



# Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (CAPE) aplicada a las demandas del proceso de extracción de aceite crudo de palma

Angel Darío González-Delgado  
Ingeniero Químico, Ph. D.



**INNOVACIÓN Y SOSTENIBILIDAD  
EN PALMA DE ACEITE**  
Nutriendo Personas y Protegiendo el Planeta

26, 27 y 28 de septiembre de 2018  
Centro de Convenciones Cartagena de Indias, Colombia

Convenio 069  
MADR-  
CORPOICA

Convenio 211  
MADR-  
CORPOICA

Convenio 181  
MADR-  
CORPOICA

Convenio 115  
MADR-  
CORPOICA

2011

2012

2013

2014

2  
3

Coordinadores  
de cadenas

7

Gestores de  
Innovación

3

Asesores  
expertos

1  
3

Centros de  
Investigación

3  
7

Cadenas  
productivas

RESULTADOS

La Agenda Nacional de I+D+i es un **instrumento de planificación y gestión** concertado con los distintos actores del SNCTA, **destinado a orientar los procesos de I+D+i** en las cadenas productivas para mejorar el desempeño sectorial. Identifica y prioriza demandas, actores, brechas tecnológicas, capacidades institucionales, oferta de investigación, iniciativas de proyectos y estrategias de gestión.

Fuente: Corpoica

Cadena	Producto	Nombre de la demanda	Área temática principal
Palma	Palma	Implementación de estrategias para disminuir el costo de procesamiento de racimos de fruto fresco (RFF).	Manejo cosecha, poscosecha y transformación
Palma	Palma	Necesidad de tecnologías eficientes en la producción de aceite crudo de palma (ACP).	Manejo cosecha, poscosecha y transformación
Palma	Palma	Implementación de un proceso viable técnico y económicamente, para la refinación de APC que conserva los antioxidantes.	Manejo cosecha, poscosecha y transformación
Palma	Palma	Disponibilidad de mano de obra calificada.	Socioeconomía, mercadeo y desarrollo empresarial
Palma	Palma	Disponibilidad de semillas mejoradas de palma con adaptación a las condiciones locales y resistentes a plagas y enfermedades.	Material de siembra y mejoramiento genético
Palma	Palma	Eficiencia en el uso de la energía en el sector palmicultor.	Manejo cosecha, poscosecha y transformación
Palma	Palma	Implementación de planes de producción para obtener productos de valor agregado a partir de la biomasa residual del cultivo de la palma.	Manejo cosecha, poscosecha y transformación

Fuente: Colciencias

# ¿Que es la Ingeniería de procesos asistida por computador?

- Dado lo complejo que pueden resultar los diseños en la ingeniería, se han logrado, obtener mecanismos que recrean la realidad para analizar el comportamiento de ciertos fenómenos, ahorrando así muchos recursos en casos donde no se tenga el diseño y se desconozca el comportamiento del medio.



# ¿Que es la Ingeniería de procesos asistida por computador?

- La ingeniería de procesos asistida por computador (CAPE por sus siglas en inglés) se refiere a la gestión de la complejidad de los sistemas que implican cambios físicos y químicos utilizando herramientas computacionales y software especializado.



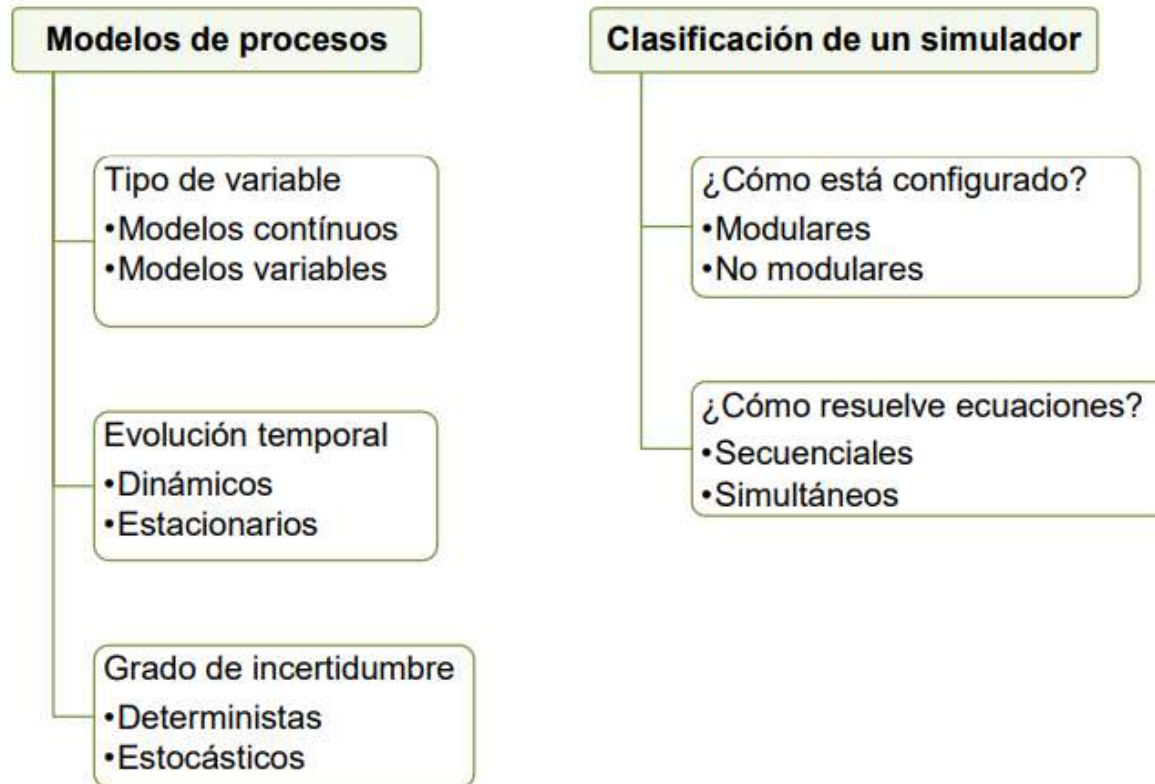
## ¿Cuáles son las competencias básicas de la CAPE?

- El modelado, la síntesis, diseño, control, optimización, resolución de problemas con sus dominios en productos y procesos de fabricación que implican cambio molecular, la sostenibilidad, los procesos de negocio, los sistemas biológicos, la energía y el agua.



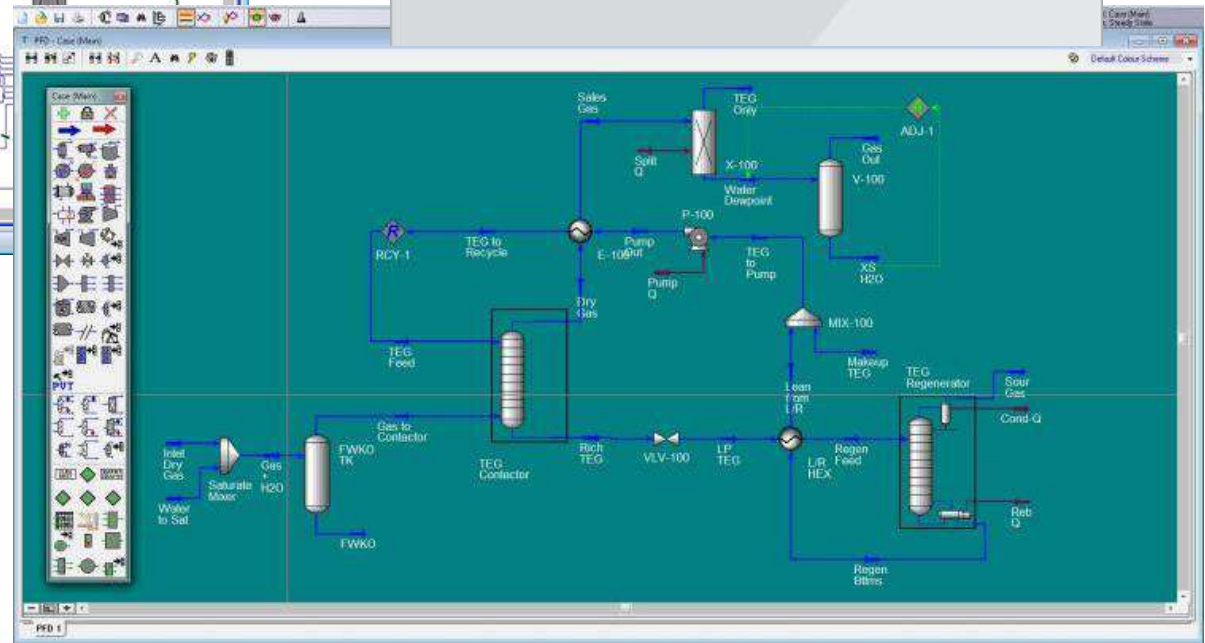
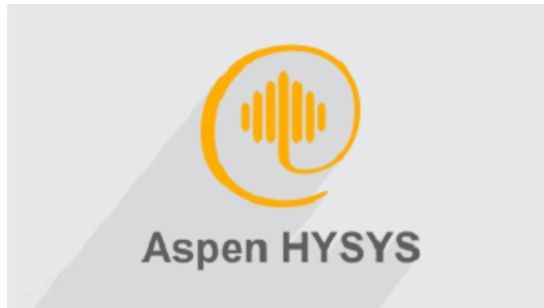
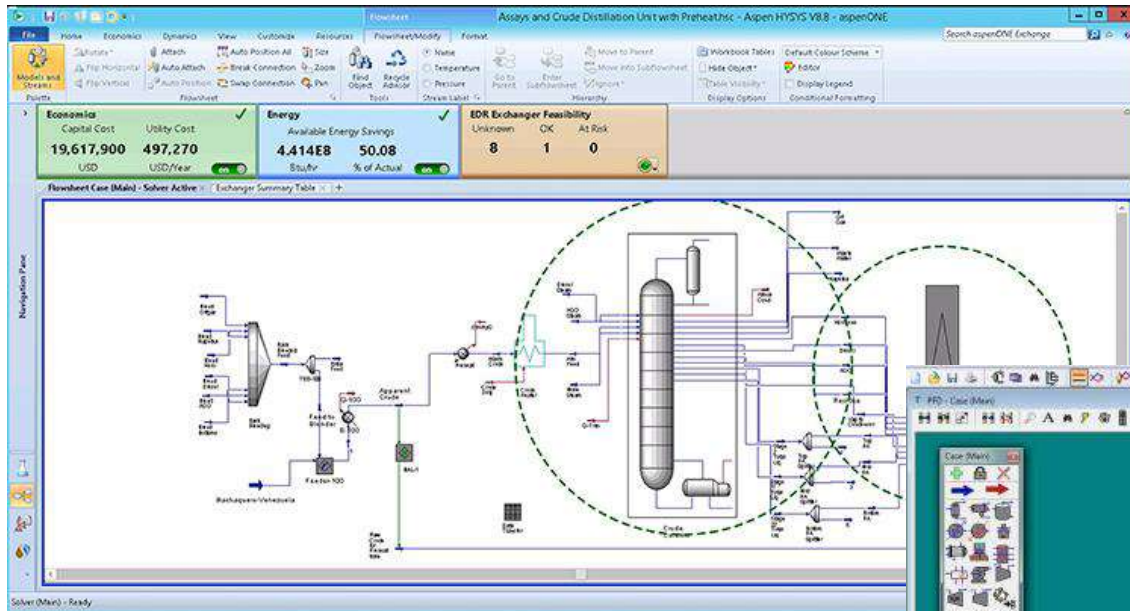
# Herramientas:

## -Simulación de procesos



# Herramientas:

## -Simulación de procesos

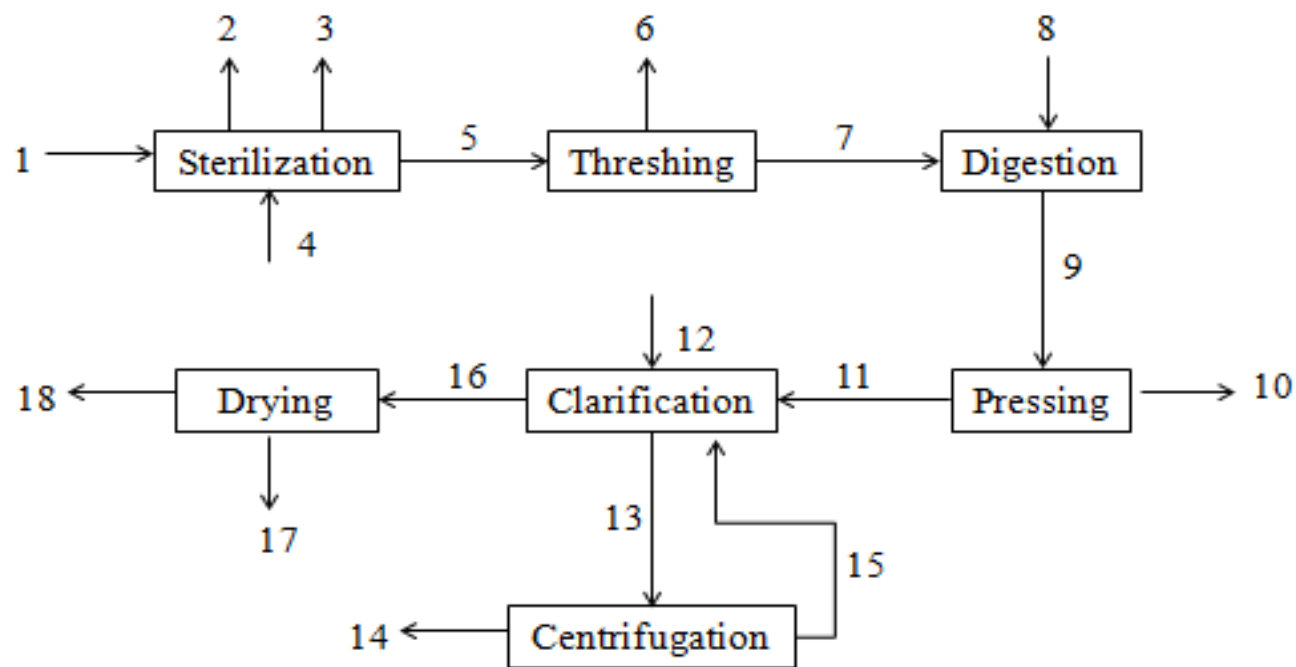




# 1. Visitas y toma de datos

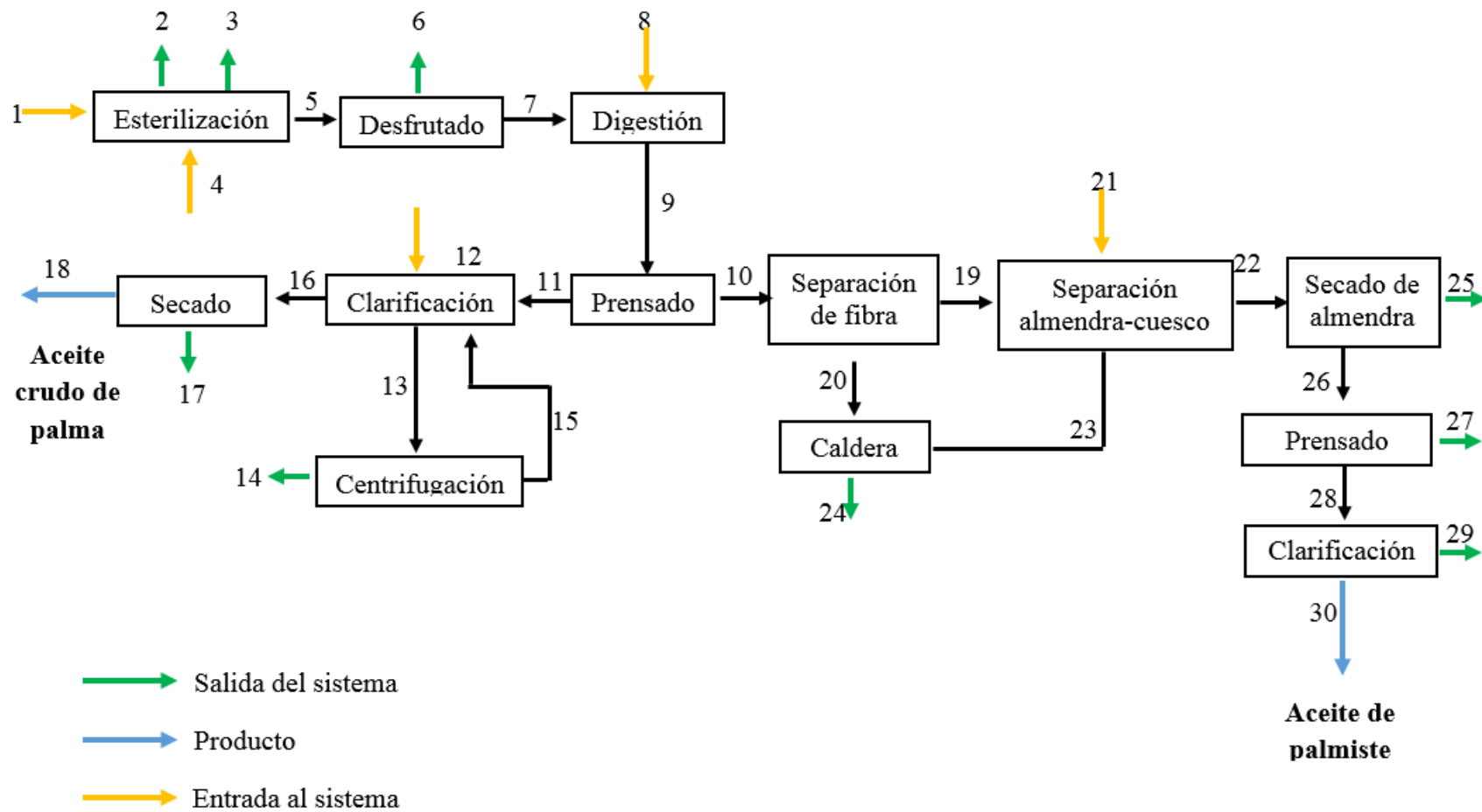


# 1. Modelamiento de los procesos

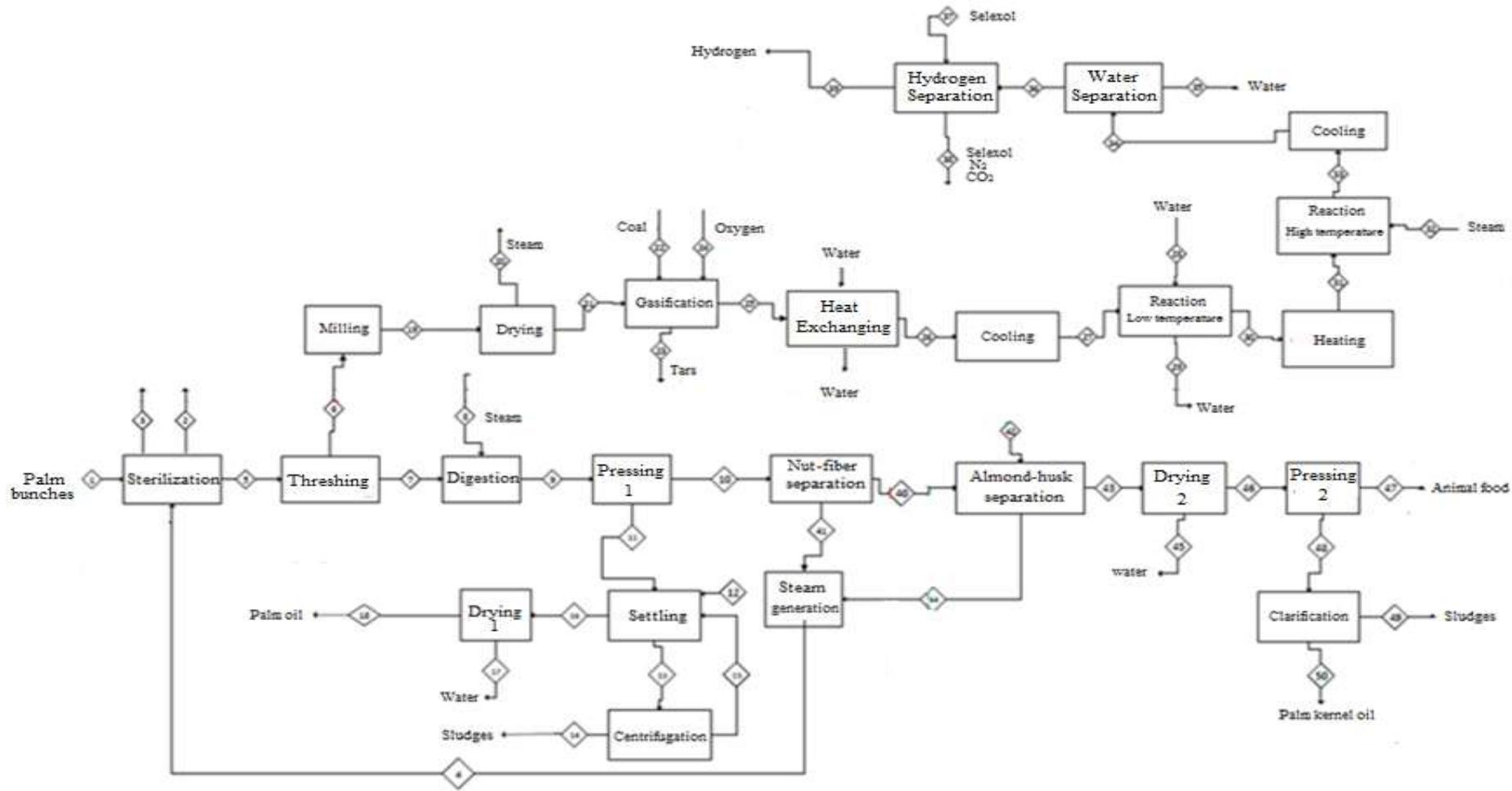


Componente	1
Agua (liquida)	30.1
Agua (vapor)	0
Cenizas	3.533
Silice	0.195
Celulosa	17.835
Hemicelulosa	9.985
Lignina	12.12
Ácido palmítico	0.549
Ácido esteárico	0.053
Ácido oleico	0.515
Ácido linoleico	0.092
Ácido mirístico	0.019
Ácido laurico	0.023
Tripalmitina	1.416
