miel y jugo para la producción de

bioetanol. Consta de una fermentación continua, deshidratación con tamices moleculares y tratamiento anaeróbico de las vinazas (Ramírez Novoa, 2009).

1.1.1.2. Proceso industrial en Colombia

La materia prima utilizada para la producción de bioetanol en Colombia (y también Brasil) es la caña de azúcar. En la tabla 2 se puede observar la composición de la caña de azúcar (Larrahondo, 1995). Ésta permite evidenciar que la caña de azúcar es una materia prima adecuada, teniendo en cuenta que cerca al 89% (Agua + Sólidos solubles) es utilizado en la producción de bioetanol y el 11% restante (Fibra seca) puede ser usado para la obtención de energía.

La producción de bioetanol de primera generación consta de múltiples etapas las cuales se encargan de transformar la caña de azúcar (materia prima) en etanol anhidro (producto final), sin embargo éstas se pueden clasificar en tres etapas principales: Molienda, Fermentación y Destilación.

Tabla 2. Composición de la caña de azúcar

Constituyente químico	Porcentaje*
En los tallos	
Agua	73-76
Sólidos	24-27
-Sólidos solubles (brix)	10-16
-Fibra (seca)	11-16
En el jugo:	
Azúcares	75-92
-Sacarosa	70-88
-Glucosa	2-4
-Fructosa	2-4

FUENTE: Larrahondo, 1995

*En los tallos, el porcentaje se refiere a la planta de caña y en el jugo a sólidos solubles

1.1.1.2.1. Molienda

El objetivo del proceso de molienda es extraer el jugo de caña de azúcar para su posterior fermentación. Comprende de tres pequeñas etapas como lo son el lavado de la caña de azúcar, su trituración y su molienda. Se requiere del ingreso de agua y se obtiene el jugo de caña de azúcar junto con el bagazo de caña de azúcar, el cual puede ser dispuesto para la producción de etanol (de segunda generación) o para la quema para la generación de electricidad.

1.1.1.2.2. Fermentación

El objetivo de esta etapa es la obtención de etanol a partir del jugo de caña de azúcar obtenido en la etapa anterior. Previamente se realiza una etapa de clarificación en la cual se ajusta el pH de la solución y se remueven algunas impurezas y se genera la cachaza. Este material es la torta de filtro obtenida durante la remoción de los sólidos suspendidos en el filtro de tambor rotatorio utilizado en la clarificación (Quintero, Montoya, Sánchez, Giraldo & Cardona, 2008). La cachaza es comercializada como parte de alimento para animales o para compostaje (Quintero et al., 2008). Posteriormente, el jugo de caña de azúcar es esterilizado y directamente llevado al proceso de fermentación. En éste último por medio de *Saccharomyces cerevisiae* se transforman los azúcares de la solución en etanol.

El proceso es normalmente operado en modo batch, aunque también podría ser continuo o parcialmente continuo (Wilkie, Riedesel & Owens, 2000).

Algunos de los compuestos necesitados para esta etapa son: carbonato de calcio, agua, levadura, etc. Igualmente esta etapa genera la salida de compuestos como cristales de azúcar, cenizas, dióxido de carbono y la corriente principal que contiene etanol y que será llevada a un proceso de destilación para su purificación.

1.1.1.2.3. Destilación

La corriente principal saliente del proceso de fermentación (mezcla diluida entre etanol, agua, azúcares residuales y algunos sólidos) es sometida a un proceso de destilación que consta de dos torres. Igualmente, los gases de fermentación, principalmente CO₂, son lavados en una columna de absorción para recuperar más del 98 % del etanol volatilizado y llevarlo a la primera columna de destilación (concentración) junto a la corriente principal (Quintero et al., 2008). La corriente de etanol que sale de la primera columna tiene una concentración aproximadamente del 63 %p/p, luego es llevada a la segunda columna de destilación (rectificación) para salir con una concentración cerca al azeótropo (95,6 %p/p) (Quintero et al., 2008). Finalmente, esta corriente es deshidratada a través de tamices moleculares los cuales adsorben el vapor y permiten una pureza del etanol elevada (mayor a 99 %p/p).

Esta etapa genera una corriente de salida conocida como vinazas, la cual es altamente contaminante debido a la variedad de compuestos en ella.

1.1.1.3. Antecedentes de la producción de primera generación en el CIDES

Durante los últimos años se han realizado múltiples investigaciones sobre la producción de bioetanol de primera generación. Sin embargo, debido a que ésta es una industria madura, se presentan a continuación algunas investigaciones realizadas, sobre la producción en Colombia, por el grupo de investigación CIDES, las cuales sirvieron como base para la realización de este proyecto.

Ramírez Novoa (2009) investigó sobre el proceso de producción dual azúcar-bioetanol, teniendo en cuenta que ambos procesos inicialmente fueron diseñados por separado. El objetivo del proyecto fue lograr un mayor grado de integración y como consecuencia aumentar la eficiencia energética y productividad del proceso. El proyecto incluyó la evaluación de tres casos de estudio en los cuales se variaba el sustrato para la producción de bioetanol. En el primero se tomó una mezcla entre miel, jugo claro y meladura; en el segundo se trabajó con miel final y en el

tercero una mezcla entre miel final y jugo. Como resultado final se obtuvo un esquema que permite evaluar y/o predecir el comportamiento del sistema, para la facilitación de la implementación de acciones correctivas, mejoras y/o definir estrategias de operación.

Pérez Cáceres (2011) también trabajó en el proceso de producción dual azúcar-bioetanol. La investigación buscaba reducir la demanda de vapor en una fábrica que produce azúcar y alcohol carburante a partir de caña de azúcar mediante la metodología del análisis Pinch. Adicionalmente, simuló y analizó cuatro alternativas para los sistemas de cogeneración que utilizan bagazo como combustible, determinando cuál técnicamente ofrece mejores rendimientos en cuanto a la producción de energía eléctrica, con el fin de aumentar los excedentes de electricidad. Por medio de este trabajo se redujo la demanda de vapor en un 37,33 % y tres de las cuatro configuraciones de sistemas de cogeneración suplieron las necesidades energéticas del proceso.

Otros trabajos como el desarrollado por Morales Pérez, 2009 están relacionados con la industria azucarera. Sin embargo, éstos contemplan estrictamente la producción de azúcar, dejando a un lado la producción de bioetanol.

1.1.2. Producción de bioetanol de segunda generación

El proceso de producción de bioetanol de segunda generación se encuentra en proceso de maduración. No obstante, existe un esquema general que se ha establecido y del cual parten las investigaciones actuales sobre este proceso.

La importancia de este proceso radica en la posibilidad de generar productos de alto valor agregado a partir de materias primas que se consideran residuos, y de las cuales no se espera una gran utilidad.

1.1.2.1. Esquema de producción

La producción de bioetanol de segunda generación consta de cuatro pasos principales: pretratamiento, hidrólisis, fermentación y la purificación del producto, los cuales se pueden observar en la figura 2 (Hamelinck, Hooijdonk & Faaij, 2003).

La materia prima utilizada para este proceso son los materiales lignocelulósicos. La estructura básica de la biomasa lignocelulósica está formada por los tres polímeros principales mencionados previamente: celulosa $(C_6H_{10}O_5)_x$, hemicelulosas tales como xilano $(C_5H_8O_4)_m$, y lignina $[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0.9-1.7}]_n$ (Furlan et al, 2012). La proporción de estos constituyentes varían entre especies.

La composición estructural de varios materiales de biomasa lignocelulósica se presentan en la tabla 3 (Ortiz López, 2008). Esta información permite justificar la elección de la caña de azúcar como materia prima para la producción de bioetanol, considerando que su residuo, el bagazo de caña, tiene un 92 % de los tres componentes lignocelulósicos, vitales para la producción de bioetanol de segunda generación. Igualmente, la disponibilidad del bagazo de caña como residuo del proceso de producción de bioetanol de primera generación hace que sea adecuado para un esquema de producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación.

Tabla 3. Composición estructural de varios materiales de biomasa lignocelulósica

Fuente	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
Bagazo de caña	45	26	21
Rastrojo de maíz	36-37	22-23	16-17
Olote de maíz	36	23	17
Fibra de maíz	14,28	16,8	8,4
Paja de cebada	40-44	28-30	20-22
Paja de trigo	33-38	21-25	23
Paja de arroz	34	25	23
Madera	40-50	20-26	17-30
Madera de pino	46,4	8,8	29,4
Pasto	31	20-24	17-18
Papel de oficina	68,6	12,4	11,3

FUENTE: Ortiz López, 2008

El bagazo de caña posee un poder calorífico inferior de 18 651,92 kJ/kg (Escalante Hernández, Orduz Prada, Zapata Lesmes, Cardona Ruiz & Duarte

Ortega, 2010) lo cual hace que pueda ser considerado para la generación de energía también. En algunas ocasiones el bagazo se utiliza para ambos fines.

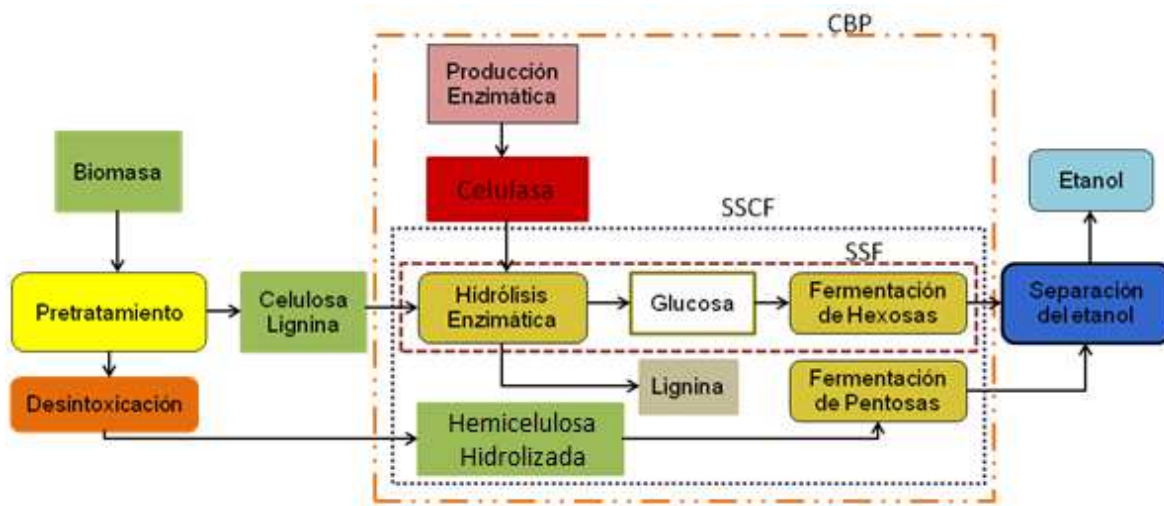


Figura 3. Proceso simplificado y esquemas de integración del proceso de producción de etanol a partir de material lignocelulósico. FUENTE: Hamelinck et al., 2003

1.1.2.1.1. Pretratamiento

Una de las grandes dificultades que se tienen cuando se desean utilizar materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol de segunda generación es su estructura. La conversión de celulosa y la hemicelulosa (polisacáridos) en monosacáridos es de gran interés para la producción de bioetanol, sin embargo estas dos se encuentran rodeadas por la lignina, la cual actúa como superficie protectora.

El pretratamiento es llevado a cabo para afectar la estructura y el tamaño macroscópico y microscópico de la biomasa, así como también su composición y estructura química submicroscópica (Yang & Wyman, 2008).

Esta etapa permite que la hidrólisis de la fracción carbohidratada a monómeros de azúcar pueda ser alcanzada de manera más rápida y con conversiones considerables. Es decir, con el pretratamiento se desea hidrolizar la hemicelulosa,

solubilizar la lignina y liberar la celulosa para una futura hidrólisis (Hamelinck, Van Hooijdonk & Faaij, 2005).

Actualmente se encuentran en estudio varios pretratamientos para el material lignocelulósico tales como, ácido diluido, alcalino, explosión de vapor, explosión de vapor catalizada con ácido, LHW, explosión con amoníaco, explosión con CO₂, organosolv (Ojeda Delgado, 2011). Es importante recalcar que hay que tener en cuenta varios factores a la hora de seleccionar un conjunto de pretratamientos más adecuados. Entre ellos se encuentran la madurez tecnológica, la aplicabilidad a la biomasa, la formación de inhibidores y el rendimiento (Ojeda Delgado, 2011).

Previo a la hidrólisis es realizado un proceso de desintoxicación de los componentes resultantes del pretratamiento, esto con el objetivo de evitar la inhibición de los agentes biológicos (enzima, levadura y bacteria) en la siguiente etapa (hidrólisis y fermentación) (Cardona & Sánchez, 2006).

1.1.2.1.2. Tecnología de Hidrólisis/Fermentación

La hidrólisis es la etapa posterior al pretratamiento (excepto en los casos que requieren de una etapa de desintoxicación previa) en la cual ocurre la conversión de los polímeros carbohidratados a monómeros de azúcar para posteriormente ser fermentados a etanol. En el caso particular de la conversión de polisacáridos a monosacáridos se le llama sacarificación.

La hidrólisis puede ser clasificada en dos grupos: química (hidrólisis ácida diluida o concentrada) y enzimática.

En la hidrólisis química el material lignocelulósico es expuesto ante químicos a condiciones de temperatura específicas durante un período fijo de tiempo. Si se realiza una hidrólisis química, el pretratamiento y la hidrólisis pueden ser llevados a cabo en una sola etapa (Balat, 2011). Sin embargo, este tipo de hidrólisis suele incurrir en grandes costos por los materiales del reactor necesarios para soportar las condiciones de trabajo (ácido a temperaturas y presiones altas) (Balat, 2011).

Cuando la conversión de los polisacáridos a monosacáridos es llevada a cabo por medio de enzimas, el proceso es llamado hidrólisis enzimática. Este tipo de hidrólisis tiene la ventaja de una alta selectividad de conversión de celulosa a glucosa, al igual que previene la futura degradación de la glucosa en compuestos indeseados.

La hidrólisis enzimática brinda grandes oportunidades tecnológicas y reduce los costos en los equipos por efecto de la corrosión, haciendo el etanol resultante de este proceso un combustible competitivo a gran escala comparado con otros combustibles líquidos (Kumar, Singh, Mishra, Mishra & Adhikari, 2009). La principal desventaja es el tiempo elevado que requiere para que ocurra el proceso dependiendo de la estructura de los materiales lignocelulósicos, el área superficial y la cristalinidad de la celulosa (Balat, 2011).

Posterior a la etapa de hidrólisis se realiza la fermentación de los monosacáridos (hexosas y pentosas). Esta etapa es muy similar a la realizada en primera generación. Se deben tener en cuenta las condiciones adecuadas para el microorganismo que llevará a cabo este proceso, entre las cuales encontramos el porcentaje de sólidos, la temperatura y el pH.

Dentro de las tecnologías de hidrólisis/fermentación que se han estudiado durante los últimos años se encuentran las siguientes tres:

1. Hidrólisis y Fermentación Separadas o SHF (siglas en inglés)
2. Sacarificación y Fermentación Simultáneas o SSF (siglas en inglés)
3. Sacarificación y Co-fermentación Simultáneas o SSCF (siglas en inglés)

En la primera, SHF, las etapas de hidrólisis y fermentación ocurren en diferentes equipos, tal como lo indica su nombre. Esta etapa presenta la dificultad de controlar la inhibición de las enzimas celulasa y β -glucosidasa por la producción de celobiosa y glucosa, lo cual requiere una menor carga de sólidos y una mayor carga de enzima para poder alcanzar rendimientos razonables (Balat, 2011). Sin embargo, brinda la gran ventaja de poder operar cada equipo bajo condiciones

óptimas. Este es el proceso representado en la figura 2 sin encerrar ninguna etapa.

En la segunda, SSF, la hidrólisis de la celulosa y la fermentación de las hexosas se realizan en un solo reactor, y la fermentación de las pentosas ocurre en un reactor diferente. Esta etapa brinda una solución al problema presentado en la tecnología SHF ya que una vez se va produciendo la glucosa, esta es transformada en etanol por el microorganismo. No obstante, tiene la desventaja de presentar diferentes óptimos de temperatura para la sacarificación y la fermentación, típicamente 323 K y 308 K, respectivamente (Balat, 2011). Esta tecnología se encuentra en la figura 2 encerrada por un rectángulo de líneas discontinuas.

En la tercera, SSCF, la hidrólisis de la celulosa y la fermentación de las hexosas y pentosas se realizan en un solo reactor, contribuyendo a una mejora económica en el proceso. A pesar de esto, existen dos grandes dificultades, encontrar un microorganismo (éste suele haber sido modificado genéticamente) que fermente tanto las hexosas como las pentosas y produzca etanol, y presentar diferentes óptimos de temperatura, tal como ocurre con la etapa SSF. En la figura 2 se puede observar encerrado por un rectángulo de puntos.

Una vez finalizada la etapa de hidrólisis/fermentación, la corriente de salida es llevada a un proceso de purificación con el objetivo de obtener como producto final el bioetanol con una muy alta pureza (mayor a 99 %p/p), conocido como etanol anhidro. Este proceso es análogo al descrito en la producción de bioetanol de primera generación.

1.1.2.2. Antecedentes de investigación en producción de segunda generación

Diferentes investigaciones se han realizado sobre el proceso de producción de bioetanol de segunda generación alrededor del mundo. A continuación se nombran algunas:

Mosier et al. (2005) realizaron una revisión sobre el efecto de los pretratamientos en las etapas posteriores del proceso de producción de bioetanol lignocelulósico. Igualmente analizaron los diferentes parámetros y sus modos de acción en los pretratamientos. En este trabajo también se hace una descripción de cada pretratamiento y la forma en la que afecta a la biomasa.

Hendriks & Zeeman (2009) hicieron una revisión acerca de los diferentes efectos de varios pretratamientos en los tres componentes principales de los materiales lignocelulósicos. Los diferentes efectos evaluados fueron incremento del área superficial accesible, descristalización de la celulosa, solubilización de la hemicelulosa, solubilización de la lignina, formación de furfural/hidroximetilfurfural y alteración de la estructura de la lignina. Se pudo concluir que los pretratamientos con vapor, cal muerta (Ca(OH)_2), agua líquida caliente y amoníaco tienen mayor potencial.

Hamelinck, van Hooijdonk & Faaij (2005) evaluaron el estado del arte de las tecnologías de pretratamiento e hidrólisis/fermentación para producir bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica. A partir de esta revisión se plantearon tres casos de estudio los cuales fueron evaluados técnica y económicamente en períodos a corto plazo (5 años), mediano plazo (10-15 años) y largo plazo (20 años o más). Cada uno de ellos consideraba las tecnologías disponibles o que se considerarían disponibles para esa época. Por medio de este estudio se estimó que el efecto combinado entre una mayor eficiencia en la etapa de hidrólisis/fermentación, un capital de inversión menor, el aumento de la escala y costos menores de la biomasa podrían llevar los costos de producción de bioetanol desde 22 €/GJ en los próximos 5 años hasta 13 €/GJ en los próximos 10-15 años y hasta 8,7 €/GJ en más de 20 años.

Lopez (2011) presentó diferentes plantas de producción de bioetanol de segunda generación actualmente en funcionamiento, entre las cuales se encuentran:

- La planta piloto en Nebraska, Estados Unidos con una capacidad de 0,4 millones de litros por año utilizando hidrólisis enzimática y fermentación de glucosa y xilosa.
- La planta de demostración en Salamanca, España con una capacidad de cinco millones de litros por año a partir de paja de trigo, utilizando hidrólisis enzimática y fermentación de glucosa.
- La planta a escala comercial en Kansas, Estados Unidos con una capacidad de 100 millones de litros por año a partir de rastrojos de maíz, paja de trigo y pasto varilla, utilizando hidrólisis enzimática y fermentación de glucosa y xilosa.

Fang, Shen, Zhao, Bao & Qu (2010) realizaron una revisión sobre las investigaciones y los desarrollos recientes en la producción de bioetanol lignocelulósico durante la última década en China. Como caso estudio presentaron un proceso de biorefinería usando tusas de maíz como materia prima. En conclusión se estableció que para que la producción de bioetanol sea una realidad hay que mejorar cada etapa del proceso y no considerar el bioetanol como el único producto posible.

1.1.2.2.1. Investigaciones realizadas en el CIDES

El grupo de investigación CIDES también ha desarrollado trabajos relacionados con la producción de bioetanol de segunda generación en Colombia, y al igual que los trabajos realizados sobre primera generación, fueron el cimiento para la realización de este proyecto.

Quintero Dallos (2009) desarrolló una metodología de evaluación para seleccionar la tecnología más adecuada en cada etapa del proceso, utilizando bagazo de caña como materia prima. En este trabajo se seleccionaron los criterios económico y técnico como parámetros de evaluación de tres rutas de estudio conformadas por las etapas de pretratamiento, hidrólisis, fermentación, destilación simple y deshidratación. Al finalizar el estudio se pudo concluir que bajo las condiciones de estudio, la ruta que incluye el pretratamiento organosolv, Sacarificación y

Fermentación Simultánea y deshidratación con tamices moleculares fue la que presentó mejores resultados.

Ojeda Delgado (2011) desarrolló una metodología basada en análisis exergético para comparar diferentes alternativas tecnológicas para la producción de bioetanol a partir de material lignocelulósico. Adicionalmente, el diseño consideraba buscar un mínimo consumo energético externo. El trabajo consideró la evaluación de 15 rutas de producción de bioetanol de segunda generación, en las cuales se combinaron cinco pretratamientos con tres tecnologías de hidrólisis/fermentación. Por medio de análisis exergético se evaluaron e identificaron las etapas y rutas con mejor y peor eficiencia exergética y se diseñaron redes de intercambio para un mejor aprovechamiento de la energía de las corrientes del proceso. Como resultado se propuso una ruta para la producción de bioetanol lignocelulósico que involucra una combinación en serie de los pretratamientos explosión de vapor catalizada y Agua Líquida Caliente (LHW por su nombre en inglés) y una tecnología hidrólisis/fermentación SSF.

1.1.3. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación

El concepto de producción conjunta de bioetanol considera alcanzar un objetivo por medio de la modificación adecuada del proceso, sus etapas, las condiciones de operación de los equipos y la distribución de corrientes a través del proceso. Entre los objetivos principales que pueden llegar a considerarse se encuentran, el aumento de la rentabilidad de la planta, la disminución de los requerimientos energéticos, la disminución de los impactos ambientales ocasionados por el proceso, etc. El planteamiento de estos objetivos depende de diferentes factores ambientales, legislativos y económicos del país en el cual se encuentre operando la planta.

Las tecnologías de hidrólisis/fermentación SSF y SSCF, descritas en la producción de bioetanol de segunda generación, pueden considerarse como un ejemplo de

integración de etapas ya que, por definición, éstas involucran la unión de dos o más etapas dentro de una sola.

En la tabla 4 se presenta la eficiencia de la conversión de celulosa a etanol dividida en sus dos etapas. Se puede observar el beneficio que estas tecnologías presentan al incrementar la eficiencia respecto a las etapas separadas, lo cual da un indicio de los beneficios que puede traer el concepto de producción conjunta.

Tabla 4. Eficiencia de la conversión de celulosa a etanol, dividida en sus dos etapas, para las tecnologías SHF, SSF y SSCF

Tecnología hidrólisis/fermentación	Eficiencia de la conversión celulosa a glucosa (%)	Eficiencia de la conversión glucosa a etanol (%)
SHF	75	85
SSF	80	92,5
SSCF	88	92

FUENTE: Hamelinck et al., 2005

Igualmente, este concepto considera el uso de diferentes herramientas para alcanzar el objetivo como lo son metodologías de evaluación y mejora de la eficiencia del proceso global y por etapas, tanto energética como másicamente, análisis del impacto ambiental generado por el proceso, análisis económicos, entre otros. Durante el desarrollo del trabajo se consideraron las metodologías de análisis exergético e integración de procesos como apoyo.

1.1.3.1. Antecedentes de investigación en producción conjunta de bioetanol

Se han realizado algunos trabajos relacionados con la producción conjunta de bioetanol. Éstos permiten observar la variedad y flexibilidad que se puede tener en este tema:

Grisi, Yusta & Khodr (2011) usaron Programación Lineal Mixta-Entera para evaluar el concepto de biorefinería, utilizando caña de azúcar y bagazo de caña de azúcar como materia prima, para la producción de diferentes bienes como lo son azúcar,

bioetanol, biogás y bioelectricidad. Como resultado del trabajo se obtiene un modelo de biorefinería y su optimización. En éste se observa que la producción de azúcar y bioetanol juegan un papel más importante que la producción de biogás y bioelectricidad.

Dias et al. (2009) realizaron el análisis de la disponibilidad del bagazo de caña para la producción de bioetanol de segunda generación, teniendo en cuenta la satisfacción energética del proceso de producción de bioetanol de primera generación. En este trabajo se estudió el efecto de dos tipos de purificación, en el cual encontraron que la destilación de doble efecto permitía el uso del 90% del bagazo generado para producir bioetanol, representando un incremento del 26% en la producción de este biocombustible.

Dias, Cunha, et al. (2011) llevaron a cabo un análisis técnico-económico para analizar la factibilidad de la producción de bioetanol a partir de bagazo de caña considerando la utilización de esta materia prima en la producción de electricidad. Como resultado se encontró que la producción de bioetanol de segunda generación puede competir favorablemente con la producción de bioelectricidad siempre y cuando se usen los residuos de caña de azúcar para la cogeneración y las tecnologías necesarias estén comercialmente disponibles.

Dias et al. (2012) efectuaron una comparación entre la producción individual de bioetanol de primera generación y segunda generación y la producción conjunta, teniendo en cuenta condiciones brasileras y escenarios específicos escogidos por los autores. Los resultados establecieron que la producción conjunta usando caña de azúcar como materia prima, conlleva mejores resultados económicos comparado con la producción separada.

Akgul, Shah & Papageorgiou (2012) ejecutaron una optimización de un proceso de producción híbrido entre primera y segunda generación, considerando metodologías ambientales y económicas. Se encontró que la producción híbrida generaba una reducción del 44% de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Giarola, Zamboni & Bezzo (2012) hicieron una optimización de la producción de bioetanol de primera y segunda generación y conjunta, por medio de Programación Lineal Mixta-Entera, para materias primas tales como maíz y rastrojos. Por medio de esta investigación se concluyó que la producción de primera generación no es una respuesta sostenible a la necesidad energética. Por otra parte, la producción de segunda generación no es lo suficientemente rentable por el momento. En cambio, la producción conjunta permite una reducción de la emisión de gases de efecto invernadero y al mismo tiempo demuestra rentabilidad.

Dias, Modesto, et al. (2011) realizaron el estudio del efecto de un Ciclo Combinado de Gasificación Integrada de Biomasa (BIGCC por su nombre en inglés) y encontraron que por debajo de determinados requerimientos de vapor, el ciclo permitiría incrementar el exceso de electricidad, lo cual conllevaría a la disminución del uso de biomasa para el sistema de cogeneración y el aumento del uso en la producción de bioetanol.

1.1.3.2. Utilización del concepto de producción conjunta de bioetanol en el desarrollo del proyecto

Una vez mencionado el concepto general de la producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación, es importante especificar de qué forma se aplicó este concepto durante el desarrollo del proyecto.

Durante la realización de los trabajos mencionados no se observa una comparación directa entre las diferentes rutas de tecnologías de hidrólisis/fermentación y de las oportunidades de integración tanto másica como energética que cada una de ellas conlleva. Por lo tanto, se presentan más específicamente tres diferentes configuraciones para ser evaluadas por medio de las metodologías de análisis exergético e integración de procesos.

El objetivo de estas tres configuraciones es poder evaluar cual de las diferentes tecnologías de hidrólisis/fermentación presentadas anteriormente puede traer más posibilidades de integración entre etapas, al igual que un incremento de la

eficiencia exergética y el rendimiento del proceso, y una disminución de los servicios industriales.

1.1.3.2.1. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SHF

Esta configuración de producción conjunta de bioetanol está caracterizada principalmente por la unión de la producción de bioetanol de primera y segunda generación por medio de la etapa de fermentación de hexosas. Tal como se puede observar en la figura 3, no solo la etapa de fermentación de hexosas es compartida entre la primera y segunda generación, si se decide utilizar las pentosas para producir bioetanol, la etapa de purificación también sería compartida. Sin embargo, es importante recalcar que las pentosas no necesariamente deben ser utilizadas para producir bioetanol.

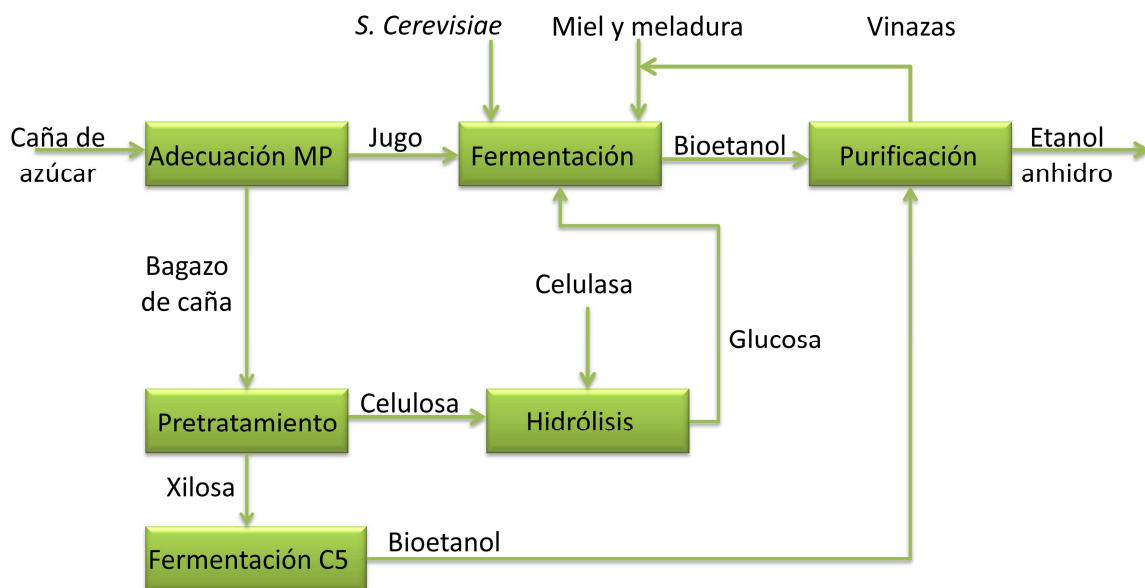


Figura 4. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SHF. MP: Materia Prima, FUENTE: Autor

1.1.3.2.2. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SSF

La particularidad de esta configuración de producción conjunta de bioetanol está en la unión de los dos procesos por medio de la etapa de purificación. La figura 4 permite observar tres diferentes corrientes de bioetanol las cuales se unen en una sola etapa de purificación evitando el uso de dos etapas de purificación adicionales. Nuevamente, es importante resaltar la unión de las etapas de hidrólisis y fermentación en la etapa SSF, conllevando disminución de equipos y energía.

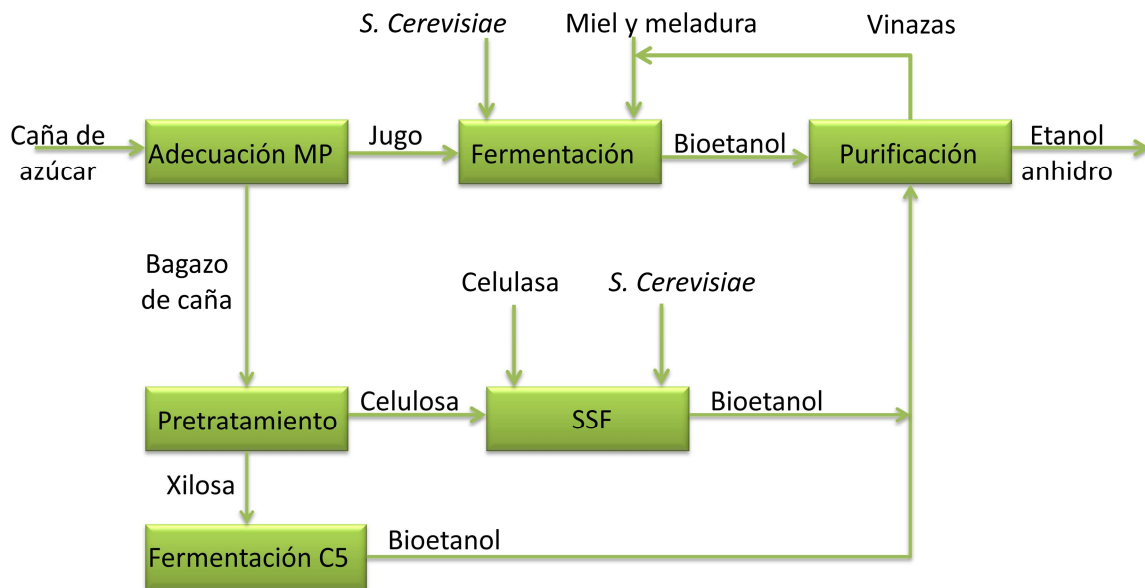


Figura 5. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SSF. FUENTE: Autor

1.1.3.2.3. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SSCF

Al igual que en la configuración anterior, esta configuración presenta la unión de los dos procesos a través de la etapa de purificación. La figura 5 aparenta ser un poco más sencilla que las otras dos, sin embargo es importante resaltar que la

etapa SSCF contiene las etapas de hidrólisis de celulosa y fermentación tanto de hexosas como pentosas. Tal como en la configuración previa, esto conllevaría a una reducción de equipos (incluso mayor) y energía.

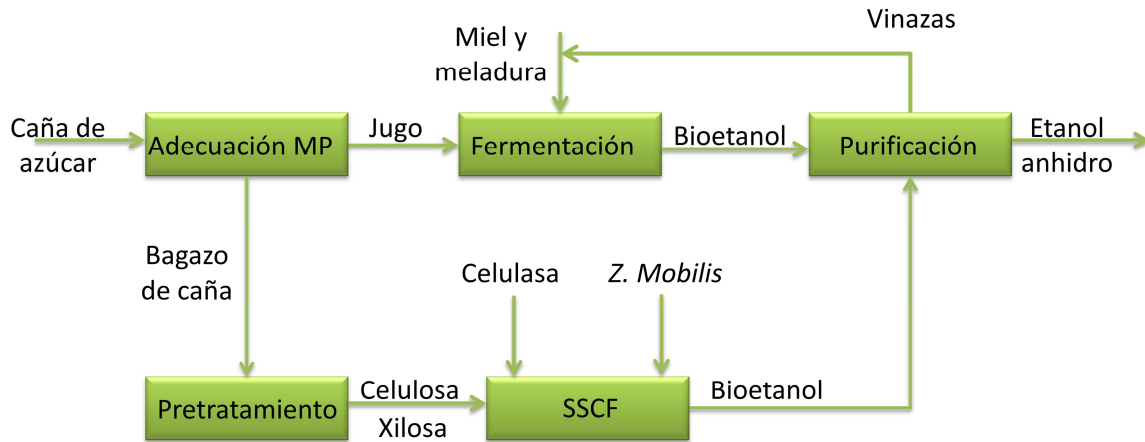


Figura 6. Producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación utilizando la tecnología de hidrólisis/fermentación SSCF. FUENTE: Autor

1.2. ANÁLISIS EXERGÉTICO

El concepto de exergía provee una medida de la mínima cantidad de recursos teóricos que puede requerir un proceso (masa y energía) (Ojeda & Kafarov, 2009). La exergía es una propiedad termodinámica que permite medir la utilidad, calidad o potencial de una forma de energía o de una sustancia para causar cambios cuando no está en equilibrio con los alrededores. En otras palabras, entre mayor sea la desviación del sistema, mayor será la exergía y mayor será la capacidad para realizar trabajo útil mientras llega al equilibrio (Wall, 1977).

La realización del análisis exergético permite identificar oportunidades para mejorar tecnológicamente, por medio de un análisis individual, las unidades que conforman el proceso (Talens, Villalba & Gabarrell, 2007).

Para procesos reales, la exergía que entra al sistema siempre excede a la exergía que sale: este desbalance es debido a irreversibilidades internas del sistema. En este sentido, un balance exergético, por definición, solo existe para procesos

reversibles. Así, para procesos reales siempre existirán irreversibilidades en el sistema (Wall, 2009).

La exergía de una corriente se puede calcular como la suma de su exergía cinética (Ex_{kin}), potencial (Ex_{pot}), química (Ex_{ch}) y física (Ex_{ph}) expresada en la ecuación 1 (Tan, Lee & Mohamed, 2010).

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

Puesto que la variación de la exergía potencial y cinética se considera muy pequeña, la exergía química y física son tenidas en cuenta en los sistemas químicos. Para calcular estas dos últimas exergías se pueden utilizar las ecuaciones 2 y 3, respectivamente:

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

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

Donde m es el flujo másico, s y h la entropía y entalpía específica para cada una de las corrientes, el sub índice 0 representa las condiciones del estado de referencia, n es el flujo molar, x es la fracción molar de la especie en el flujo y ε_i^{ch} es la exergía química del compuesto. Las exergías químicas de los compuestos utilizados se pueden encontrar en el anexo 15.

A diferencia de la energía, la exergía si presenta pérdidas, las cuales deben tenerse en cuenta. En las ecuaciones 4 y 5 se pueden observar los balances de energía y exergía, respectivamente

$$Energía\ entra - Energía\ sale = Energía\ acumula \quad (4)$$

$$Exergía\ entra - Exergía\ sale - Exergía\ consume = Exergía\ acumula \quad (5)$$

El análisis de exergía es una manera de evaluar los procesos, además puede ser usado como herramienta para la identificación de material desperdiciado y pérdidas de energía, detectando áreas dentro del proceso que necesiten ser

mejoradas tecnológicamente, calculando la eficiencia exergética (Ojeda & Kafarov, 2009).

1.3. INTEGRACIÓN DE ENERGÉTICA

En esta estrategia, por medio de la utilización de las corrientes del proceso, se busca suplir las necesidades energéticas del mismo al diseñar una red de intercambio de calor (HEN por su nombre en inglés), disminuyendo los costos por servicios industriales (El-Halwagi, 2006). El diseño óptimo de una HEN busca encontrar la mejor configuración en la cual las corrientes calientes transfieren su energía a las corrientes frías, conllevando un mínimo costo de servicio de calentamiento, enfriamiento y de inversión (Seider, Seader & Lewin, 2004).

En este estudio se utilizará la metodología de análisis Pinch, la cual es una técnica secuencial que resuelve el problema a través de unos pasos establecidos (El-Halwagi, 2006):

- Minimizar costo de servicios de calentamiento y enfriamiento
- Minimizar el número de intercambiadores
- Minimizar costos de inversión

La metodología de análisis Pinch está basada en la curva compuesta y la gran curva compuesta, los cuales son diagramas de entalpía-temperatura, que representan las corrientes del proceso y brindan información de los requerimientos energéticos mínimos, considerando una temperatura mínima de aproximación (ΔT) para los intercambiadores (El-Halwagi, 2006; Seider et al, 2004).

Debido a la unicidad de cada proceso no siempre se garantiza que se puedan encontrar redes de intercambio de calor que puedan mejorar el proceso. Con ayuda de softwares se crean diferentes redes de intercambio, en las cuales se puede observar las diferentes características de la red como los requerimientos energéticos (calentamiento y enfriamiento) y el número de equipos necesarios.

2. SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS

Siete rutas de producción de bioetanol fueron simuladas con ayuda del software Aspen Plus 7.1. En el anexo 17 se puede encontrar la descripción de los equipos que conforman las etapas de los diferentes procesos. Este simulador, el cual fue trabajado en estado estable, permite estimar las características del proceso, parámetros físicos, requerimientos de energía y parámetros de los equipos. La primera ruta corresponde al proceso de producción de bioetanol de primera generación, las tres rutas siguientes representan al proceso de producción de bioetanol de segunda generación y las tres rutas restantes corresponden al proceso de producción conjunta de bioetanol. Cada una de las tres rutas pertenecientes a segunda generación y producción conjunta utilizan una de las tecnologías SHF, SSF y SSCF. Es importante aclarar que durante la comparación de rutas pertenecientes a un mismo proceso, se designan los nombres ruta 1, ruta 2 y ruta 3, en las cuales se utilizan las tecnologías de Hidrólisis/Fermentación SHF, SSF y SSCF, respectivamente.

El modelo utilizado a través de las rutas simuladas para el cálculo de los coeficientes de actividad en la fase líquida fue el NRTL (Non-Random Two Liquid). Este último se escoge por la necesidad de realizar destilaciones de etanol y manejar gases disueltos, además por representar las mejores estimaciones del sistema simulado (Dias et al., 2009). En las figuras 7, 8, 9 y 10 se presenta una comparación de algunos modelos para el cálculo de la temperatura de ebullición para mezclas agua/etanol, sacarosa, glucosa y xilosa, respectivamente. De la figura 7 se puede observar la gran similitud entre los modelos NRTL y UNIQUAC, en contraste con las estimaciones brindadas por Peng-Robinson. Luego, en la figura 8 se puede observar la diferencia entre estos dos modelos, en comparación con datos experimentales tomados del *Handbook of cane sugar engineering* (Hugot, 1986). En la figura 9 también se observa una comparación entre el valor experimental (Torgesen, Bower, & Smith, 1950) y los calculados para los tres modelos, en el cual se evidencia una similitud entre NRTL y los valores

experimentales. Igualmente, en la figura 10 se observa la misma tendencia y similitud en los valores que en la figura 9, a pesar de no existir una comparación directa con datos experimentales. Adicionalmente, se utilizó la ecuación de estado Hayden-O'Connell para calcular las propiedades termodinámicas de la fase vapor para algunos equipos en los cuales hay presencia de ácidos orgánicos (Wooley et al, 1999). Para caracterizar los compuestos lignocelulósicos se utilizó una base de datos creada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (National Renewable Energy Laboratory-NREL), especialmente desarrollada para biocombustibles (Wooley & Putsche, 1996). De igual forma, en la tabla 5 se presenta una comparación entre el poder calorífico superior (HHV por sus nombre en inglés) que se calculan de literatura (Wooley & Putsche, 1996) y los obtenidos en Aspen Plus, evidenciando una gran similitud.

Para la integración energética fue utilizado el software Aspen Energy Analyzer 7.1. Por medio de éste se calcularon los requerimientos energéticos de calentamiento y enfriamiento para los procesos actuales. Posteriormente, se crearon las redes de intercambio de calor junto con sus requerimientos energéticos.