1,3-Dipalmitoyl-2-oleoylglycerol	7.217
1,2-dioleoyl-3-palmitoylglycerol	6.218
1-Palmitoyl-2-oleoyl-3-linoleoyl-rac-glycerol	2.608
1,2-Dipalmitoyl-3-lauroylglycerol	2.397
Trioleina	1.598
1-Palmitoyl-2-oleoyl-3-stearoyl-rac-glycerol	1.568
1,2-Lauroyl-3-miristoylglycerol	0.491
Trilaurina	0.585
1,3-Lauroyl-2-oleoylglycerol	0.272
1,2-Miristoyl-3-Lauroylglycerol	0.333
CCLA	0.278

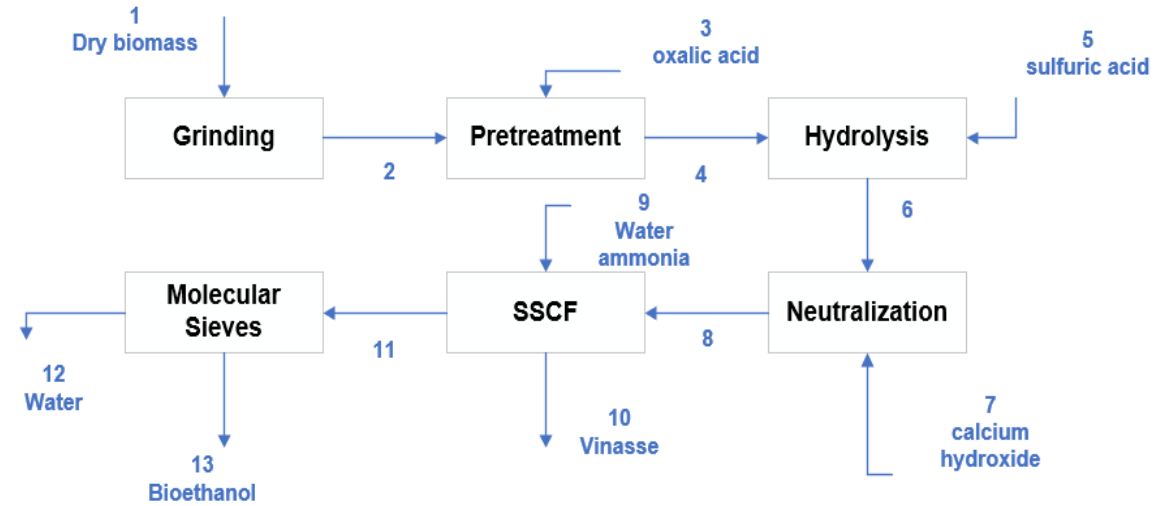
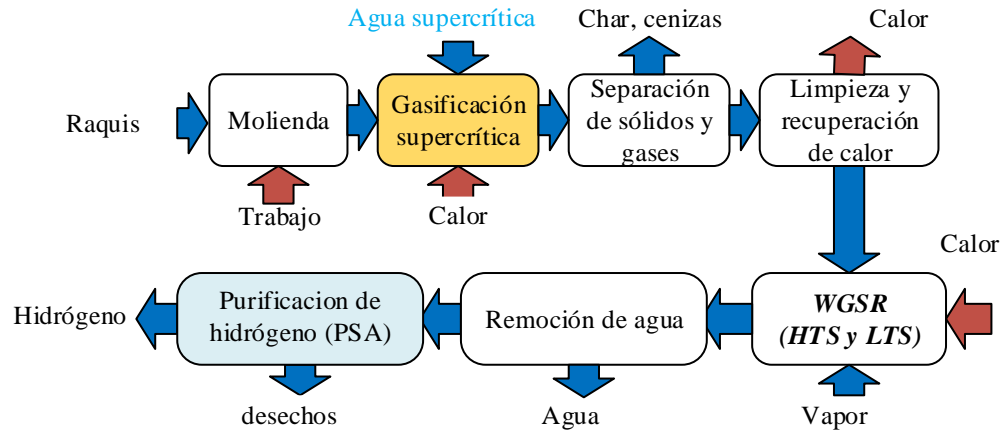
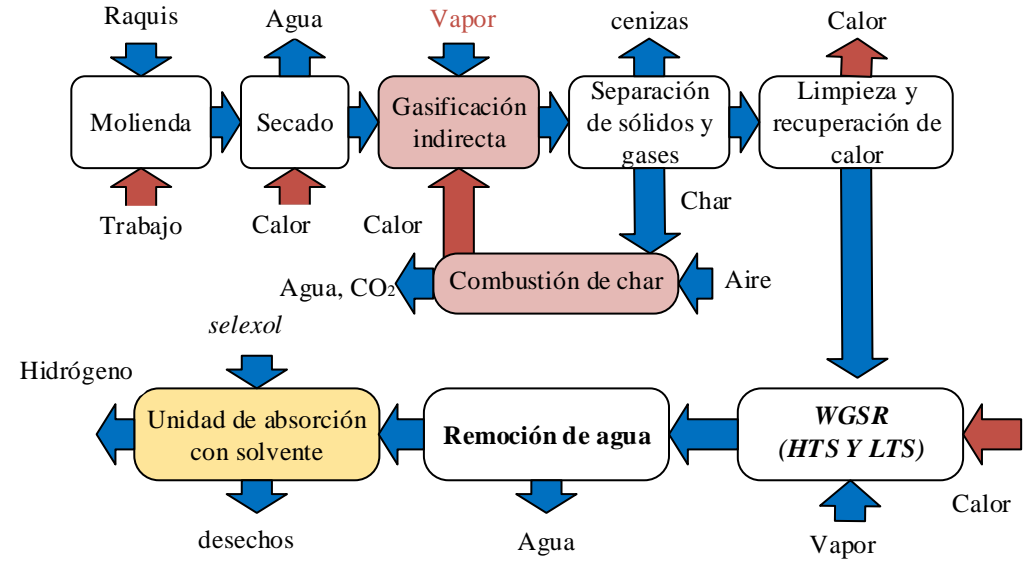
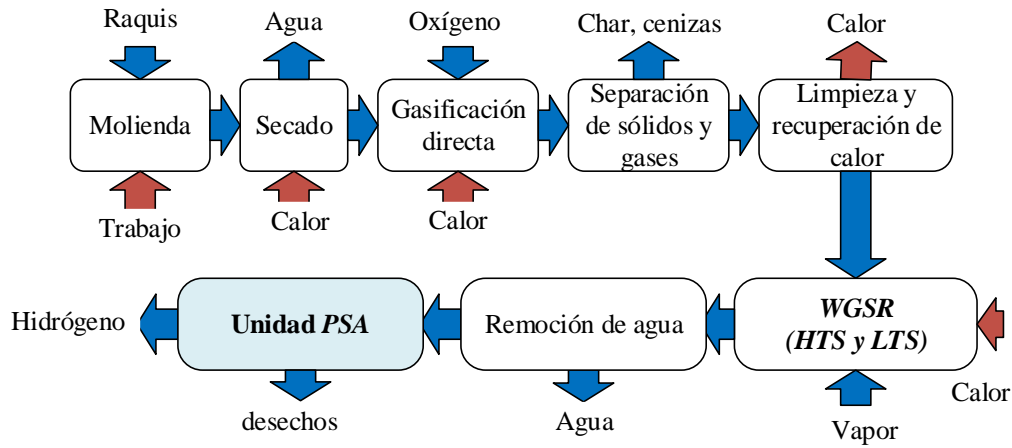
# 1. Modelamiento de los procesos