Tabla 5. Poder calorífico superior de los principales constituyentes del bagazo de caña

Compuesto	HHV (kcal/mol)	
	Aspen Plus	Literatura
Celulosa	2 812,48	2 812,43
Hemicelulosa	2 347,40	2 346,55
Lignina	3 264,76	3 266,72

Fuente: Autor

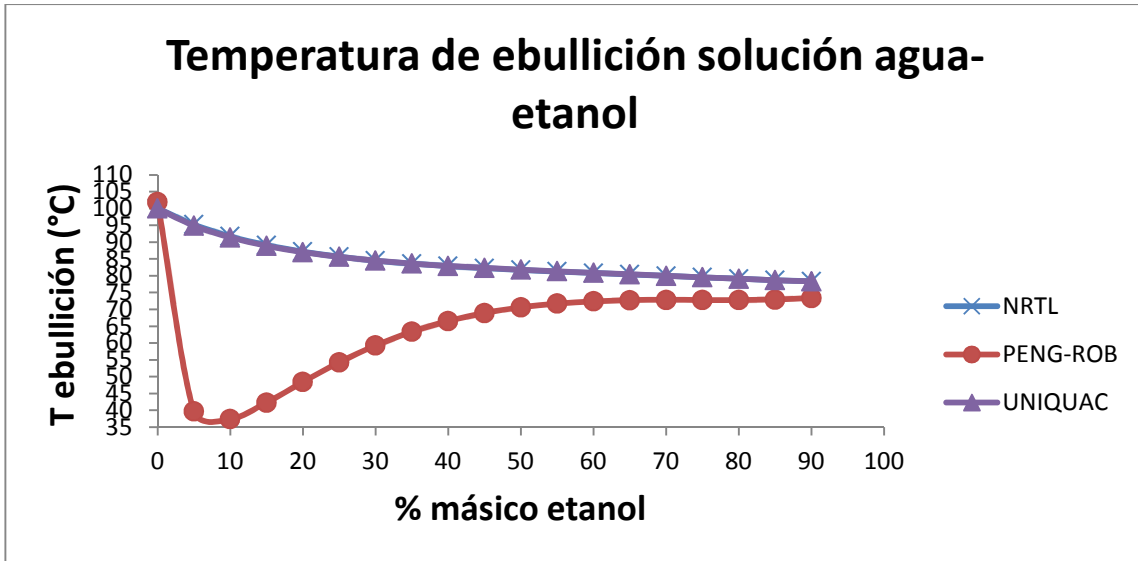


Figura 7. Variación de la temperatura de ebullición de soluciones agua-etanol en función de la concentración FUENTE: Autor

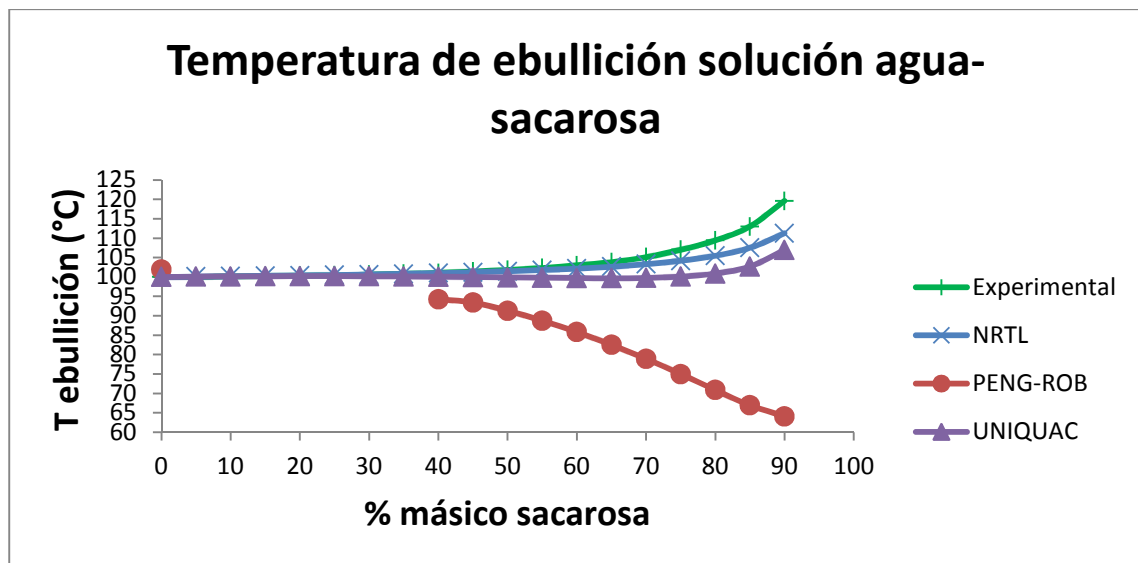


Figura 8. Variación de la temperatura de ebullición de soluciones agua-sacarosa en función de la concentración FUENTE: Autor

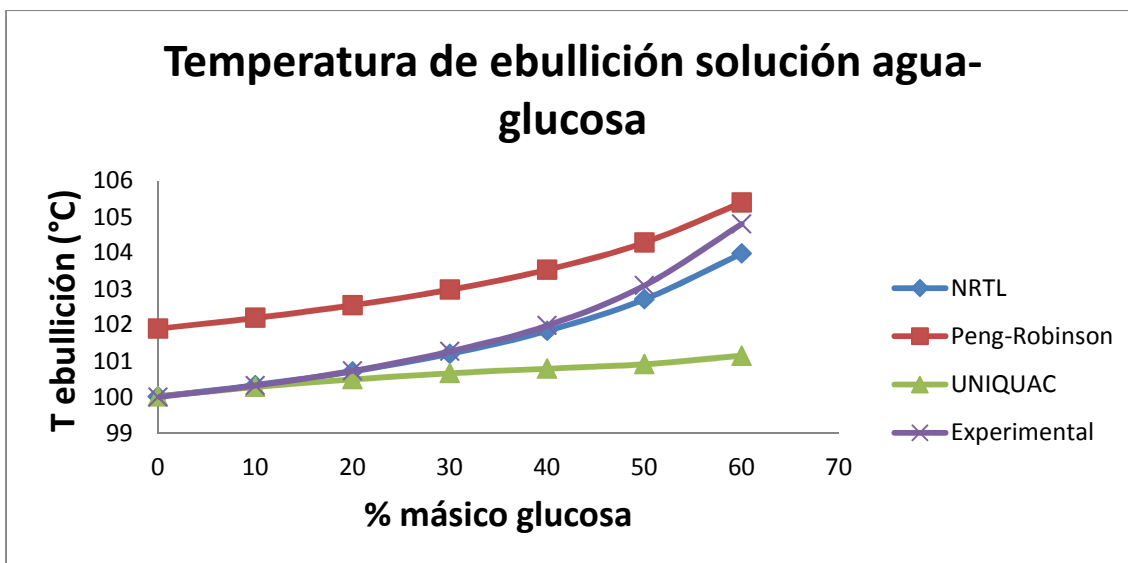


Figura 9. Variación de la temperatura de ebullición de soluciones agua-glucosa en función de la concentración FUENTE: Autor

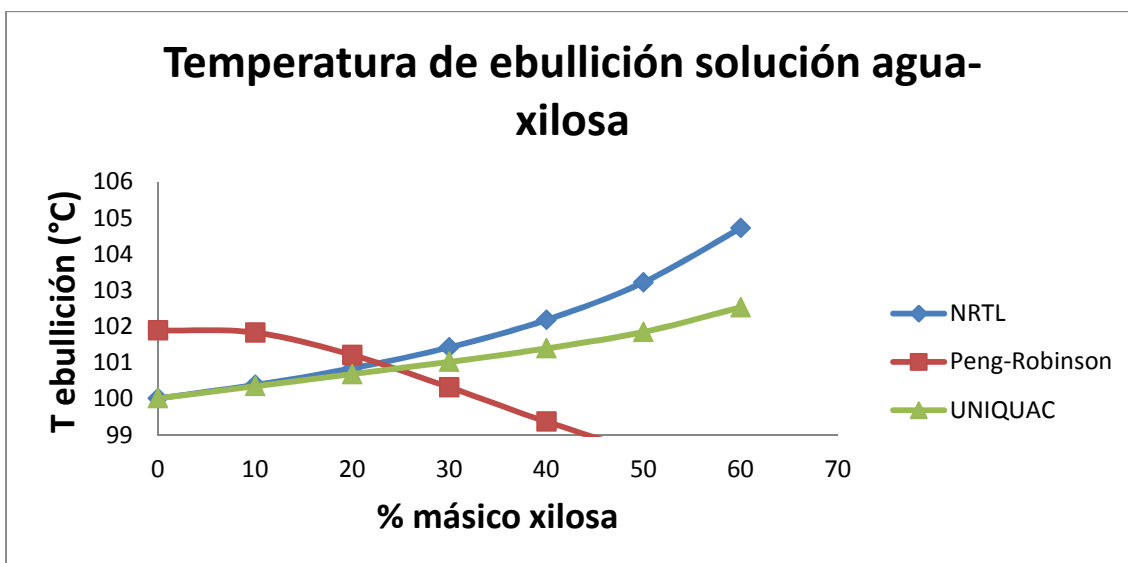


Figura 10. Variación de la temperatura de ebullición de soluciones agua-xilosa en función de la concentración FUENTE: Autor

Parámetros utilizados durante la simulación

El proceso de producción de bioetanol de primera generación está basado en información provista por un ingenio. El flujo de entrada al proceso equivale a 38 000 kg/h de caña de azúcar y es el punto de partida para todas las simulaciones.

El proceso de producción de bioetanol de segunda generación toma como materia prima el flujo de bagazo de caña resultante de la etapa Molinos y este equivale a 12 838 kg/h.

A continuación se describen diferentes parámetros utilizados en la simulación de las rutas de producción de bioetanol de segunda generación:

Pretratamiento

- Conversión de hemicelulosa a xilosa: 80,91% (Rudolf, Baudel, Zacchi, Hahn-Hägerdal & Lidén, 2007)
- Conversión celulosa a glucosa: 5% glucosa (Rudolf et al., 2007)
- Relación entre agua (sólo agua) y sólidos: 2:1 (Hamelinck et al., 2005)
- Concentración de ácido sulfúrico: 2%p/p (Rudolf et al., 2007)
- Solubilización de lignina: 10,56% (Rudolf et al., 2007)
- Presión y temperatura: Vapor saturado a 190°C, Presión de saturación: 12,36 atm (Carrasco et al, 2010; Rudolf et al., 2007)
- Conversión de xilosa a ácido acético: 10,93% (Rudolf et al., 2007)
- Conversión de xilosa a furfural: 3,66% (Rudolf et al., 2007)

Neutralización

- Neutralización del ácido usando hidróxido de calcio y la posterior formación de sulfato de calcio dihidratado. Temperatura: 50 °C (Hamelinck et al., 2005; Wooley et al, 1999)
- Remoción de furfural por medio de extracción con éter y remoción de ácido acético: 88% (Olsson & Hahn-Hägerdal, 1996; Sánchez & Cardona, 2008; Wooley et al, 1999)
- Separación del sulfato de calcio dihidratado por medio del uso de filtros de tambor rotario (Wooley et al, 1999)

Hidrólisis/Fermentación

SHF

- Celulasa : 40 FPU/g celulosa (Rudolf et al., 2007)
- Conversión celulosa a glucosa: 87% (Carrasco et al, 2010; Rudolf et al., 2007)
- Carga de sólidos: 10% (Rudolf et al., 2007)
- Temperatura de hidrólisis: 50°C (Sun & Cheng, 2001)
- Conversión de glucosa a etanol: 85-90% (Rudolf et al., 2007)
- Temperatura de fermentación: 30-35°C (Rudolf et al ., 2007; Sun & Cheng, 2001)

SSF

- Temperatura: 38°C (Sun & Cheng, 2001)
- Celulasa: 20 FPU/g celulosa (Ojeda Delgado, 2011; Santos, Lucena, Gusmão & Gouveia, 2012)
- Carga de sólidos: 10% (Ojeda Delgado, 2011)
- Conversión celulosa a glucosa: 80% (Hamelinck et al., 2005)
- Conversión de glucosa a etanol: 92,5% (Hamelinck et al., 2005)

Fermentación de pentosas

- Temperatura: 30 °C (Zhang, Lang, Wang & Nagata, 20 08)
- Conversión: 90% (Fu, Peiris, Markham & Bavor, 2009)

SSCF

- Temperatura: 30°C (Wooley et al, 1999)
- Celulasa: 15 FPU/g celulosa (Wooley et al, 1999)
- Conversión celulosa a glucosa: 88% (Hamelinck et al., 2005)
- Conversión de glucosa a etanol: 92% (Hamelinck et al., 2005)
- Conversión de xilosa a etanol: 85% (Hamelinck et al., 2005)
- Consumo de nutrientes y conversiones:

- Carga de sólidos: 20% (Wooley et al, 1999)

Los parámetros para la producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación son los mismos de los procesos individuales.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para las siete rutas de producción de bioetanol se calcularon tres variables importantes, las cuales pueden ser observadas en la tabla 6. El proceso general de las siete rutas y sus diferentes etapas pueden ser observadas en los anexos 1 al 7.

La razón por la cual se incluyeron la cantidad de CO₂ producida, el agua requerida en el proceso y las vinazas producidas es por la importancia que estas tres variables tienen ambientalmente y como posible materia prima en el proceso de producción de bioetanol de tercera generación (Gomez Fuentes & Jaimes Villareal, 2010; Rios Cárdenas, 2013).

La relación que hay entre estas variables y los posibles impactos ambientales perjudiciales es directa. Sin embargo, si estas corrientes son aprovechadas adecuadamente en un proceso de producción de bioetanol de tercera generación, el beneficio potencial de una mayor cantidad de vinazas y CO₂ incrementaría considerablemente.

Tabla 6. Producción de etanol, CO₂, vinazas y cantidad de agua requerida para todas las rutas de producción de bioetanol

Ruta	Etanol producido (kg/h)	CO ₂ producido (kg/h)	Agua requerida (kg/h)	Vinazas producidas (kg/h)	Proceso
1	491	462	16 782	858	Primera generación
2	1 614	1 539	41 777	63 131	Segunda generación SHF
3	1 616	1 542	50 689	86 422	Segunda generación SSF
4	1 694	1 619	5 386	19 617	Segunda generación SSCF
5	2 106	2 022	19 817	50 628	Producción conjunta SHF
6	2 049	1 967	33 607	59 373	Producción conjunta SSF
7	2 128	2 044	1 981	16 012	Producción conjunta SSCF

FUENTE: Autor

Es importante resaltar la reducción en los requerimientos de agua y la producción de vinazas por medio de los procesos de producción conjunta, lo cual se explica por los reciclos de ambos tipos de corrientes. Adicionalmente, si se tiene en cuenta que el objetivo de esta tesis era evaluar el anexo de procesos de producción de segunda generación a la industria actual, la producción de bioetanol en el país se cuadruplicaría, aproximadamente.

3.1. ANÁLISIS EXERGÉTICO

A continuación se analizan y comparan las rutas para la producción de bioetanol teniendo en cuenta las rutas pertenecientes a un mismo tipo de proceso. Se analiza la ruta de primera generación, se analizan y comparan las tres rutas de segunda generación y se analizan y comparan las tres rutas de producción conjunta de bioetanol. En el anexo 16 se exhibe un ejemplo de cálculo de las irreversibilidades para un equipo. El cálculo para un proceso completo requiere la repetición de este ejemplo numerosas veces.

Primera generación

En la figura 11 se observan las irreversibilidades para las diferentes etapas del proceso de producción de bioetanol de primera generación. Las dos etapas con mayores irreversibilidades, y que superan a las restantes significativamente, son Tachos y Fermentación. La principal razón por la cual los tachos presentan las mayores irreversibilidades es el alto consumo energético, necesario para la producción de azúcar (tabla 7). Por otra parte, el reactor de fermentación es el principal generador de irreversibilidades con casi el 100% de ellas.

En cuanto a las demás etapas, las irreversibilidades generadas en la etapa Evaporación están asociadas principalmente a servicios industriales requeridos entre los evaporadores y los intercambiadores de calor, siendo éstas un 76% de las totales, aproximadamente. En la etapa Clarificación, el 87% de las irreversibilidades provienen de servicios industriales necesarios para llevar la materia prima a las condiciones de temperatura adecuadas. Las irreversibilidades en la etapa Destilación están distribuidas en aproximadamente 75% y 25% para

torres de destilación e intercambiadores de calor, respectivamente. Finalmente, en la etapa Molinos, el 81% de las irreversibilidades corresponden a mezcladores, mientras que el 19% restante son generadas en los molinos debido a los requerimientos de electricidad.

Teniendo en cuenta la cantidad de bioetanol producida y las irreversibilidades totales para el proceso, las irreversibilidades por kilogramo de etanol ascienden a un valor de 17,89 MJ/kg etanol.

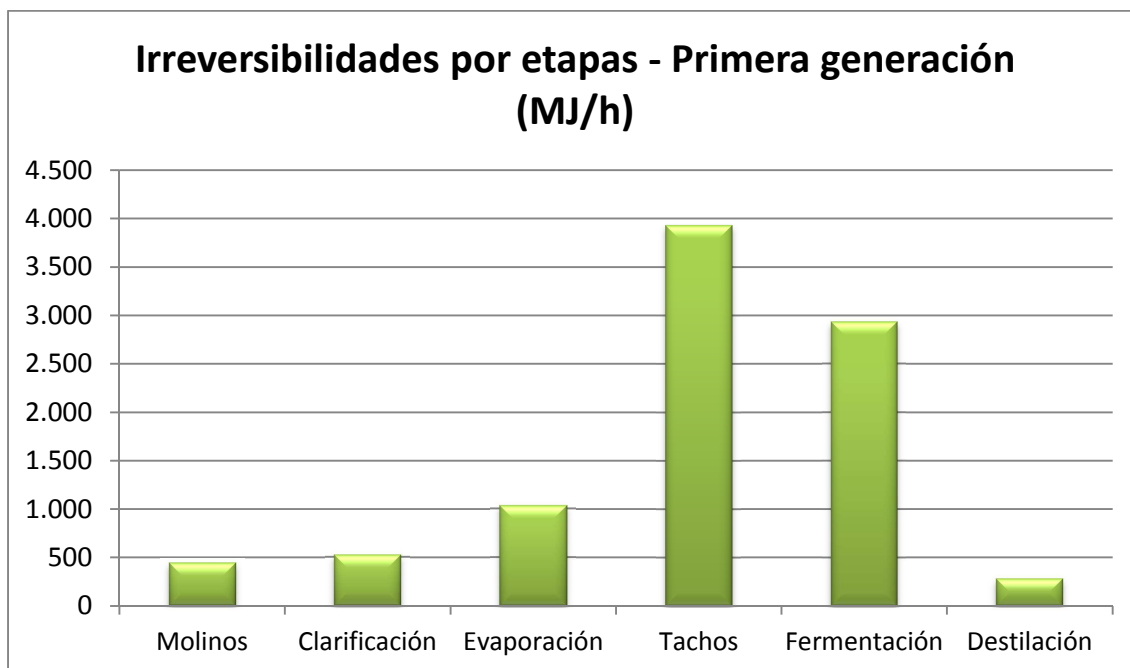


Figura 11. Irreversibilidades por etapas - Primera generación FUENTE: Autor

Tabla 7. Irreversibilidades totales y por servicios industriales para la primera generación

Etapas	Totales	Servicios industriales	
	MJ/h	MJ/h	%*
Molinos	443,75	97,54	21,87
Clarificación	526,73	457,21	86,80
Evaporación	1 034,18	786,80	76,07
Tachos	3 931,79	3 818,08	97,10
Fermentación	2 935,53	92,36	3,14
Destilación	285,44	69,19	24,23
Total	8 862,42	5 321,18	58,11

*% de las irreversibilidades atribuidas a servicios industriales respecto a cada etapa. FUENTE: Autor

Segunda generación

En la figura 12 se puede observar que el pretratamiento y la neutralización son las etapas que generan más irreversibilidades. El valor para las dos etapas es el mismo para las tres rutas ya que estas dos etapas son idénticas para cada una de ellas. Las altas irreversibilidades en la etapa Pretratamiento están asociadas principalmente al reactor de pretratamiento y a los intercambiadores de calor, correspondientes al 88% y 12%, respectivamente. Por otra parte, el principal generador de irreversibilidades en la etapa Neutralización es el intercambiador de calor encargado de ajustar la temperatura de la corriente de entrada para posteriormente ser realizada la neutralización.

Las irreversibilidades asociadas a los etapa Hidrólisis/Fermentación (SHF, SSF y SSCF) presentan diferencias entre las tres rutas, y se puede resaltar la etapa SSF como la que genera mayor irreversibilidades con un valor de 8 154 MJ/h. Las irreversibilidades para las etapas SHF y SSCF corresponden a un 55% y un 44% del valor para SSF, respectivamente. Las irreversibilidades para la etapa de Hidrólisis/Fermentación están atribuidas a la conversión de los azúcares en etanol y a mezcladores necesarios en el proceso. Consecuentemente, en SHF los

valores están distribuidos en un 88% y 12%, respectivamente; en SSF las irreversibilidades se dividen en 77% y 23%, respectivamente; y en SSCF se reparten en 59% y 41%, respectivamente. El valor más elevado de la etapa SSF está asociado a mayores irreversibilidades durante la conversión de azúcares a etanol.

Finalmente, la etapa Destilación presenta altas irreversibilidades para la ruta 1 y bajas irreversibilidades para las rutas 2 y 3. La razón de esto se basa en el intercambiador al comienzo de la etapa, en el cual se destruye mucha exergía debido a la alta temperatura de la corriente proveniente de Hidrólisis/Fermentación. En este intercambiador se destruye aproximadamente 93% de las irreversibilidades de la etapa. Las irreversibilidades están distribuidas entre torres de destilación e intercambiadores de calor. En la ruta 1 estos valores ascienden a 6% y 94%, respectivamente; en la ruta 2 las irreversibilidades se dividen en 75% y 25%, respectivamente; y en la ruta 3 se distribuyen en 83% y 17%, respectivamente.

Tal como se puede observar en la tabla 8, cerca a un quinto de las irreversibilidades son ocasionadas por servicios industriales. Con base en la producción de bioetanol para cada una de las tres rutas y las irreversibilidades totales para cada proceso, las irreversibilidades por kilogramo de etanol para las rutas 1, 2 y 3 corresponden a 20,7; 19,31 y 15,71 MJ/kg etanol, respectivamente.

Tabla 8. Irreversibilidades totales y por servicios industriales para la segunda generación

Etapas (Ruta 1)	Totales	Servicios industriales	
	MJ/h	MJ/h	%*
Pretratamiento	13 054,36	1 527,11	11,69
Neutralización	9 538,97	3 802,99	39,87
Hid/Fer	4 467,11	200,70	4,49
Destilación	6 371,90	1 163,02	18,25
Total	33 432,34	6 693,82	20,02

Etapas (Ruta 2)	Totales	Servicios industriales	
	MJ/h	MJ/h	%*
Pretratamiento	13 054,36	1 527,11	11,69
Neutralización	9 538,97	3 802,99	39,87
SSF	8 154,29	427,45	5,24
Destilación	485,33	317,04	65,32
Total	31 232,95	6 074,59	19,44
Etapas (Ruta 3)	Totales	Servicios industriales	
	MJ/h	MJ/h	%*
Pretratamiento	13 054,36	1 527,11	11,69
Neutralización	9 538,97	3 802,99	39,87
SSCF	3 602,66	199,58	5,53
Destilación	444,61	271,29	61,01
Total	26 640,60	5 800,97	21,77

*% de las irreversibilidades atribuidas a servicios industriales respecto a cada etapa. FUENTE: Autor

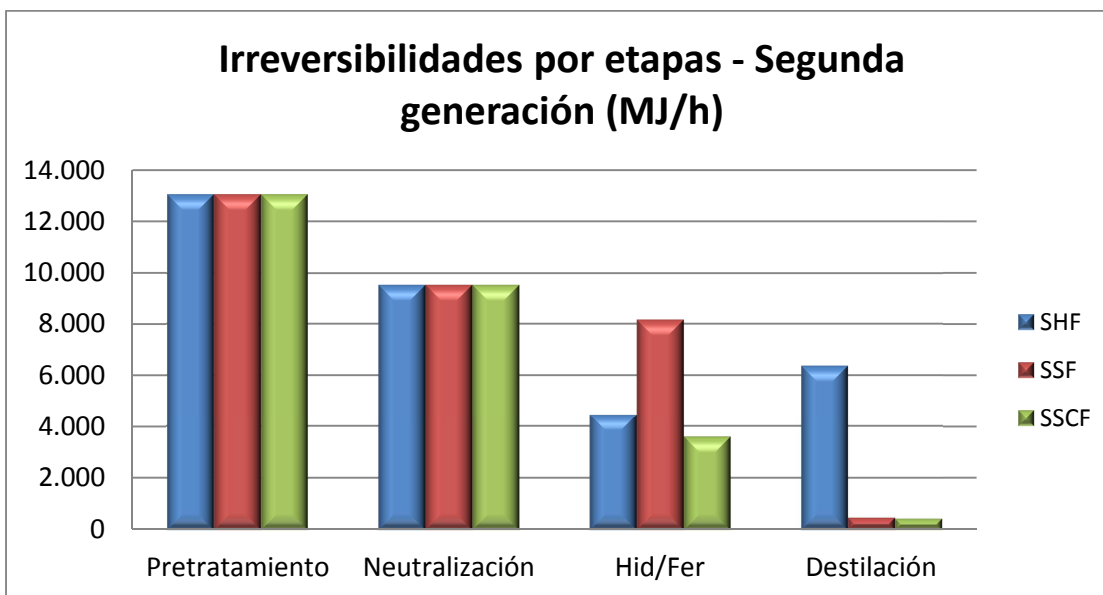


Figura 12. Irreversibilidades por etapas - Segunda generación FUENTE: Autor

Producción conjunta

En la figura 13 se puede observar las irreversibilidades por etapas para las rutas de producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación. Es importante notar que las tres rutas de producción conjunta presentan diferencias en tres etapas (Molinos, Clarificación y Evaporación) relacionadas con la primera generación. Estas diferencias se atribuyen al aprovechamiento y disponibilidad de diferentes corrientes provenientes de otras partes del proceso.

En la etapa Molinos se evidencian altas irreversibilidades para la ruta 3, las cuales se explican por el uso de un intercambiador de calor que condensa vapor de agua proveniente de la etapa Tachos y el uso de un mezclador adicional al cual llegan otras corrientes de agua. Las irreversibilidades asociadas a estos dos equipos son el 30% y 60% de la total de la etapa. Las irreversibilidades restantes están atribuidas a los mezcladores y molinos comunes a las tres rutas de producción conjunta y la primera generación.

En la etapa Clarificación se presenta una leve diferencia entre la ruta 3 y las rutas 1 y 2, la cual está asociada al uso de un intercambiador de calor para ajustar la temperatura del agua a 20°C, tal cual como ocurre en el proceso de primera generación, y la cual es diferente ya que proviene de aguas residuales de la etapa Molinos.

En Evaporación la diferencia entre la ruta 1 y la 2 y 3 radica en el uso de un intercambiador para condensar los vapores provenientes de las etapas Tachos y Clarificación, junto a los resultantes de la evaporación, y llevarlos a temperatura ambiente para posteriormente ser ingresados en la etapa SHF. La contribución de este intercambiador a las irreversibilidades de esta etapa ascienden a alrededor de 70%, lo cual equivale a casi tres veces las irreversibilidades totales de la misma etapa para las rutas 2 y 3, las cuales son iguales.

La etapa Tachos no presenta diferencias entre las tres rutas debido a que no hay diferencias en las configuraciones para esta etapa. Al igual que en primera

generación, la principal causa de irreversibilidades son los requerimientos energéticos en los tachos para la producción de azúcar (Tabla 9).

La etapa fermentación presenta valores muy similares para las tres rutas, lo cual tiene sentido si se tiene en cuenta que no hay un cambio en la estructura de la etapa. Las irreversibilidades principales se atribuyen al reactor, tal como ocurre con la primera generación, siendo el reactor el productor de casi el 100% de las irreversibilidades para las tres rutas. Las leves diferencias entre las tres rutas se atribuyen a las pequeñas variaciones en la composición de la corriente que entra al reactor de fermentación. Lo mismo ocurre en las etapas Pretratamiento y Neutralización para las tres rutas de producción conjunta; éstas presentan valores casi idénticos, y su variación se ve explicada en mínimas diferencias en la composición de la corriente de entrada de la etapa.

Las irreversibilidades de la etapa Pretratamiento están asociadas, al igual que en segunda generación, al reactor de pretratamiento y los intercambiadores de calor, y corresponden, para las tres rutas, a un 82,5% y 17,5%, respectivamente. En cuanto a la etapa Neutralización, las irreversibilidades para las tres rutas son generadas por el reactor al comienzo de la etapa, aportando un 99% de las irreversibilidades totales, tal como ocurre en la segunda generación.

Respecto a la etapa de Hidrólisis/Fermentación, existe similitud en el comportamiento y la relación de irreversibilidades presentadas por las tres rutas, respecto al proceso de segunda generación. De esta etapa se destaca la ruta 2 (SSF) como la ruta de mayor irreversibilidades con aproximadamente 8 200 MJ/h. Las irreversibilidades de SHF y SSCF corresponden a un 54,98% y 43,25% del valor de SSF. Las irreversibilidades para la etapa de Hidrólisis/Fermentación en la producción conjunta están atribuidas a la conversión de los azúcares en etanol y a mezcladores necesarios en el proceso, de igual manera que en segunda generación. Por lo tanto, en SHF los valores están distribuidos en un 89,06% y 10,93%, respectivamente; en SSF las irreversibilidades se dividen en 84,91% y 15,08%, respectivamente; y en SSCF se reparten en 56,09% y 43,9%, respectivamente. El valor más elevado de la etapa SSF está asociado a mayores

irreversibilidades durante la conversión de azúcares a etanol, similar a la segunda generación.

En la etapa Destilación, la ruta 2 sobresale como la que genera más irreversibilidades, seguida de la ruta 1 y de última la ruta 3. La razón de esto es la necesidad de aumentar la temperatura de la corriente que ha de ser destilada. Las irreversibilidades para esta etapa están atribuidas a los sistemas de separación y los intercambiadores de calor. En la ruta 1 estos valores ascienden a 25,07% y 74,92%, respectivamente; en la ruta 2 las irreversibilidades se dividen en 6,7% y 93,29%, respectivamente; y en la ruta 3 se distribuyen en 14,05% y 85,94%, respectivamente. Una parte significativa de las irreversibilidades están atribuidas al intercambiador de calor utilizado para enfriar las vinazas, las cuales se recirculan a la etapa de fermentación.

Considerando la producción de bioetanol para cada una de las tres rutas y las irreversibilidades totales para cada proceso, las irreversibilidades por kilogramo de etanol para las rutas 1, 2 y 3 corresponden a 18,12; 19,85 y 17,52 MJ/kg etanol, respectivamente.

Tabla 9. Irreversibilidades totales y por servicios industriales para la producción conjunta de bioetanol

Etapas (Ruta 1)	Totales	Servicios industriales	
	MJ/h	MJ/h	%*
Molinos	433,36	89,09	20,56
Clarificación	548,41	461,89	84,23
Evaporación	3 745,18	678,86	18,13
Tachos	4 005,54	3 798,37	94,83
Fermentación	3 842,24	14,83	0,39
Pretratamiento	10 429,80	1 826,71	17,51
Neutralización	8 230,87	3 268,95	39,72
Hid/Fer	4 508,11	360,59	8,00
Destilación	2 426,65	1153,31	47,53
Total	38 170,16	11 652,63	30,53

Etapas (Ruta 2)	Totales	Servicios industriales	
	MJ/h	MJ/h	%*
Molinos	433,36	89,09	20,56
Clarificación	548,41	461,89	84,23
Evaporación	1 107,06	789,81	71,34
Tachos	4 005,54	3 798,37	94,83
Fermentación	3 665,61	14,98	0,41
Pretratamiento	10 412,70	1 826,71	17,54
Neutralización	8 217,51	3 268,95	39,78
SSF	8 199,32	927,09	11,31
Destilación	4 101,06	2 395,18	58,40
Total	40 690,57	13 572,09	33,35
Etapas (Ruta 3)	Totales	Servicios industriales	
	MJ/h	MJ/h	%*
Molinos	5 099,63	90,761	1,78
Clarificación	614,52	528,24	85,96
Evaporación	1 107,57	789,76	71,31
Tachos	4 006,49	3 799,13	94,82
Fermentación	3 567,54	15,06	0,42
Pretratamiento	10 452,88	1 833,44	17,54
Neutralización	8 210,02	3 261,49	39,73
SSCF	3 546,88	169,23	4,77
Destilación	709,48	609,77	85,95
Total	37 315,02	11 096,90	29,74

*% de las irreversibilidades atribuidas a servicios industriales respecto a cada etapa. FUENTE: Autor

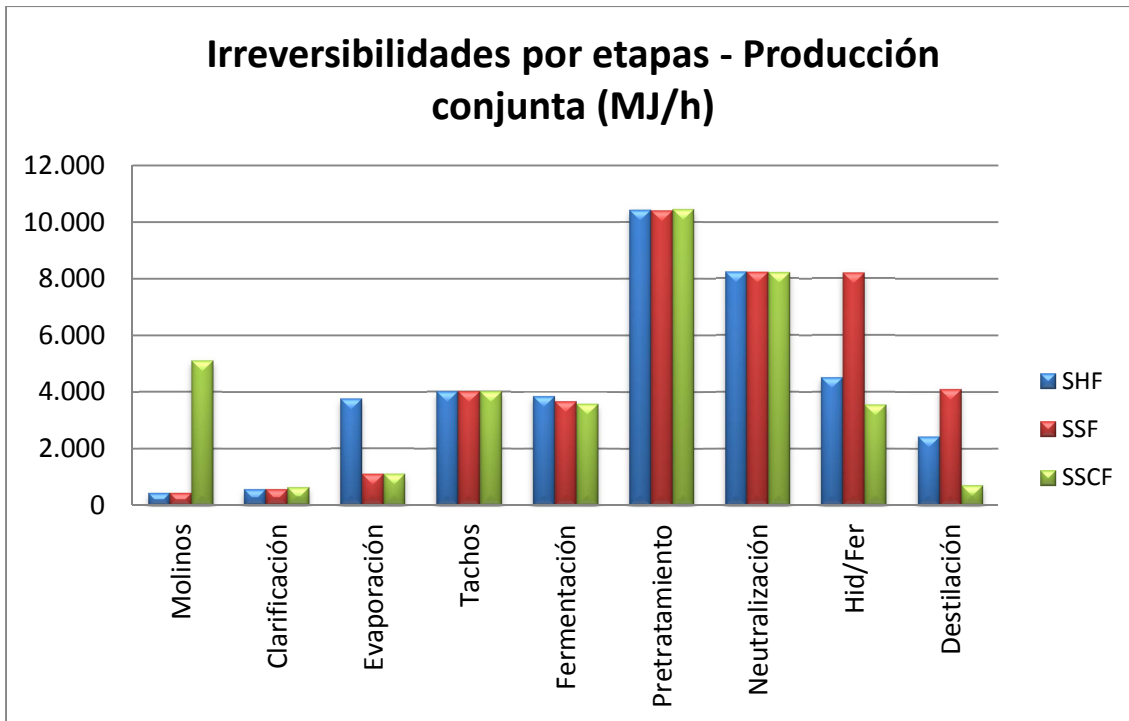


Figura 13. Irreversibilidad por etapas - Producción conjunta FUENTE: Autor

Comparación entre la primera y segunda generación con la producción conjunta para cada tecnología (SHF, SSF y SSCF)

En la sección anterior se analizaron las irreversibilidades de cada ruta y se compararon las rutas pertenecientes a un mismo proceso, es decir, se compararon entre sí las tres rutas de segunda generación y las tres rutas de producción conjunta de bioetanol. La primera generación sólo presenta una ruta, por lo tanto no hubo comparación con una ruta similar.

Con el objetivo de evidenciar posibles mejoras por medio de la producción conjunta, se comparan las etapas individuales de los procesos de primera y segunda generación con las etapas de la producción conjunta.

En esta sección se comparan las rutas que utilizan la misma tecnología de Hidrólisis/Fermentación, es decir, se comparan:

- Primera generación, Segunda generación (SHF) y Producción conjunta (SHF);

- Primera generación, Segunda generación (SSF) y Producción conjunta (SSF) y
- Primera generación, Segunda generación (SSCF) y Producción conjunta (SSCF)

Primera generación, Segunda generación (SHF) y Producción conjunta (SHF)

A partir de la figura 14 se puede observar que los valores para las etapas Molinos, Clarificación, Tachos e Hidrólisis/Fermentación varían mínimamente entre los procesos individuales (primera y segunda generación) y la producción conjunta.

A diferencia de las etapas anteriores, en Evaporación se observan diferencias las cuales están explicadas por el intercambiador de calor adicional que condensa los vapores de las etapas Clarificación y Tachos y los vapores residuales de la misma etapa.

Existen diferencias notorias en las etapas Fermentación, Pretratamiento y Neutralización. Estas diferencias se observan en las tres diferentes tecnologías, es decir también existe la diferencia entre las etapas individuales y la producción conjunta utilizando SSF y SSCF. No obstante, las diferencias serán sólo nombradas en la tecnología SHF. La diferencia en la etapa Fermentación se puede explicar en la cantidad de azúcares a convertir en el reactor. La primera generación maneja un flujo menor que la producción conjunta, debido a que en la producción conjunta el reciclo de vinaza hacia Fermentación es mayor que en la primera generación. La diferencia en las irreversibilidades de Pretratamiento, y consecuentemente Neutralización, están atribuidas a la diferencia en la composición de la corriente de entrada para la segunda generación y la producción conjunta. La segunda generación, vista como un proceso individual, utiliza sólo material lignocelulósico, a diferencia de la producción conjunta, en la cual no sólo se tiene el material lignocelulósico sino también residuos de sacarosa procedentes de la etapa Molinos. Esto genera una diferencia en los aportes individuales de cada compuesto a la destrucción de exergía total para los equipos y, por consiguiente, de la etapa.

Adicionalmente, en la etapa Destilación se puede observar una reducción significativa en las irreversibilidades en la producción conjunta. La combinación de las corrientes procedentes de las etapas Fermentación y SHF disminuyen el consumo energético en el intercambiador encargado de ajustar la corriente de entrada en la etapa.

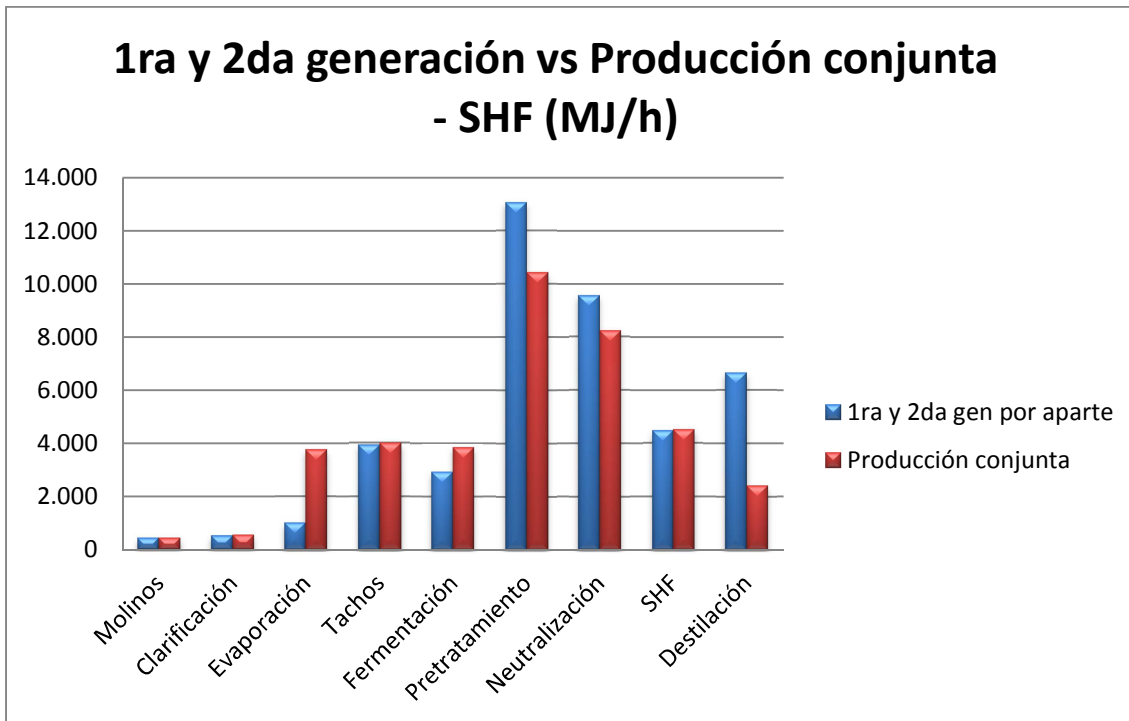


Figura 14. Irreversibilidades para las rutas con tecnología SHF FUENTE:
Autor

Primera generación, Segunda generación (SSF) y Producción conjunta (SSF)

Por medio de la figura 15 se evidencia que en esta tecnología, los valores para las etapas Molinos, Clarificación, Evaporación, Tachos e Hidrólisis/Fermentación presentan pequeñas variaciones entre la primera y segunda generación y la producción conjunta. Las variaciones en las etapas Fermentación, Pretratamiento y Neutralización han sido nombradas en el análisis de la anterior tecnología.

A diferencia de la tecnología anterior, la destilación en la producción conjunta produce mayores irreversibilidades en comparación con las producidas por los

procesos individuales. Las dos razones principales son la necesidad de mayores requerimientos en el intercambiador que calienta la corriente de entrada y la necesidad de enfriar mayor cantidad de vinaza para ser recirculada. Esta tecnología se ve particularmente afectada por la recirculación de vinaza y las irreversibilidades asociadas a esto. Debido a que esta tecnología requiere mayor cantidad de agua, la corriente a purificar es aproximadamente cuatro veces mayor que la que requiere menor cantidad de agua (SSCF), lo cual conlleva mayores irreversibilidades.

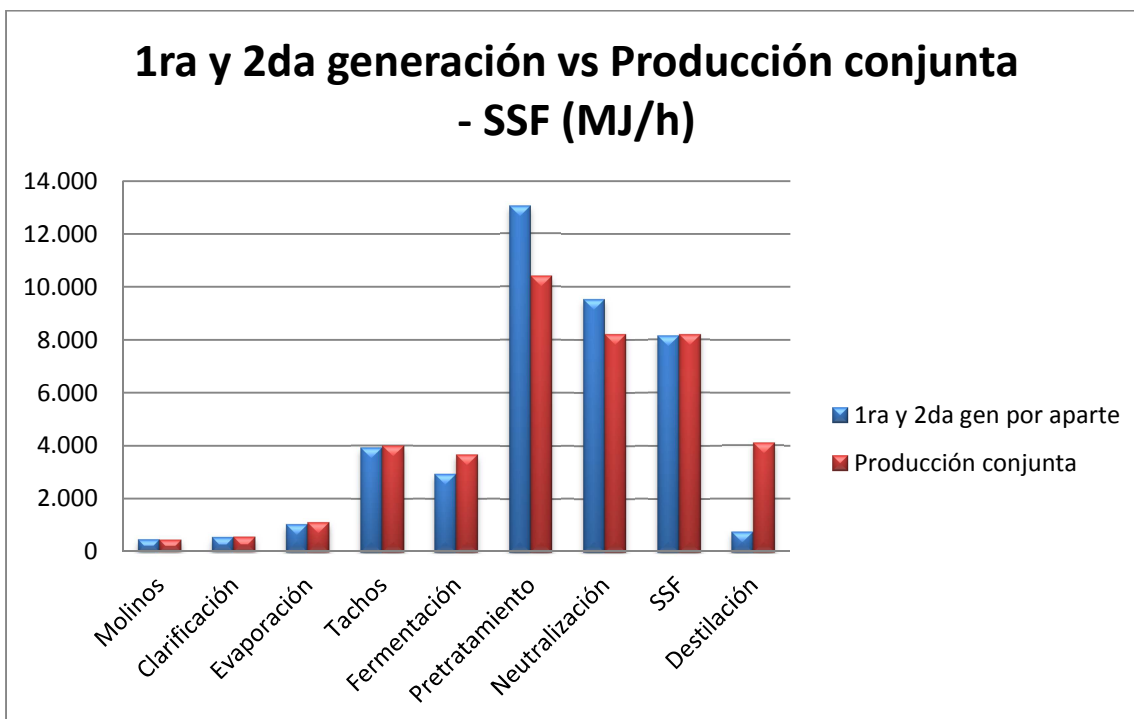


Figura 15. Irreversibilidades para las rutas con tecnología SSF FUENTE:
Autor

Primera generación, Segunda generación (SSCF) y Producción conjunta (SSCF)

En la figura 16 se observa que la tecnología SSCF presenta una diferencia significativa en irreversibilidades en la etapa Molinos. Las razones detrás de esto son similares a la diferencia en irreversibilidades en la etapa Evaporación para la

tecnología SHF, el manejo de vapores procedentes de otras etapas y la condensación de los mismos para ser utilizados como agua.

De manera similar, la variación en las etapas Clarificación, Evaporación, Tachos e Hidrólisis/Fermentación son mínimas, y las diferencias en las etapas Fermentación, Pretratamiento y Neutralización obedecen los mismos argumentos mencionados previamente en SHF.

Finalmente, la etapa Destilación no demuestra una variación notoria entre la producción conjunta y los procesos individuales. La primera sólo reduce alrededor de un 3% las irreversibilidades de los últimos. La razón para esto se basa en que los procesos individuales no requieren de requerimientos energéticos sobresalientes en el intercambiador que varía la temperatura de la corriente de entrada, a diferencia de SHF.

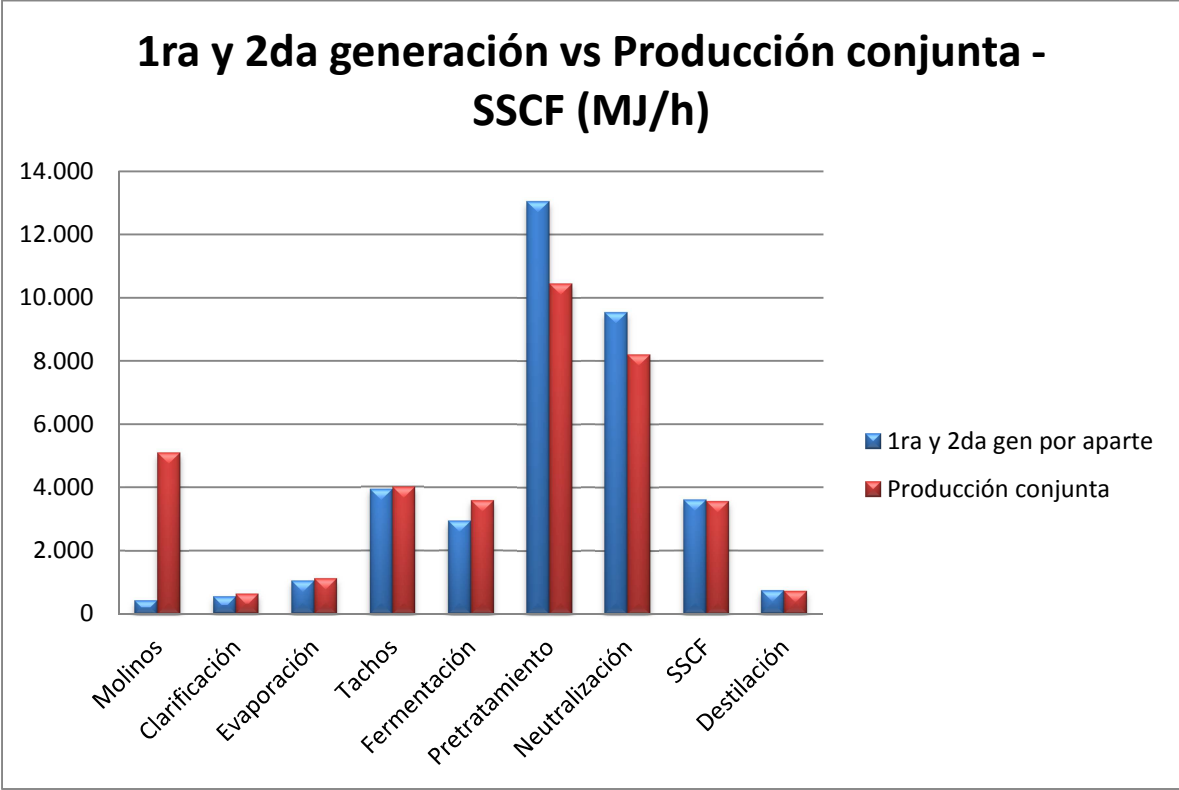


Figura 16. Irreversibilidades para las rutas con tecnología SSCF FUENTE:
Autor

Eficiencias exergeticas

La eficiencia exergetica permite tener una idea de qué tan adecuadamente se está aprovechando la energía en cada etapa y globalmente. Ésta se calcula al dividir la exergía de los productos entre la exergía de todas las entradas, y se puede observar en la ecuación 6.

$$\text{Eficiencia exergetica} = \frac{\text{Exergía de los productos}}{\text{Exergía de las entradas}} * 100 \quad (6)$$

En las tablas 10, 11 y 12 se pueden observar las eficiencias exergeticas por etapas y global la primera y segunda generación y la producción conjunta de bioetanol, respectivamente.

El proceso de producción de bioetanol de primera generación presenta una eficiencia relativamente alta en cada una de sus etapas, excepto Molinos.

Un factor determinante en el valor de la eficiencia exergetica es el entendimiento y la decisión de qué considerar un producto. Desde esta perspectiva, producto se asume como aquella corriente que será aprovechada más adelante en otra parte del proceso o que se considera como un producto final del proceso.

La razón por la cual la etapa Molinos presenta una eficiencia inferior es el hecho de que una de las dos corrientes que salen de la etapa no es considerada como un producto. Las dos corrientes que abandonan esta etapa contienen el jugo (mezcla de sacarosa y agua) y el bagazo de caña, respectivamente. Sin embargo, considerando que al bagazo de caña no se le da un uso posterior, éste no se considera como un producto, por consiguiente, esta corriente se convierte en una fuente de pérdida de exergía. A diferencia de Molinos, en las otras etapas del proceso se recirculan algunas de las corrientes que salen, o sólo sale una corriente, lo cual permite obtener una eficiencia mucho más elevada.

Tabla 10. Eficiencias exergéticas por etapas y global para la primera generación

Etapas	Eficiencia (%)
Molinos	47,64
Clarificación	88,05
Evaporación	94,70
Tachos	93,70
Fermentación	86,78
Destilación	84,24
Global	37,13

FUENTE: Autor

La producción de bioetanol de segunda generación presenta etapas con valores muy altos y muy bajos de eficiencia exergética. La etapa Pretratamiento presenta una alta eficiencia exergética debido a que las dos corrientes con mayor contenido exergético son utilizadas en Neutralización e Hidrólisis/Fermentación. En contraste, la etapa Neutralización recibe la corriente altamente exergética proveniente de Pretratamiento y genera una corriente final con una muy pequeña fracción de la exergía de entrada. Esta exergía se pierde al comienzo de la etapa en el intercambiador que reduce la temperatura desde 167°C hasta 50°C para poder llevar a cabo la neutralización. Otro foco de pérdida de exergía se encuentra en el solvente (éter) utilizado para remover los inhibidores, el cual no se recircula y termina saliendo del sistema. En la etapa Hidrólisis/Fermentación se observa una alta eficiencia exergética debido a que sólo sale una corriente de la etapa, igualmente, las pérdidas de exergía por corrientes de energía son bajas. En la etapa Destilación ocurre un fenómeno similar al que ocurre entre Pretratamiento-Neutralización. La corriente que proviene de la etapa Hidrólisis/Fermentación tiene exergía elevada y esta se pierde a través de corrientes de energía que salen del proceso y por las corrientes que no se aprovechan como las vinazas. La diferencia entre los valores de la ruta 3 y las rutas 1 y 2 está ocasionada por una menor entrada de exergía en la etapa Hidrólisis/Fermentación. Ya que casi toda la

exergía en Hidrólisis/Fermentación es transferida a Destilación, la exergía que se pierde en Destilación es menor en la ruta 3, generando una mayor eficiencia.

Tabla 11. Eficiencias exergéticas por etapas y global para la segunda generación

Etapa	Eficiencia (%)		
	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
Pretratamiento	87,4	87,4	87,4
Neutralización	2,93	2,93	2,93
Hid/Ferm	99,85	99,47	99,53
Destilación	5,19	2,73	11,43
Global	4,92	2,64	10,33

FUENTE: Autor

En cuanto a la producción conjunta de bioetanol, se puede observar que la etapa Molinos mejora significativamente su eficiencia exergética. Esto se explica con el aprovechamiento de la corriente de bagazo de caña, la cual no era aprovechada en la primera generación. Varias etapas mejoran su eficiencia exergética, sin embargo, debido a que la eficiencia exergética anteriormente era alta, las mejoras no son significativas. Las eficiencias exergéticas para la producción conjunta son mayores que la segunda generación entre el 1% y el 12%. La eficiencia exergética global para la ruta 3 es superior debido a que la etapa SSCF requiere menos cantidad de agua, lo cual permite aprovechar el agua residual en otras etapas, reduciendo el ingreso de corrientes de agua fresca. El hecho de que la eficiencia exergética en la ruta 3 para la segunda generación fuera mayor también influye en lo anterior.

Tabla 12. Eficiencias exergeticas por etapas y global para la producción conjunta de bioetanol

Etapa	Eficiencia (%)		
	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
Molinos	99,97	99,97	99,00
Clarificación	92,83	92,29	92,00
Evaporación	93,71	97,28	96,72
Tachos	94,54	94,54	94,50
Fermentación	99,79	99,83	99,60
Pretratamiento	87,68	87,68	87,67
Neutralización	1,84	1,84	1,84
Hid/Ferm	99,44	99,04	99,13
Destilación	69,86	70,07	70,11
Global	11,36	10,16	17,41

FUENTE: Autor

La principal razón de la eficiencia global significativamente baja para todas las rutas, comparada con las etapas, es la gran cantidad de corrientes de energía (calor y trabajo) que ingresan al proceso y que se pierden a través de él; esto ocurre en todas las rutas. Entre las corrientes por las cuales se pierde exergía, se pueden destacar las corrientes de calor de las etapas Clarificación, Evaporación y Tachos, al igual que el intercambiador inicial de la etapa Neutralización y las torres de destilación. La pérdida de exergía por la vinaza que no se recircula o que se recircula parcialmente también es un factor determinante. El uso de un solvente como éter sin recuperación y recirculación en la remoción de los inhibidores en la etapa Neutralización también genera una alta pérdida de exergía.

Durante la realización del análisis exergetico se pudo identificar que las principales causas de pérdidas de exergía están atribuidas principalmente al cambio abrupto de estado de una corriente y a la salida del proceso de corrientes con altos contenidos exergeticos. Por lo tanto, si se desea disminuir las pérdidas de exergía es aconsejable reevaluar la topología (posiblemente usando herramientas de optimización), basándose en un criterio exergetico.

3.2. INTEGRACIÓN ENERGÉTICA

El análisis de resultados de la integración energética presenta el mismo formato que el análisis exergético. Primero se realiza un análisis y comparación entre las rutas pertenecientes a un mismo tipo de proceso. A continuación, se toman los procesos pertenecientes a una misma tecnología para compararlos y observar los posibles beneficios de la producción conjunta en la integración energética del proceso. En los anexos 8 al 14 se pueden encontrar las redes de intercambio de calor y los servicios industriales, al igual que las curvas compuestas y la gran curva compuesta.

Primera generación

La figura 17 presenta los requerimientos energéticos para el proceso de producción de primera generación. Es importante resaltar la gran diferencia entre los requerimientos de calentamiento y enfriamiento, lo cual indica la gran disponibilidad de energía dentro del proceso. La razón para la gran diferencia entre es la energía disponible en la etapa Evaporación, siendo el 97% de los requerimientos de enfriamiento.

Por medio de la red de intercambio de calor se disminuyen los requerimientos energéticos de calentamiento y enfriamiento en 65,5% y 17,4%, respectivamente. La reducción de energía ocurrió por medio de la transferencia de 12 502 MJ/h entre las corrientes frías y calientes del proceso. La energía transferida proviene de las corrientes de la etapa Evaporación y se distribuye entre una corriente de la etapa Clarificación, una corriente en Fermentación y dos en Destilación.

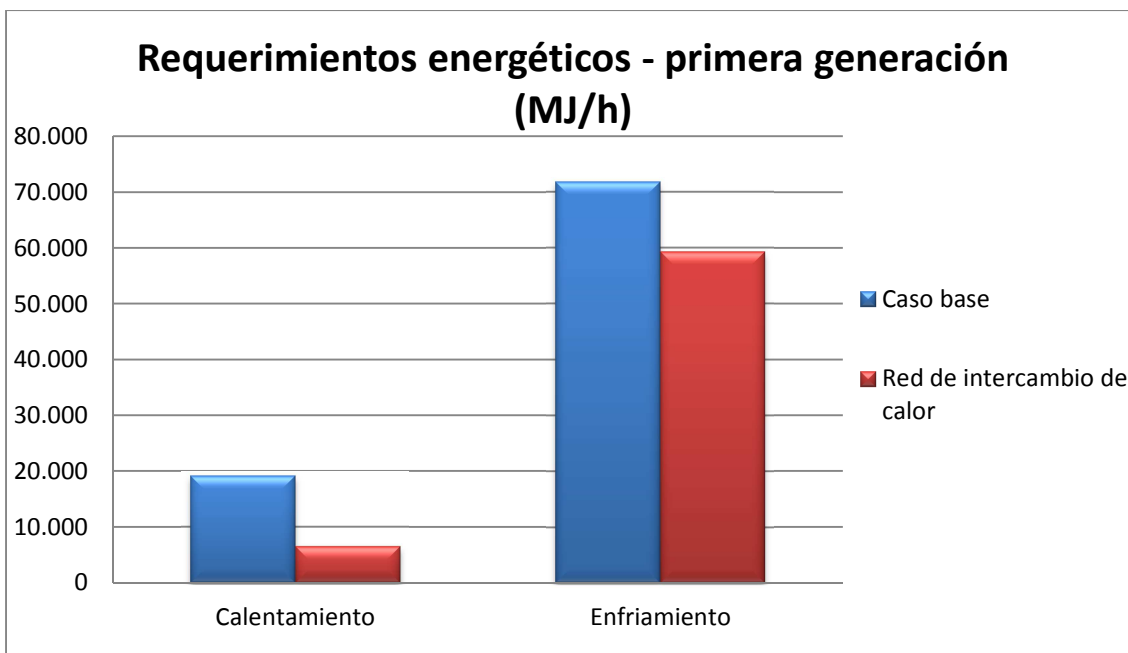


Figura 17. Requerimientos energéticos - primera generación FUENTE: Autor

Segunda generación

Las figuras 18 y 19 exhiben los requerimientos energéticos de calentamiento y enfriamiento, respectivamente, para las tres rutas de producción de bioetanol de segunda generación.

En lo que respecta a los servicios de calentamientos la ruta 1 presenta los más altos requerimientos energéticos con 115 819 MJ/h. El 99% de estos se requieren en el intercambiador de calor del comienzo del pretratamiento, los separadores flash de las etapas Pretratamiento e Hidrólisis/Fermentación y el rehervidor de la segunda torre de destilación. Los requerimientos para las rutas 2 y 3 corresponden a aproximadamente 61% y 59% de la ruta 1, respectivamente. En la ruta 2 la mayoría de las necesidades energéticas se encuentran en el intercambiador de calor inicial y el flash de la etapa Pretratamiento y en el intercambiador de calor del comienzo de la etapa Destilación. En la ruta 3 gran parte de la energía se requiere en el intercambiador de calor inicial y el flash de la etapa Pretratamiento.

En cuanto a los servicios de enfriamiento, la ruta 1 tiene los requerimientos más altos con un poco más de 142 000 MJ/h. Alrededor del 81% de estos

requerimientos provienen del calor generado en el reactor de pretratamiento, los intercambiadores de calor al comienzo de las etapas Neutralización y Destilación, y los condensadores de las torres de destilación. Las rutas 2 y 3 presentan requerimientos similares con aproximadamente 120 000 MJ/h. En éstas, el 87% de la energía disponible proviene de los reactores de pretratamiento y SSF/SSCF, los condensadores de las torres de destilación y el intercambiador al comienzo de Neutralización.

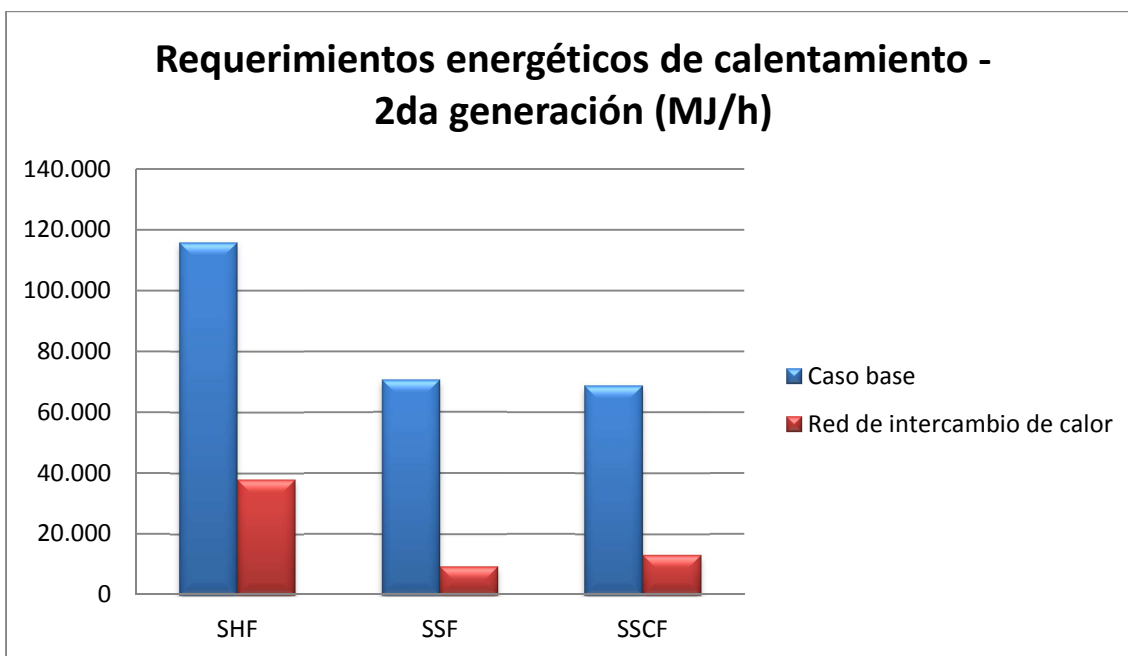


Figura 18. Requerimientos energéticos de calentamiento para la segunda generación FUENTE: Autor

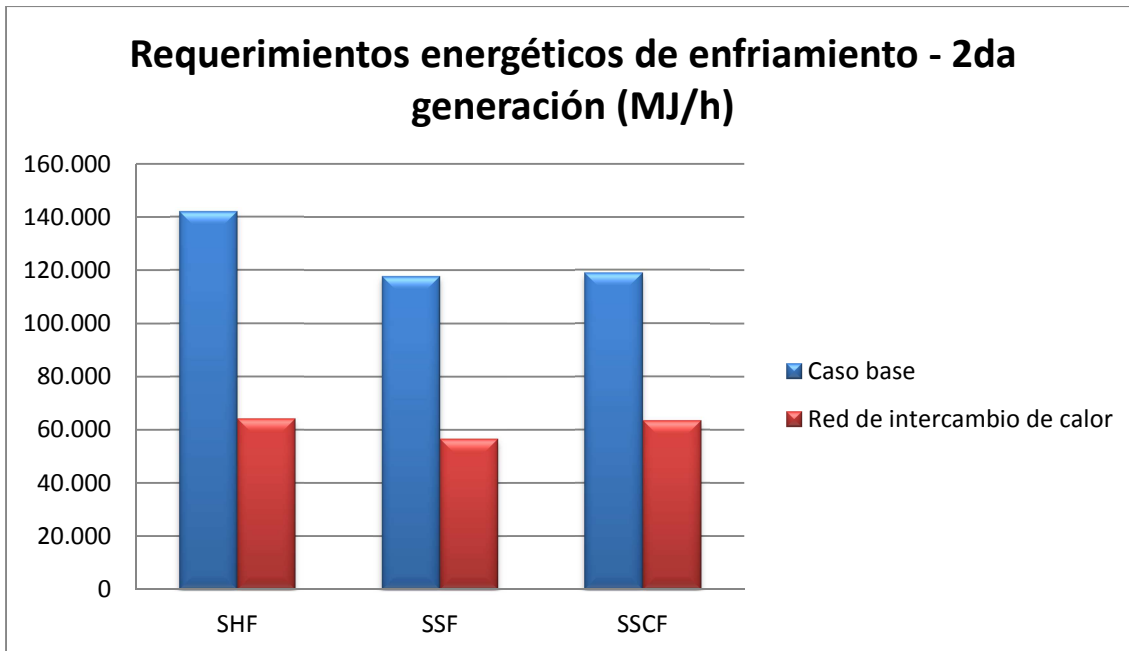


Figura 19. Requerimientos energéticos de enfriamiento para la segunda generación FUENTE: Autor

Al igual que la primera generación, los requerimientos de enfriamiento son mayores que los de calentamiento, indicando la disponibilidad de energía para ser aprovechada. Esto ocurre para las tres rutas de segunda generación, aunque la diferencia entre enfriamiento y calentamiento varía de una ruta a la otra.

La implementación de la red de intercambio de calor en cada una de las rutas permite el ahorro del 67%, 87% y 81%, respectivamente, de servicios de calentamiento y del 55%, 52% y 47%, respectivamente, en los servicios de enfriamiento, para las rutas 1, 2 y 3. Por lo tanto, la ruta 2 presentaría los menores requerimientos energéticos de calentamiento y enfriamiento con tan sólo 9 452 MJ/h y 56 638 MJ/h, respectivamente.

La transferencia de calor entre corrientes asciende a 77 806, 61 105 y 55 513 MJ/h, para las rutas 1, 2 y 3, respectivamente. En la ruta 3 la mayoría de la energía transferida proviene del intercambiador de calor en la etapa Neutralización y el reactor de pretratamiento y se distribuye en el intercambiador al comienzo de la etapa Pretratamiento y en el flash posterior al reactor de pretratamiento. En la

ruta 2 la mayoría de la energía transferida proviene y se dispone en los mismas corrientes que la ruta 3. Adicionalmente, otra gran parte de la energía se transfiere desde la segunda torre de destilación hacia el intercambiador al comienzo de esta etapa. En la ruta 1 la mayoría de la energía se transfiere desde los mismos equipos que la ruta 2 y la primera torre de destilación y se aprovecha en los mismos equipos de la ruta 3 al igual que en el separador flash de la etapa Hidrólisis/Fermentación.

Producción conjunta

En las figuras 20 y 21 se observan los requerimientos energéticos de calentamiento y enfriamiento, respectivamente, para las rutas de producción conjunta de bioetanol.

La ruta 1, al igual que en la segunda generación, presenta los requerimientos más altos de calentamiento (cerca de 100 000 MJ/h), seguida muy de cerca por la ruta 2. Las necesidades de calentamiento en la ruta 1 están distribuidas principalmente entre los intercambiadores de calor iniciales de las etapas Clarificación y Pretratamiento y los separadores flash de las etapas Pretratamiento e Hidrólisis/Fermentación. En la ruta 2 se necesitan la mayoría de los servicios de calentamiento en los intercambiadores iniciales de las etapas Destilación, Evaporación y Pretratamiento y en el separador flash de la etapa Pretratamiento. La mayor parte de los requerimientos de calentamiento de la ruta 3 se dividen entre los intercambiadores de calor iniciales de las etapas Clarificación y Pretratamiento y el separador flash de la última.

Opuesto a la segunda generación, la ruta 1 presenta los requerimientos energéticos de enfriamiento más bajos, equivalentes a aproximadamente 200 000 MJ/h. Le sigue la ruta 2 con aproximadamente el doble de la ruta 1, y la ruta 3 con aproximadamente el triple de la ruta 1. En la ruta 1 casi la mitad de las corrientes involucradas en los requerimientos de enfriamiento abarcan el 90% de los mismos, distribuidos entre las etapas Evaporación, Pretratamiento, Neutralización y Destilación. En las ruta 2 y 3 ocurre algo diferente en las cuales sólo una corriente,

perteneciente a la primera torre de destilación, representa el 70% y 64% de los requerimientos de enfriamiento, para las rutas 2 y 3, respectivamente.

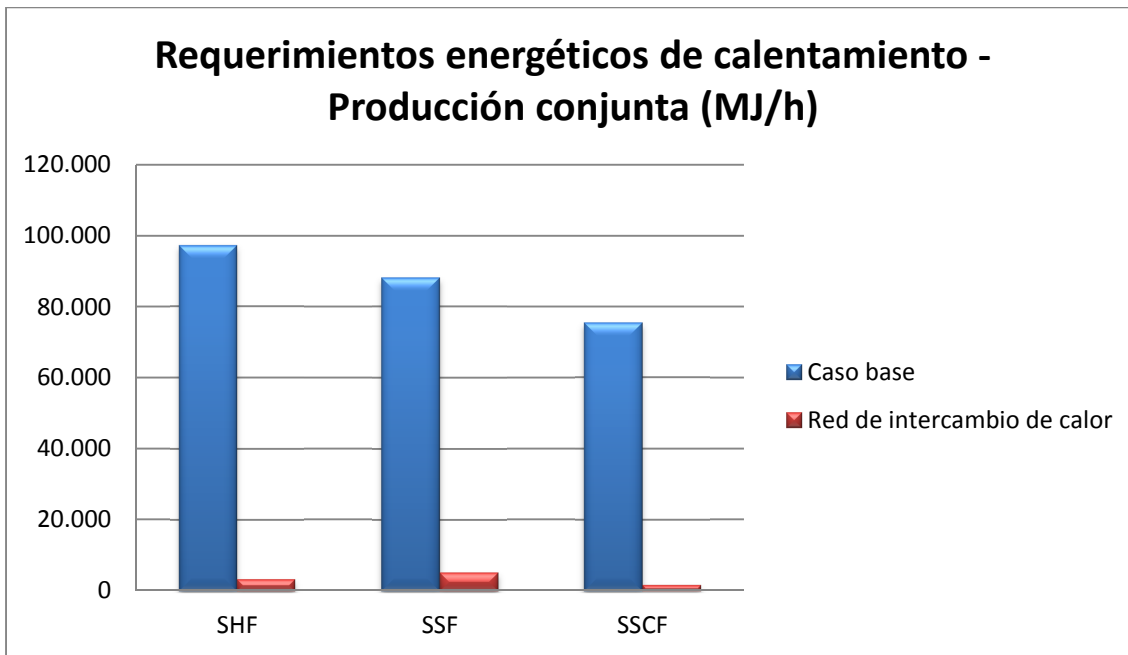


Figura 20. Requerimientos energéticos de calentamiento para la producción conjunta FUENTE: Autor

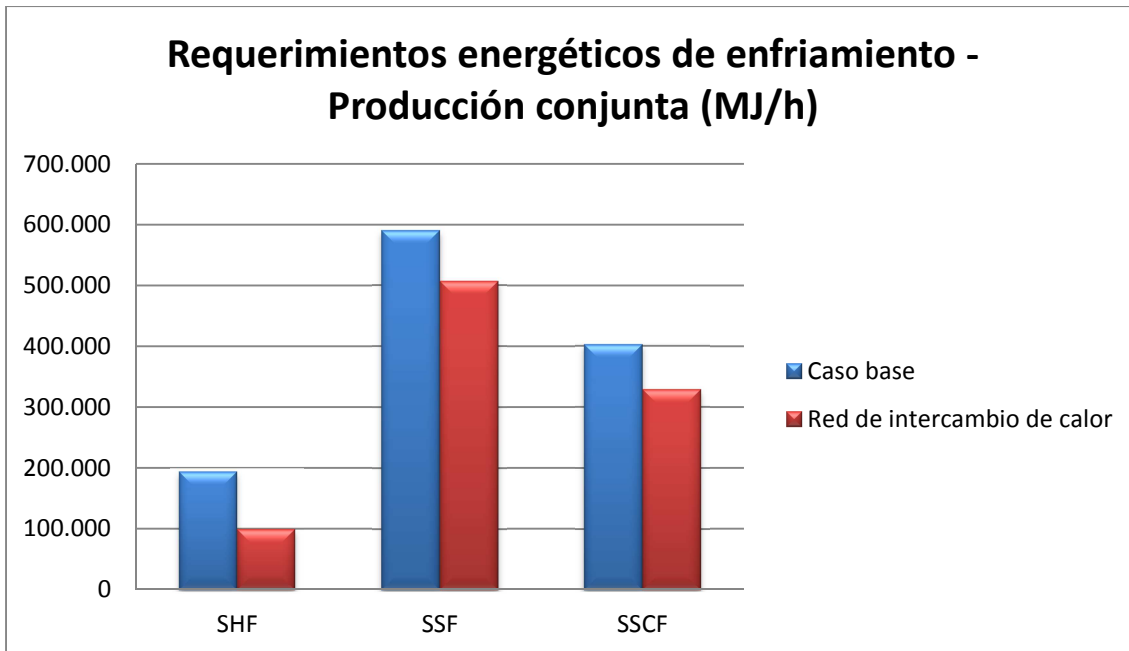


Figura 21. Requerimientos energéticos de enfriamiento para la producción conjunta FUENTE: Autor

Conforme con los procesos de producción de primera y segunda generación, los requerimientos energéticos de enfriamiento son mayores que los de calentamiento. Lo cual indica que la producción de bioetanol presenta una disponibilidad de energía para ser aprovechada a través de las diferentes corrientes del proceso, sin importar el tipo de proceso. Las mayores diferencias entre enfriamiento y calentamiento, en orden descendente, las presentan la ruta 2, 3 y 1.

El diseño de una red de intercambio de calor permite un ahorro mayor que en primera y segunda generación, siendo los requerimientos de calentamiento 3,5%; 6% y 2,4% del caso base, para las rutas 1, 2 y 3, respectivamente. Los requerimientos energéticos más bajos de calentamiento los presentaría la ruta 3 con 1 787 MJ/h. Adicionalmente, se reducirían los servicios de enfriamiento en un 48,5%; 14% y 18%, para las rutas 1, 2 y 3, respectivamente, exhibiendo la ruta 1 los menores requerimientos con aproximadamente 100 000 MJ/h. A pesar de los menores requerimientos de calentamiento presentados por la ruta 3, en cuanto a

los requerimientos energéticos combinados (calentamiento y enfriamiento), la ruta 1 presenta menores requerimientos que la ruta 3.

La implementación de la red de intercambio de calor conllevaría la transferencia de energía entre corrientes del proceso equivalente a 93 804 MJ/h, 82 924, y 73 605 MJ/h, para las rutas 1, 2 y 3, respectivamente. El número de corrientes que comparten energía entre sí son mayores en la ruta 1 (42 corrientes) que en la ruta 2 (14 corrientes) y 3 (16 corrientes). En la ruta 1 el 63% de la energía transferida entre corrientes pasó desde el reactor de pretratamiento, el intercambiador inicial de Neutralización y dos evaporadores hasta los separadores flash de Pretratamiento e Hidrólisis/Fermentación y el intercambiador inicial de Pretratamiento. En la ruta 2 el 80% de la energía se transfirió desde la primera torre de destilación y el reactor de Pretratamiento hasta el separador flash de Pretratamiento y los intercambiadores de calor iniciales de Pretratamiento y Destilación. En la ruta 3 el 79% de la energía fluyó desde los mismos equipos que la ruta 2 hasta los intercambiadores iniciales de Clarificación y Pretratamiento y el separador flash de Pretratamiento.

En la figura 22 se presenta la energía transferida entre las corrientes de cada proceso, por medio de la creación de redes de intercambio de calor. En las columnas de segunda generación se ha sumado la energía transferida en la primera generación, de modo que se pueda determinar si existe una mayor transferencia en los procesos de producción conjunta, en comparación con los procesos individuales. Los tres procesos de producción conjunta exhiben mayor transferencia de energía entre corrientes, comparado con la suma de los dos procesos individuales. La diferencia entre la producción conjunta y los procesos individuales, para las rutas con SHF, SSF y SSCF, corresponde a 3 496, 9 317, 5 590 MJ/h, respectivamente. Esto significaría que en la eventualidad de producir bioetanol de primera y segunda generación, y adicionalmente implementar una red de intercambio de calor, si se hace a través de un proceso conjunto (usando cualquier de las tres tecnologías) se conseguiría una mayor reducción en los servicios industriales. La diferencia entre la producción conjunta y los procesos

individuales aparenta no ser muy grande, sin embargo, si se considera la cantidad de horas en las cuales opera una planta por año, y el número de años que estaría en operación, estas cifras pueden llegar a ser indiscutiblemente relevantes.

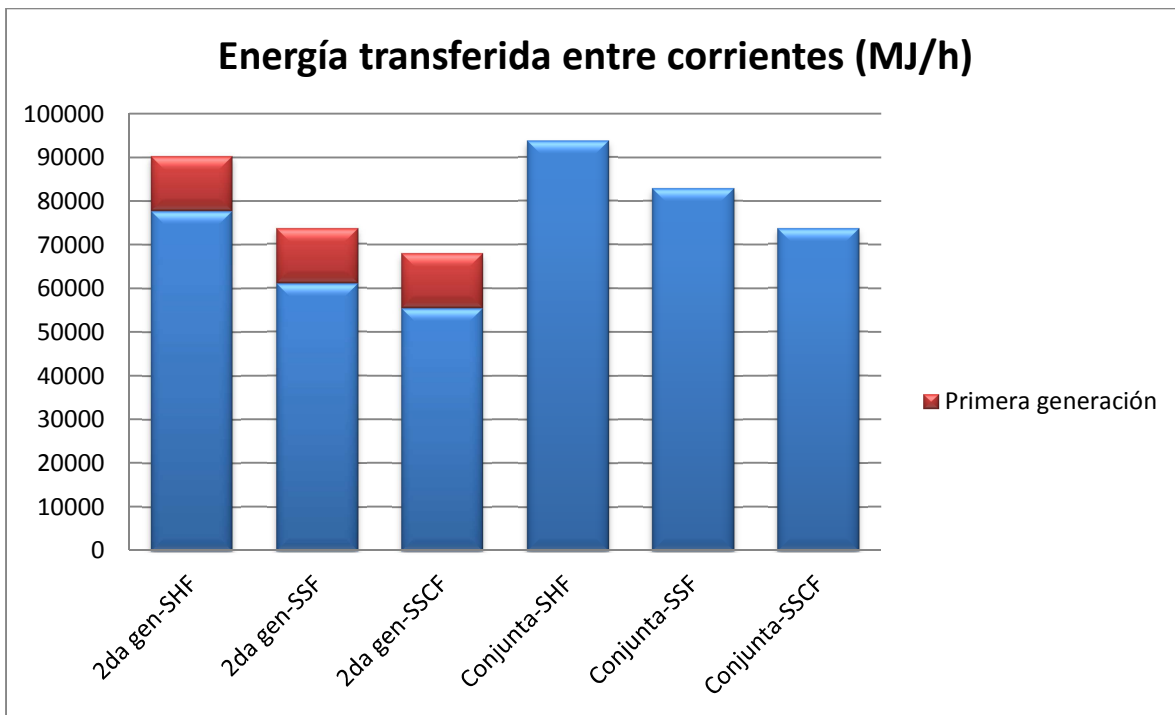


Figura 22. Transferencia de energía entre corrientes FUENTE: Autor

Relación energía producida/energía requerida

Una variable importante a evaluar en un proceso es la relación entre la energía producida y la energía requerida para producir un bien, más particularmente un combustible. En la tabla 13 se pueden observar los resultados para cada una de las rutas, teniendo en cuenta el proceso con y sin integración energética.

Tabla 13. Relación energía producida/energía requerida para las siete rutas de producción de bioetanol

Rutas	Relación	
	Caso base	Con integración energética
1	0,72	2,10
2	0,38	1,15
3	0,62	4,61
4	0,66	3,45
5	0,58	16,79
6	0,63	10,45
7	0,76	32,11

FUENTE: Autor

Para el cálculo de esta relación se utilizó el poder calorífico del bioetanol, equivalente a 26,952 MJ/kg (Boundy, Diegel, Wright & Davis, 2011) y la energía que necesita ser provista al proceso.

Es importante resaltar que los resultados sin integración energética (caso base) indican que el proceso no es energéticamente viable, presentando una similitud en los valores encontrados por Ojeda Delgado (2011). Sin embargo, por medio de las redes de intercambio de calor todos las siete rutas superan la barrera de la viabilidad energética (relación igual a 1).

La razón para el cambio notable entre el caso base y la aplicación de las redes de intercambio de calor es la gran cantidad de energía disponible en el proceso, tal como se mencionó previamente durante el análisis de la integración energética.

Las rutas que mejores resultados presentan son las rutas de producción conjunta de bioetanol de primera y segunda generación. Este resultado es congruente con el resultado obtenido sobre la reducción de requerimientos energéticos en estas rutas, el cual evidencia una reducción de los requerimientos energéticos de calentamiento de por lo menos del 94%.

Es importante de igual forma resaltar que el cálculo de esta relación es un proceso altamente subjetivo ya que requiere de la decisión de las variables que se van a tomar para el cálculo. Por ejemplo, un proceso puede tener más de un producto con alto contenido energético; los cálculos de la relación dependerán de qué se considere como energía producida, es decir cuáles de las corrientes de salida se consideren como productos para la producción de energía.

Comparación con otros trabajos

Realizando una comparación con otros trabajos parecidos, se encuentra que los valores de irreversibilidades por kilogramo de etanol son muy similares a los presentados por Ojeda Delgado (2011), en los cuales éstas se encuentran en un rango entre 19 y 50 MJ/kg etanol. La razón de las diferencias entre su trabajo, en el cual se evalúan rutas de producción de bioetanol de segunda generación, y el trabajo presente se basa en las diferencias de configuración de los procesos. Igualmente, Ofori-Boateng y Teong Lee (2013) comparan pretratamientos para materiales lignocelulósicos y reportan valores en los rangos de 13 a 19 MJ/kg etanol. En el trabajo realizado por Modarresi, Kravanja & Friedl (2012) se observan valores de servicios de enfriamiento y calentamiento en el mismo orden de magnitud con alrededor de 100 000 MJ/h. Una vez realizada la integración energética, se presentan valores de alrededor de 60 000 MJ/h. El trabajo realizado buscaba analizar la producción de bioetanol lignocelulósico adjunto a la producción de biometano y un sistema de cogeneración, a partir de aproximadamente 13 000 kg/h de material lignocelulósico (paja de trigo).

4. CONCLUSIONES

Por medio del presente trabajo se consiguió comparar procesos individuales de producción de bioetanol de primera y segunda generación con sus respectivos procesos de producción conjunta de bioetanol. La comparación fue realizada con ayuda de las metodologías de análisis exergético e integración de procesos. Conformemente, se identificaron los principales focos de pérdida de exergía y los procesos que contribuyen a la mayor parte de los requerimientos energéticos.

La implementación de las rutas de producción de bioetanol de segunda generación en la industria actual contribuiría a aumentar la producción hasta alcanzar aproximadamente un 400% del valor actual. Adicionalmente, por medio de los procesos de producción conjunta ocurre una reducción en los requerimientos de agua y la producción de vinazas.

Las irreversibilidades para las 7 rutas de producción de bioetanol son 17,89; 20,7; 19,31; 15,71; 18,12; 19,85 y 17,52 MJ/kg etanol, respectivamente. Por ende, la tecnología de hidrólisis/fermentación SSCF demuestra presentar la menor cantidad de irreversibilidades (rutas 4 y 7). En lo que respecta a la comparación entre producción conjunta y procesos individuales, la producción conjunta con tecnología SHF disminuye las irreversibilidades por kilogramo de etanol, contrario a SSF y SSCF en las cuales aumenta. Es importante resaltar que los servicios industriales contribuyen significativamente a la generación de estas irreversibilidades, con valores que varían entre 30% y 58% para las siete rutas de producción de bioetanol. De igual forma, cabe mencionar que una de los procesos que más conlleva la pérdida de exergía es el cambio de fase del agua entre vapor y líquido, ya que el vapor posee 10 veces más exergía química que el líquido.

Las eficiencias exergéticas globales para las 7 rutas de producción de bioetanol son 37,13%; 4,92%; 2,64%; 10,33%; 11,36%; 10,16% y 17,41%, respectivamente. A pesar de valores bajos de eficiencias exergéticas globales, las etapas de los procesos, en su mayoría, presentan eficiencias exergéticas altas, excepto la etapa

Neutralización. De forma consecuente con el anterior párrafo, la tecnología SSCF presenta mejores eficiencias exergéticas que las otras dos tecnologías.

La creación de las redes de intercambio disminuyó los requerimientos energéticos en todas las 7 rutas de producción de bioetanol. La reducción en los servicios de enfriamiento correspondió al 17%, 55%, 52%, 47%, 49%, 14% y 18%, respectivamente. La reducción en los servicios de calentamiento ascendió al 65%, 67%, 87%, 81%, 97%, 94% y 98%, respectivamente.

La transferencia de calor por medio de las redes de intercambio de calor fue mayor en las rutas de producción conjunta de bioetanol, comparada con la suma de la transferencia de calor de la primera y segunda generación. Adicionalmente, la tecnología SHF permite una mayor transferencia de calor entre corrientes del proceso. En la segunda generación, la ruta con tecnología SSF presenta los más bajos requerimientos energéticos combinados, antes y después de la integración energética, seguida muy de cerca por SSCF. En la producción conjunta de bioetanol, la ruta con tecnología SHF presenta los más bajos requerimientos combinados, antes y después de la integración energética. Finalmente, es relevante mencionar que los servicios de enfriamiento superan a los servicios de calentamiento para cada una de las 7 rutas de producción de bioetanol, indicando la cantidad de energía disponible a través de las corrientes de los procesos.

Con base en lo anterior, se concluye que los procesos de producción conjunta de bioetanol son los más adecuados para aumentar la producción de este biocombustible en el país, debido a la disminución en los requerimientos de agua, menores requerimientos de calentamiento y mejores eficiencias exergéticas que el proceso de segunda generación por aparte. En particular la tecnología SSCF, la cual presenta mejores eficiencias exergéticas y los menores requerimientos de calentamiento.

Finalmente, se puede estimar la validez de los resultados encontrados en este trabajo debido a la similitud encontrada con los resultados de trabajos similares en los cuales se aplican las herramientas aplicadas en este trabajo.

5. RECOMENDACIÓN

Con el objetivo de obtener resultados más cercanos a la realidad se recomienda realizar simulaciones de estos procesos en estado dinámico, de forma que se puedan observar las variaciones en las variables más importantes de operación y la producción final de bioetanol. Esto daría un mayor entendimiento de cómo se estaría aprovechando la energía en los diferentes procesos.

6. REFERENCIAS

A clean, renewable fuel. UNICA-Sugarcane Industry Association. *Consultado 26 de abril de 2012.*

<http://english.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=11891360-41CC-459C-9A22-191506941834>

AKGUL, O.; SHAH, N. & PAPAGEORGIOU, L. G. An optimisation framework for a hybrid first/second generation bioethanol supply chain. *Computers and Chemical Engineering*. 2012., doi:10.1016/j.compchemeng.2012.01.012.

ASOCAÑA, 2010. Guía ambiental para el subsector de la caña de azúcar.

BALAT, Mustafa. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy conversion and management*. Vol 52 p 858-875. 2011.

Biofuels - OECD-FAO Agricultural Outlook 2011-2020. *Consultado 25 de abril de 2012.*

<http://stats.oecd.org/viewhtml.aspx?QueryId=30104&vh=0000&vf=0&l&il=blank&lang=en>

BOUNDY, B.; DIEGEL, S. W.; WRIGHT, L. & DAVIS, S. C. *Biomass Energy Databook 4 ed.* Report for the Office of the Biomass Program Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy- Report ORNL/TM-2011/446. Apéndice A. 2011.

CARDONA, C. A. & SÁNCHEZ, O. J. Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass. *Energy*. Vol 31 p 2447-2459. 2006.

CARRASCO, C.; BAUDEL, H.M.; SENDELIUS, J.; MODIG, T.; ROSLANDER, C.; GALBE, M.; HAHN-HÄGERDAL, B.; ZACCHI, G. & LIDÉN, G. SO₂-

catalyzed steam pretreatment and fermentation of enzymatically hydrolyzed sugarcane bagasse. *Enzyme and Microbial Technology*. Vol 46 p 64-73. 2010.

Cifras Informativas del Sector Biocombustibles, Etanol anhidro de caña. Fedebiocombustibles. 2012. <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/noticias-fedebiocombustibles-sub-38.htm>

DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; ROCHA, G. J. M.; PRADELLA, J. G. C.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL FILHO, R. & BONOMI, A. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production?. *Bioresource Technology*. Vol 102 p 8964-8971. 2011.

DIAS, M. O. S.; ENSINASA, A. V.; NEBRA, S. A.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C. E. V. & WOLF MACIEL, M. R. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. *Chemical Engineering Research And Design*. Vol 87 p 1206-1216. 2009.

DIAS, M. O. S.; JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETT, O.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL FILHO, R. & BONOMI, A. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresource Technology*. Vol 103 p 152-161. 2012.

DIAS, M. O. S.; MODESTO, M.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; MACIEL FILHO, R. & ROSSELL, C. E. V. Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. *Energy*. Vol 36 p 3691-3703. 2011.

DIEN, B. S.; BOTHAST, R. J.; NICHOLS, N. N. & COTTA, M. A. The U.S. corn ethanol industry: An overview of current technology and future prospects. *International Sugar Journal*., Vol 104 p 204-211. 2002.

DINCER, I & ROSEN, M. A. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Amsterdam - Boston - Heidelberg - London - New York -

Oxford - Paris - San Diego - San Francisco - Sydney - Tokyo: Elsevier, 1ra Ed p 27, 28. 2007.

El ABC de los Alcoholes Carburantes. Fedebiocombustibles. *Consultado 28 de abril de 2012.* <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/main-pagina-id-5.htm>

EL-HALWAGI, M. M. Process Integration. Process Systems Engineering Elsevier Academic Press 2006. Vol 7 p 231-252.

En 2011: la producción de Etanol llegará a 23 400 millones de galones en el mundo. ¿Sabía que?. Fedebiocombustibles. *Consultado 27 de junio de 2012.* <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-645.htm>

ESCALANTE HERNÁNDEZ, H; ORDUZ PRADA, J.; ZAPATA LESMES, H. J.; CARDONA RUIZ, M. C. & DUARTE ORTEGA, M. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética. 2010.

<http://www1.upme.gov.co/index.php/servicios-de-informacion/publicaciones/category/1-energia.html>

Ethanol fuel basics. Alternative Fuels and Advanced Vehicles Data Center, United States Department of Energy (US-DOE). *Consultado 25 de abril de 2012.* http://www.afdc.energy.gov/afdc/fuels/ethanol_fuel_basics.html

FANG, X., SHEN, Y., ZHAO, J., BAO, X. & QU, Y. Status and prospect of lignocellulosic bioethanol production in China. Bioresource Technology. Vol 101 p 4814-4819. 2010.

Flex-Fuel: pure ethanol or mixed with gasoline. UNICA-Sugarcane Industry Association. *Consultado 26 de abril de 2012.*

<http://english.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=7B6C60C2-3136-483F-A555-541C38A360D0>

FU, N.; PEIRIS, P.; MARKHAM, J., BAVOR, J. A novel co-culture process with *Zymomonas mobilis* and *Pichia stipitis* for efficient ethanol production on

glucose/xylose mixtures. *Enzyme and Microbial Technology*. Vol 45 p 210-217. 2009.

FURLAN, F. F., COSTA, C. B. B., FONSECA, G. C., SOARES, R. P., SECCHI, A. R., CRUZ, A. J. G., & GIORDANO, R. C. Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modelling. *Computers and Chemical Engineering* . 2010., doi:10.1016/j.compchemeng.2012.04.002.

GIAROLA, S.; ZAMBONI, A. & BEZZO F.. Environmentally conscious capacity planning and technology selection for bioethanol supply chains. *Renewable Energy*. Vol 43 p 61-72. 2012.

Global ethanol production-Data, analysis and trends. *Alternative Fuels and Advanced Vehicles Data Center*, United States Department of Energy (US-DOE). *Consultado 28 de Mayo de 2012*.
<http://www.afdc.energy.gov/afdc/data/fuels.html>

GOMEZ FUENTES, A. M. & JAIMES VILLAREAL, N. A. Estudio de la incidencia del suministro de CO₂ en el crecimiento de las microalgas en un fotobioreactor a escala laboratorio. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. 2010.

GRISI, E. F.; YUSTA, J. M. & KHODR, H. M. A short-term scheduling for the optimal operation of biorefineries. *Energy Conversion and Management*. Vol 52 p 447-456. 2011.

HAMELINCK, C. N., VAN HOOIJDONK, G. & FAAIJ, A. P. C. Prospects for ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance as development progresses, Report NWS-E-2003-55. Utrecht University, Copernicus Institute-Science Technology Society. 2003.

HAMELINCK, C. N., VAN HOOIJDONK, G. & FAAIJ, A. P. C. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass & Bioenergy*. Vol 28 p 384-410. 2005.

HENDRIKS, A.T.W.M. & ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. Vol 100 p 10-18. 2009.

HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering*. Amsterdam - Oxford - New York - Tokyo: Elsevier, 3ra Ed p 497. 1986.

KARAMARKOVIC, R. & KARAMARKOVIC, V. Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures. *Energy*. Vol 35 p 537-549. 2009.

KUMAR, S., SINGH, S. P., MISHRA, I. M., MISHRA & ADHIKARI, D. K. Recent advances in production of bioethanol from lignocellulosic biomass. *Chemical Engineering Technology*. Vol 32 p 517-526. 2009.

LARRAHONDO, J.E. Calidad de la caña de azúcar. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, p 337-354. 1995.