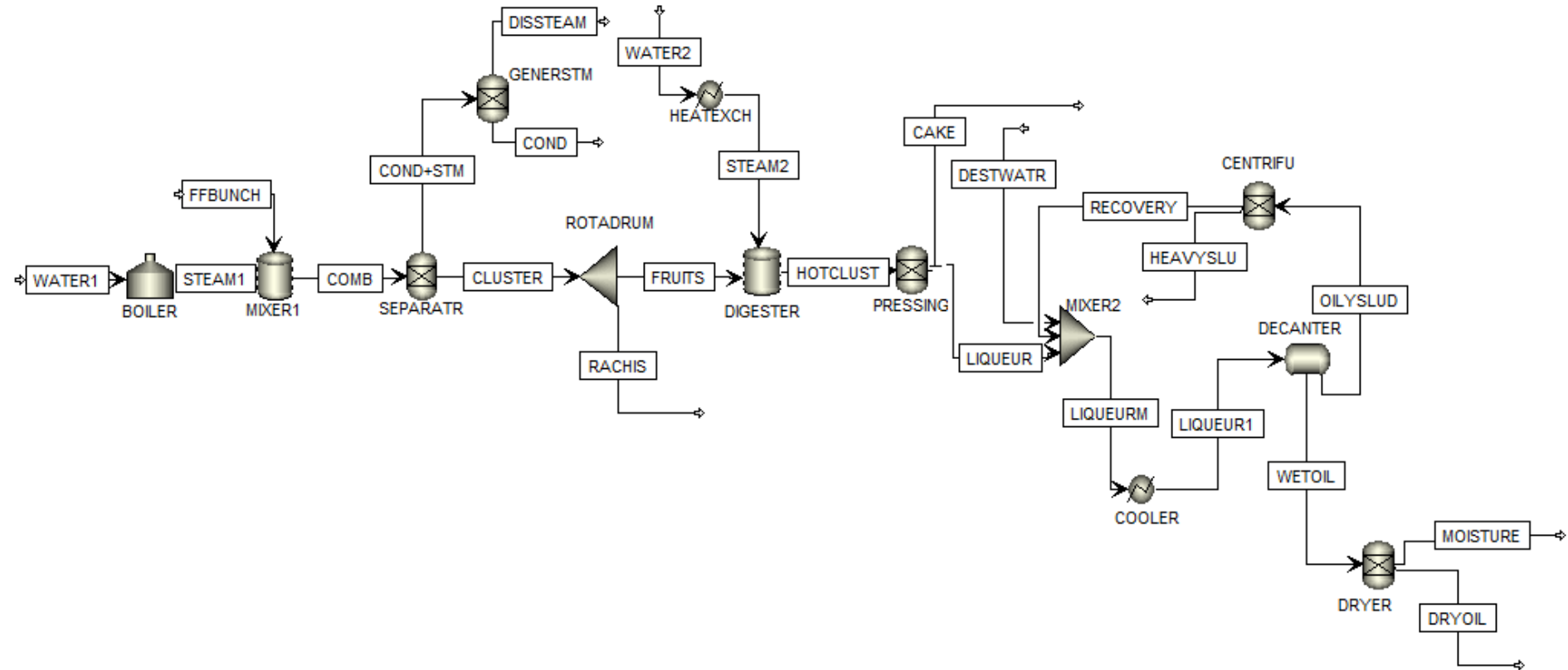
# 1. Modelamiento de los procesos



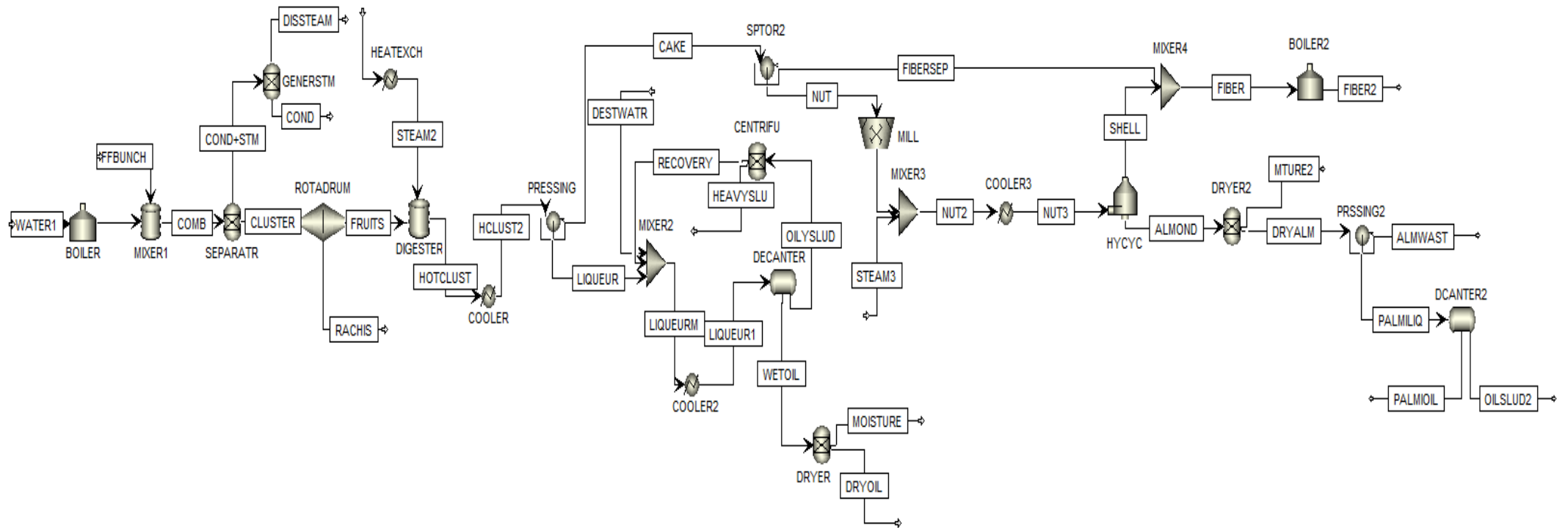
# 1. Modelamiento de los procesos



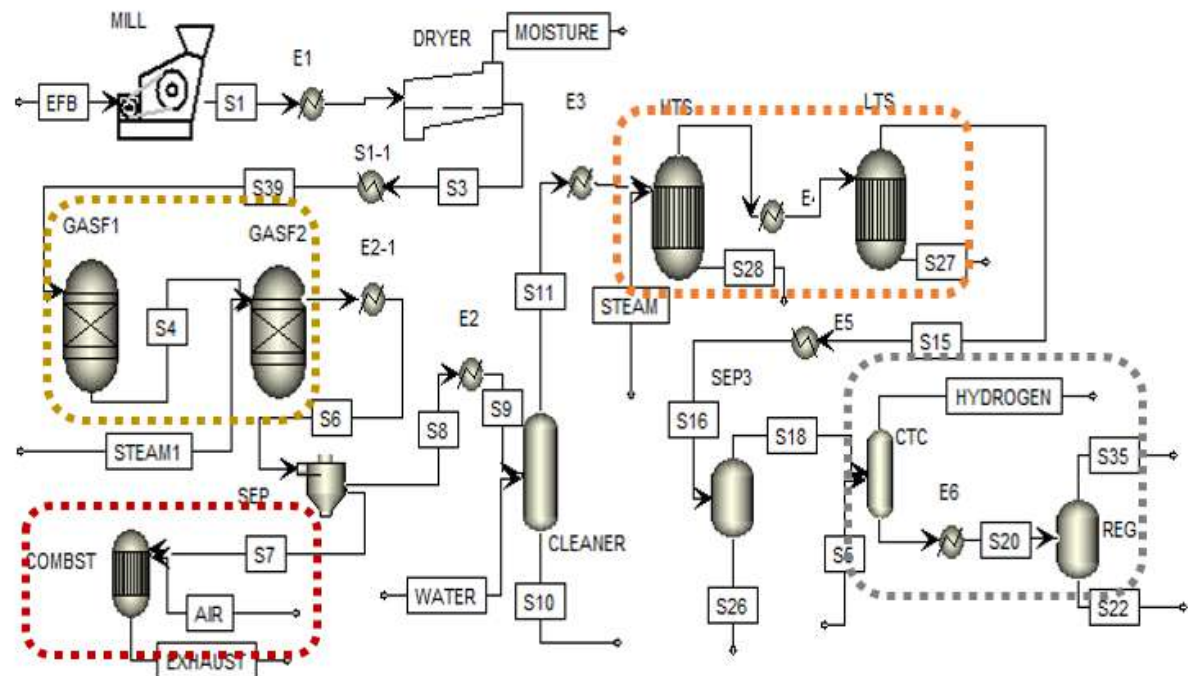
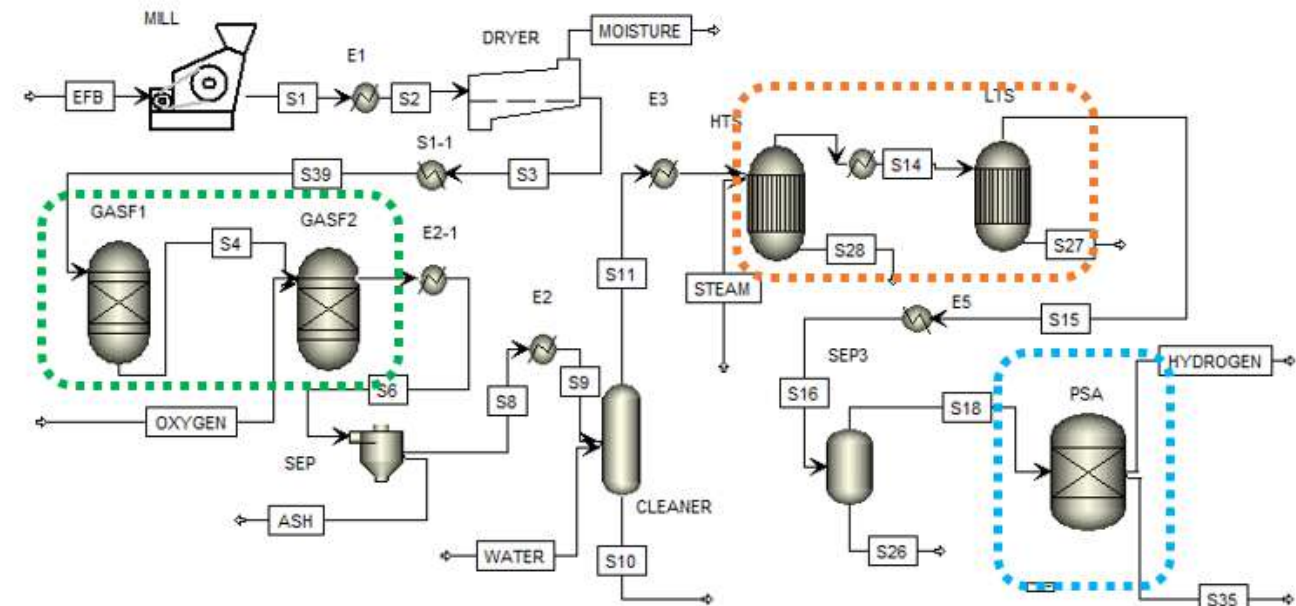