LOPEZ, N. Panel Demo plants and the road to Economic & Financial Assessment. Second International Conference on Lignocellulosic Ethanol. Verona 11-13 October 2011.

Mitos y Realidades de los Biocombustibles en Colombia. Fedebiocombustibles. 2011. <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/noticias-fedebiocombustibles-cat-35.htm>

MODARRESI, A.; KRAVANJA, P. & FRIEDL, A. Pinch and exergy analysis of lignocellulosic ethanol, biomethane, heat and power production from straw. *Applied Thermal Engineering*. Vol 43 p 20-28. 2012.

MOSIER, N., WYMAN , C., DALE, B., ELANDER, R., LEE, Y. Y., HOLTZAPPLE , M. & LADISCH, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. Vol 96 p 673-686. 2005.

OFORI-BOATENG , C. & TEONG LEE, K. Comparative thermodynamic sustainability assessment of lignocellulosic pretreatment methods for bioethanol production via exergy analysis. *Chemical Engineering Journal*. Vol 228 p 162-171. 2013.

OJEDA DELGADO, K. A. Aplicación de análisis exergético para la evaluación de procesos de producción de bioetanol de segunda generación. Tesis doctoral, Universidad Industrial de Santander. 2011.

OJEDA, K.; ÁVILA, O.; SUÁREZ, J. & KAFAROV, V. Evaluation of technological alternatives for process integration of sugarcane bagasse for sustainable biofuels production—Part 1. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol 89 (3) p 270-279. 2011.

OJEDA, K. & KAFAROV, V. Exergy analysis of enzymatic hydrolysis reactors for transformation of lignocellulosic biomass to bioethanol. *Chemical Engineering Journal*. Vol 154 p 390-395. 2009.

OLSSON, L. & HAHN-HÄGERDAL, B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for ethanol production. *Enzyme and Microbial Technology*. Vol 18 p 312-331. 1996.

ORTÍZ LÓPEZ, A. I. Pretratamiento de la biomasa lignocelulósica para la producción de biocombustibles: Aspectos Técnicos y Económicos. *Avances en bioenergía*, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Cuajimalpa. 2008.

PEREIRA HERNÁNDEZ, X. I. & ALBARRACÍN CABALLERO, J. D. Evaluación del proceso de producción de bioetanol de segunda generación a partir de residuos lignocelulósicos utilizando metodologías de análisis exergético e

integración de procesos. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. 2010.

QUINTERO, J.A.; MONTOYA, M.I.; SÁNCHEZ, O.J.; GIRALDO O.H. & CARDONA C.A. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case. *Energy*. Vol 33 p 385-399. 2008.

QUINTERO DALLOS, V. Evaluación del potencial de producción de etanol combustible a partir de biomasa secundaria disponible en la agroindustria azucarera colombiana. Tesis de magíster, Universidad Industrial de Santander. 2009.

RAMIREZ NOVOA, C. X. Simulación del proceso de producción dual bioetanol combustible- azúcar. Tesis de magíster, Universidad Industrial de Santander. 2009.

Resource Center-How ethanol is made. Renewable Fuels Association (RFA). Consultado 20 de agosto de 2012. <http://www.ethanolrfa.org/pages/how-ethanol-is-made>

RIOS CÁRDENAS, O. A. Estudio del efecto de las vinazas en la composición de *Chlorella vulgaris* UTEX 1803 para la producción de biocombustibles y productos de valor agregado. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander. 2013.

RUDOLF, A.; BAUDEL, H.; ZACCHI, G.; HAHN-HÄGERDAL, B. & LIDÉN, G. Simultaneous Saccharification and Fermentation of Steam-Pretreated Bagasse Using *Saccharomyces cerevisiae* TMB3400 and *Pichia stipitis* CBS6054. *Biotechnology and Bioengineering*. Vol 99 (4) p 783-790. 2007.

SÁNCHEZ, O. J. & CARDONA, C. A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*. Vol 99 p 5270-5295. 2008

SANTOS, J.R.A.; LUCENA, M.S.; GUSMÃO, N.B. & GOUVEIA, E.R. Optimization of ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* UFPEDA 1238 in simultaneous saccharification and fermentation of delignified sugarcane bagasse. *Industrial Crops and Products*. Vol 36 p 584-588. 2012.

SEIDER, W. D., SEADER, J. D. & LEWIN, D. R., *Product and Process Design Principles. Synthesis Analysis, and Evaluation*. John Wiley and Sons. 2da edición p 302-315. 2004.

SOCOL, C. R.; VANDENBERGHE, L. P. S.; COSTA, B.; WOICIECHOWSKI, A. L.; DE CARVALHO, J. C.; MEDEIROS, A. B. P.; FRANCISCO, A. M. & BONOMI, L. J. Brazilian biofuel program: An overview. *Journal of Scientific & Industrial Research*. Vol 64 p 897-904. 2005.

Sugarcane today. UNICA-Sugarcane Industry Association. *Consultado 26 de abril de 2012.*

<http://english.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=D0B9E7BA-04AB-4637-9B69-7B2FECB82647>

SUN, Y. & CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*. Vol 83 p 1-11. 2001.

TALENS, L.; VILLALBA, G. & GABARRELL, X. Exergy analysis applied to biodiesel production. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 51 p 397-407. 2007.

TAN, H. T., LEE, K. T. & MOHAMED, A. R. Second-generation bio-ethanol (SGB) from Malaysian palm empty fruit bunch: Energy and exergy analyses. *Bioresource Technology*. Vol 101 p 5719-5727. 2010.

TENG, H. T.; LEE, K. T. & MOHAMED, A. R. Second-generation bio-ethanol (SGB) from Malaysian palm empty fruit bunch: Energy and exergy analyses. *Bioresource Technology*. Vol 101 p 5719-5727. 2010.

The Industry-Statistics. Renewable Fuels Association (RFA). *Consultado 25 de abril de 2012.* <http://www.ethanolrfa.org/pages/statistics>

TORGESEN, J. L.; BOWER, V. E. & SMITH, E. R. Boiling points of aqueous solutions of dextrose within the pressure range of 200 to 1,500 millimeters. *Journal of Research of the National Bureau of Standards.* Vol 45 (6) p 458-462. 1950.

VELÁSQUEZ ARREDONDO, H.; RUIZ COLORADO, A. & OLIVEIRA JUNIOR, S. Ethanol Production from Banana Fruit and its Lignocellulosic Residues: Exergy and Renewability Analysis. *International Journal of Thermodynamics.* Vol 12 p 155-162. 2009.

WALL, G. EXERGETICS. Exergy, Ecology, Democracy. Bucaramanga 2009. Memorias En <http://www.exergy.se>

WALL, G. Exergy a Useful concept within Resource Accounting. Report no. 77 42, Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, 1977.

WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J. & OWENS, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass & Bioenergy.* Vol 19 p 63-102. 2000.

WOOLEY, J. R. & PUTSCHE, V. Development of an Aspen Plus physical property database for biofuels components. Report NREL/MP-425-20685. National Renewable Energy Laboratory-NREL. 1996.

WOOLEY, R.; RUTH, M.; SHEEHAN, J.; IBSEN, K.; MAJDESKI, H & GALVEZ, A. Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios. Technical report-NREL/TP-580-26157. National Renewable Energy Laboratory. 1999.

YANG, B. & WYMAN, C. E. Pretreatment: the key to unlocking low-cost cellulosic ethanol. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*. Vol 21 p 26-40. 2008.

ZHANG, L.; LANG, Y.; WANG, C. & NAGATA, S. Promoting effect of compatible solute ectoine on the ethanol fermentation by *Zymomonas mobilis* CICC10232. *Process Biochemistry*. Vol 43 p 642-646. 2008.

ZHONG, C.; PETERS, C. J. & de SWAAN ARONS, J. Thermodynamic modeling of biomass conversion processes. *Fluid Phase Equilibria*. Vol 194-197 p 805-815. 2002.

ANEXO A

DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA RUTA 1: GENERAL Y POR ETAPAS

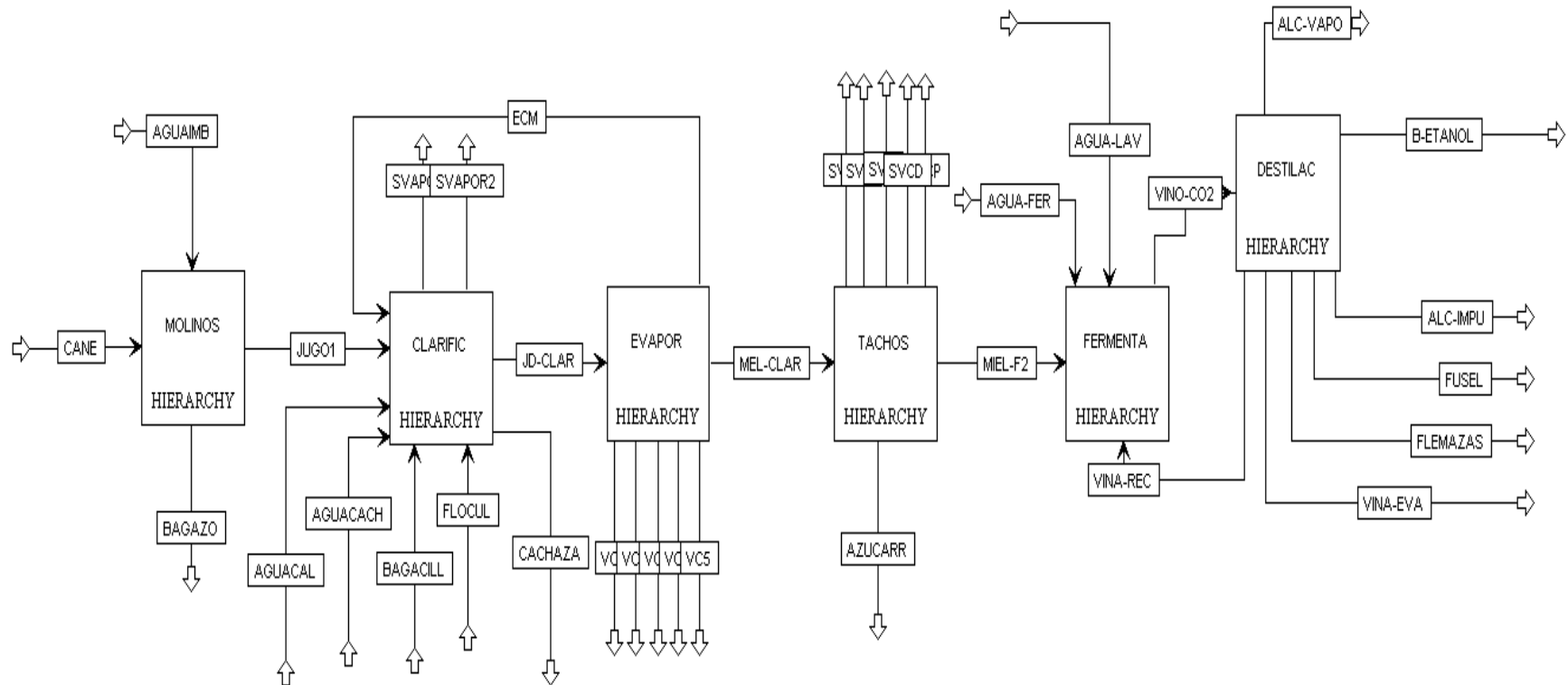
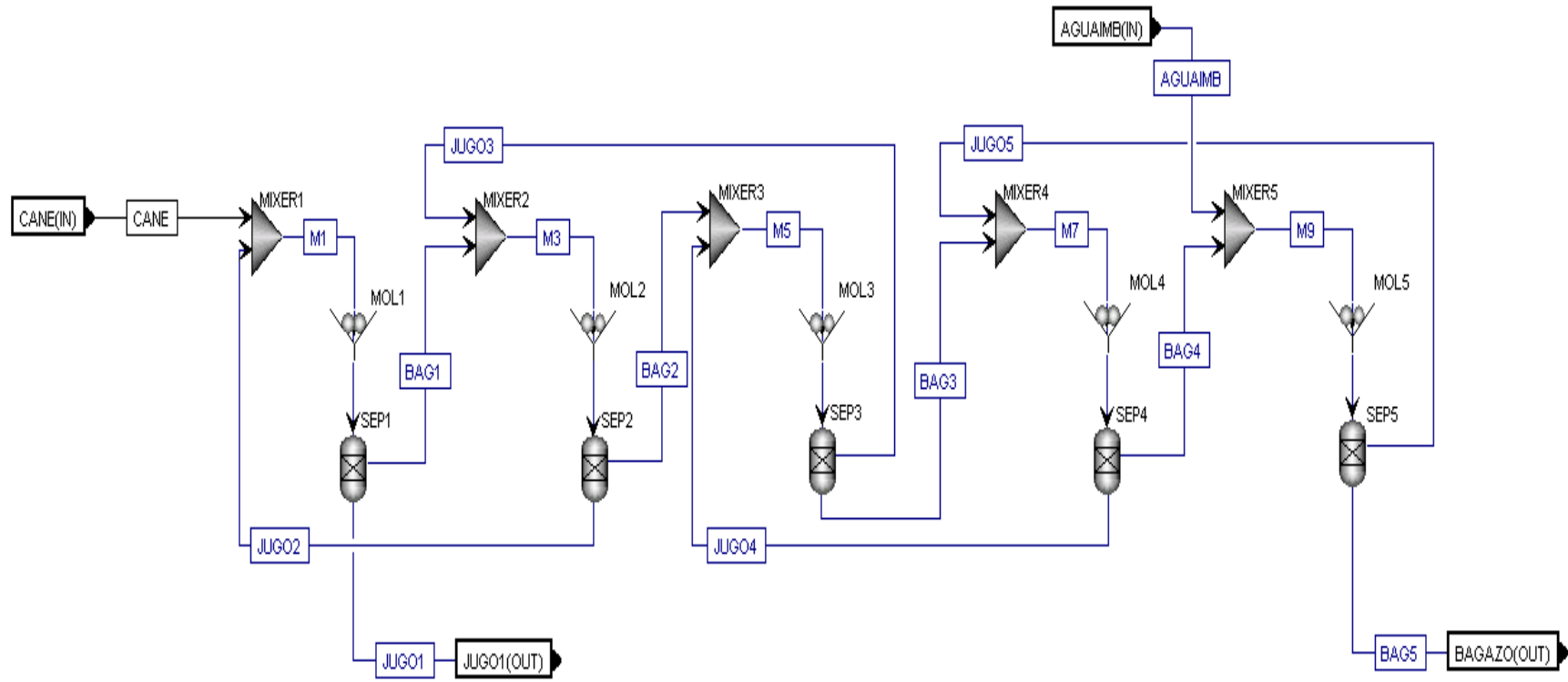
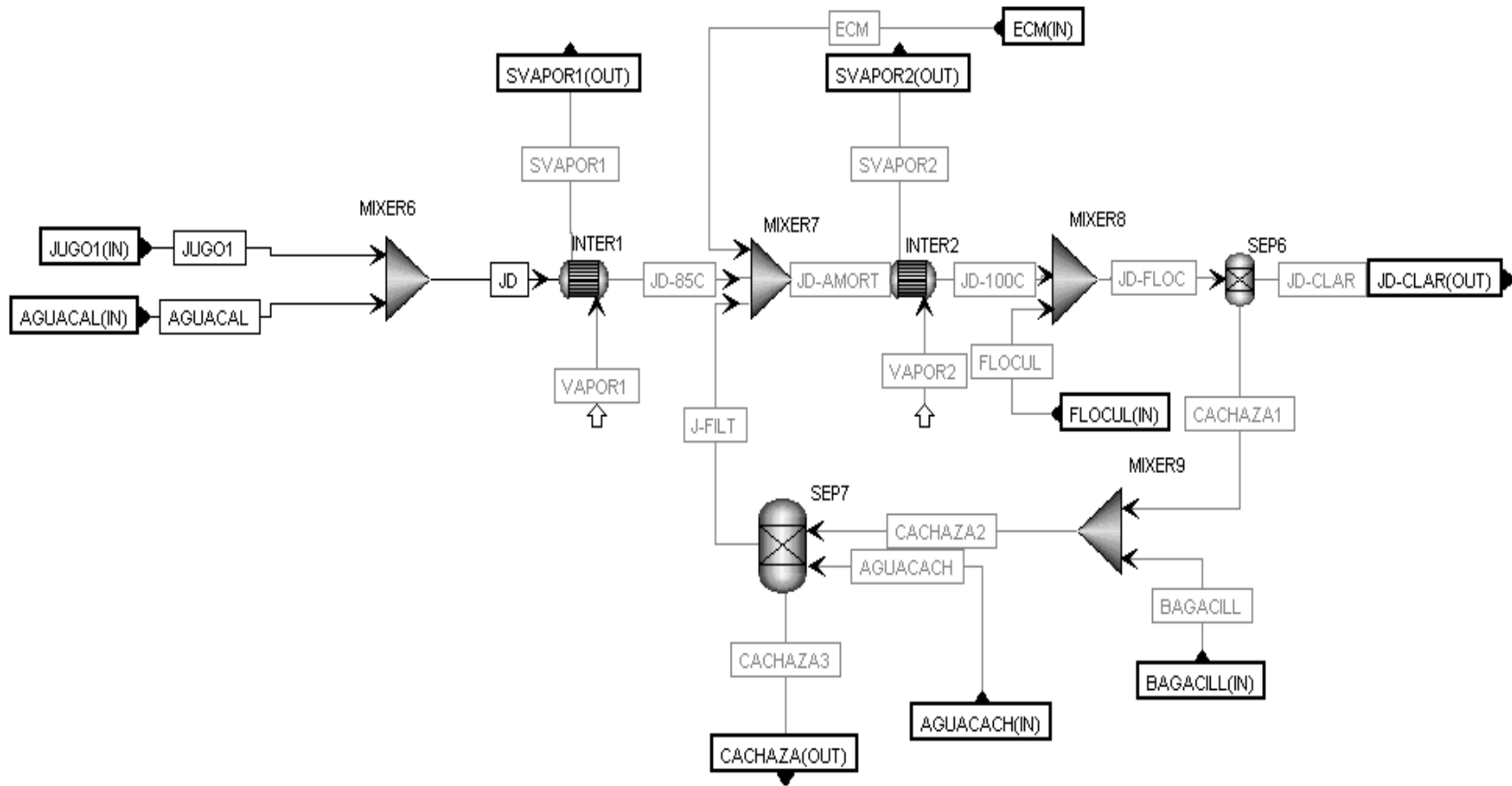


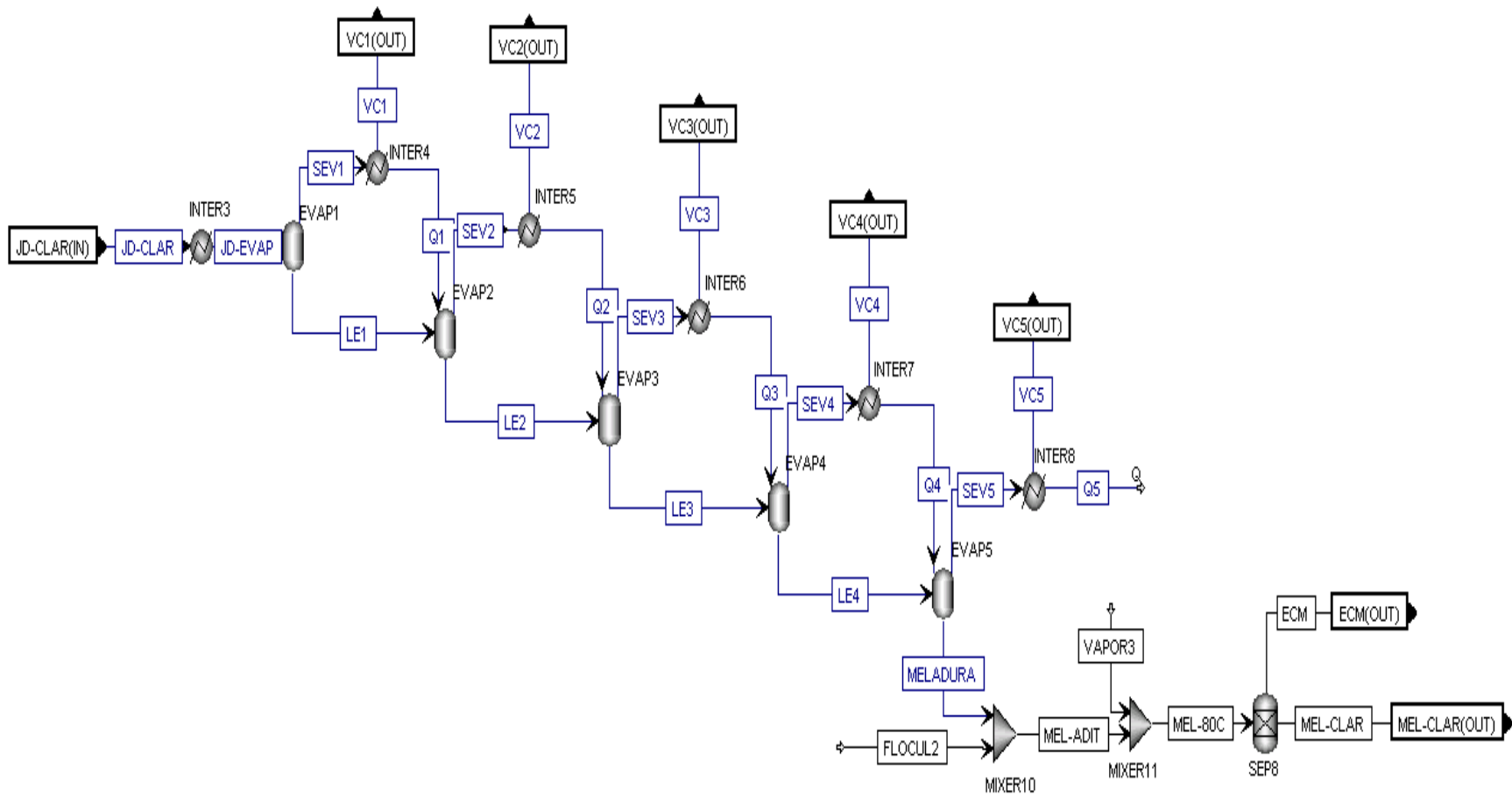
DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL (FUENTE: AUTOR)



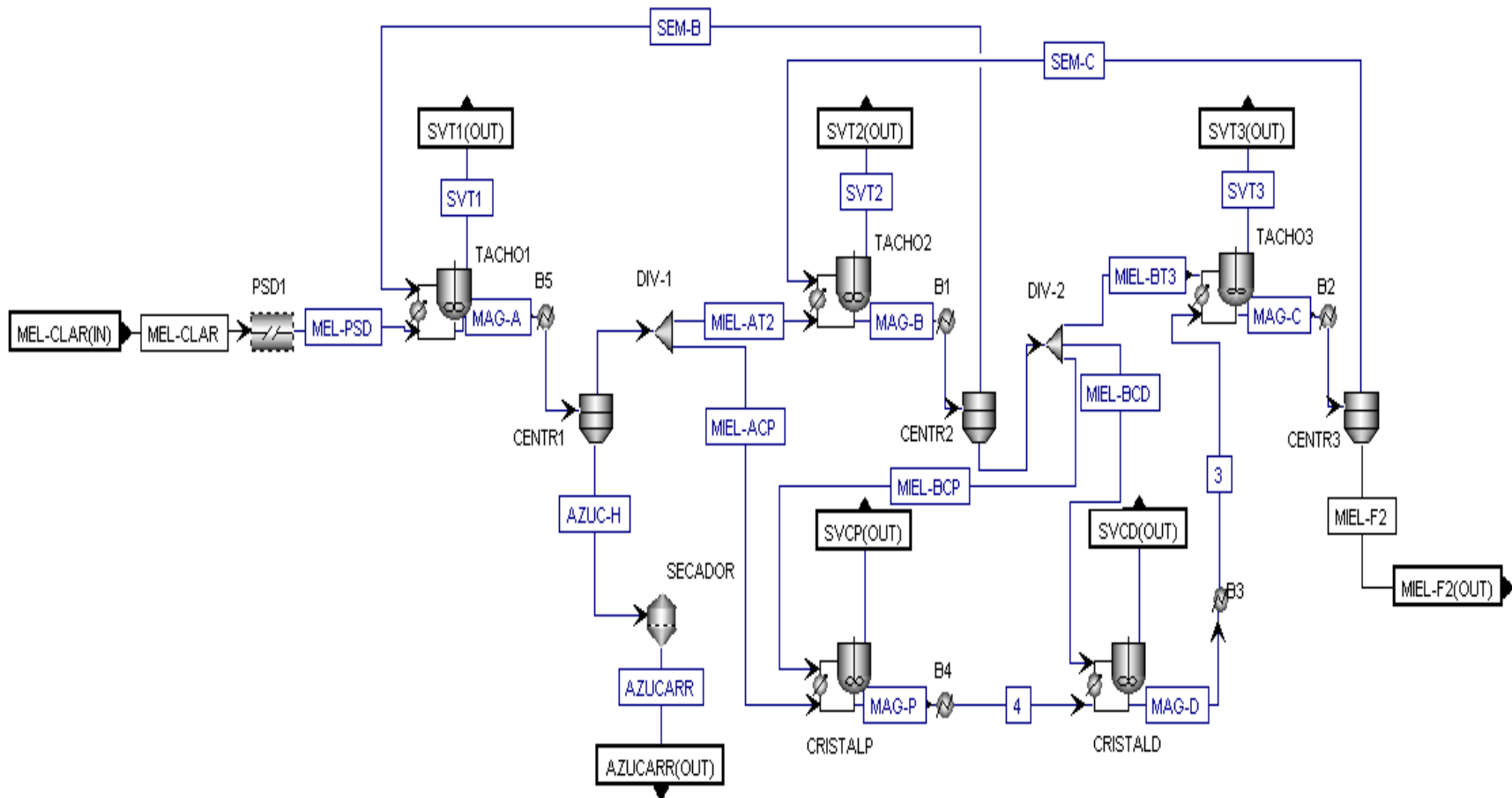
ETAPA MOLINOS (FUENTE: AUTOR)



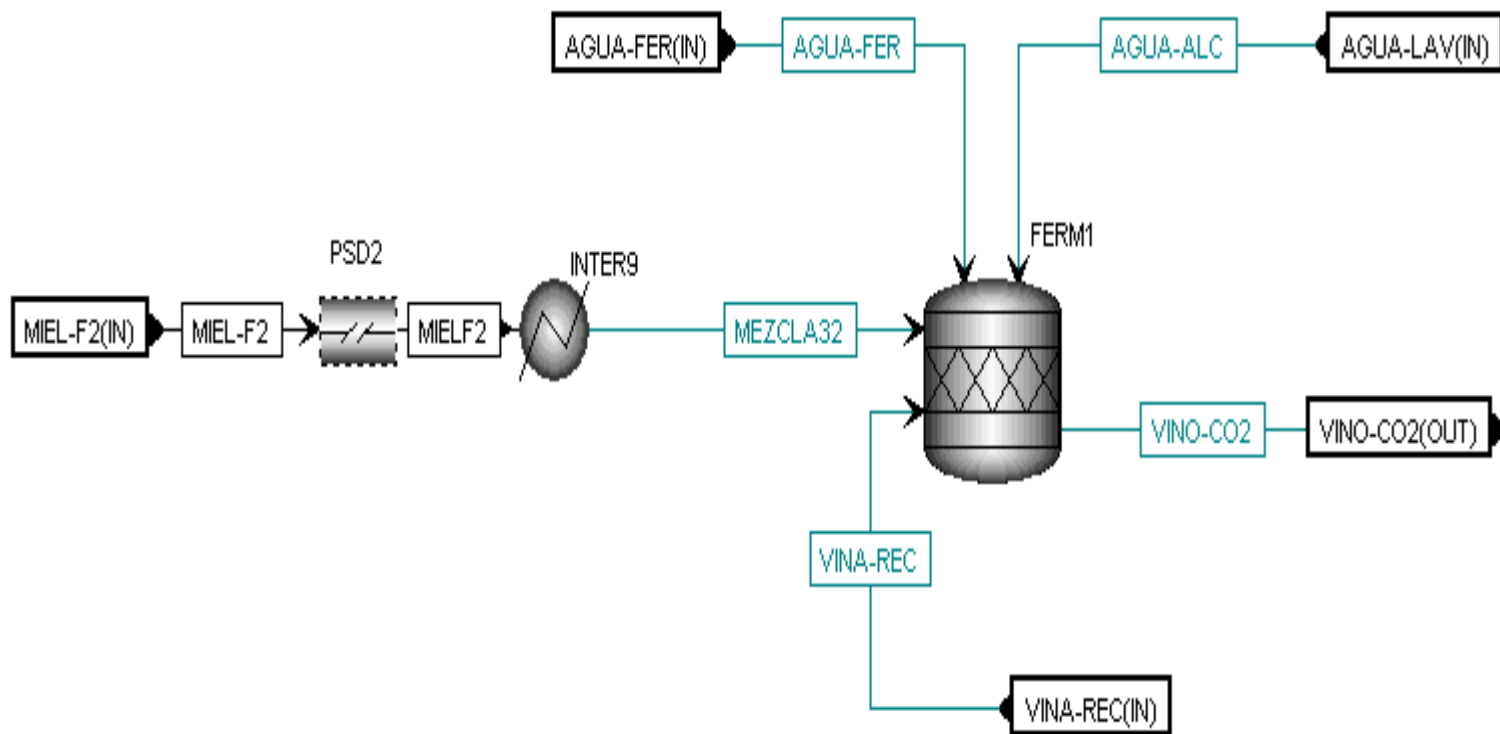
ETAPA CLARIFICACIÓN (FUENTE: AUTOR)



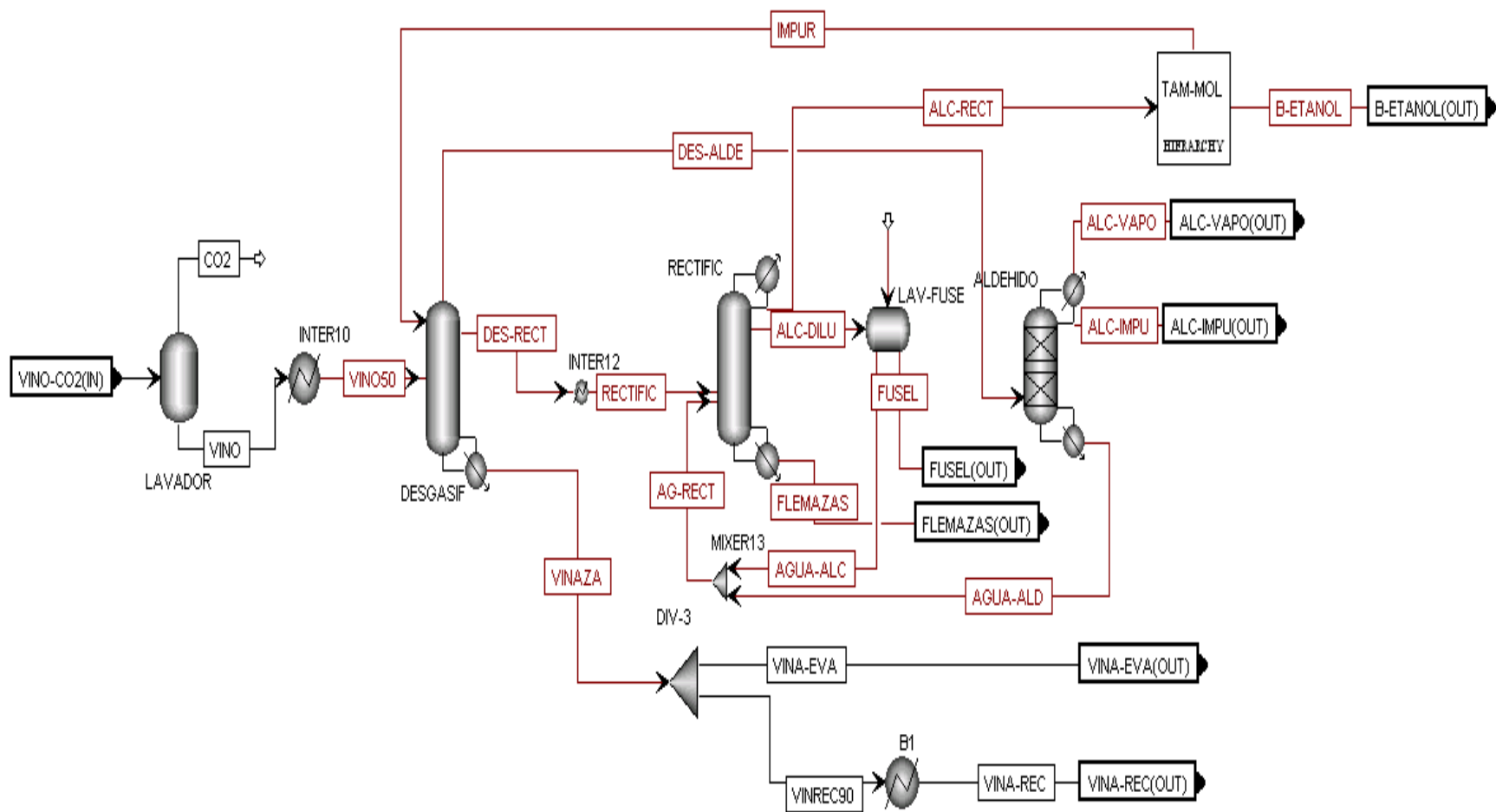
ETAPA EVAPORACIÓN (FUENTE: AUTOR)



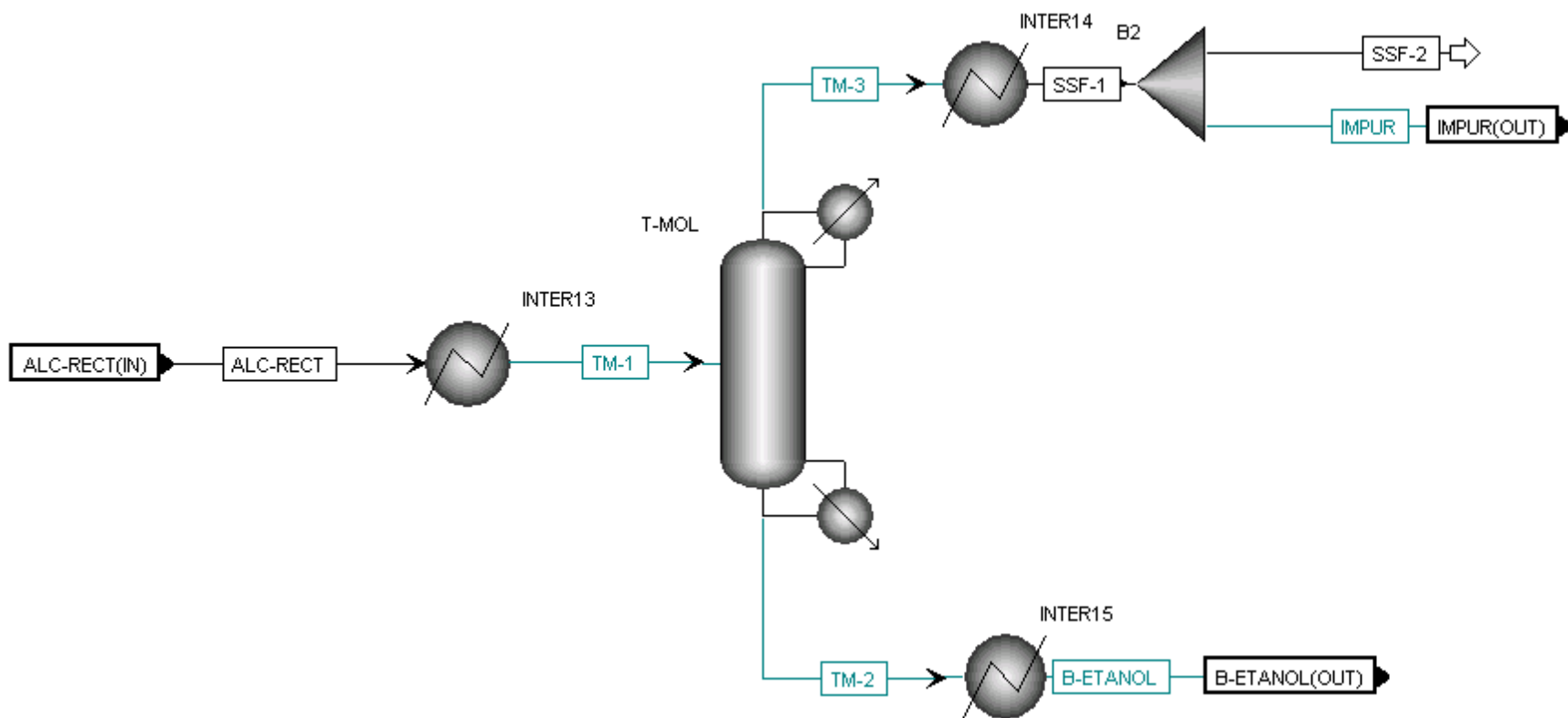
ETAPA TACHOS (FUENTE: AUTOR)



ETAPA FERMENTACIÓN (FUENTE: AUTOR)



ETAPA DESTILACIÓN (FUENTE: AUTOR)



ETAPA DESTILACIÓN-TAMICES MOLECULARES (FUENTE: AUTOR)

ANEXO B

DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA RUTA 2: GENERAL Y POR ETAPAS

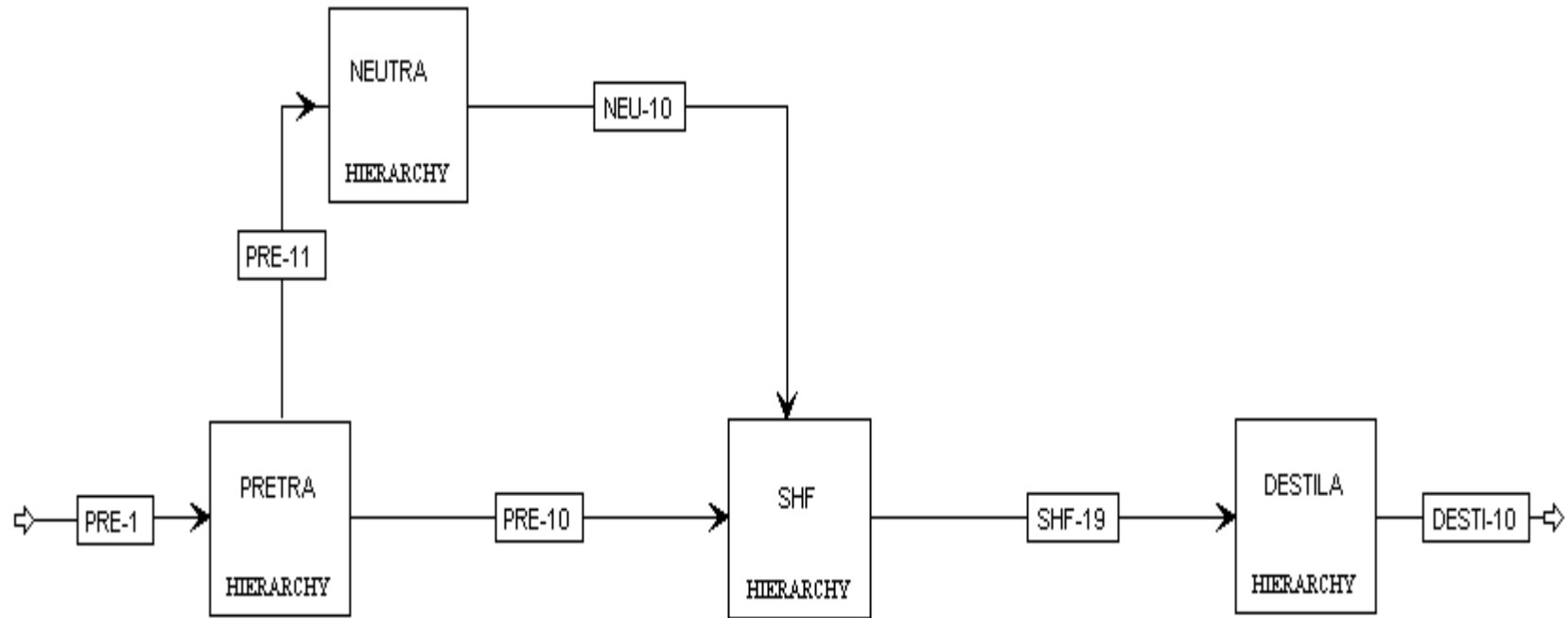
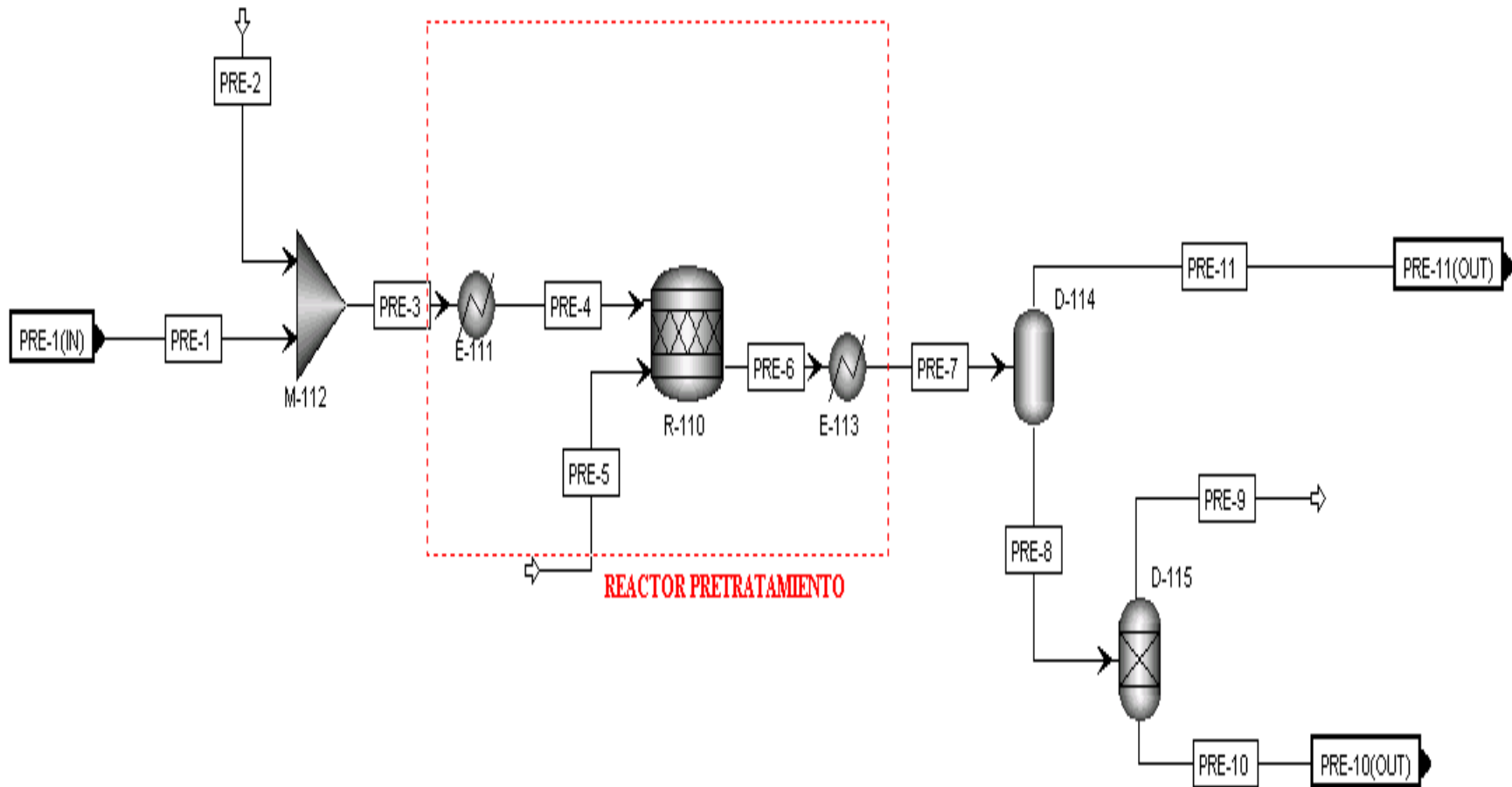
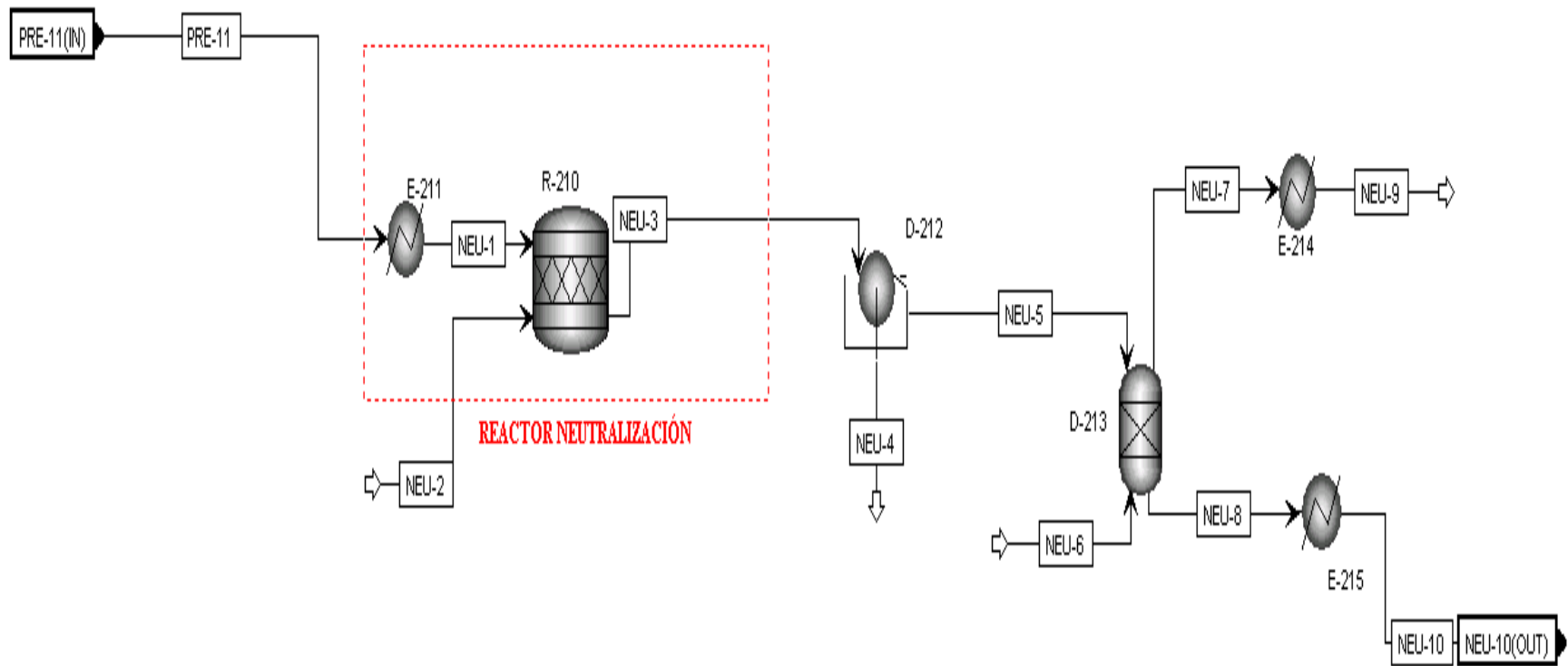


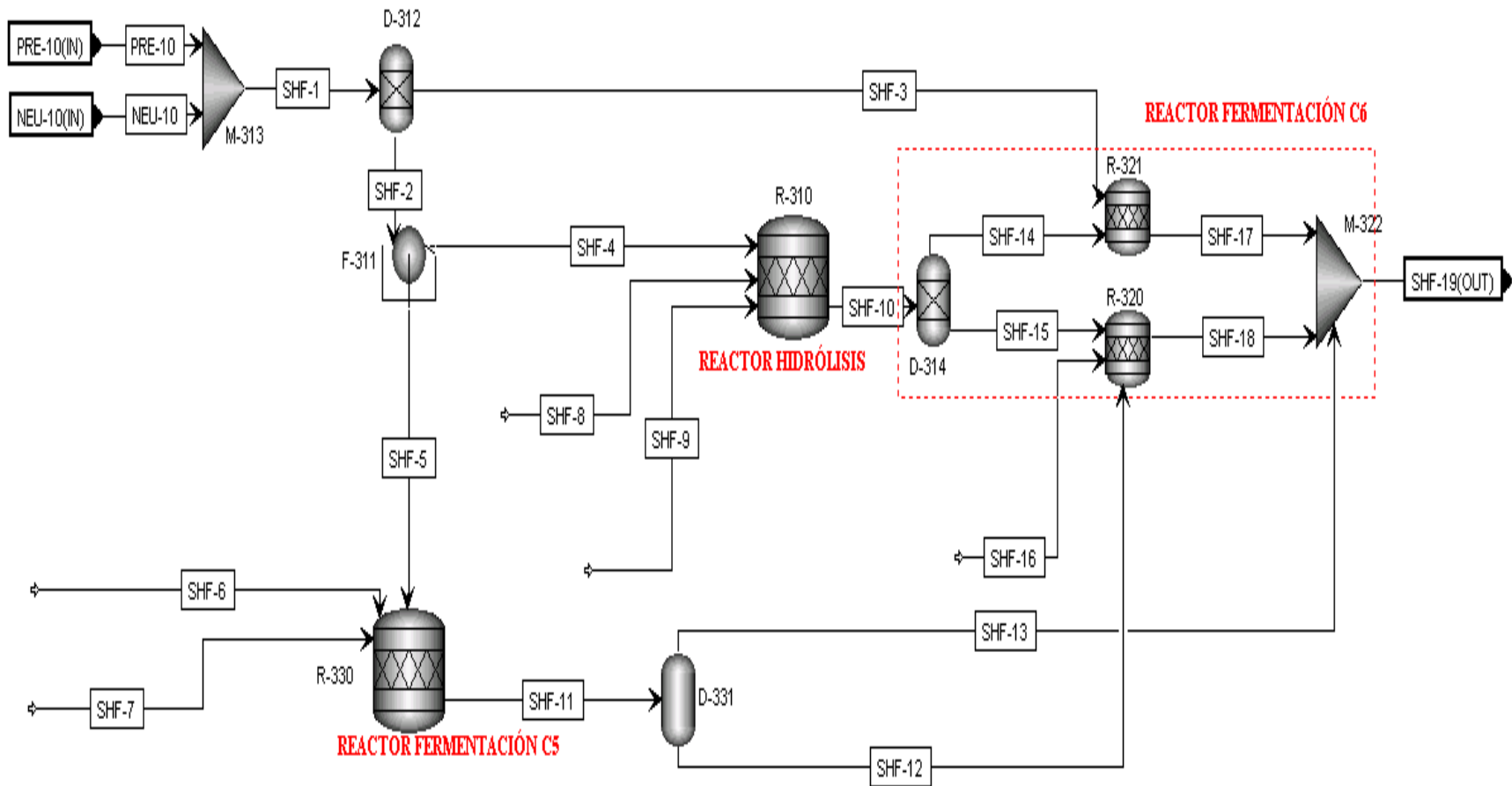
DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL (FUENTE: AUTOR)



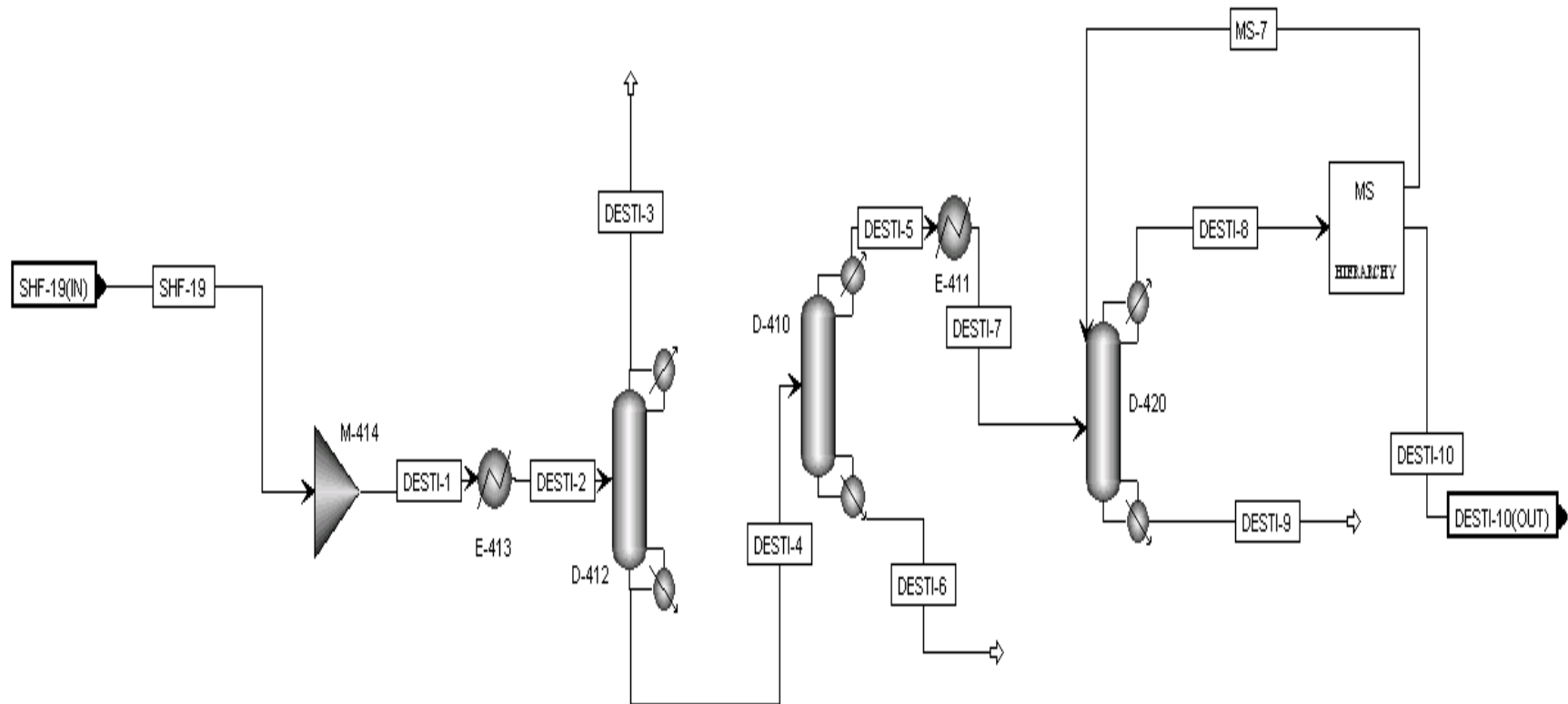
ETAPA PRETRATAMIENTO (FUENTE: AUTOR)



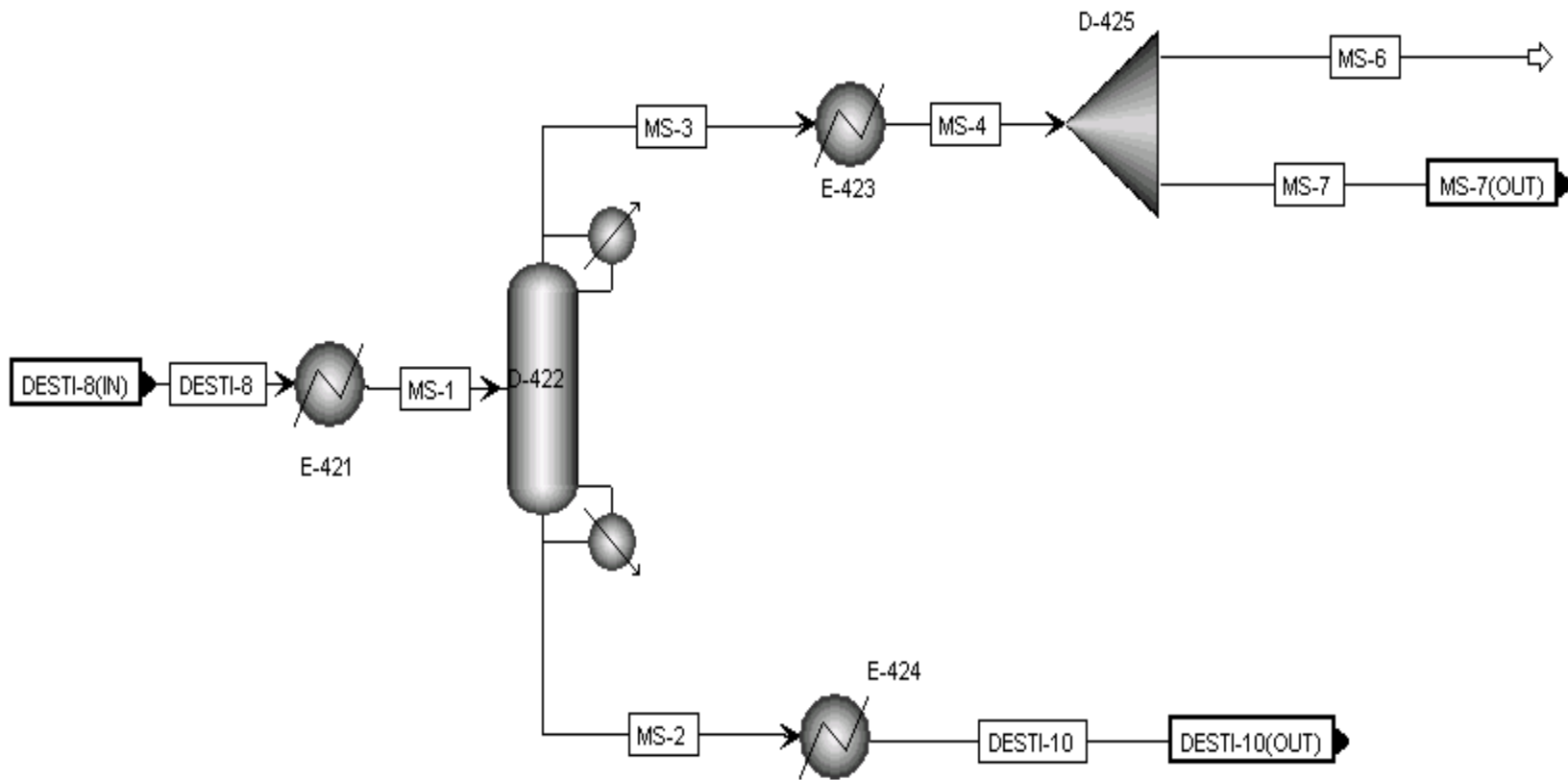
ETAPA NEUTRALIZACIÓN (FUENTE: AUTOR)



ETAPA SHF (FUENTE: AUTOR)



ETAPA DESTILACIÓN (FUENTE: AUTOR)



ETAPA DESTILACIÓN-TAMICES MOLECULARES (FUENTE: AUTOR)

ANEXO C

DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA RUTA 3: GENERAL Y POR ETAPAS

(Las etapas Pretratamiento, Neutralización y Destilación-Tamices moleculares son las mismas presentadas en el anexo B)

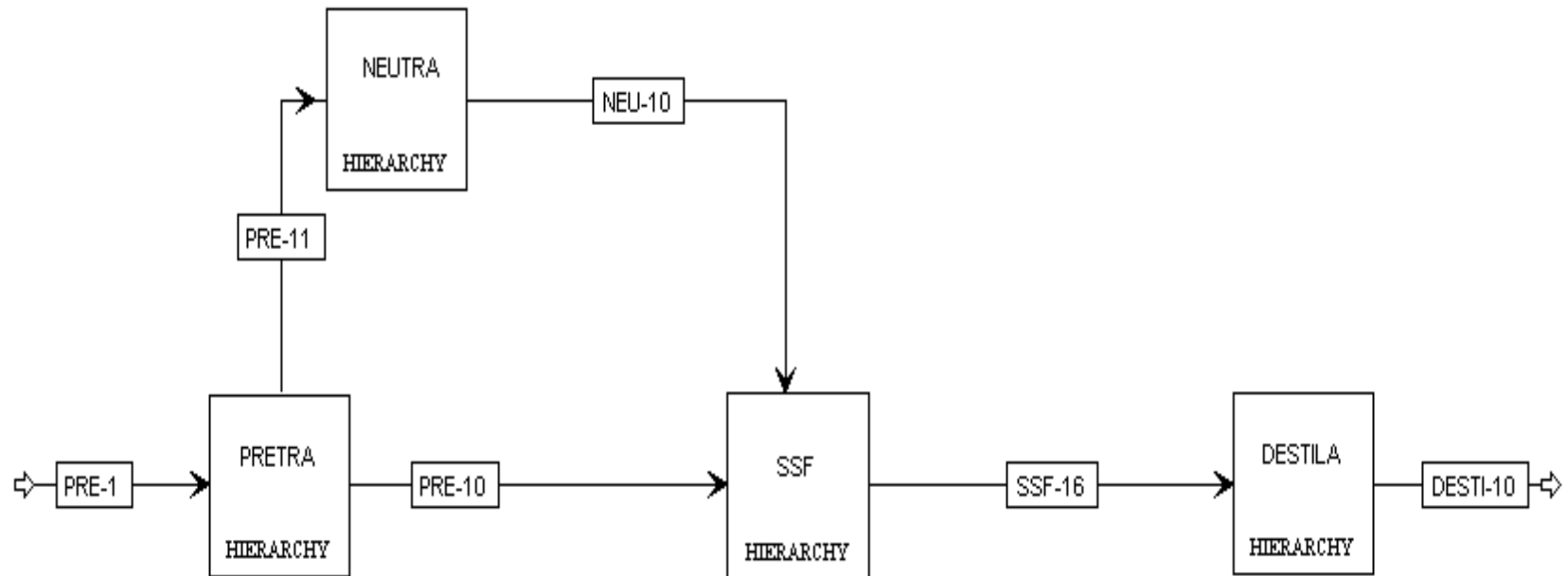
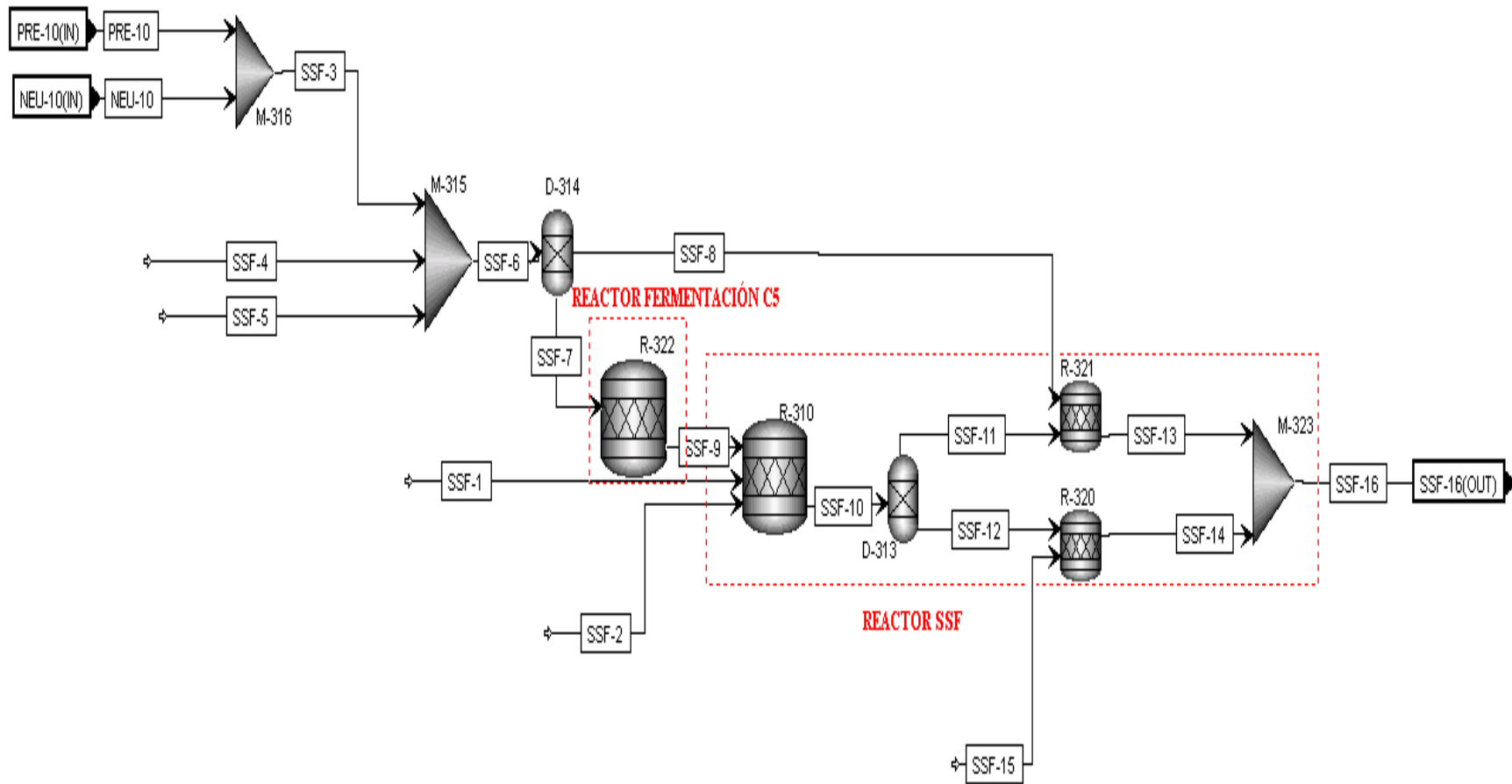
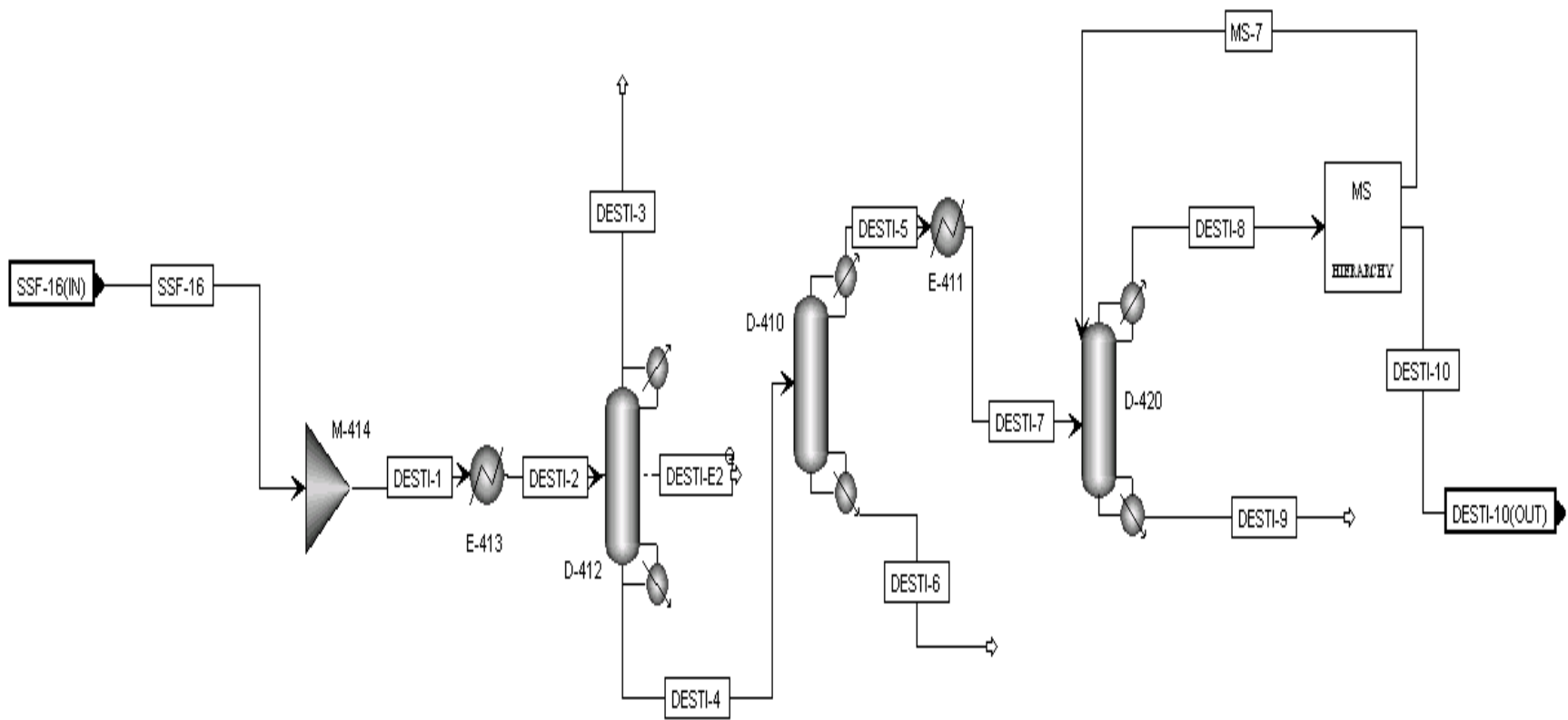


DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL (FUENTE: AUTOR)



ETAPA SSF (FUENTE: AUTOR)



ETAPA DESTILACIÓN (FUENTE: AUTOR)

ANEXO D

DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA RUTA 4: GENERAL Y POR ETAPAS

(Las etapas Pretratamiento, Neutralización y Destilación-Tamices moleculares son las mismas presentadas en el anexo B)

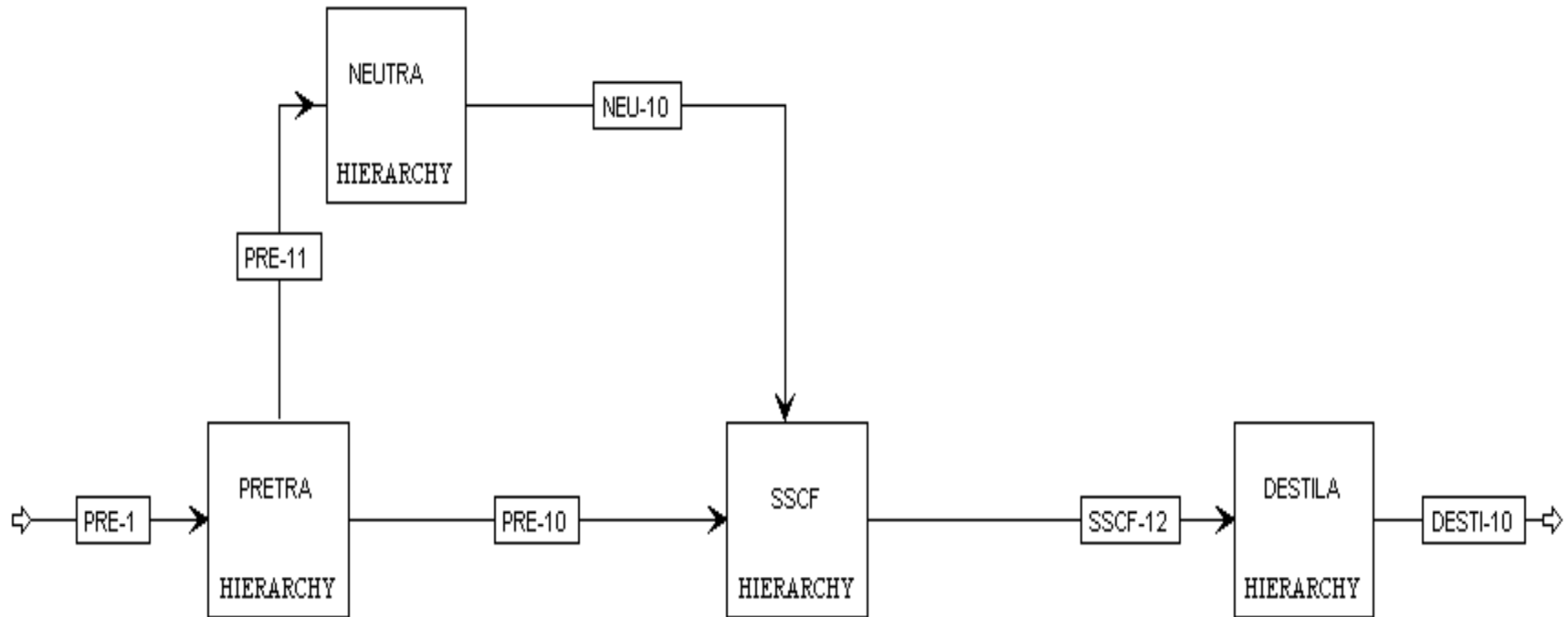
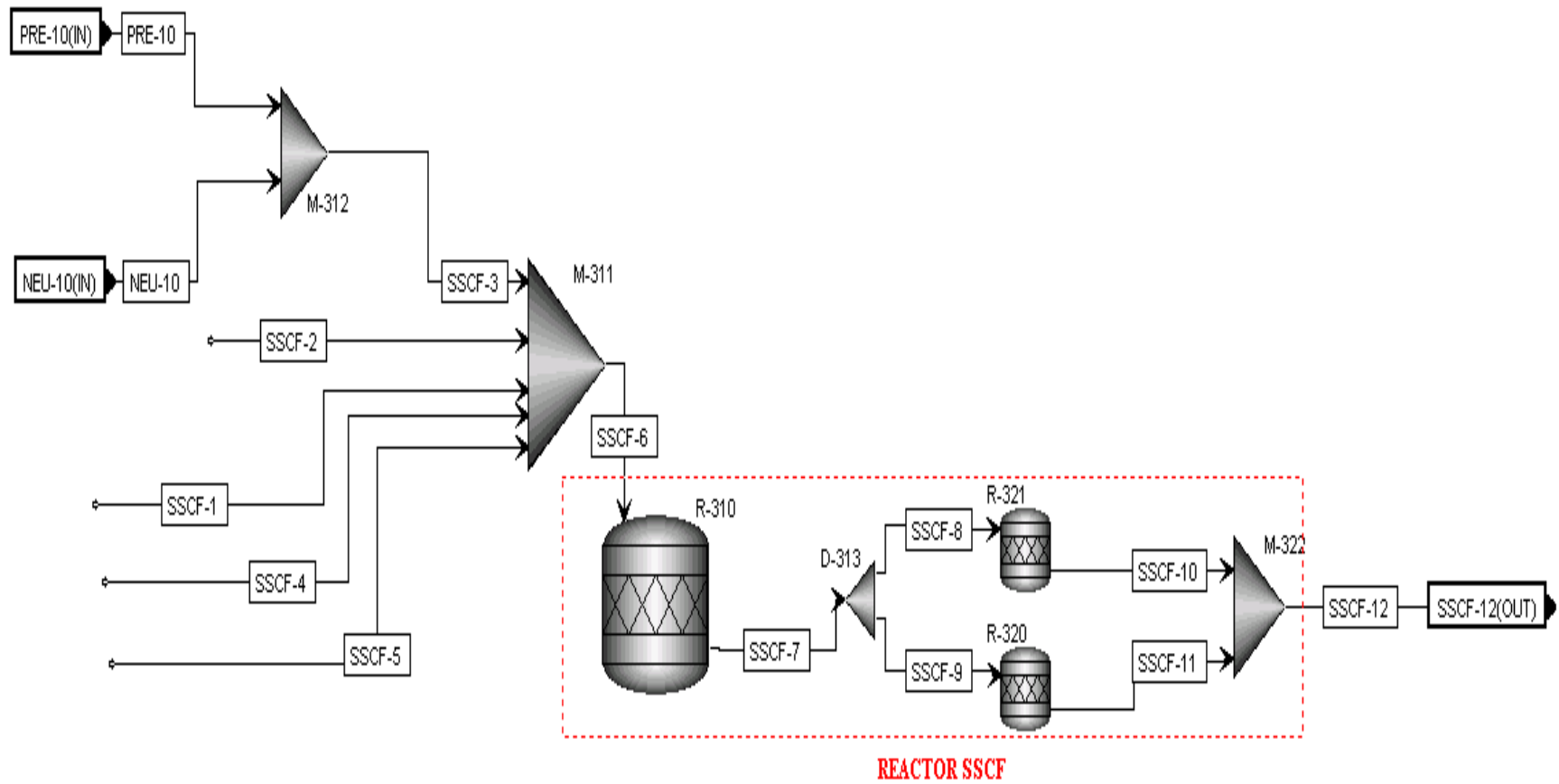
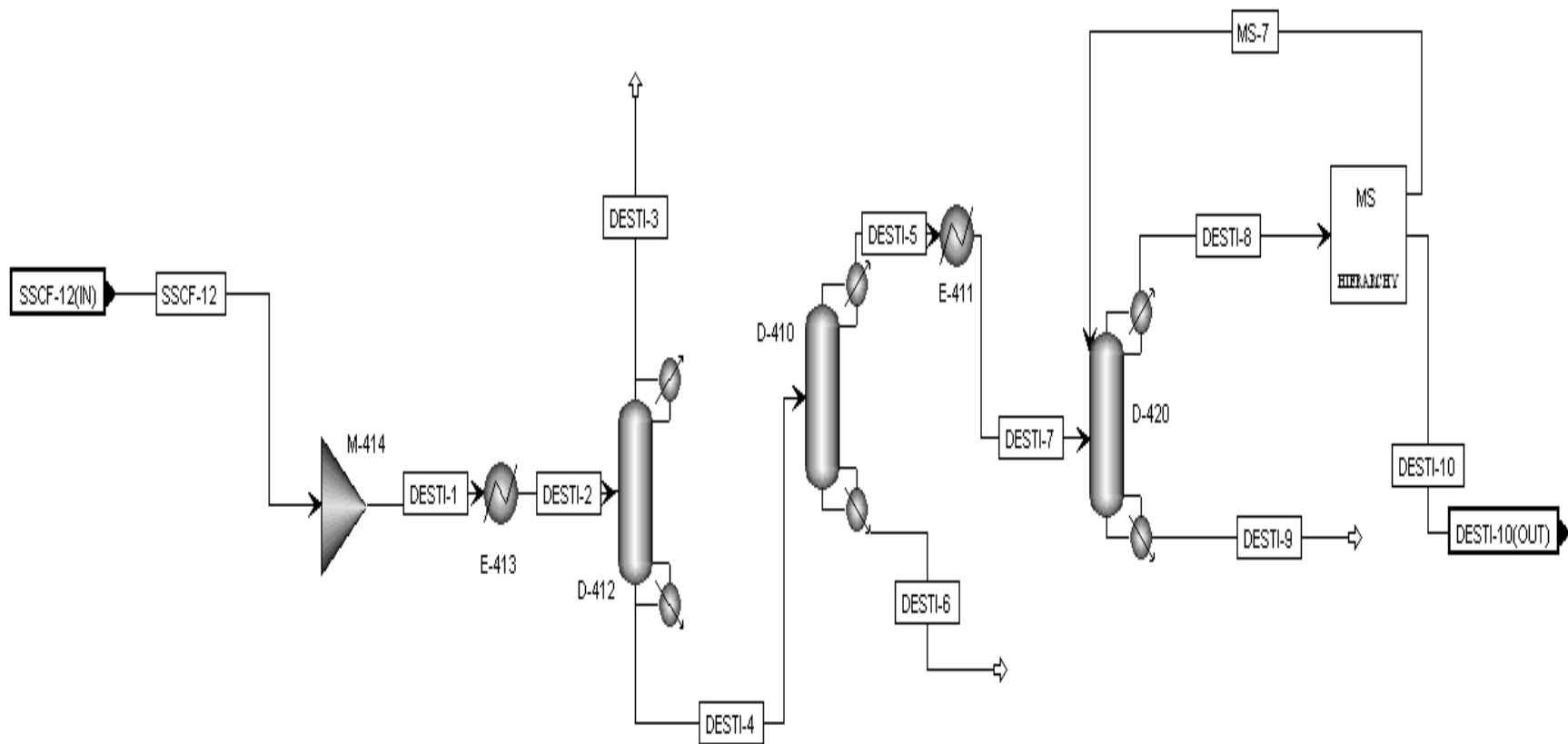


DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL (FUENTE: AUTOR)



ETAPA SSFC (FUENTE: AUTOR)



ETAPA DESTILACIÓN (FUENTE: AUTOR)

ANEXO E

DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA RUTA 5: GENERAL Y POR ETAPAS

(Las etapas Molinos, Clarificación, Fermentación y Destilación-Tamices moleculares son las mismas presentadas en el anexo A)

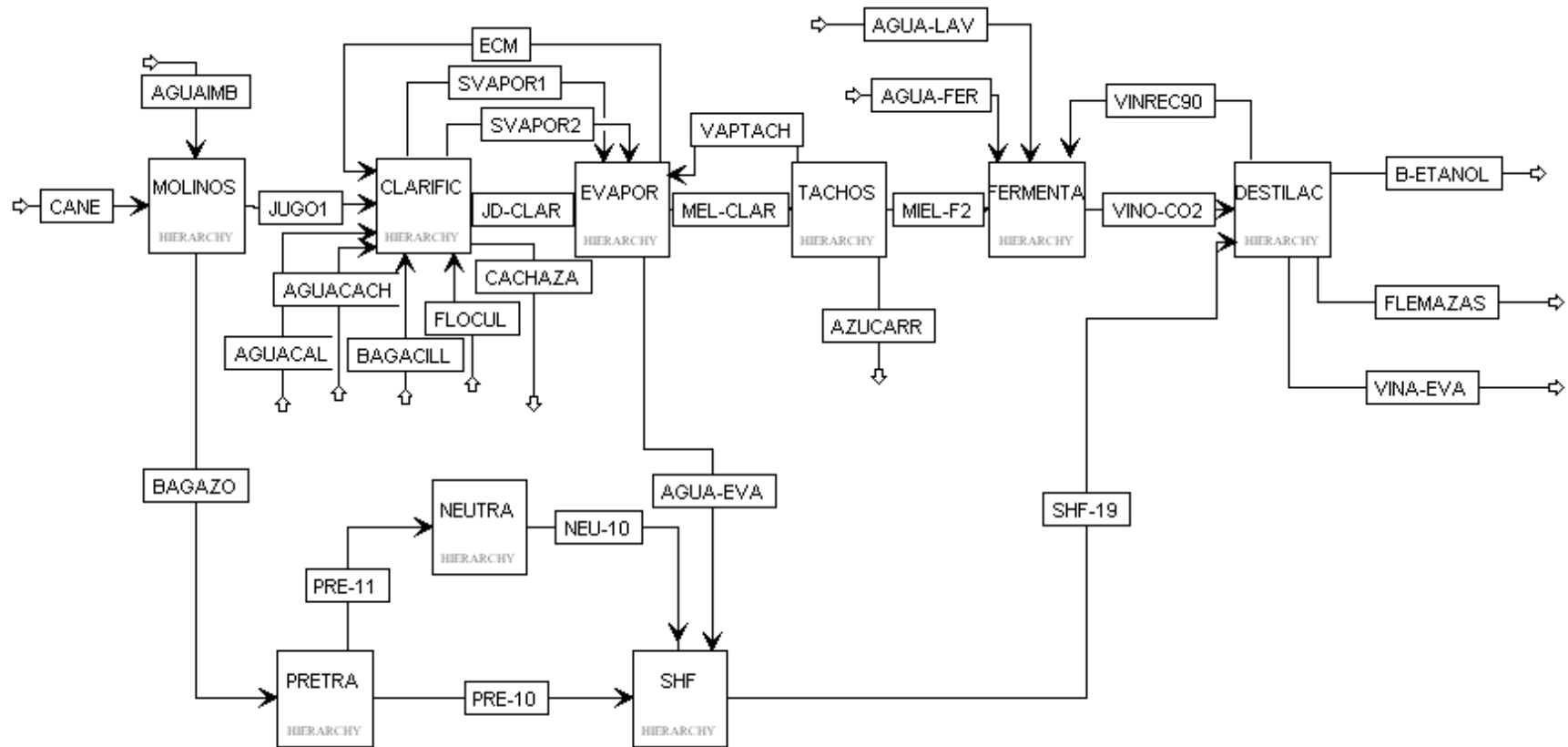
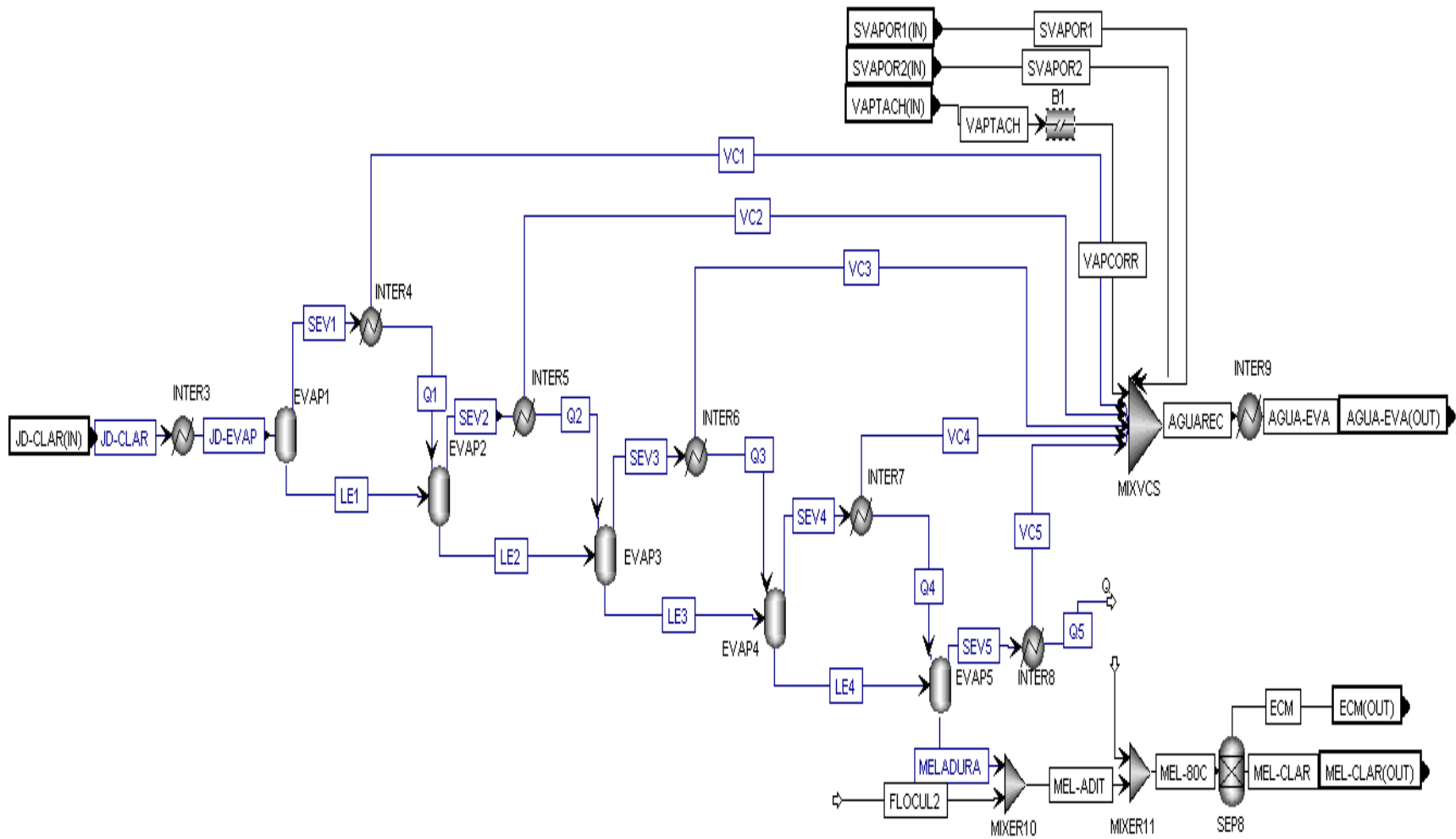
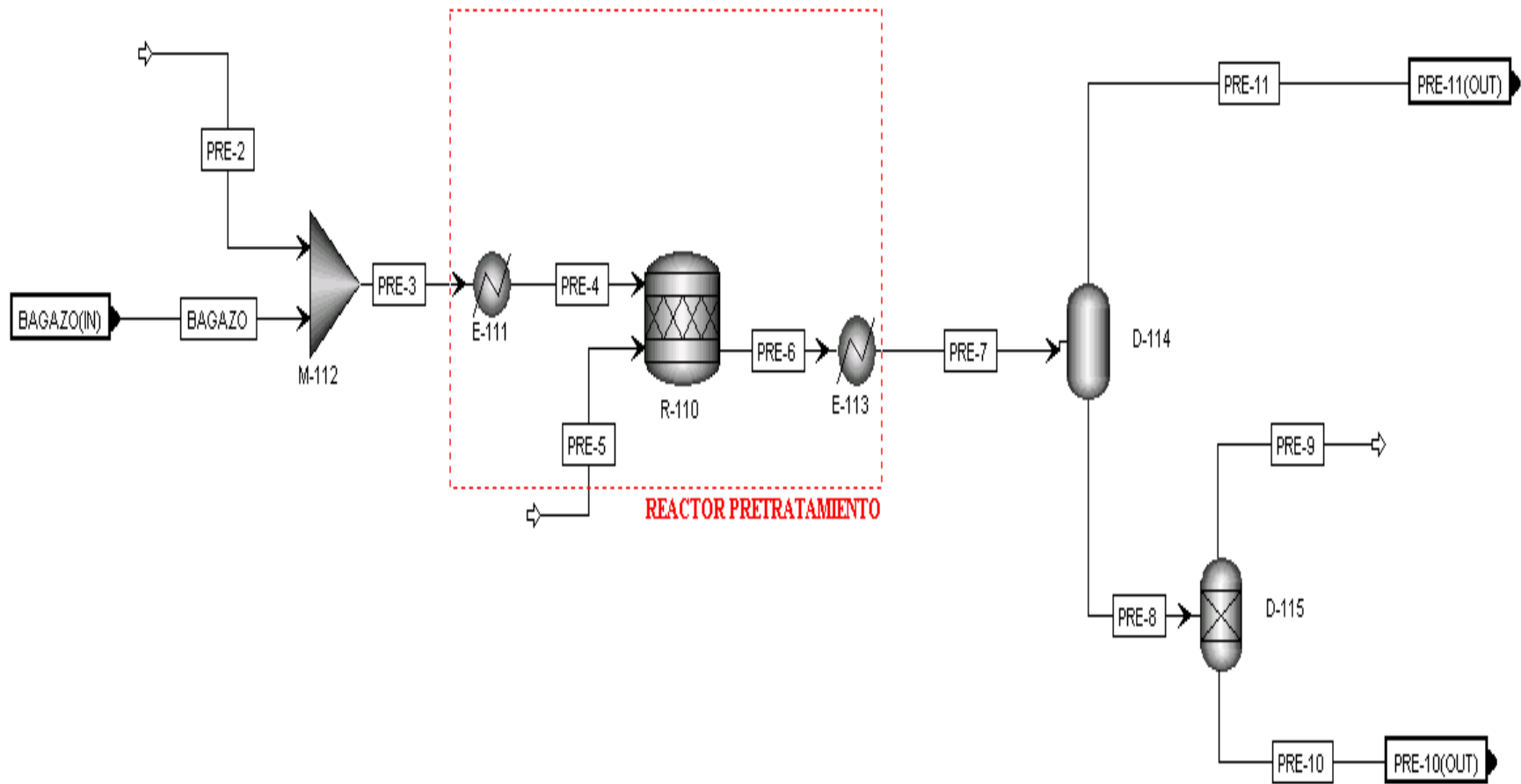