## 2. Simulación de los procesos



## 2. Simulación de los procesos

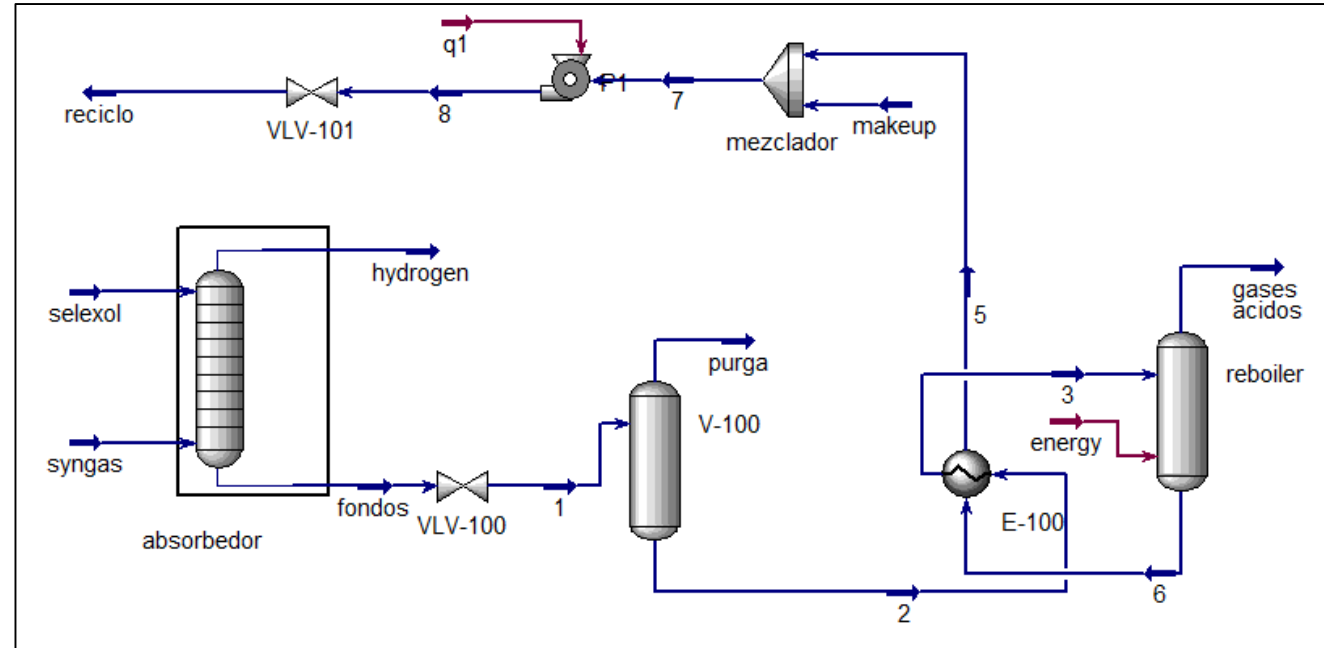
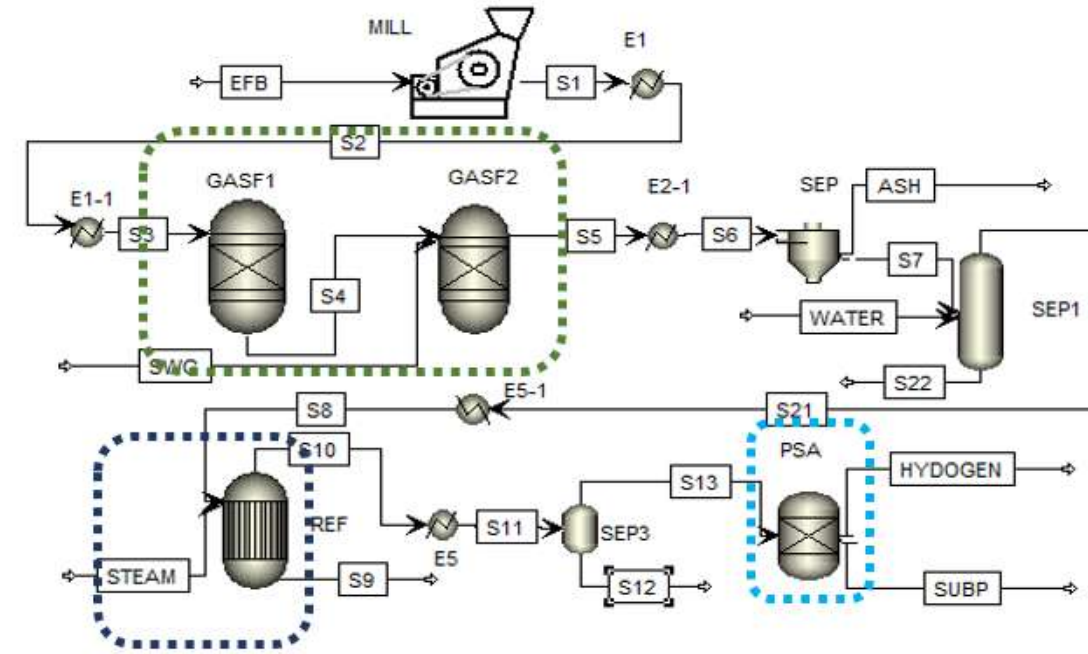


## 2. Simulación de los procesos



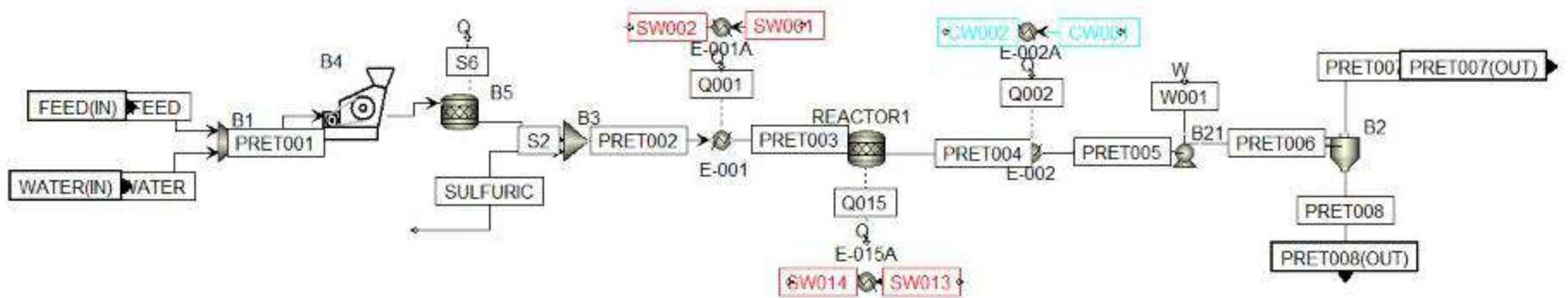
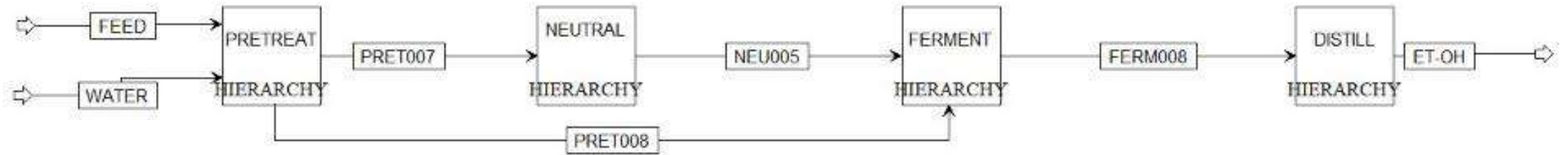