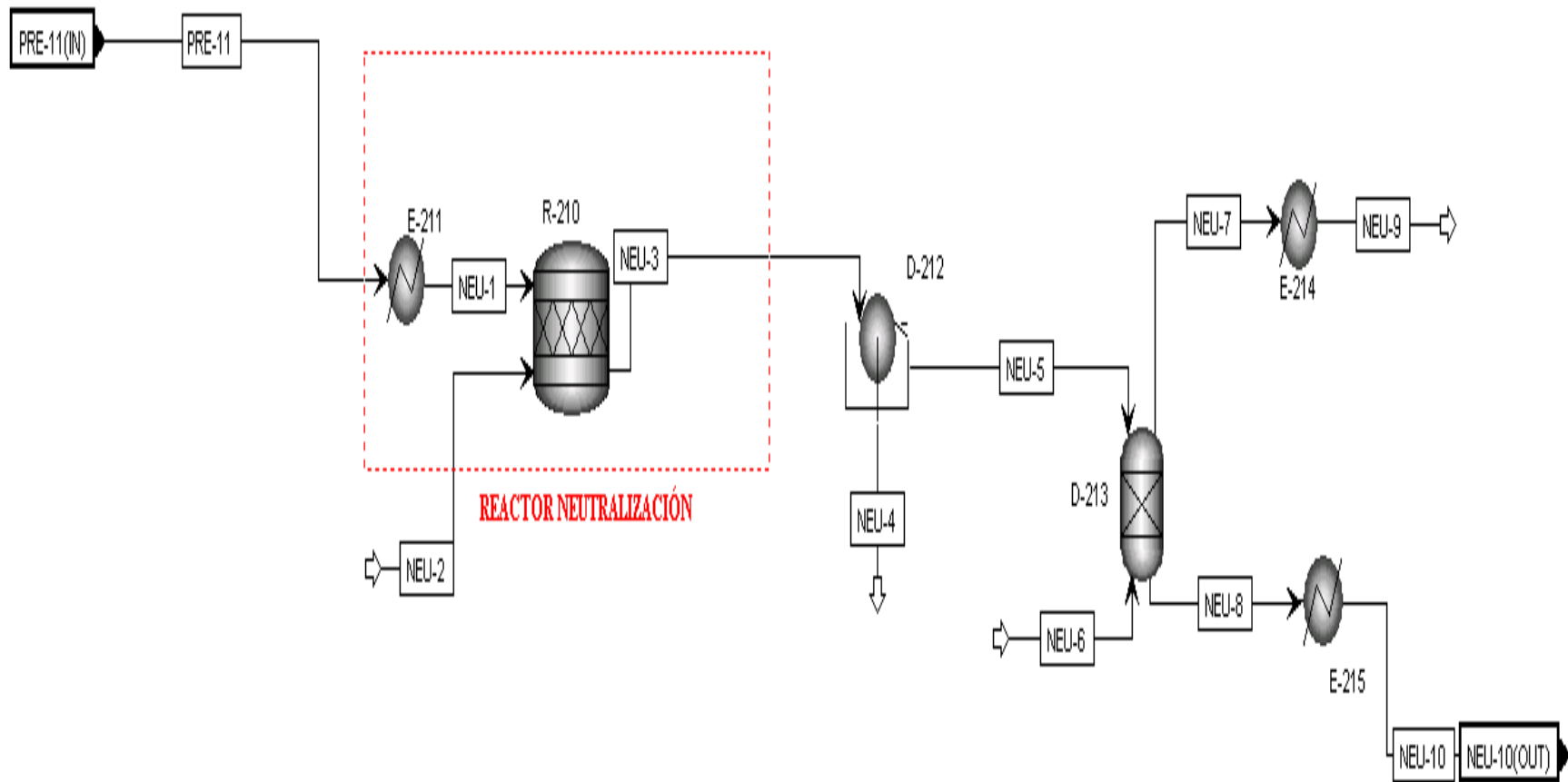
DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL (FUENTE: AUTOR)



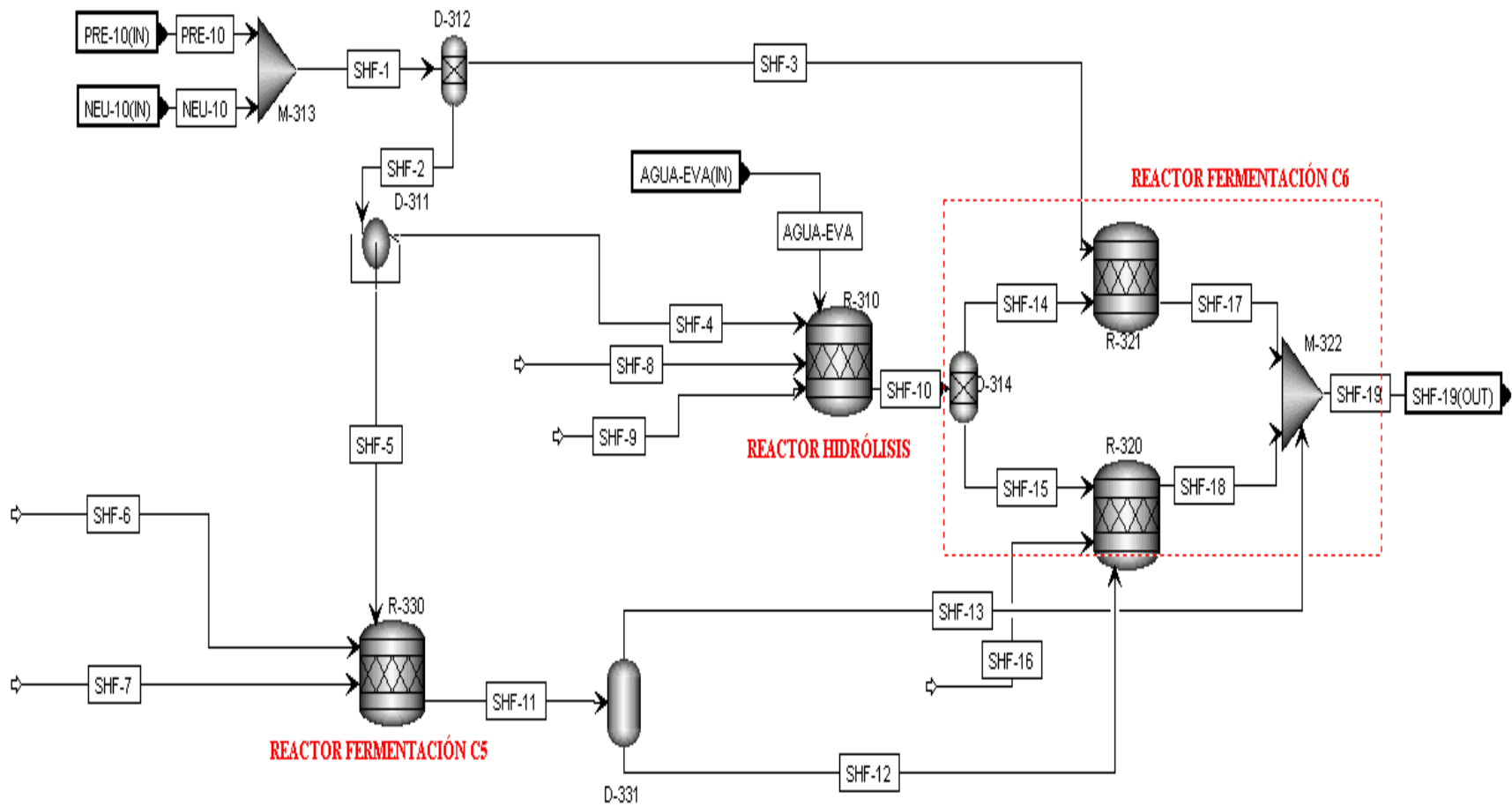
ETAPA EVAPORACIÓN (FUENTE: AUTOR)



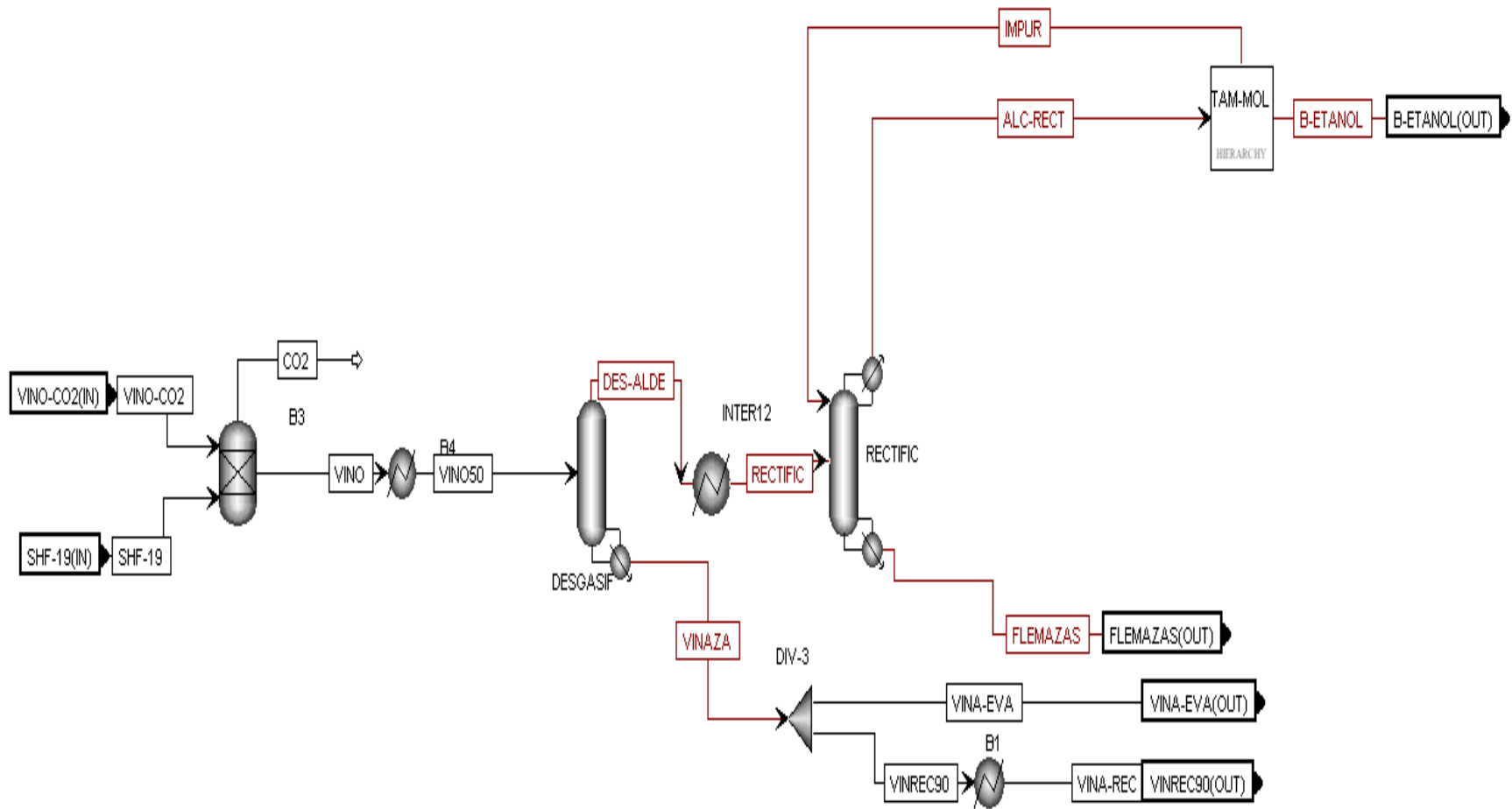
ETAPA PRETRATAMIENTO (FUENTE: AUTOR)



ETAPA NEUTRALIZACIÓN (FUENTE: AUTOR)



ETAPA SHF (FUENTE: AUTOR)



ETAPA DESTILACIÓN (FUENTE: AUTOR)

ANEXO F

DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA RUTA 6: GENERAL Y POR ETAPAS

(Las etapas Molinos, Clarificación, Fermentación y Destilación-Tamices moleculares son las mismas presentadas en el anexo A)

(Las etapas Tachos, Pretratamiento y Neutralización son las mismas presentadas en el anexo E)

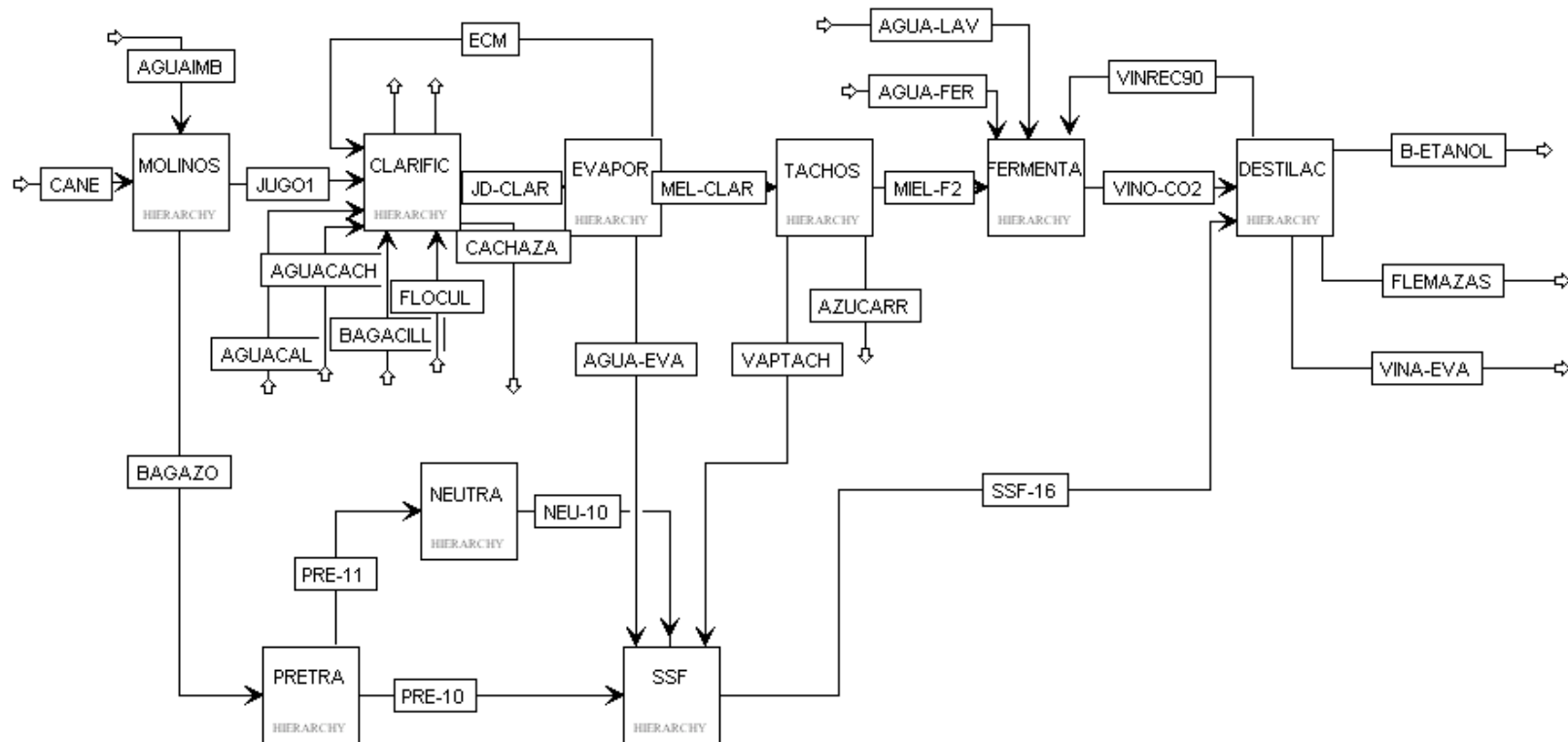
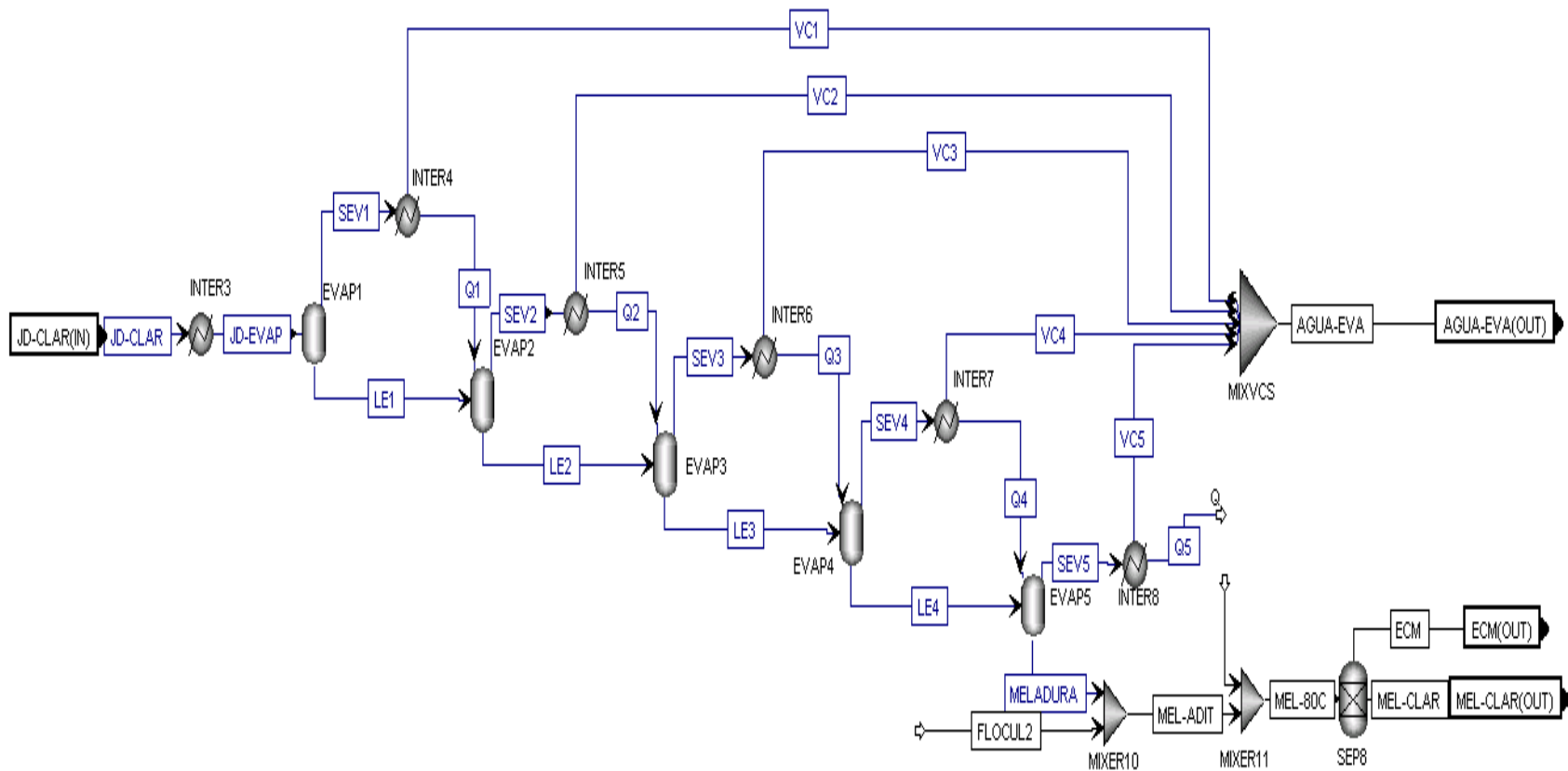
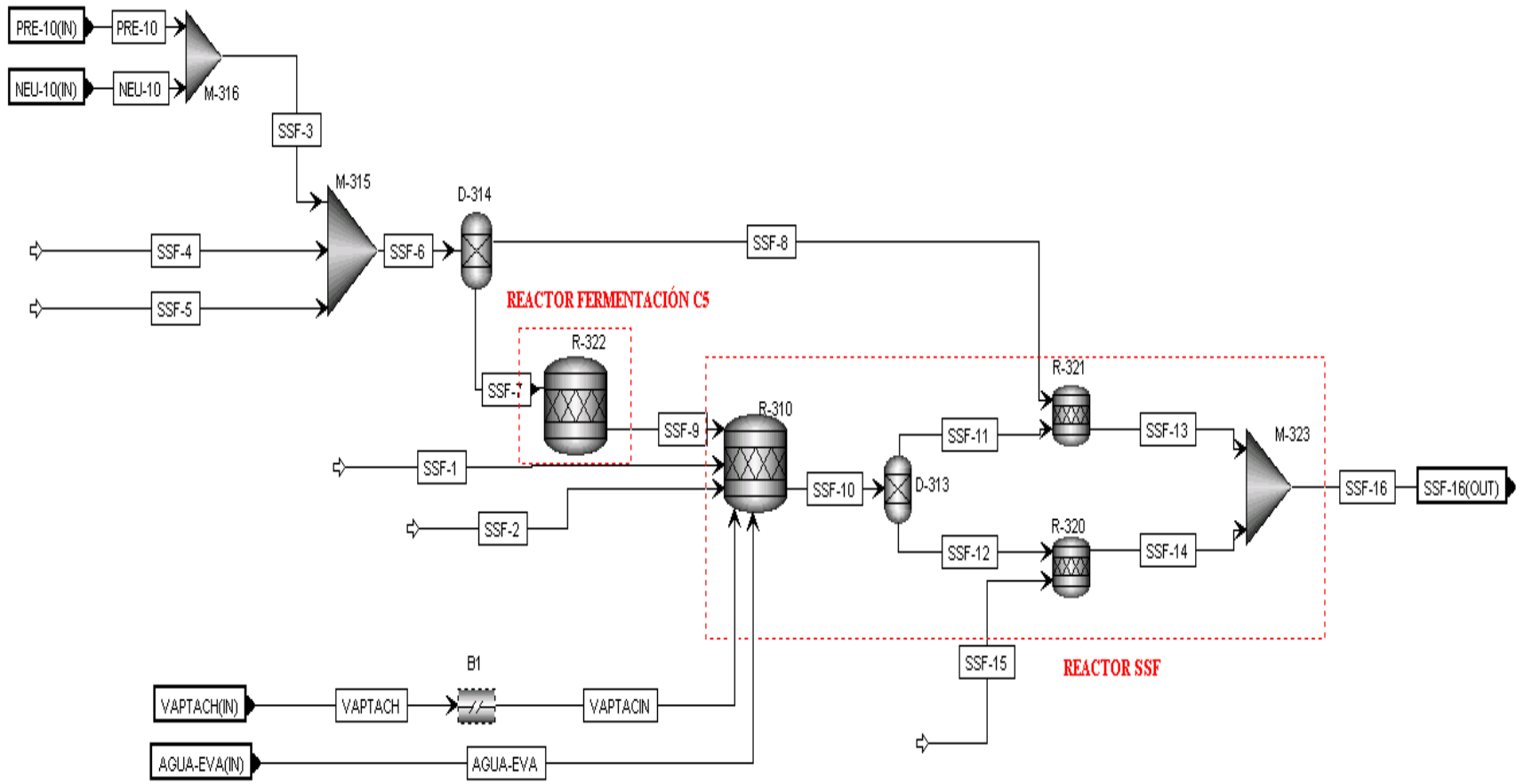


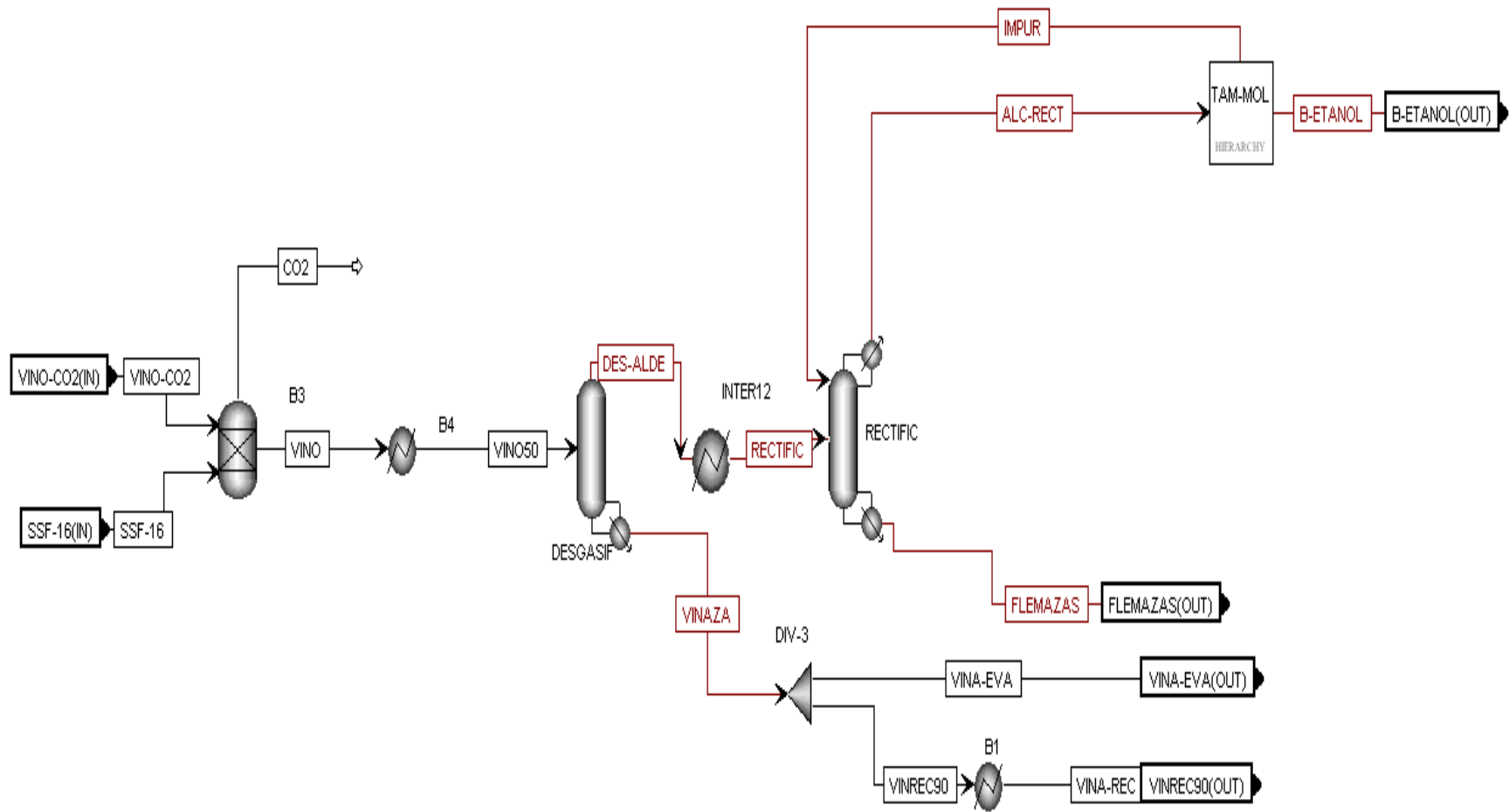
DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL (FUENTE: AUTOR)



ETAPA EVAPORACIÓN (FUENTE: AUTOR)



ETAPA SSF (FUENTE: AUTOR)



ETAPA DESTILACIÓN (FUENTE: AUTOR)

ANEXO G

DIAGRAMAS DE FLUJO PARA LA RUTA 7: GENERAL Y POR ETAPAS

(Las etapas Fermentación y Destilación-Tamices moleculares son las mismas presentadas en el anexo A)

(Las etapas Tachos, Pretratamiento y Neutralización son las mismas presentadas en el anexo E)

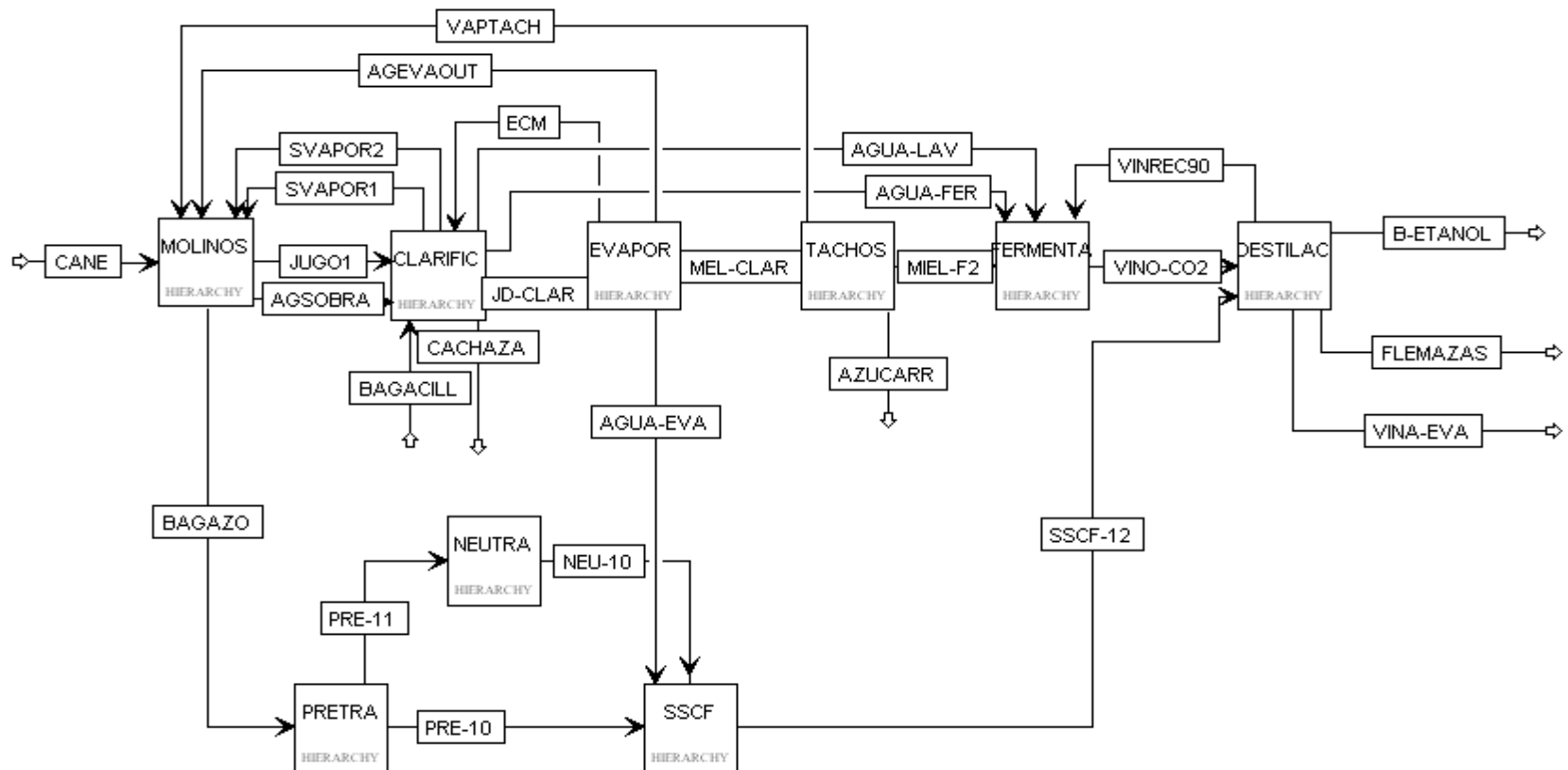
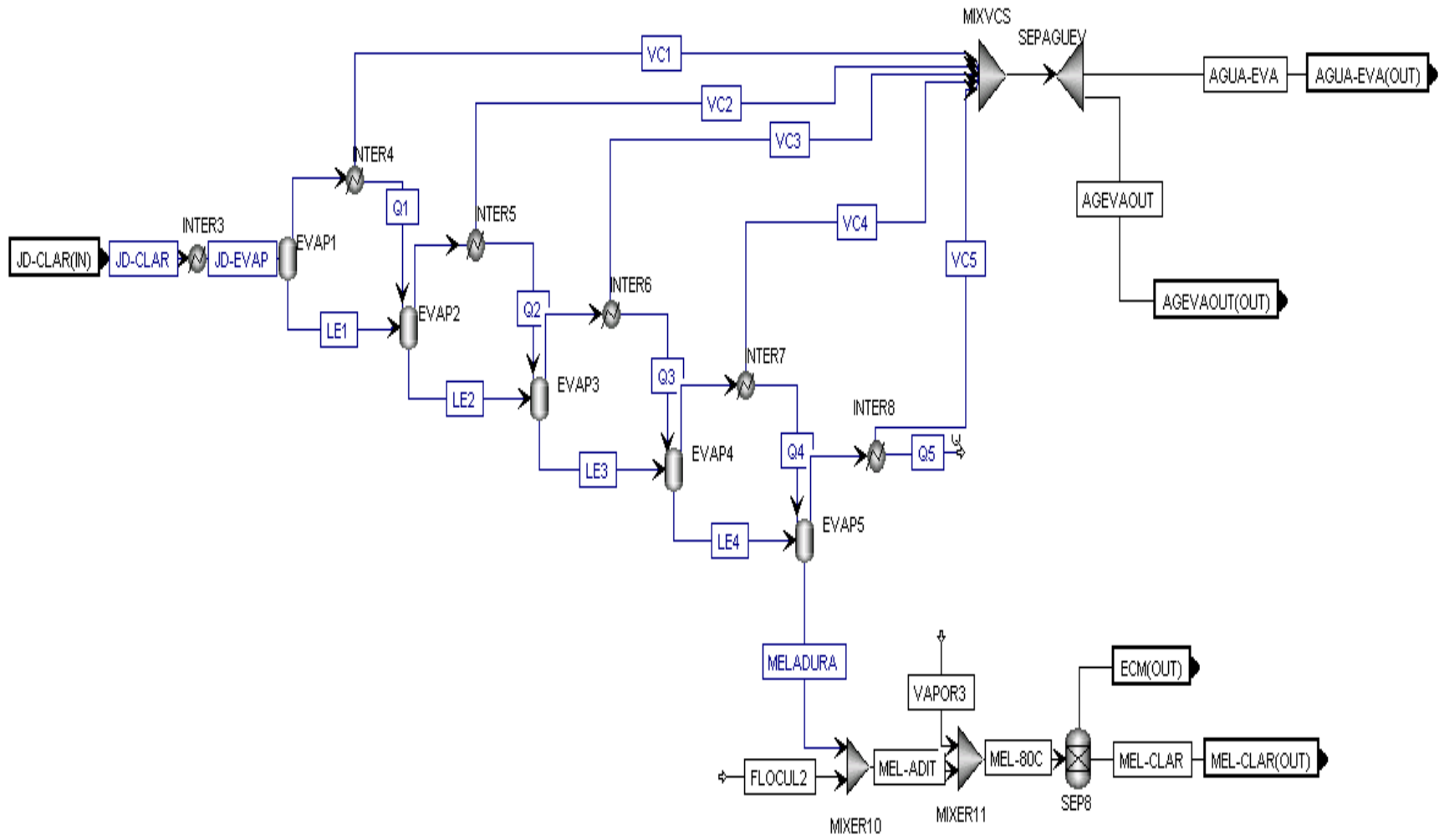
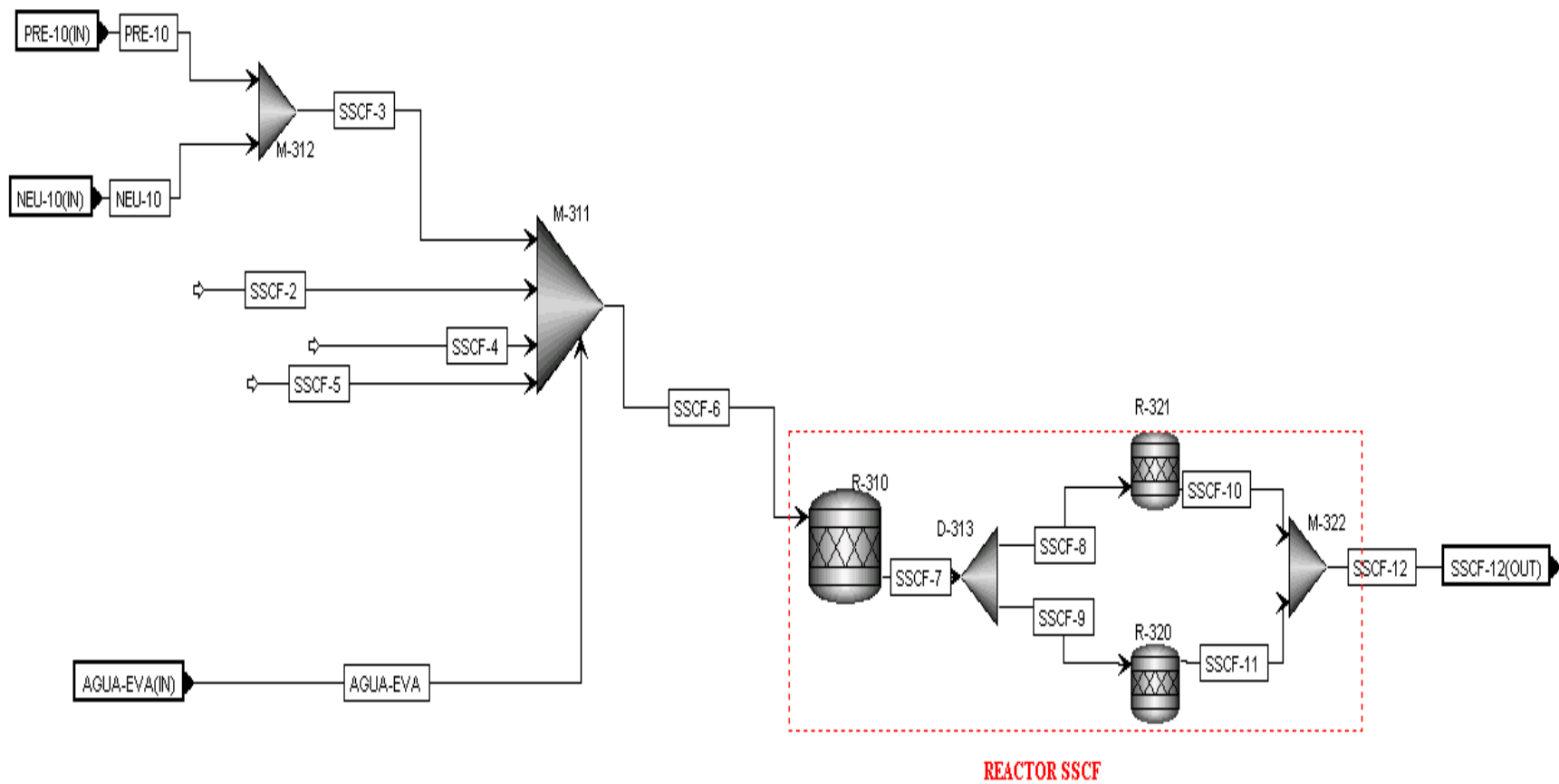


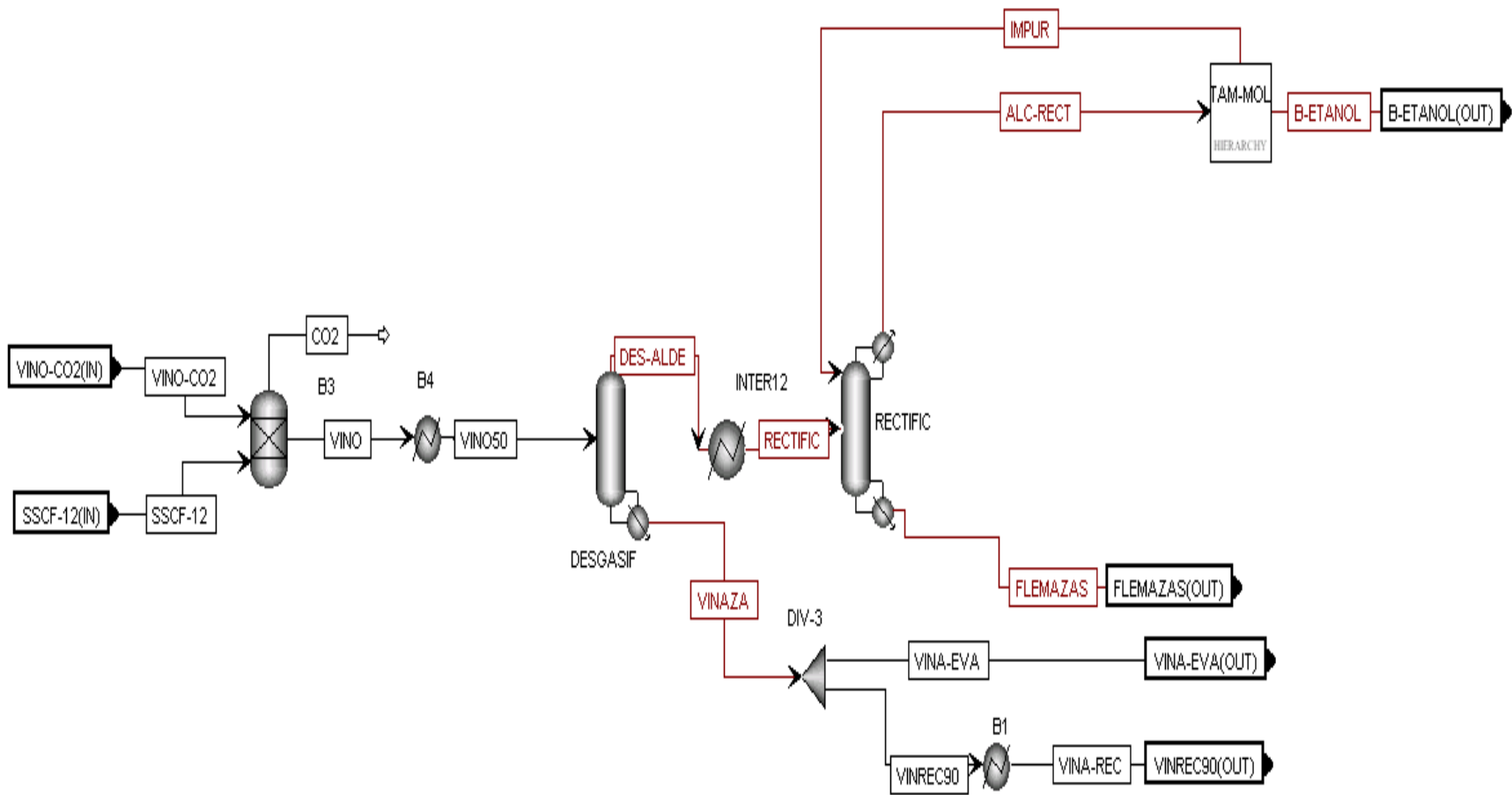
DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL (FUENTE: AUTOR)



ETAPA EVAPORACIÓN (FUENTE: AUTOR)



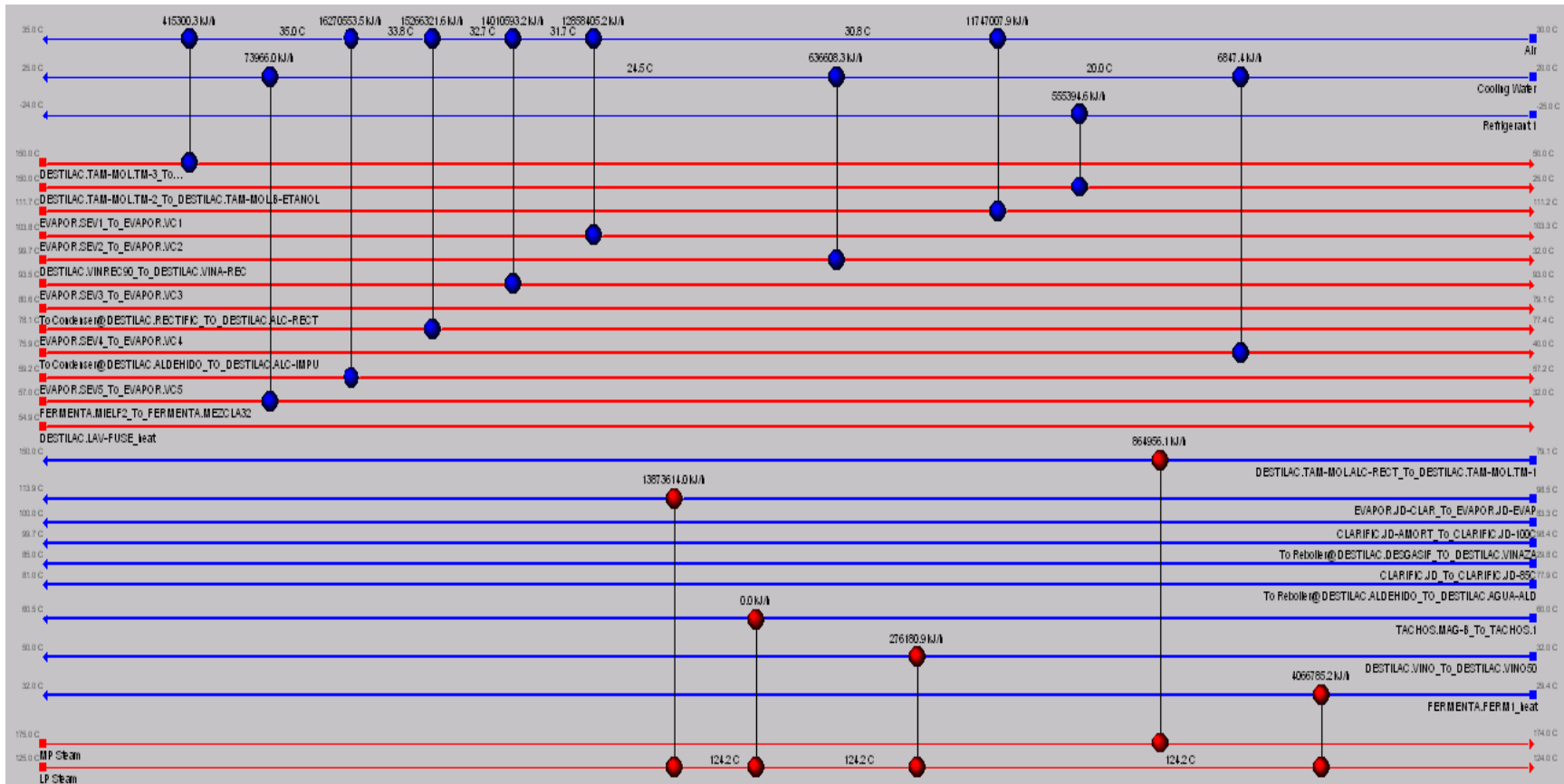
ETAPA SS CF (FUENTE: AUTOR)



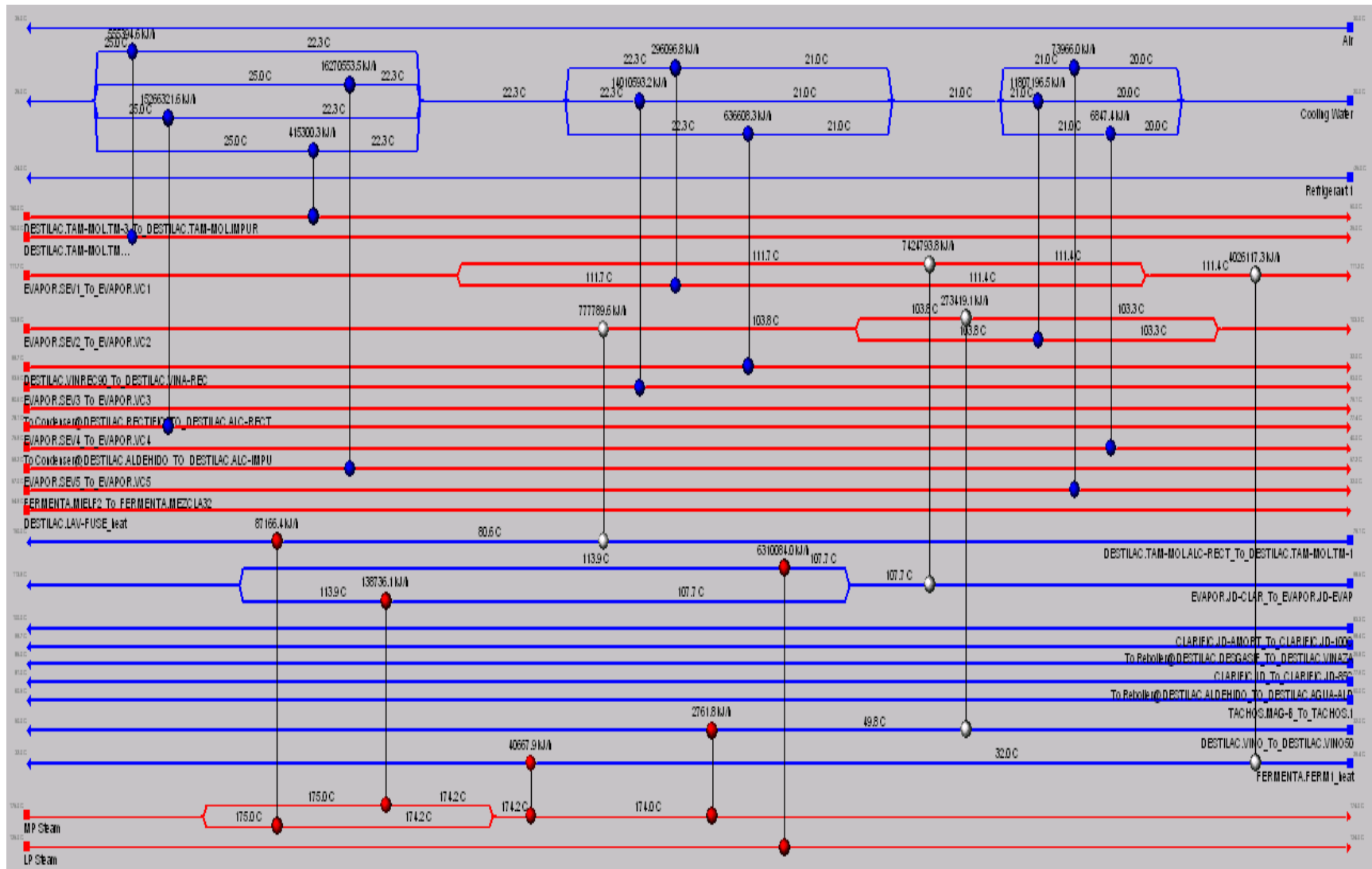
ETAPA DESTILACIÓN (FUENTE: AUTOR)

ANEXO H

SERVICIOS INDUSTRIALES PARA EL CASO BASE, RED DE INTERCAMBIO DE CALOR, CURVAS COMPUESTAS Y GRAN CURVA COMPUESTA PARA LA RUTA 1

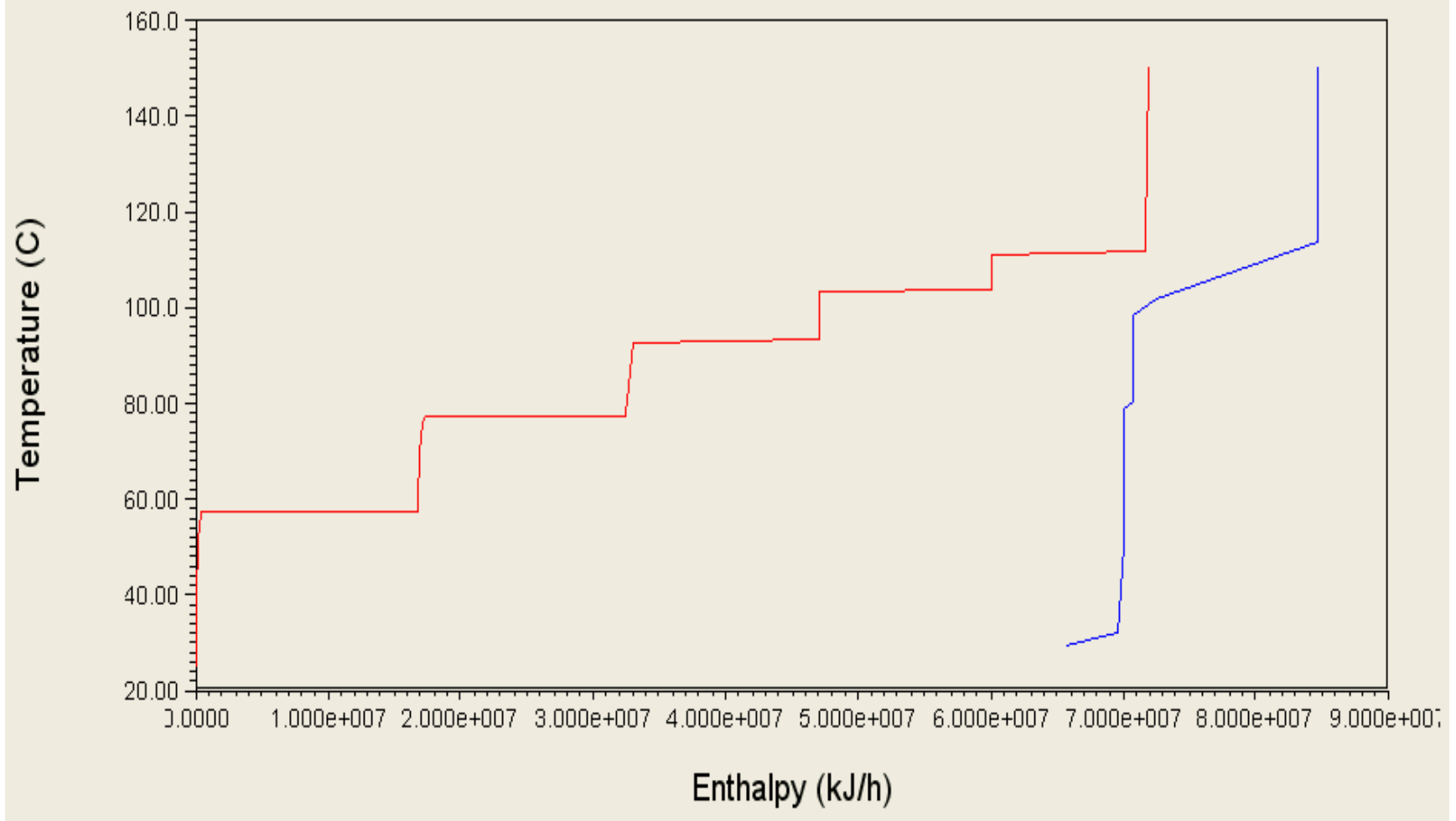


CASO BASE (FUENTE: AUTOR)

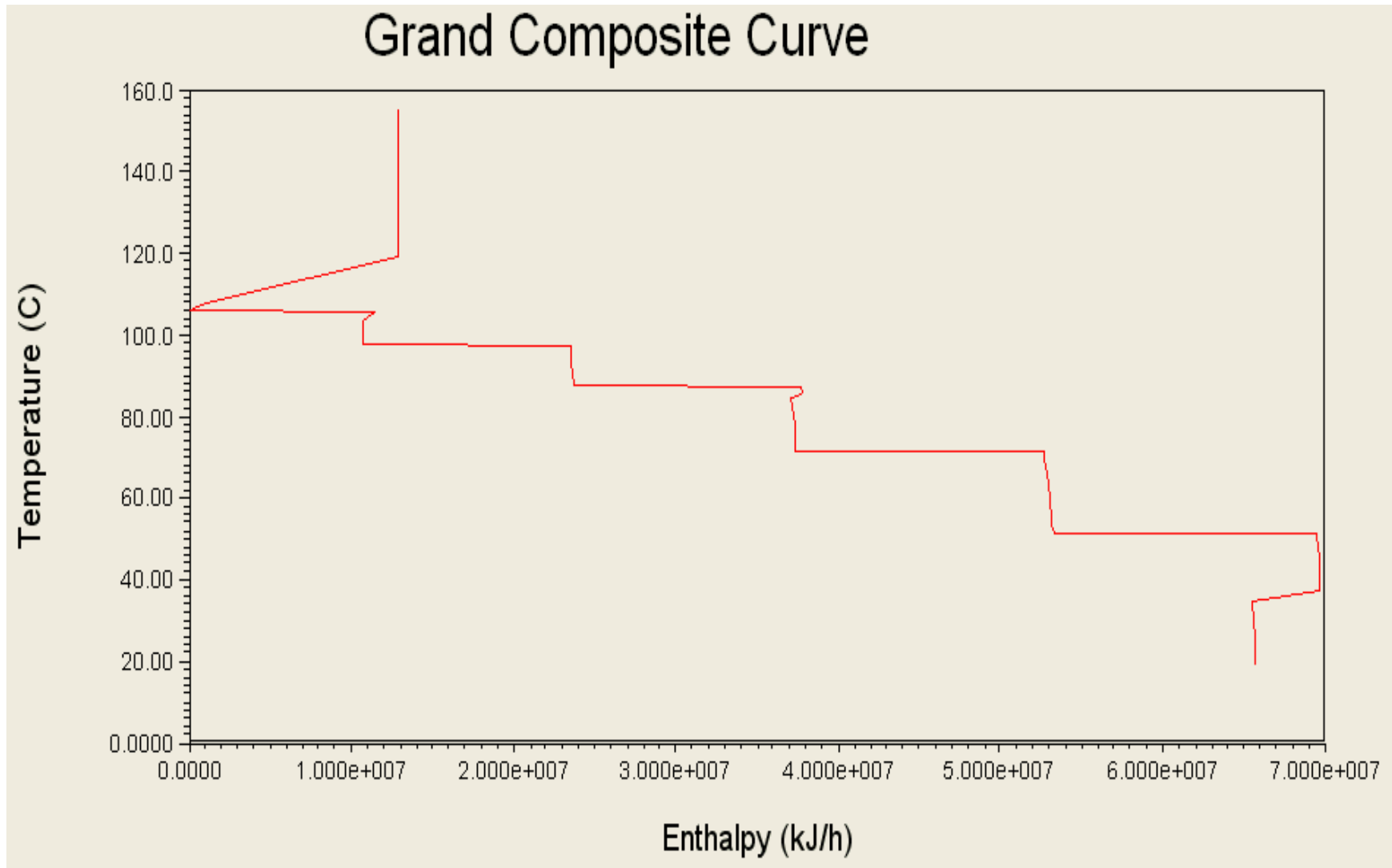


RED DE INTERCAMBIO DE CALOR (FUENTE: AUTOR)

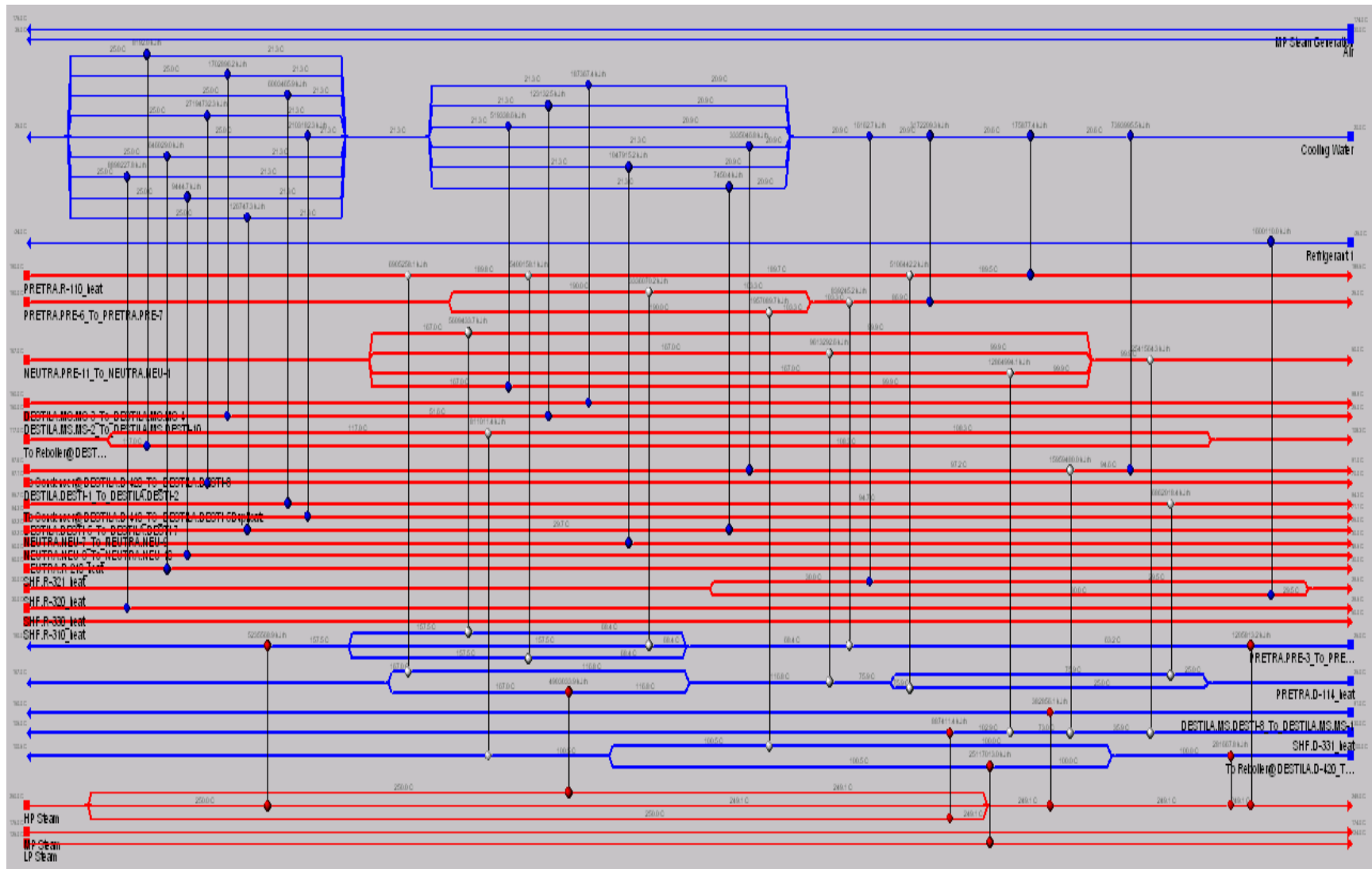
Composite Curves



CURVAS COMPUESTAS (FUENTE: AUTOR)

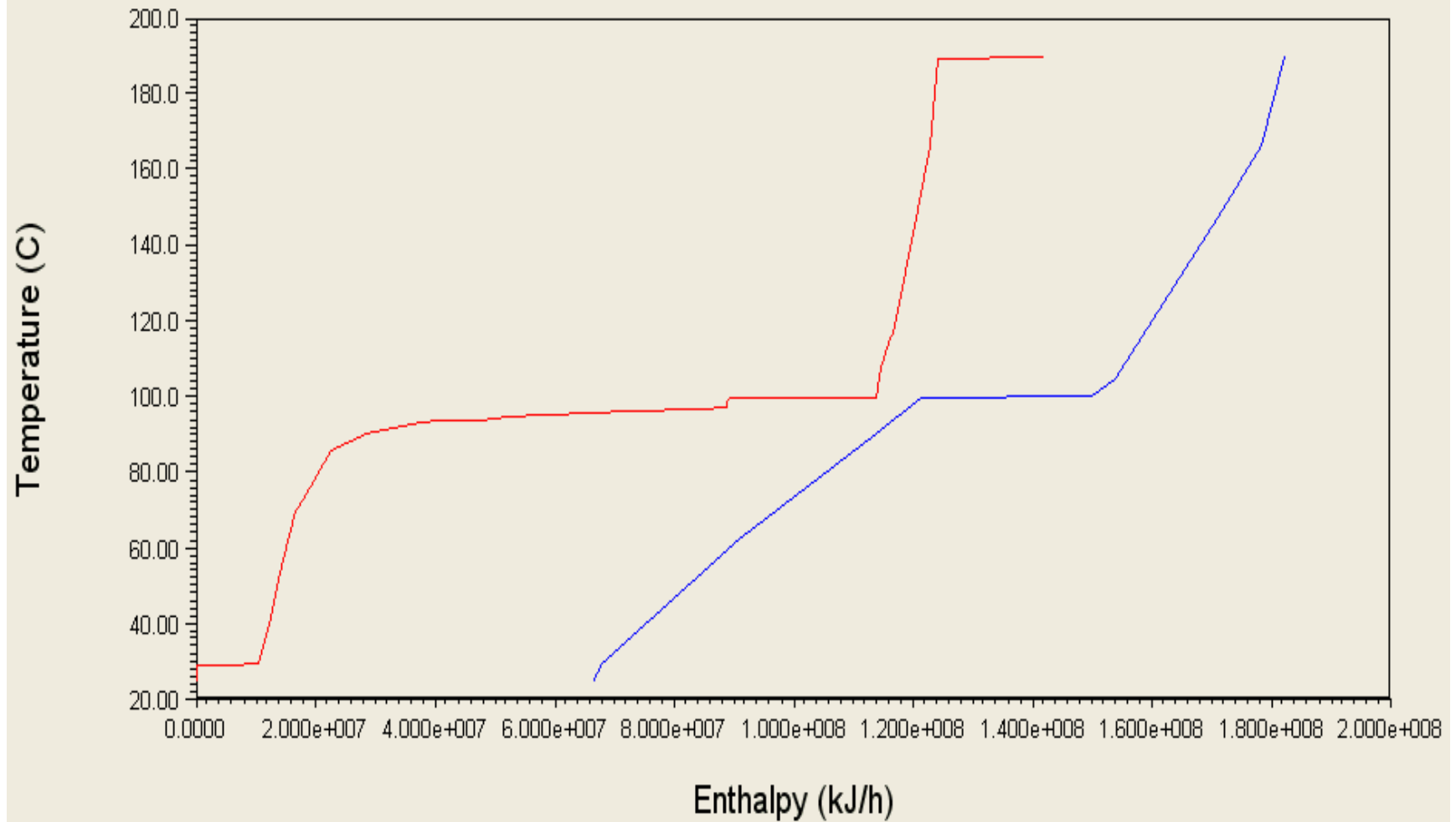


GRAN CURVA COMPUESTA (FUENTE: AUTOR)

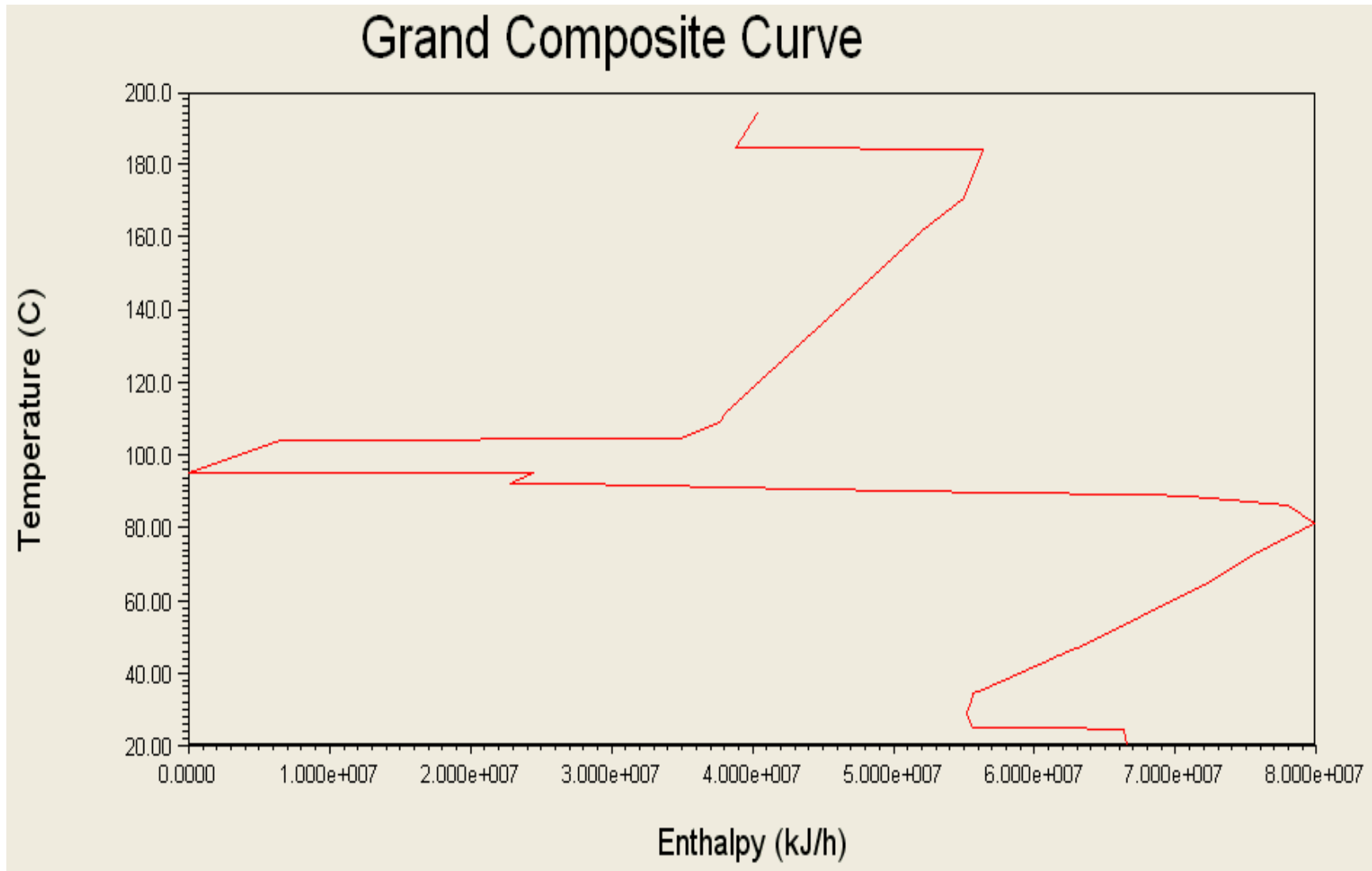


RED DE INTERCAMBIO DE CALOR (FUENTE: AUTOR)

Composite Curves



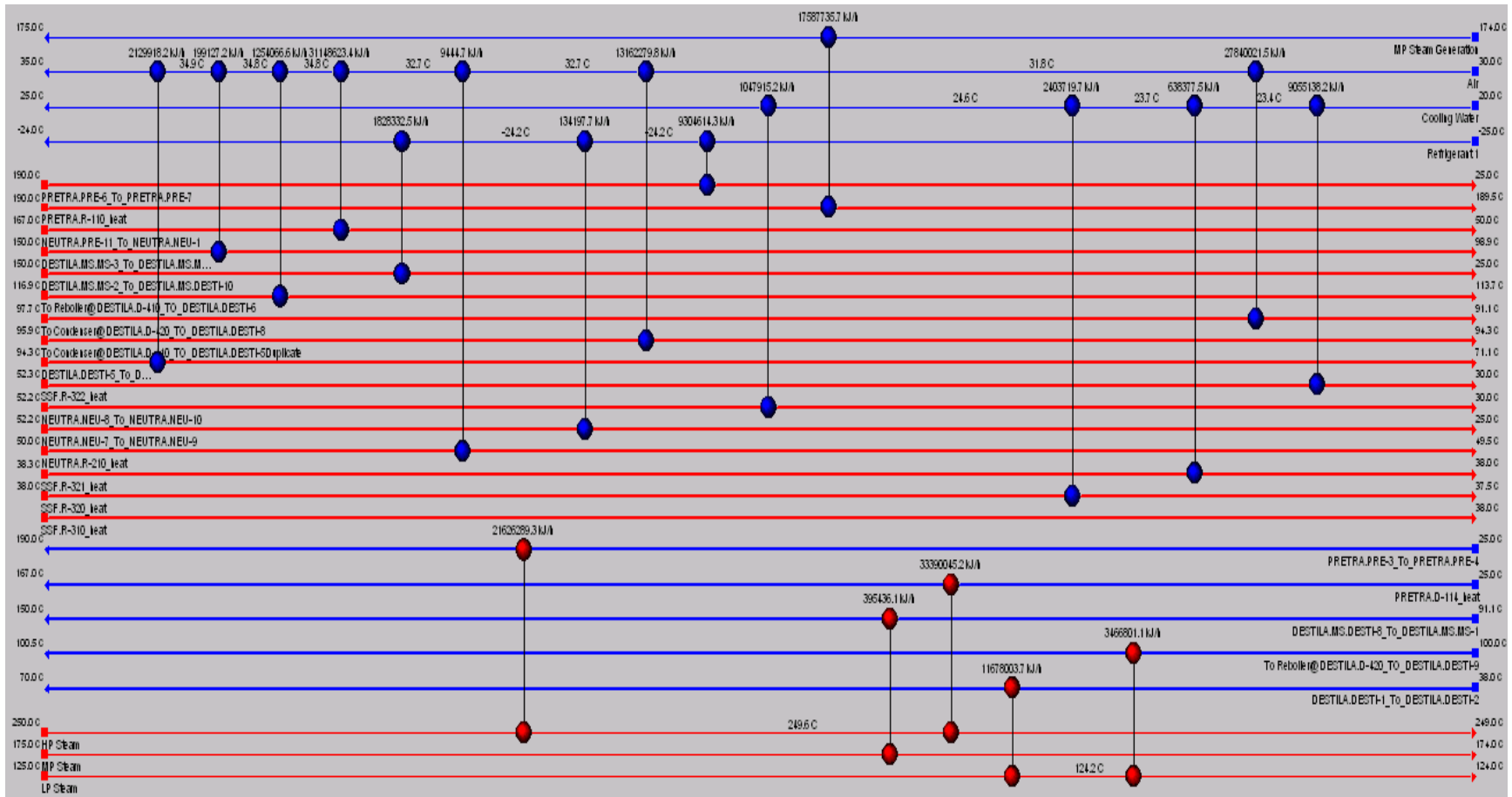
CURVAS COMPUESTAS (FUENTE: AUTOR)



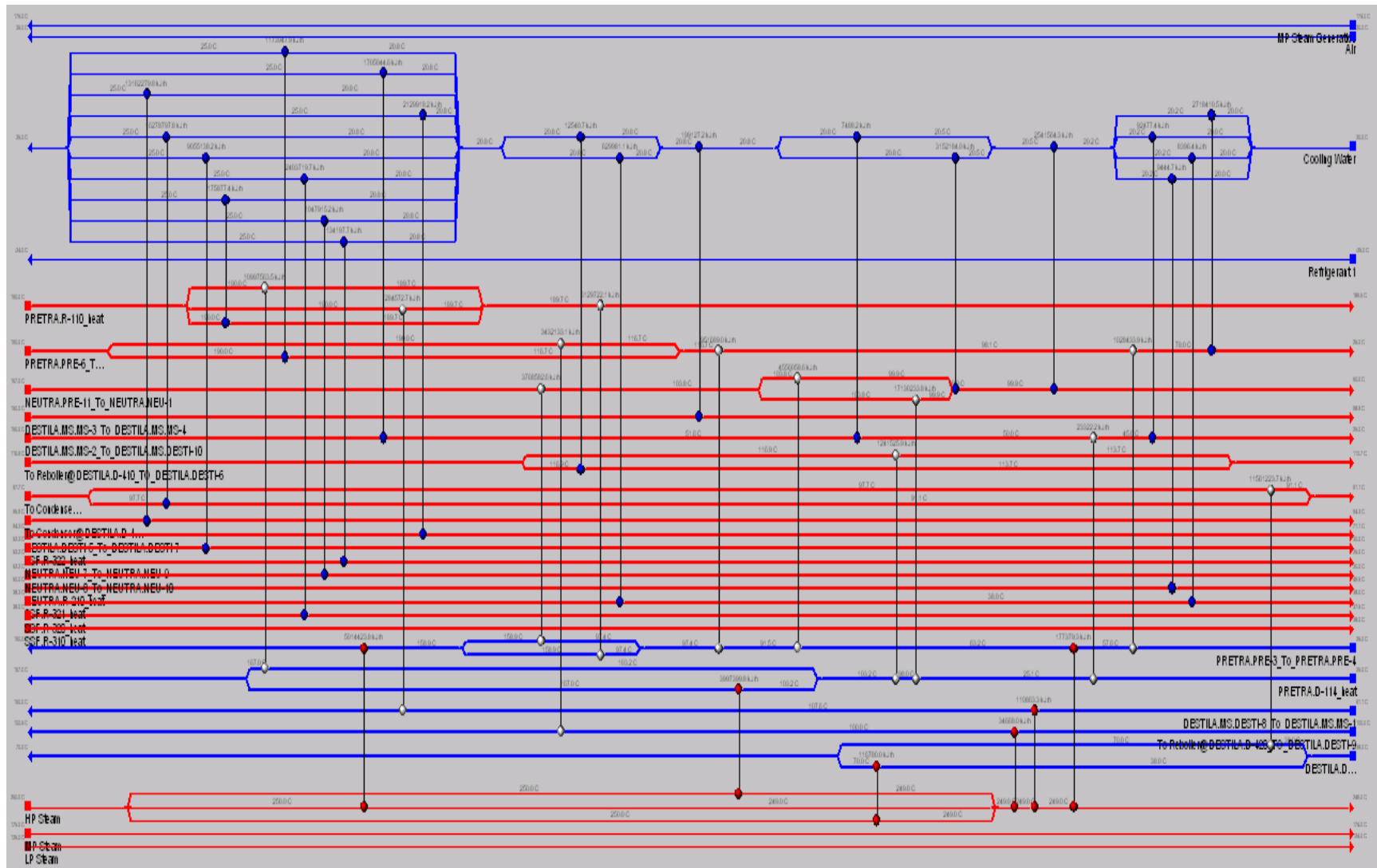
GRAN CURVA COMPUESTA (FUENTE: AUTOR)

ANEXO J

SERVICIOS INDUSTRIALES PARA EL CASO BASE, RED DE INTERCAMBIO DE CALOR, CURVAS COMPUESTAS Y GRAN CURVA COMPUESTA PARA LA RUTA 3

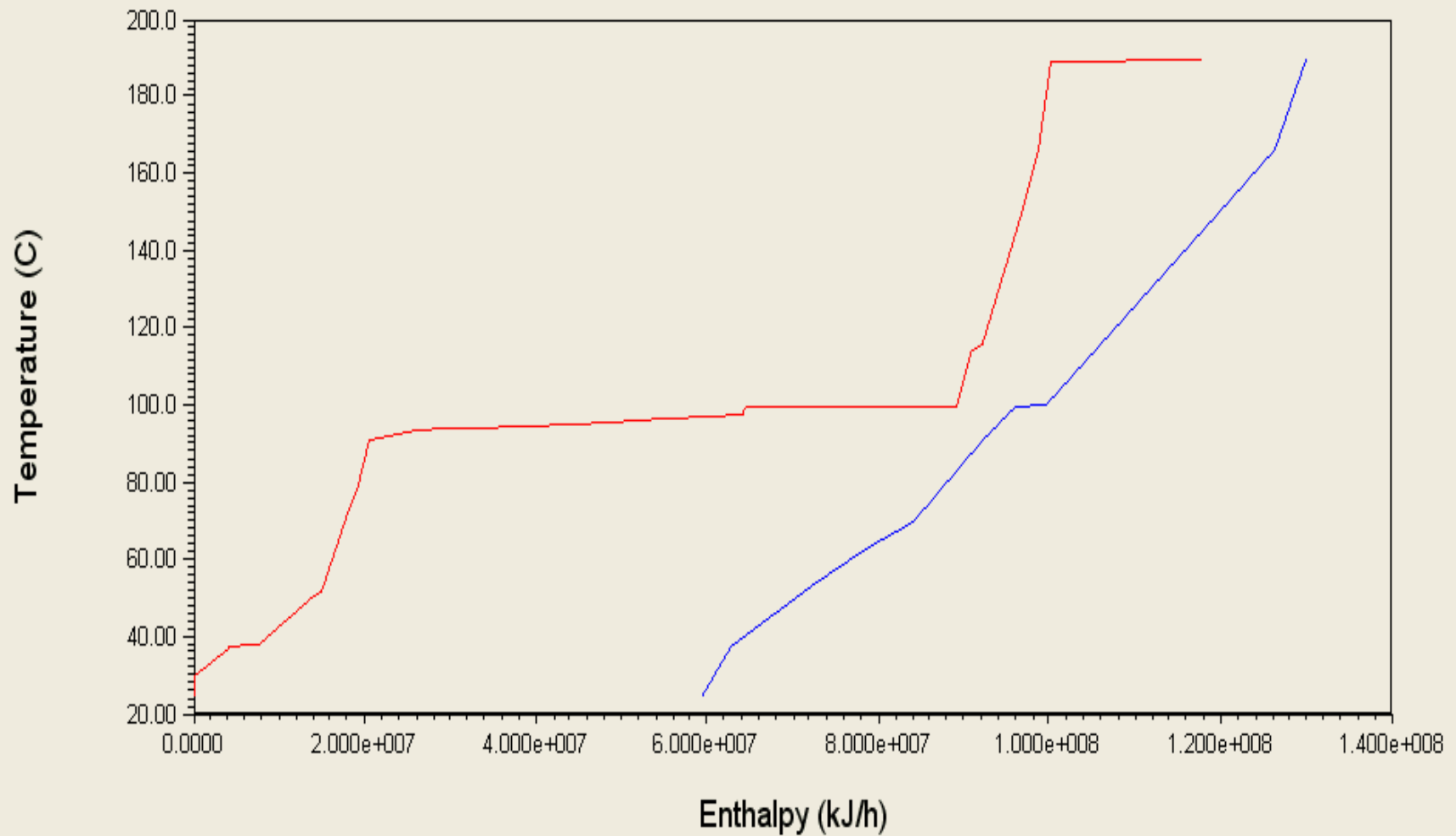


CASO BASE (FUENTE: AUTOR)

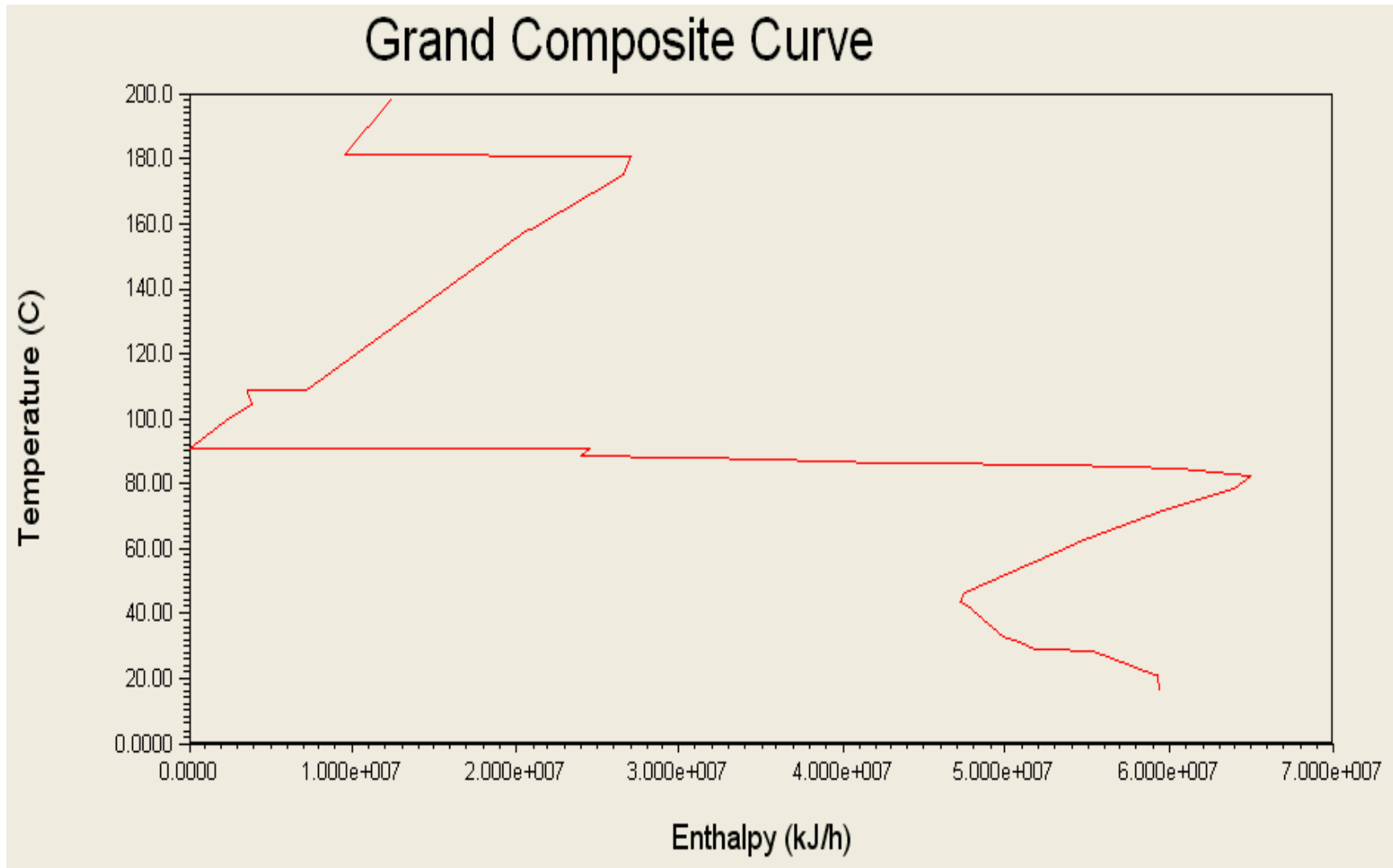


RED DE INTERCAMBIO DE CALOR (FUENTE: AUTOR)

Composite Curves



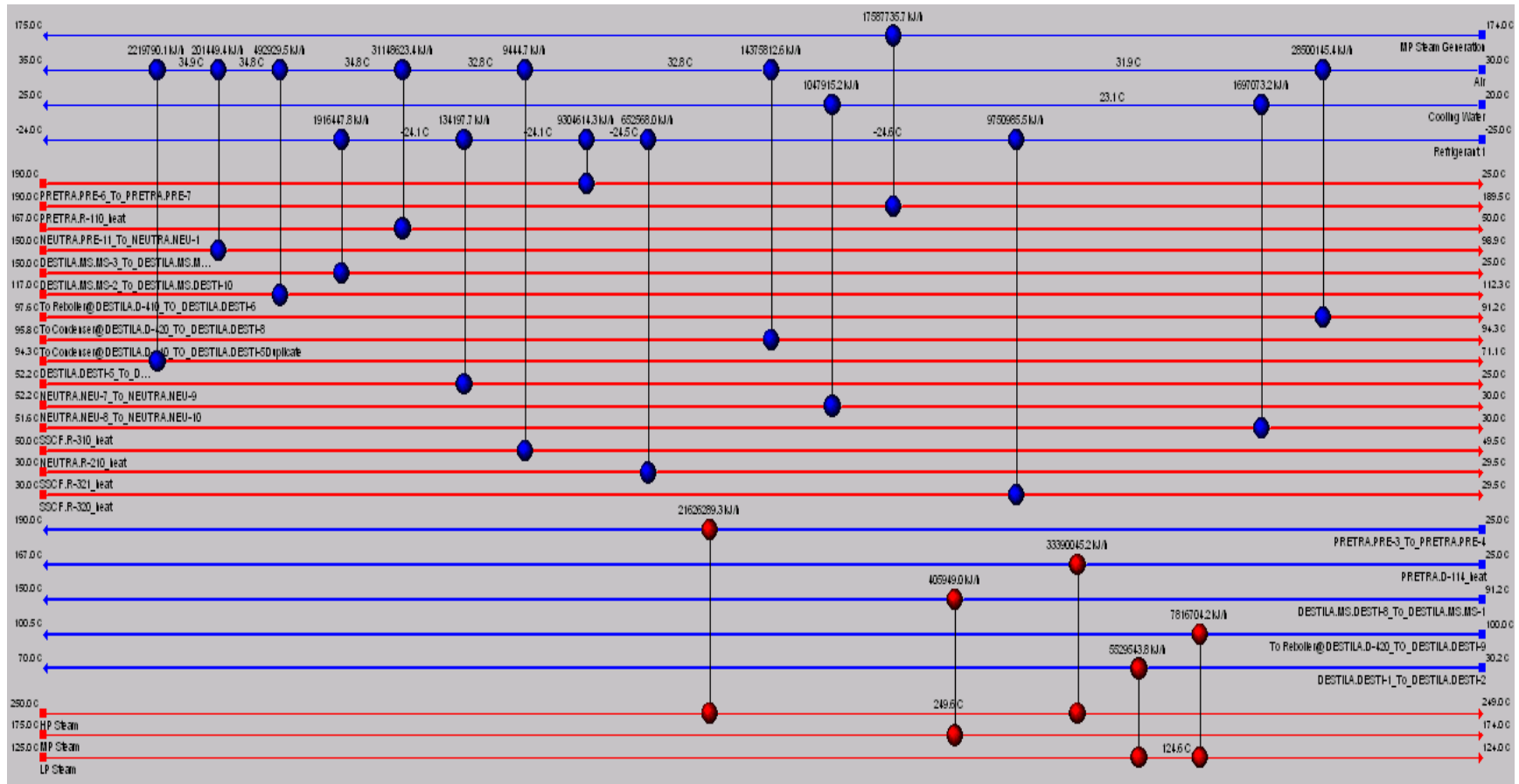
CURVAS COMPUESTAS (FUENTE: AUTOR)



GRAN CURVA COMPUESTA (FUENTE: AUTOR)