## 2. Simulación de los procesos



Propiedades	Reportado en la literatura*	Este estudio	% aproximación
Capacidad calorífica (kJ/kg.K)	14,304	14,1	98,57
Entalpia de vaporización (kJ/mol)	900	898,5	99,83
Conductividad térmica W/(K.m)	0,1815	0,1724	94,99
Volumen molar (m <sup>3</sup> /mol)	22,42	24,06	92,69

## 2. Simulación de los procesos



### 3. Análisis de sensibilidad paramétrica

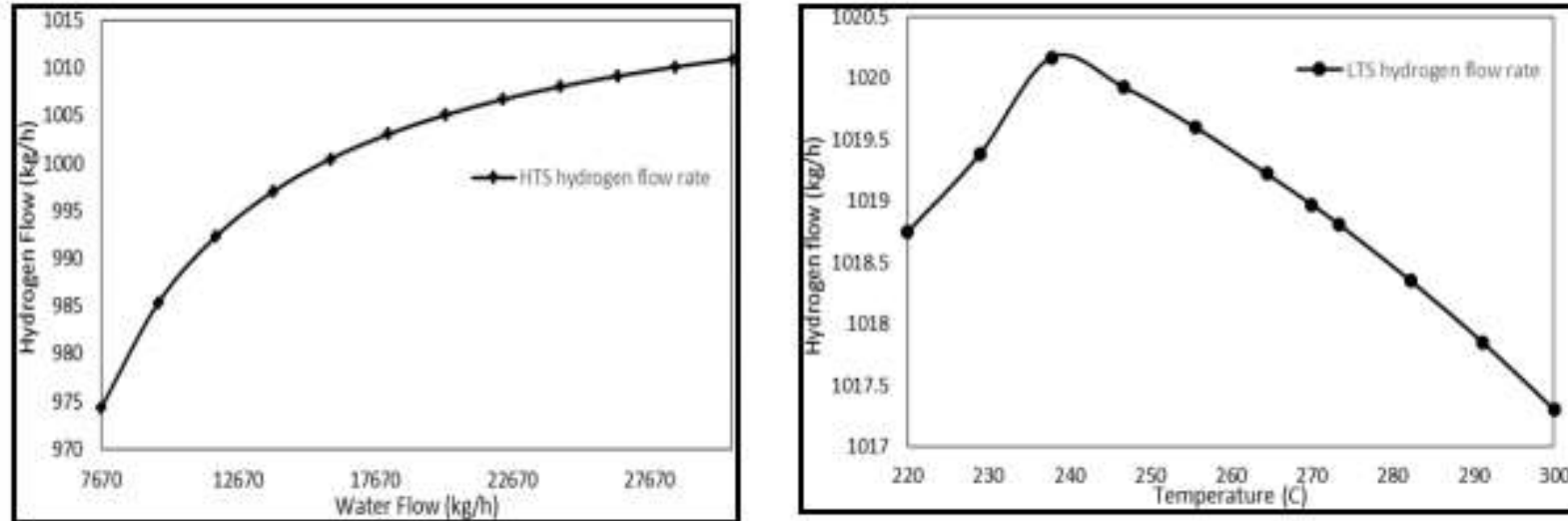
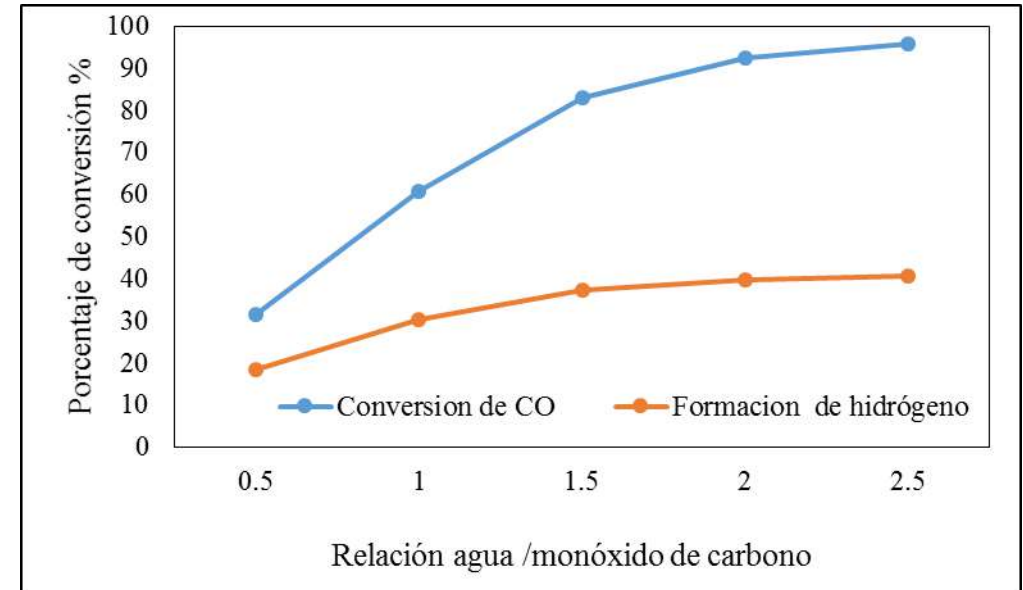
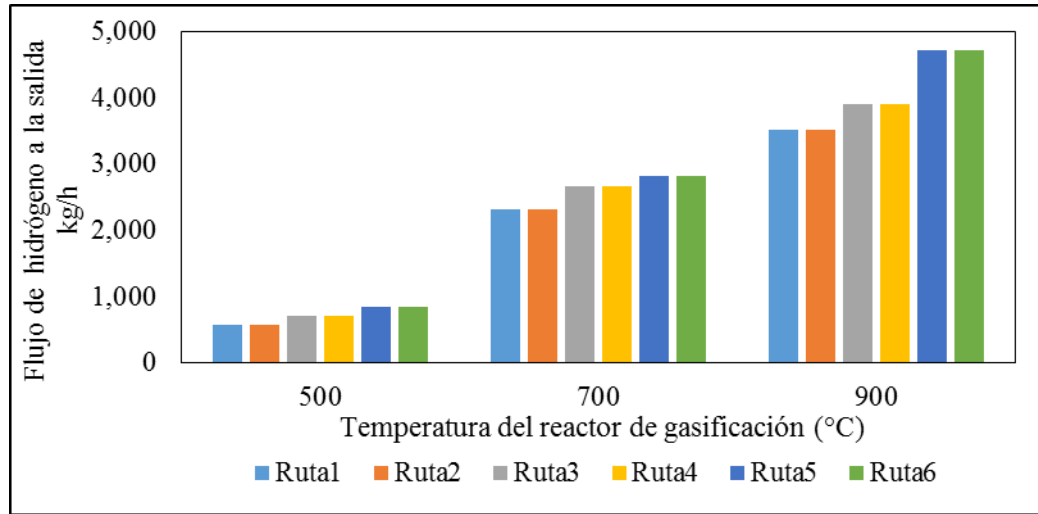


Figure 4: Effect of hydrogen flow rate in the outlet of HTS and LTS reactors.

### 3. Análisis de sensibilidad paramétrica



### 3. Análisis de sensibilidad paramétrica

Tabla 7. Diagnósticos de las seis rutas.

Nombre de la ruta	Flujo de producto (kg/h)	Acción a implementar	Resultado
<b>Ruta 1</b>	2.316,0	<p>Aumentar la temperatura del reactor de 700 °C a 900 °C.</p> <p>Aumentar el flujo de oxígeno del 10 al 50 % del contenido de raquis.</p> <p>Aumento de la relación vapor/CO en el reactor <i>Shift</i> de 0,5 a 1,5.</p> <p>Aumento de la temperatura del reactor <i>Shift</i> de 295 °C a 395 °C.</p> <p>Variación de la presión de la unidad PSA, de 5 a 10 atm</p>	<p>Aumento en la conversión de hidrógeno del 27 %.</p> <p>Aumento en la conversión de hidrógeno de 0,7 %.</p> <p>Aumento en la conversión de CO del 48 % al 95 %</p> <p>Reducción en la conversión de hidrógeno del 51 % al 48 %.</p> <p>Pureza del hidrógeno del 96 % al 99 %.</p>
<b>Ruta 2</b>	2.313,7	Variación de la presión en la unidad de absorción con solvente <i>selexol</i> entre 40 bar y 60 bar.	Aumento en la pureza del hidrógeno de 94 % al 98 %.
<b>Ruta 3</b>	2.667,42	<p>Aumentar la temperatura del reactor de 700 °C a 900 °C.</p> <p>Aumentar el flujo de vapor del 10 al 50 % del contenido de raquis.</p> <p>Aumento de la relación vapor/CO en el reactor <i>Shift</i> de 0,5 a 1,5.</p> <p>Aumento de la temperatura de la unidad <i>WGSR</i> de 295 °C a 395 °C.</p> <p>Variación de la presión de la unidad PSA, de 5 a 10 atm</p>	<p>Aumento en la conversión de hidrógeno del 26 %.</p> <p>Aumento en la conversión de hidrógeno de 45 %.</p> <p>Aumento en la conversión de CO del 48 % al 95 %.</p> <p>Reducción en la conversión de hidrógeno del 51 % al 48 %.</p> <p>Pureza del hidrógeno del 96 % al 99 %.</p>
<b>Ruta 4</b>	2.667,42	Variación de la presión en la unidad de absorción con solvente <i>selexol</i> entre 40 bar y 60 bar.	Aumento en la pureza del hidrógeno de 94 % al 98 %.

## 4. Evaluación ambiental de procesos asistida por computador

Un análisis de impactos ambientales de un proceso químico permite detectar puntos de mejora desde el punto de vista ambiental, sirviendo como herramienta de toma de decisiones y de cuantificación de los beneficios medioambientales de la transformación de una materia prima en un producto final.

# Algunas herramientas, metodologías y técnicas para evaluación ambiental son:

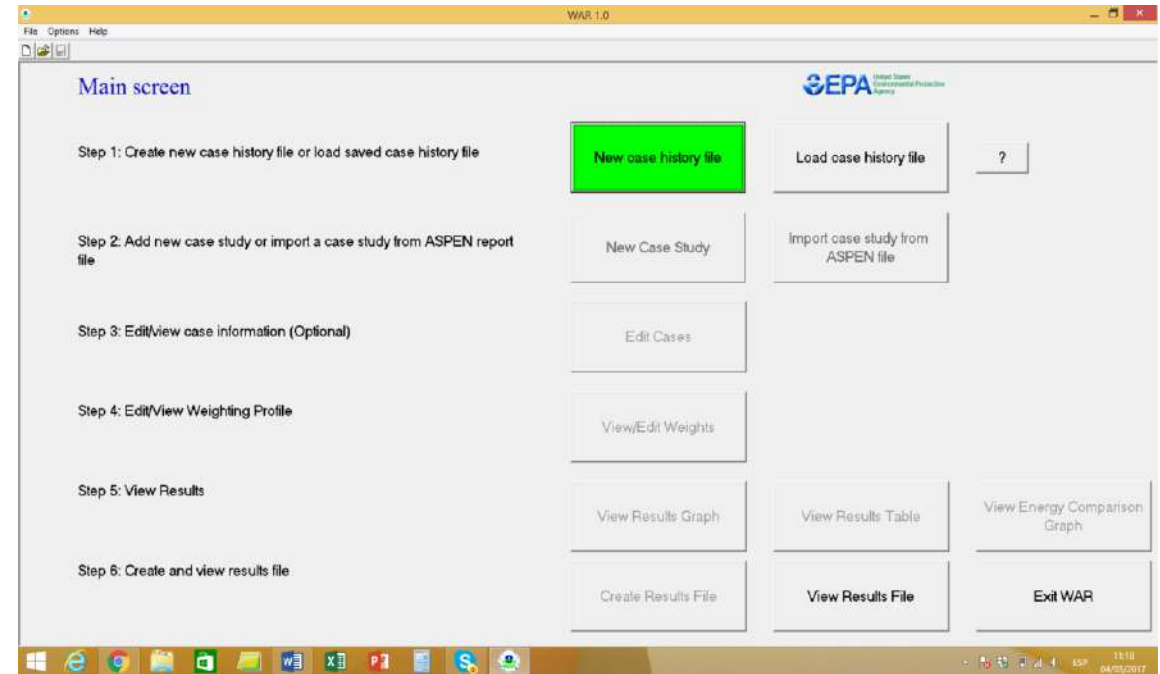
- ✓ Algoritmo de reducción de residuos WAR
- ✓ Método de minimización de impacto ambiental MEIM
- ✓ Metodología AHÍ (Atmospheric Hazards Index)
- ✓ Herramienta EFRAT (Environmental Fate and Risk Assessment Tool)
- ✓ Análisis de ciclo de vida



# Herramienta CAPE

El software WARGUI se basa en el algoritmo WAR. Contiene una base de datos de productos químicos y relaciona los puntajes de impacto ambiental, que proviene de fuentes gubernamentales y no gubernamentales.

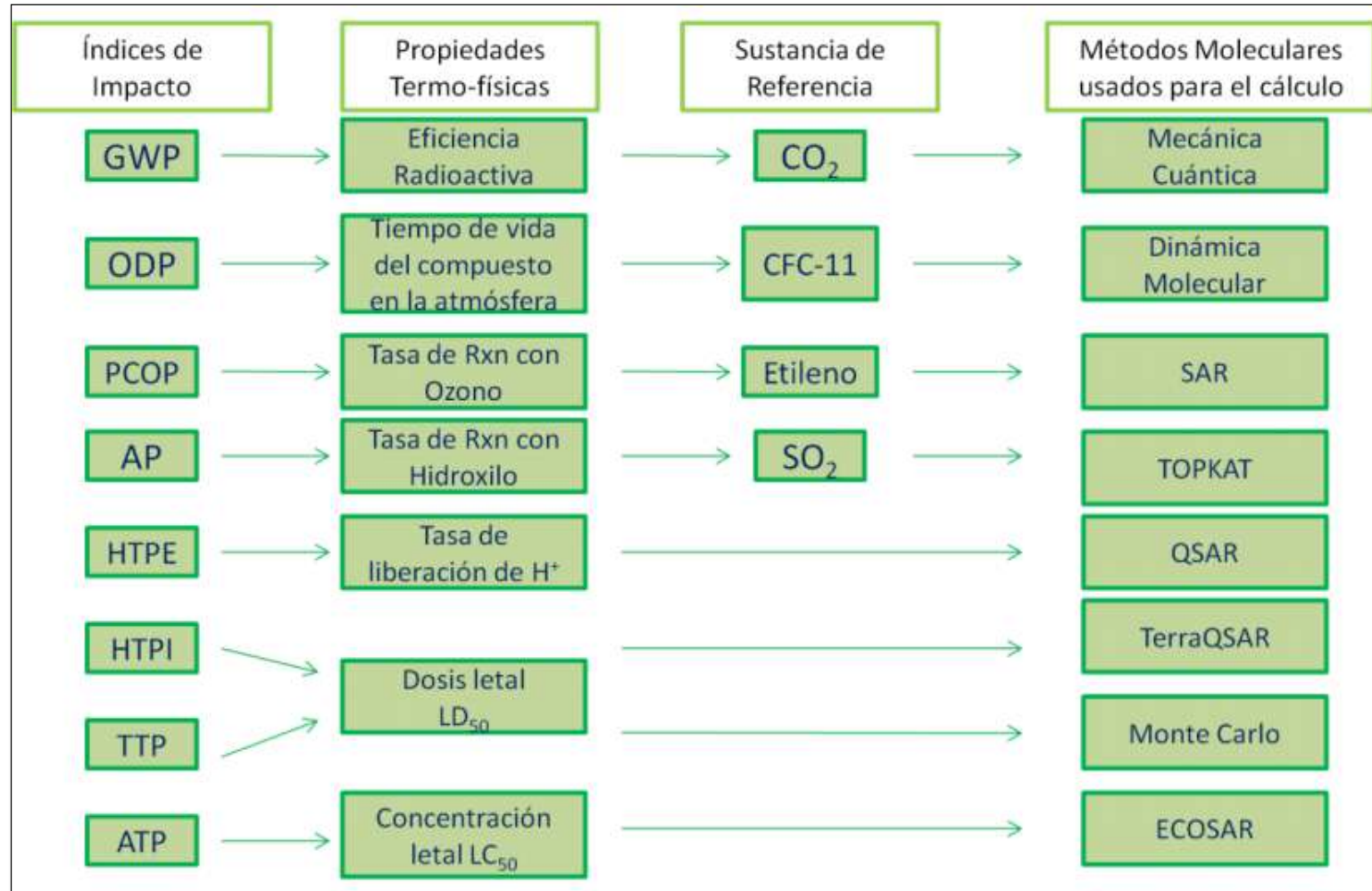
**La evaluación ambiental asistida por computador se puede aplicar para evaluar un proceso singular, para comparar varios procesos o evaluar la conveniencia ambiental de una modificación de proceso**