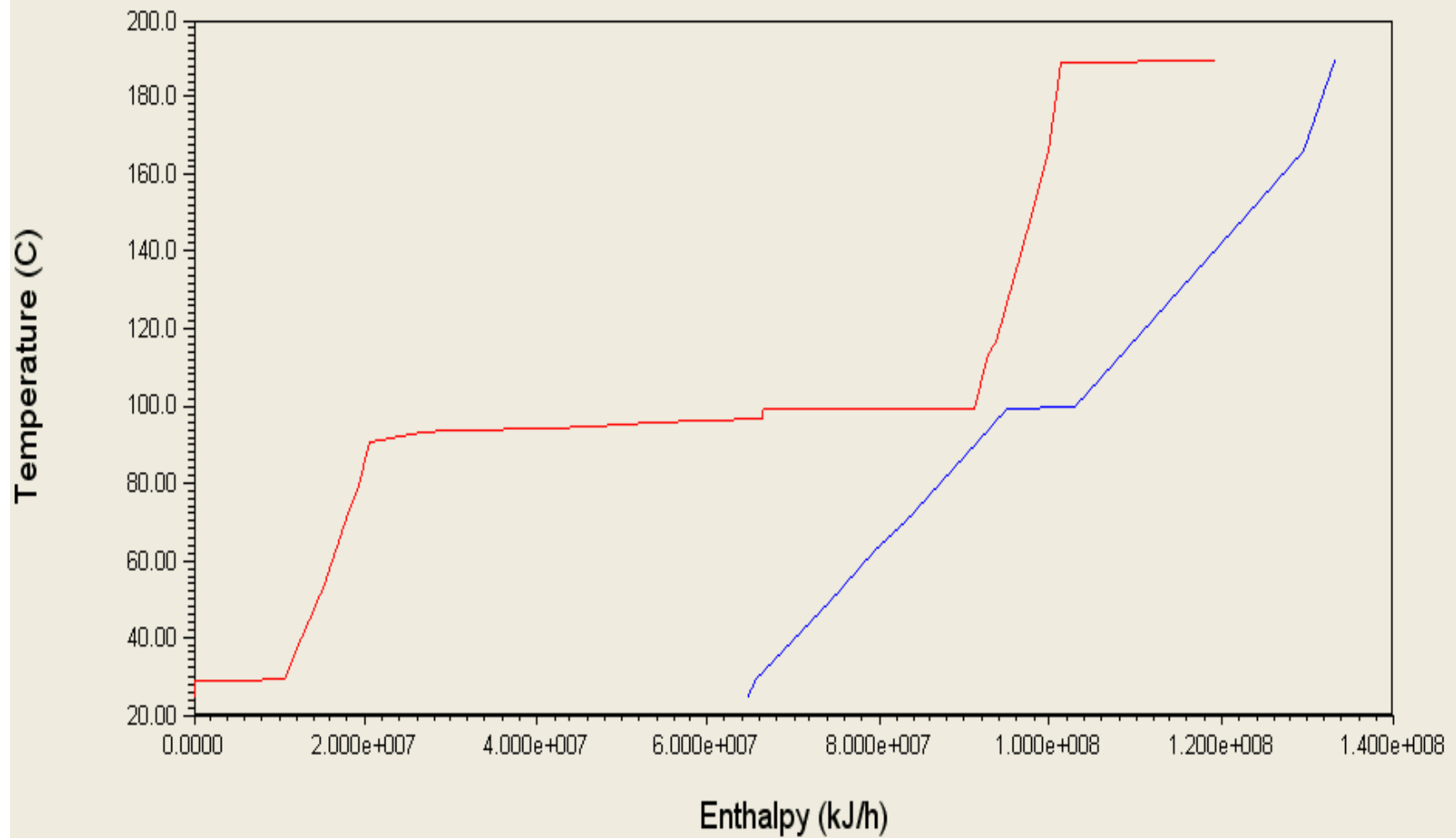
ANEXO K

SERVICIOS INDUSTRIALES PARA EL CASO BASE, RED DE INTERCAMBIO DE CALOR, CURVAS COMPUESTAS Y GRAN CURVA COMPUESTA PARA LA RUTA 4

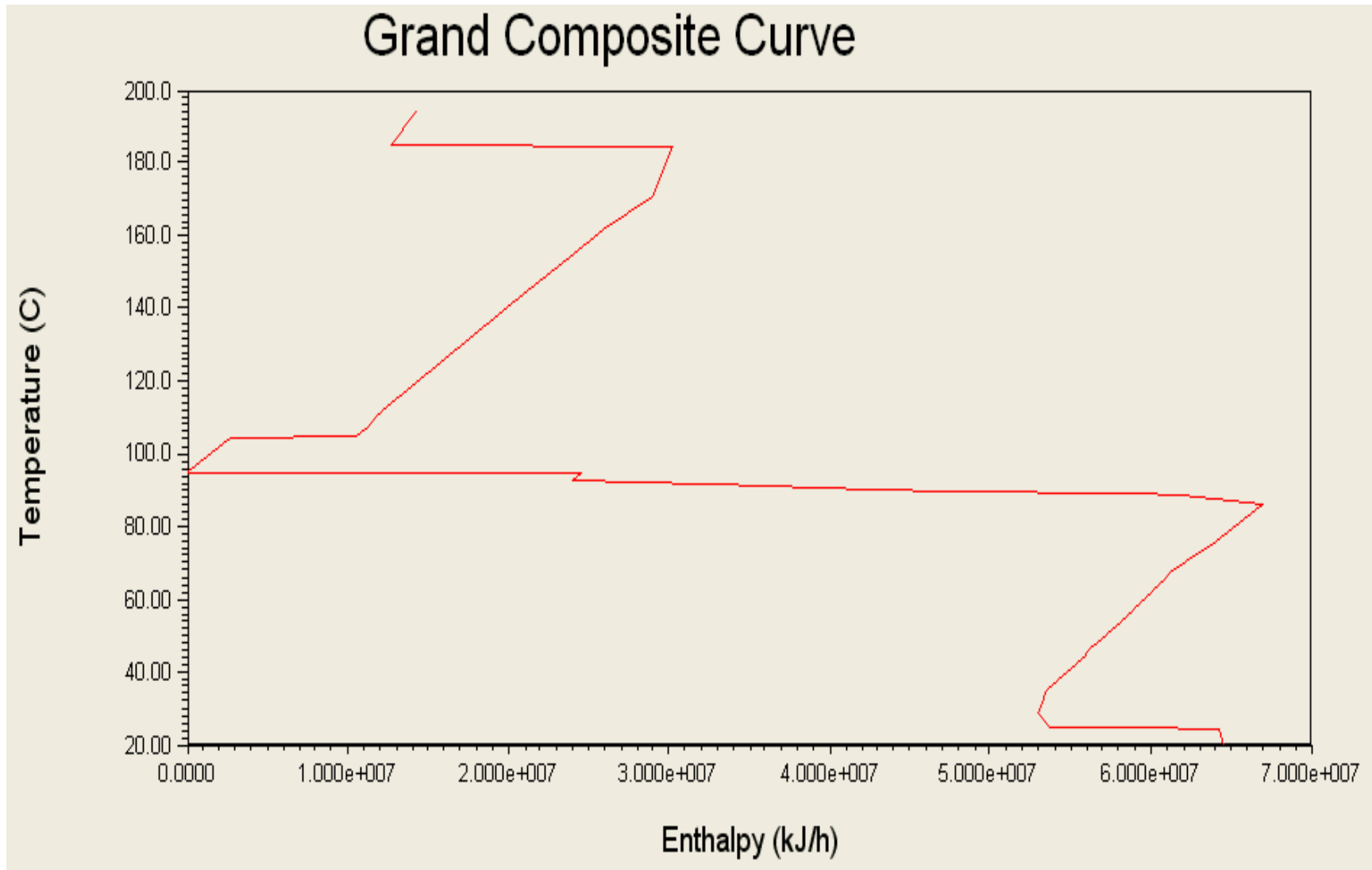


CASO BASE (FUENTE: AUTOR)

Composite Curves

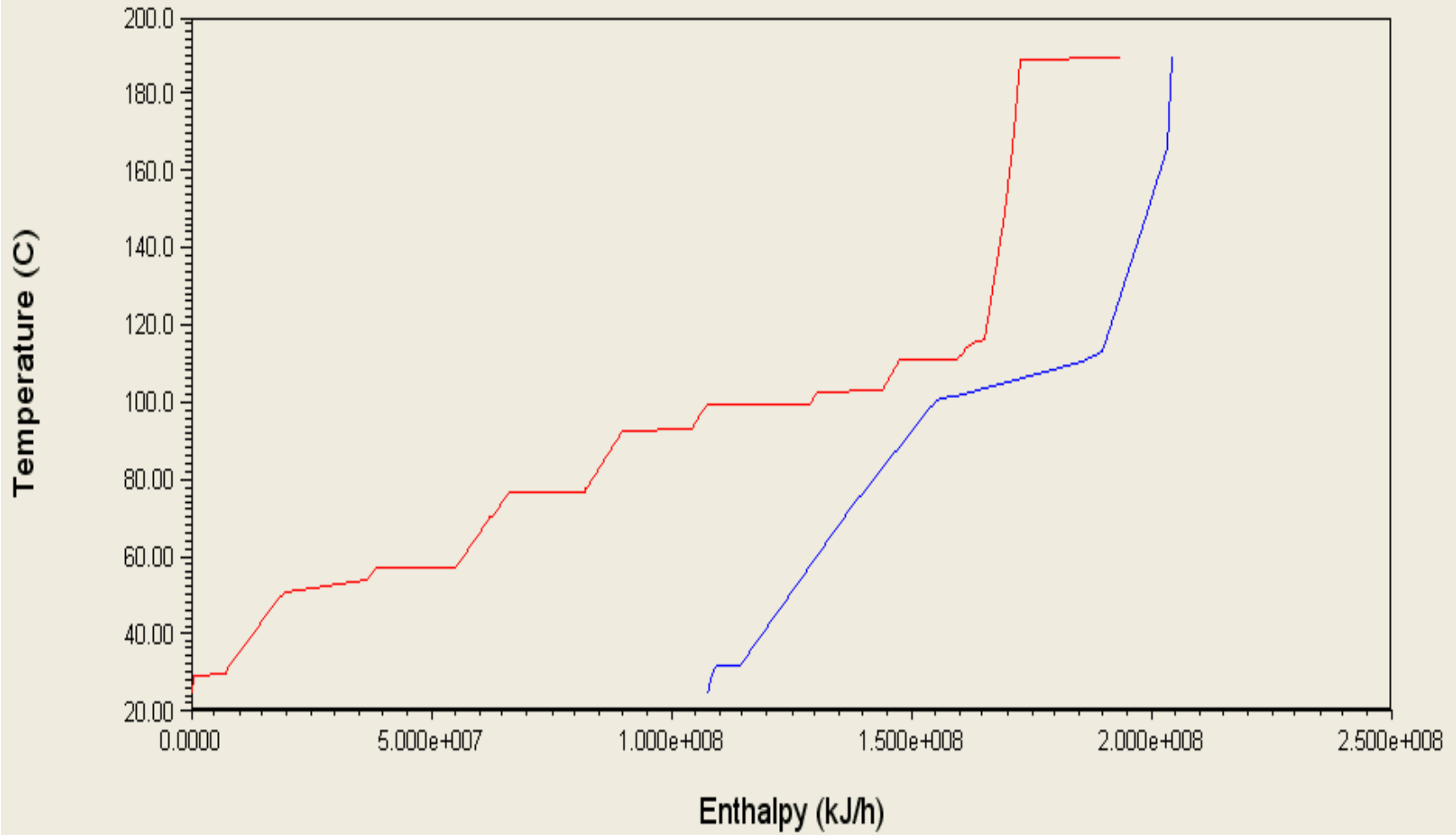


CURVAS COMPUESTAS (FUENTE: AUTOR)

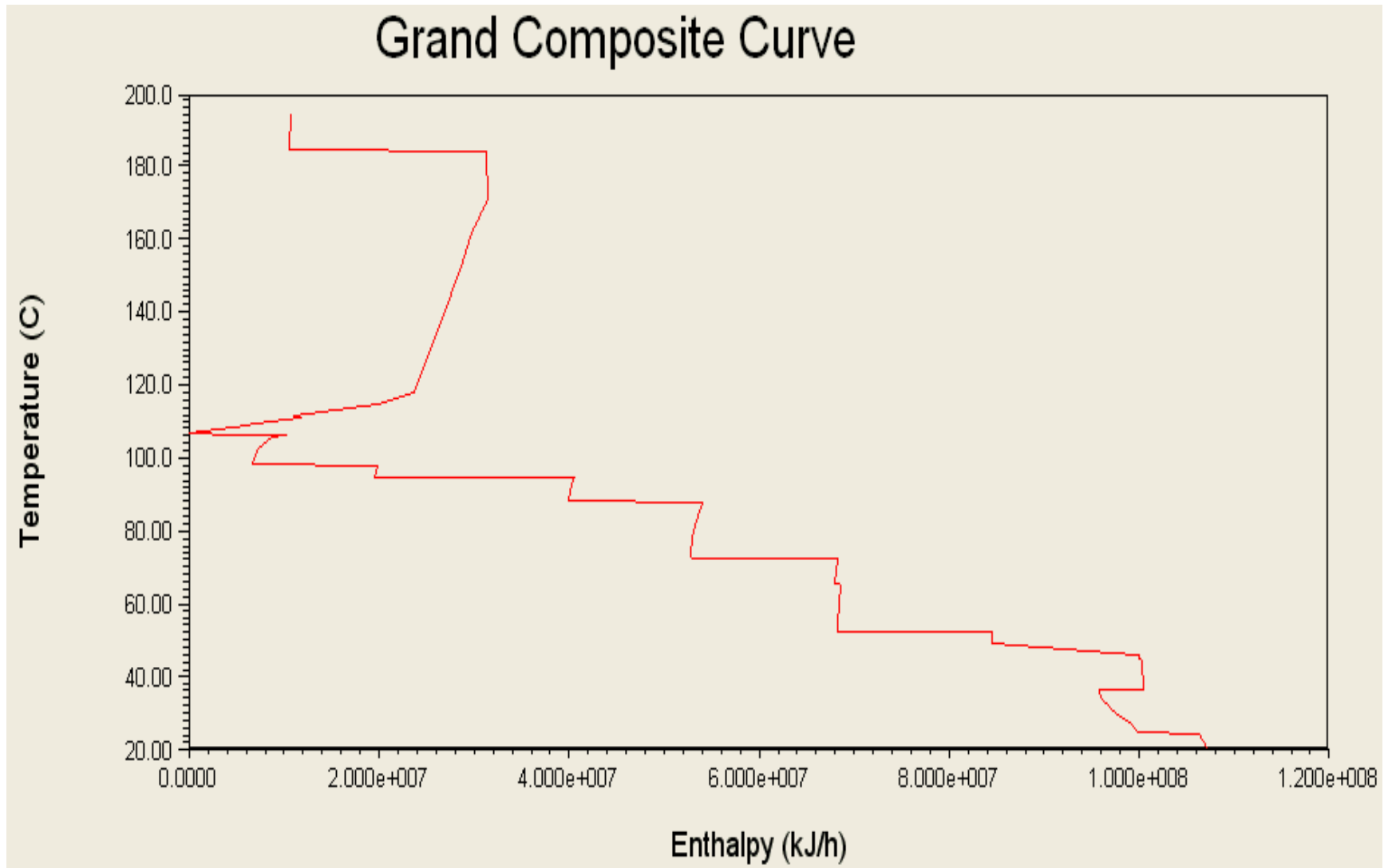


GRAN CURVA COMPUESTA (FUENTE: AUTOR)

Composite Curves



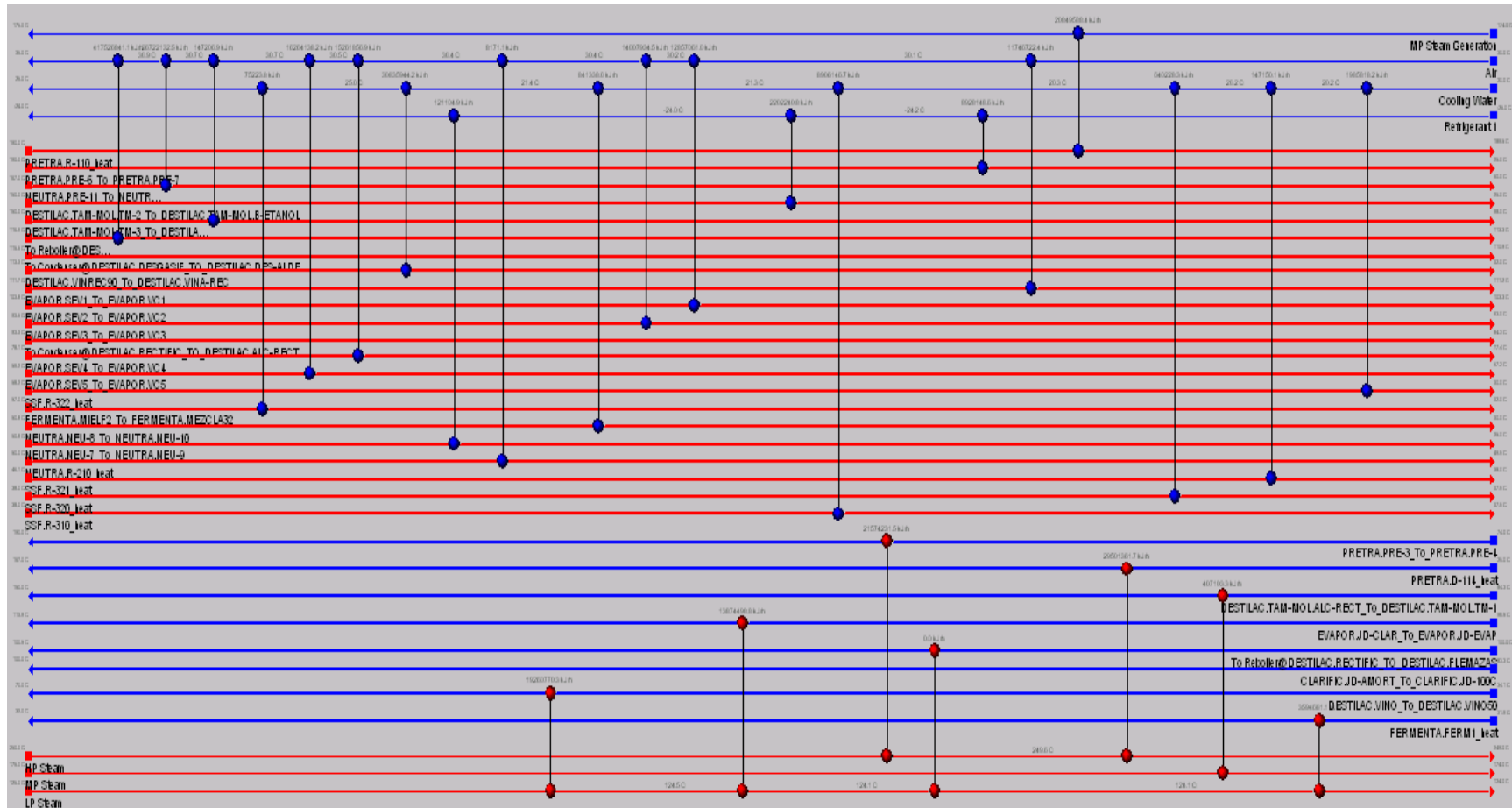
CURVAS COMPUESTAS (FUENTE: AUTOR)



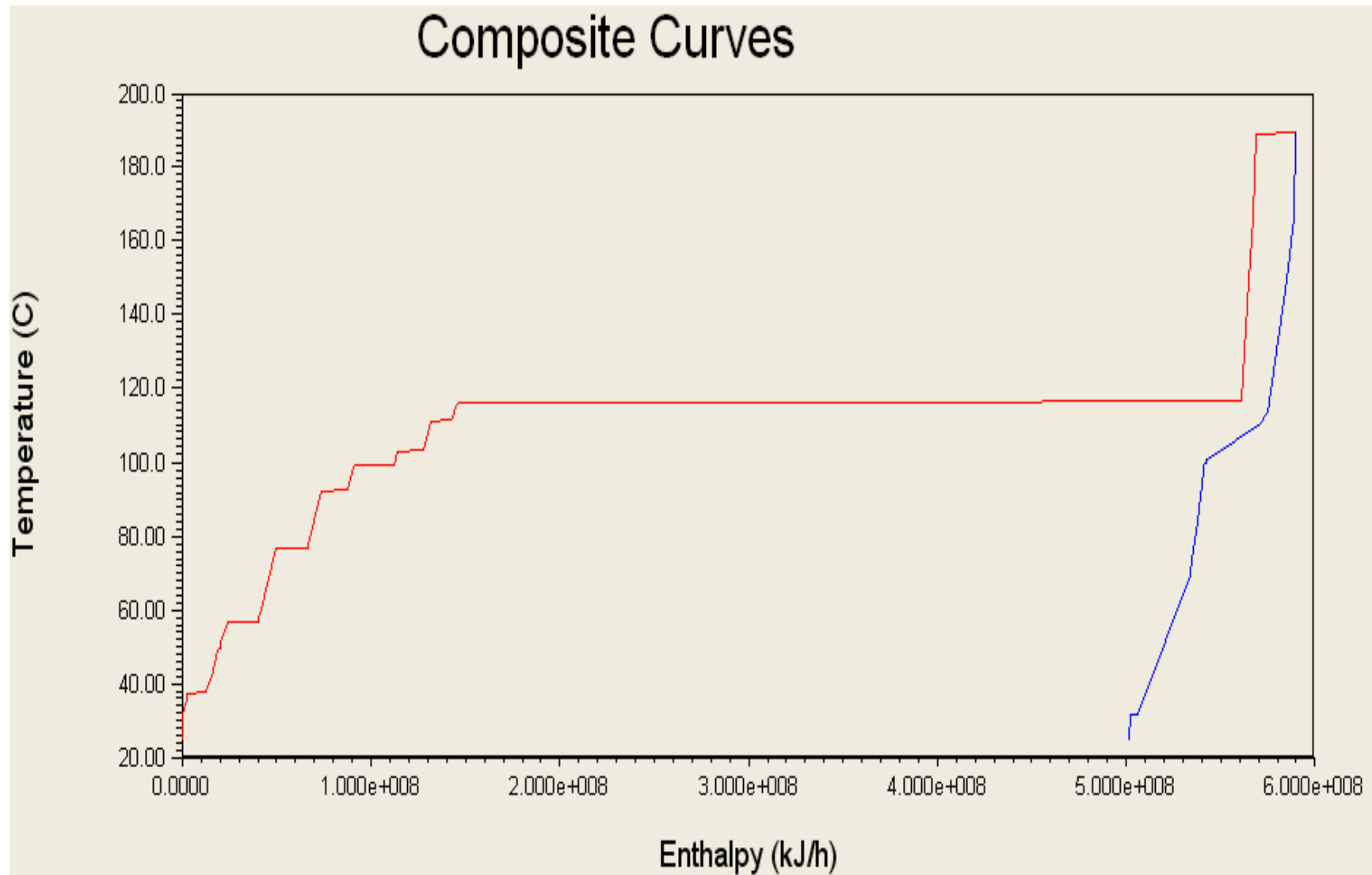
GRAN CURVA COMPUESTA (FUENTE: AUTOR)

ANEXO M

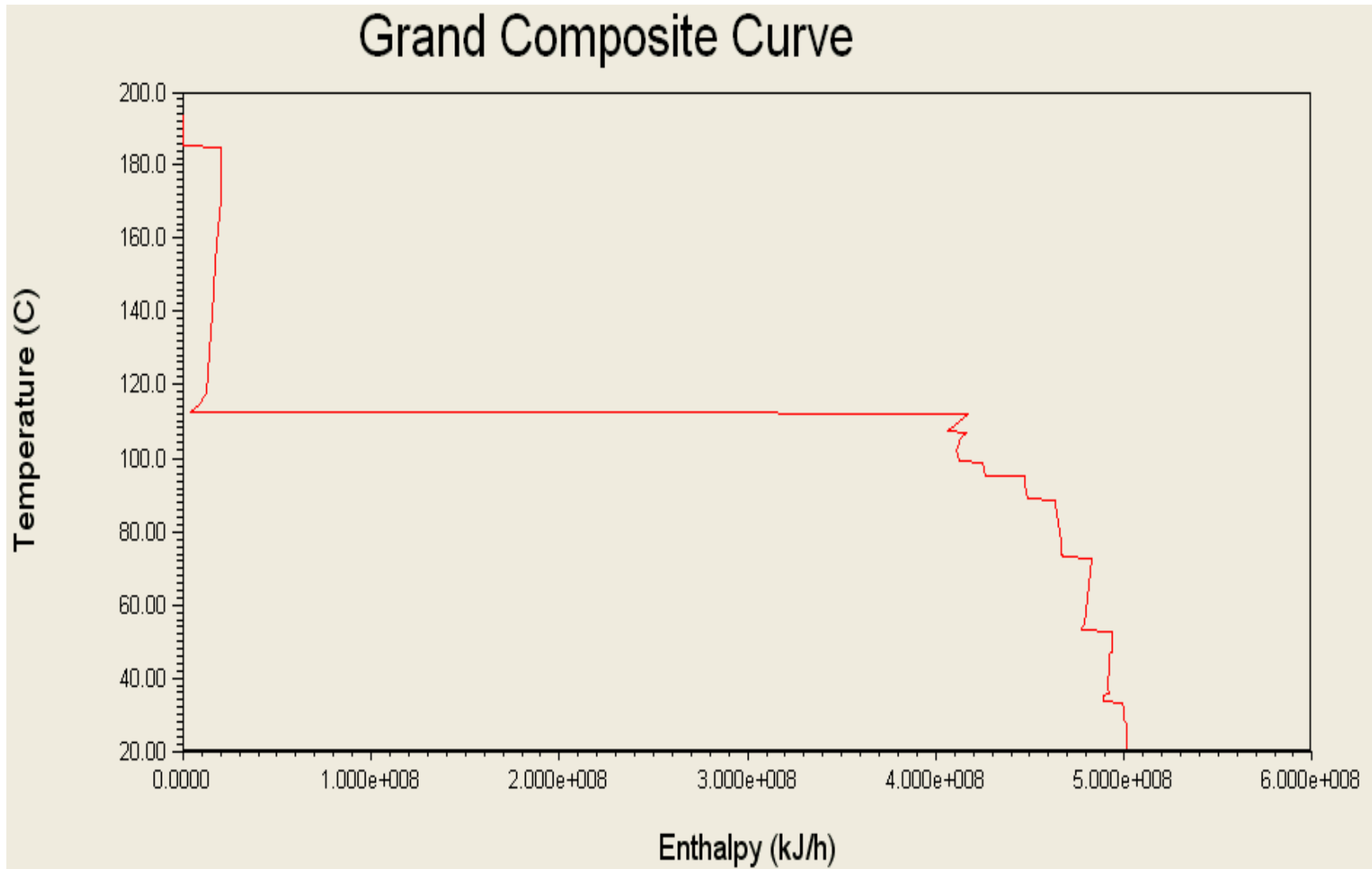
SERVICIOS INDUSTRIALES PARA EL CASO BASE, RED DE INTERCAMBIO DE CALOR, CURVAS COMPUESTAS Y GRAN CURVA COMPUESTA PARA LA RUTA 6



CASO BASE (FUENTE: AUTOR)



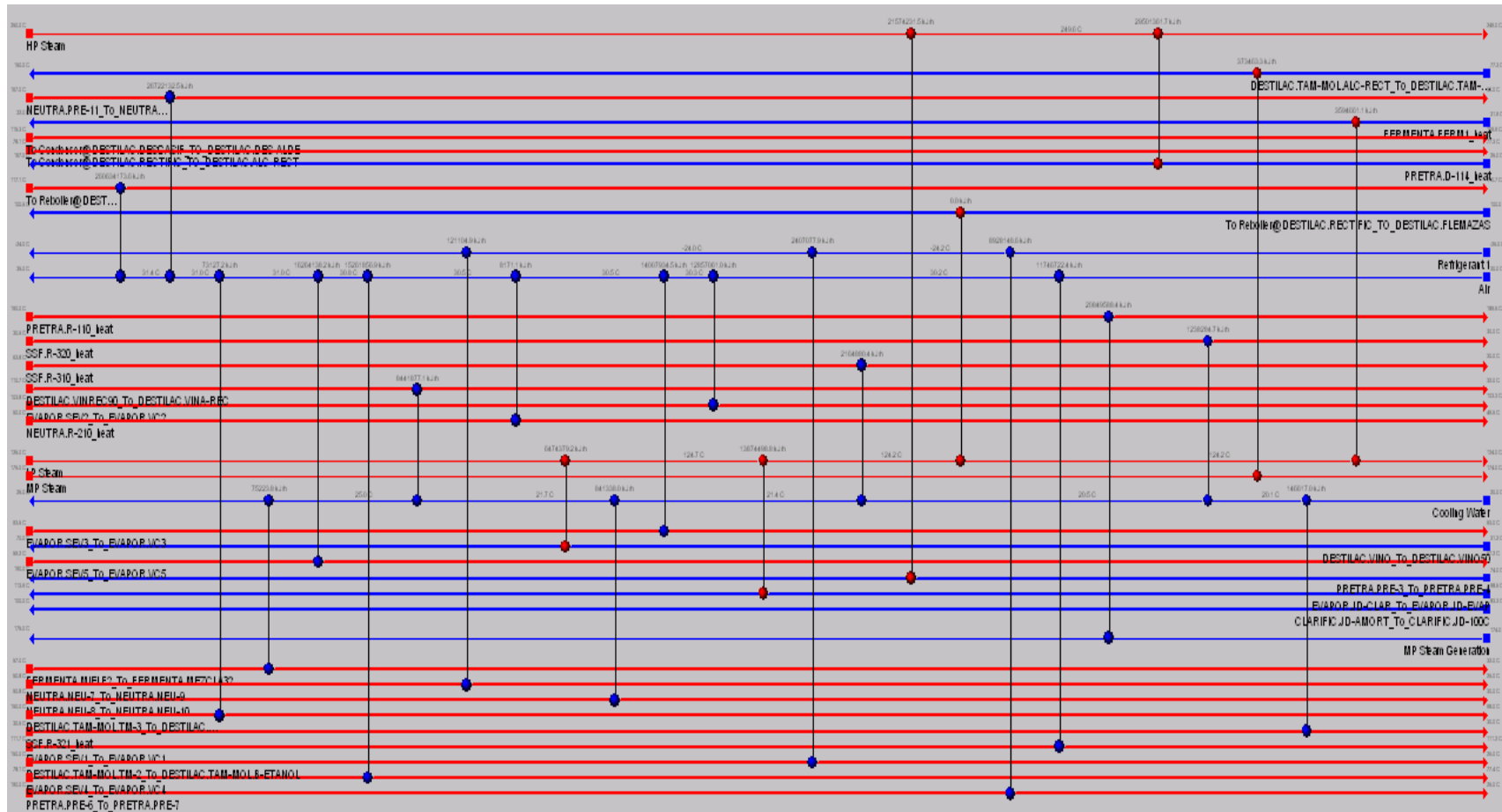
CURVAS COMPUESTAS (FUENTE: AUTOR)



GRAN CURVA COMPUESTA (FUENTE: AUTOR)

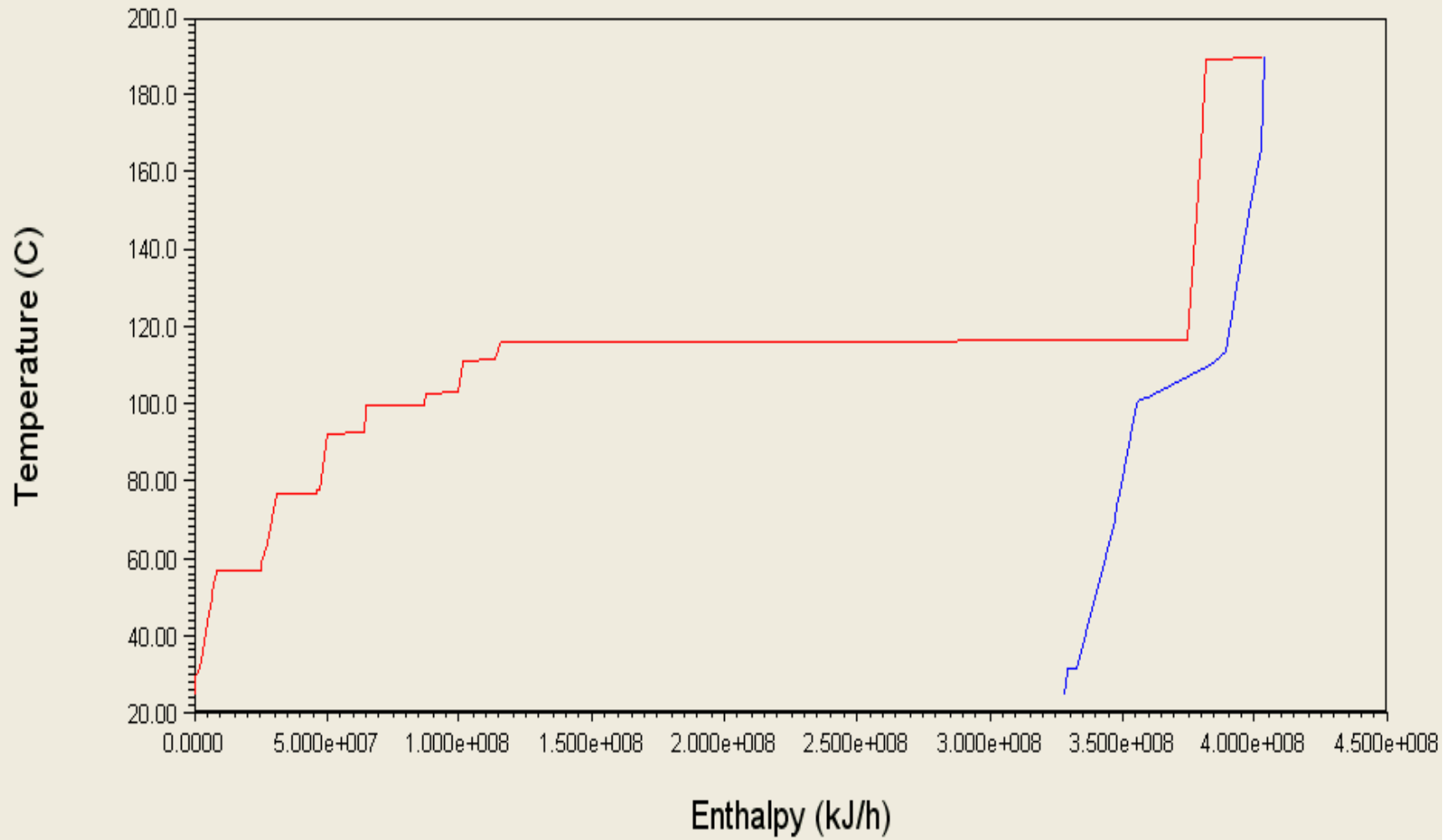
ANEXO N

SERVICIOS INDUSTRIALES PARA EL CASO BASE, RED DE INTERCAMBIO DE CALOR, CURVAS COMPUESTAS Y GRAN CURVA COMPUESTA PARA LA RUTA 7

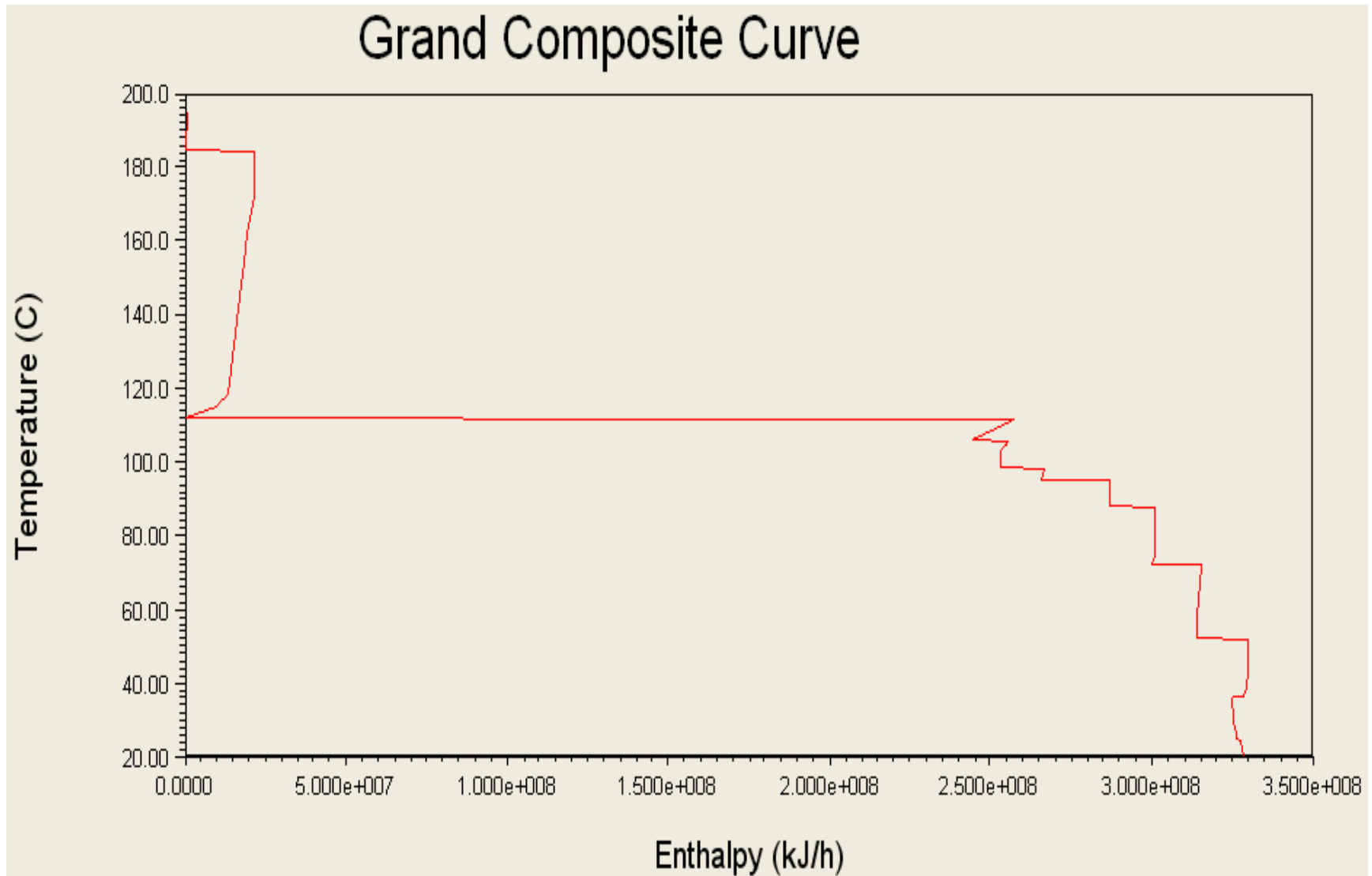


CASO BASE (FUENTE: AUTOR)

Composite Curves



CURVAS COMPUESTAS (FUENTE: AUTOR)



GRAN CURVA COMPUESTA (FUENTE: AUTOR)

ANEXO O

EXERGÍAS QUÍMICAS ESPECÍFICAS PARA CADA COMPUESTO

Componente	Exergía específica (kJ/mol)
Etanol	1 250,98
Agua (l)	0,9005
Agua (g)	9,49127
CO ₂	19,096
Glucosa	2 793,2006
Sulfato de calcio	8,6
Xilosa	1 835,31136
Celulosa	3 404,43
H ₂ SO ₄	108,57456
Hemicelulosa	2 826,64
Lignina	3 449,525373
CaO	110,2
Oxígeno	3,97
Amoníaco	337,9
Ácido acético	908
Ácido succínico	1 609,4
Glicerol	1 705,66437
Furfural	2 338,71
Hidróxido de calcio	53,7
Celobiosa	6 007,8
Ácido láctico	1 541,71776
Yoduro de potasio	129,056174
Celulasa	145,653404
<i>S. cerevisiae</i>	2 671,9644
<i>Z. mobilis</i>	2 671,9644
Cenizas	0,5
Sacarosa	6 007,8
Sorbitol	3 196,3
Acetaldehído	1 163,3
Propanol	2 010
Butanol	2 655
Pentanol	3 311,7
Éter	2 661

Fuente: Karamarkovic & Karamarkovic, 2009; Teng, Lee & Mohamed, 2010; Velásquez Arredondo, Ruiz Colorado & Oliveira Junior, 2009; Wall, 2009; Zhong, Peters & de Swaan Arons, 2002

ANEXO P

EJEMPLO DE CÁLCULO DE LAS IRREVERSIBILIDADES PARA UN EQUIPO

Como ejemplo se tomará el equipo M-112 de la etapa Pretratamiento de la Producción conjunta de bioetanol, el cual puede ser observado en el Anexo 5-Etapa Pretratamiento

Las corrientes de entrada del equipo son BAGAZO y PRE-2

La corriente de salida es PRE-3

Para el cálculo de las irreversibilidades se aplica la ecuación 7 (Pereira Hernández & Albarracín Caballero, 2010):

$$\text{Irreversibilidades} = Ex\ in - Ex\ out \pm ExQ \pm ExW \quad (7)$$

Donde:

- Ex in: Exergía de las corrientes que entran
- Ex out: Exergía de las corrientes que salen
- ExQ: Exergía asociadas a la transferencia de calor
- ExW: Exergía asociada a la corriente eléctrica

Es importante resaltar que la exergía puede entrar o salir del sistema no sólo por corrientes de materia sino también por corrientes de energía.

Para el cálculo de la exergía de las corrientes que entran y salen del proceso se utilizan las ecuaciones 1, 2 y 3, mencionadas en la sección 2.2. dedicada al análisis exergético.

Para el cálculo de la exergía de las corrientes de energía se utilizan las ecuaciones 8 y 9 (Dincer & Rosen, 2007)

$$ExQ = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) * Q \quad (8)$$

$$ExW = W \quad (9)$$

Donde:

- To: Temperatura de referencia
- T: Temperatura
- Q: Calor transferido
- W: Trabajo realizado

El estado de referencia fue establecido como Presión: 1 atm y Temperatura: 25 °C

Para la corriente BAGAZO se calcula la exergía física y química a partir de los siguientes datos calculados con el simulador y el Anexo 15:

- $m = 12.838,2494 \text{ kg/h}$
- $h = -12.059,9196 \text{ kJ/kg}$
- $h_0 = -12.227,7037 \text{ kJ/kg}$
- $S = -16,3231 \text{ kJ/kg-K}$
- $S_0 = -16,6556 \text{ kJ/kg-K}$
- $T_0 = 298 \text{ K}$
- $n = 437,7821 \text{ kmol/h}$
- $X_{\text{celulosa}} = 0,03598$
- $X_{\text{hemicelulosa}} = 0,02304$
- $X_{\text{lignina}} = 0,03050$
- $X_{\text{ceniza}} = 0,04609$
- $X_{\text{agua}} = 0,8629$
- $X_{\text{sacarosa}} = 0,001375$

A partir de estos datos se obtiene:

- Exergía física = 881.004 kJ/h
- Exergía química = 131.540.353 kJ/h

Se repite el procedimiento para calcular los valores de las otras dos corrientes y se obtiene:

Corriente PRE-2:

- Exergía física = 0 kJ/h
- Exergía química = 101.693 kJ/h

Corriente PRE-3:

- Exergía física = 784.938 kJ/h
- Exergía química = 131.613.485 kJ/h

Se toman estos datos y se introducen en la ecuación 7 y se obtiene:

Irreversibilidades = 124.627 kJ/h

Este proceso se repite para cada corriente y equipo de los procesos.

ANEXO Q

DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS POR MEDIO DE LOS EQUIPOS QUE LAS CONFORMAN

MOLINOS:

Se utilizan molinos, separadores y mezcladores en serie con el objetivo de triturar y separar el jugo del bagazo de caña. En procesos como las rutas 5, 6 y 7 también es posible que se encuentren mezcladores y/o intercambiadores para recolectar corrientes de agua y vapor provenientes de otras etapas. Esto ocurre también para las etapas Clarificación y Evaporación.

CLARIFICACIÓN:

Se utilizan intercambiadores de calor para aumentar la temperatura del jugo proveniente de la etapa Molinos. Adicionalmente, se utilizan mezcladores para agregar agentes floculantes a la corriente principal con el objetivo de separar la cachaza del jugo que sale de la etapa.

EVAPORACIÓN:

La corriente que proviene de la etapa Clarificación pasa por una serie de evaporadores que la concentran. Por medio de intercambiadores de calor se condensan los vapores de agua resultantes para ser utilizados en otras etapas.

TACHOS:

El jugo concentrado proveniente de la etapa Evaporación se dispone para la producción de azúcar. Adicionalmente, por medio de centrifugas se separa el azúcar de las mieles residuales, las cuales serán utilizadas para la producción de bioetanol. Finalmente, se utiliza un mezclador para recolectar los vapores residuales de los tachos.

FERMENTACIÓN:

Se utiliza un intercambiador para ajustar la temperatura de la corriente proveniente de Tachos, la cual es posteriormente fermentada en el reactor, produciendo bioetanol y CO₂.

PRETRATAMIENTO:

El bagazo de caña proveniente de la etapa Molinos es mezclado con ácido sulfúrico. A continuación, la corriente resultante entra al reactor de pretratamiento para convertir la hemicelulosa en xilosa, principalmente. Se utiliza un flash para la

separación de sólidos y gran parte de líquidos y gases. Los primeros pasan a la etapa de Hidrólisis/Fermentación. Los últimos pasan a la etapa de Neutralización.

NEUTRALIZACIÓN:

La corriente de gases y líquidos que entra a la etapa pasa por un intercambiador de calor para reducir la temperatura hasta el valor necesario para llevar a cabo las reacciones de neutralización en el reactor. Esta corriente es posteriormente llevada a la etapa Hidrólisis/Fermentación

HIDRÓLISIS/FERMENTACIÓN:

Las corrientes provenientes de las etapas Pretratamiento y Neutralización son mezcladas. También se utilizan mezcladores para agregar los microorganismos como la celulasa, *Saccharomyces cerevisiae* y *Zymomonas mobilis*, agua y amoníaco. Dependiendo de la tecnología (SHF, SSF y SSCF), la corriente entra a los reactores de Hidrólisis y Fermentación, o a un solo reactor encargado de hidrolizar la celulosa y fermentar las hexosas y pentosas o sólo las primeras. En el caso de SHF se utiliza un flash posterior a la fermentación de pentosas para recuperar la glucosa para ser fermentada posteriormente. Dependiendo de la tecnología, es posible el uso de un mezclador para obtener una sola corriente final.

DESTILACIÓN:

A esta etapa entran las corrientes provenientes de la etapa Fermentación y/o Hidrólisis/Fermentación. Se utiliza un absorbedor para recuperar parte del etanol que se va en la corriente de CO₂. Posteriormente se ajusta la temperatura en un intercambiador de calor y entra a la columna de concentración. El producto en el tope de la torre pasa por un nuevo intercambiador y posteriormente se ingresa a la columna de rectificación. Finalmente el producto que sale en el tope de la última torre de destilación es llevado a los tamices moleculares. Dependiendo del proceso, es posible el uso de un intercambiador de calor y un divisor para ajustar y separar las vinazas resultantes de la torre de concentración.