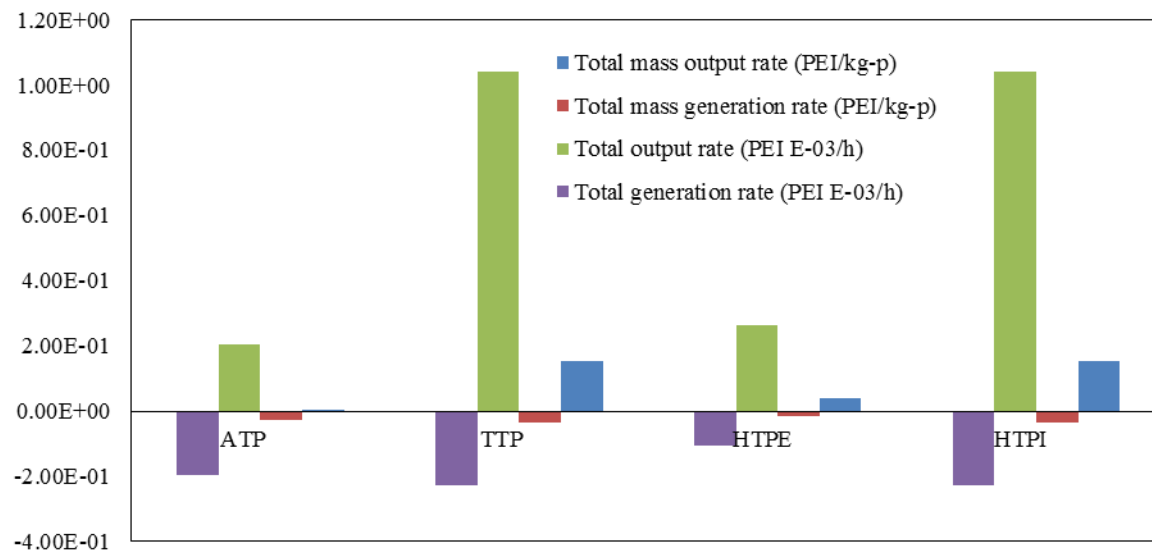
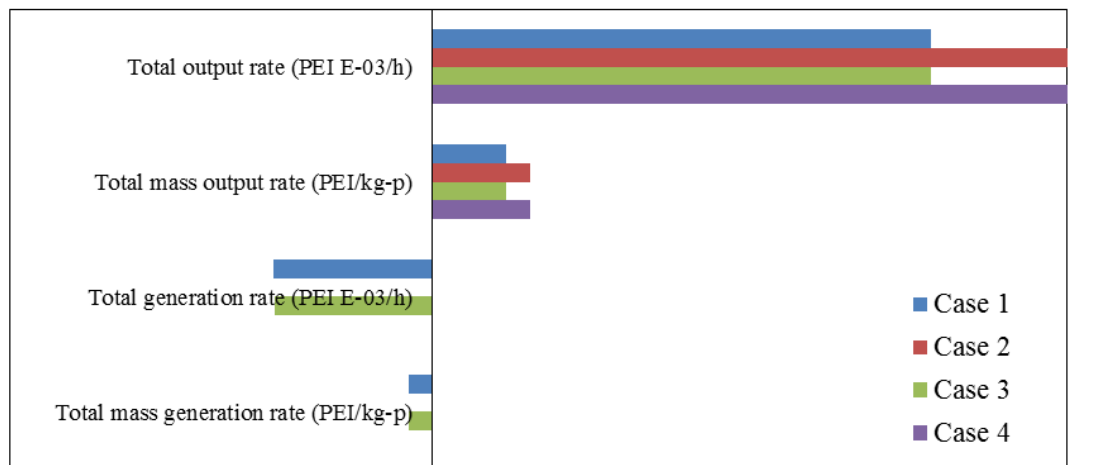


# Categorías de impacto

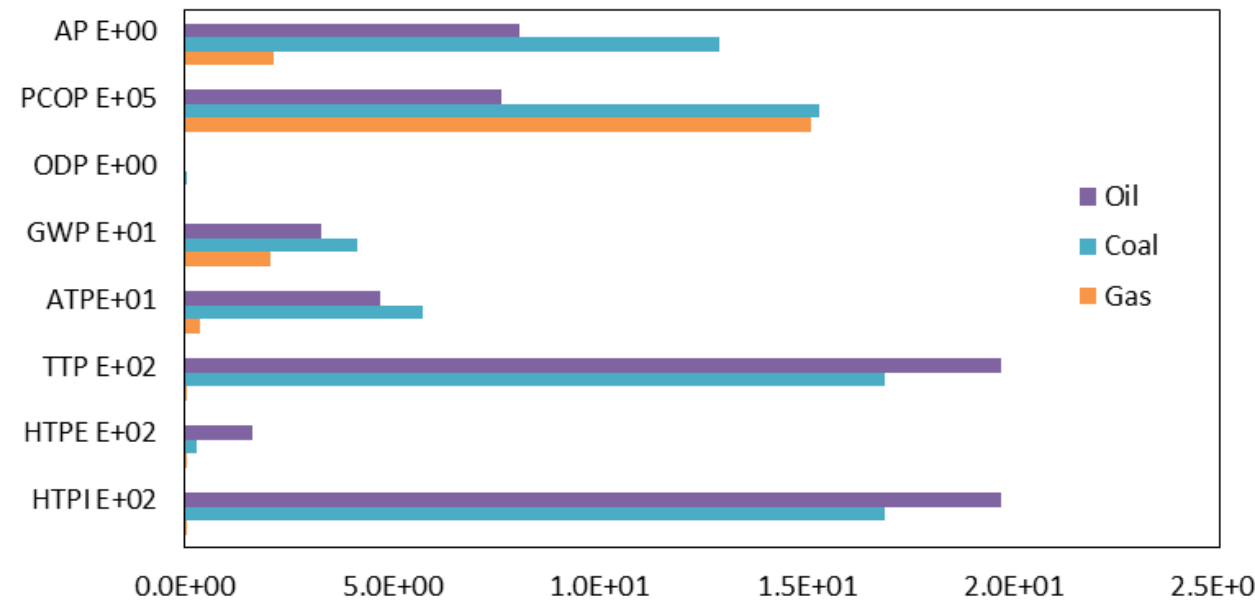
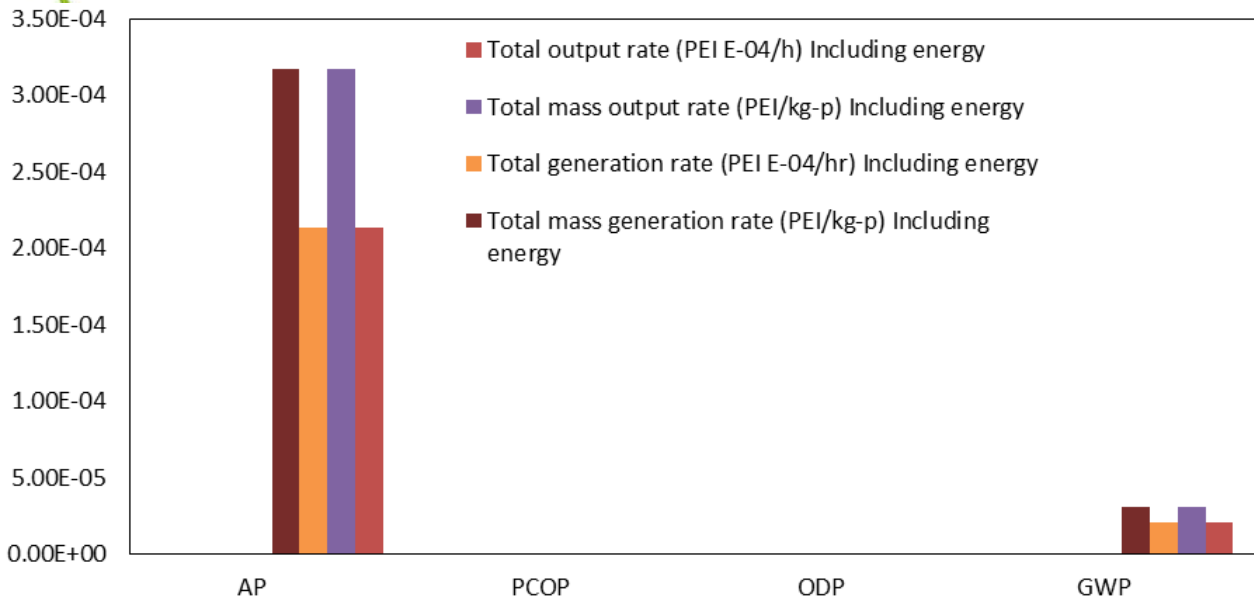




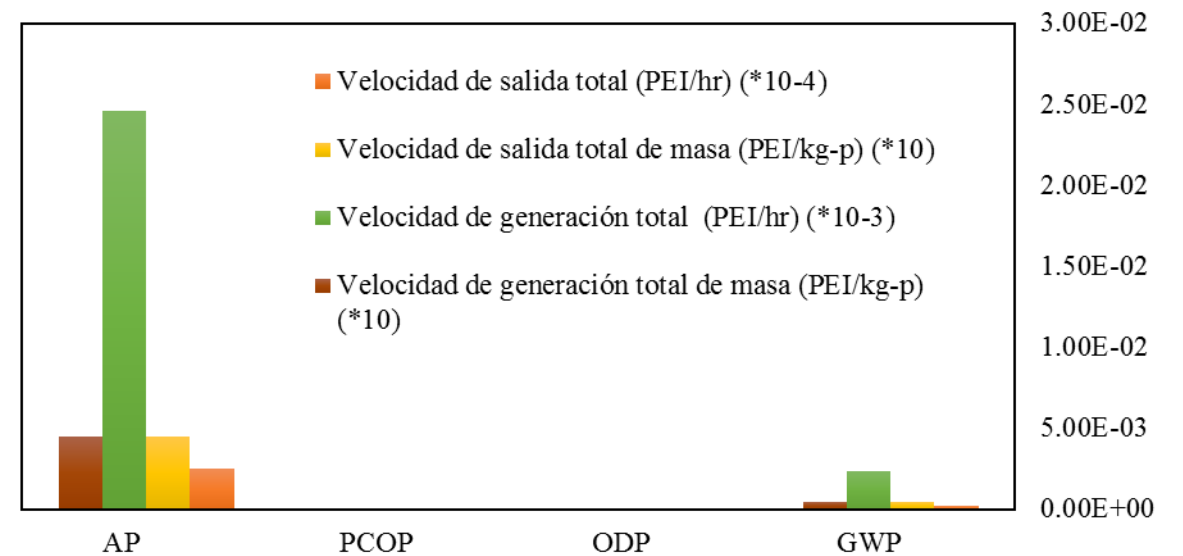
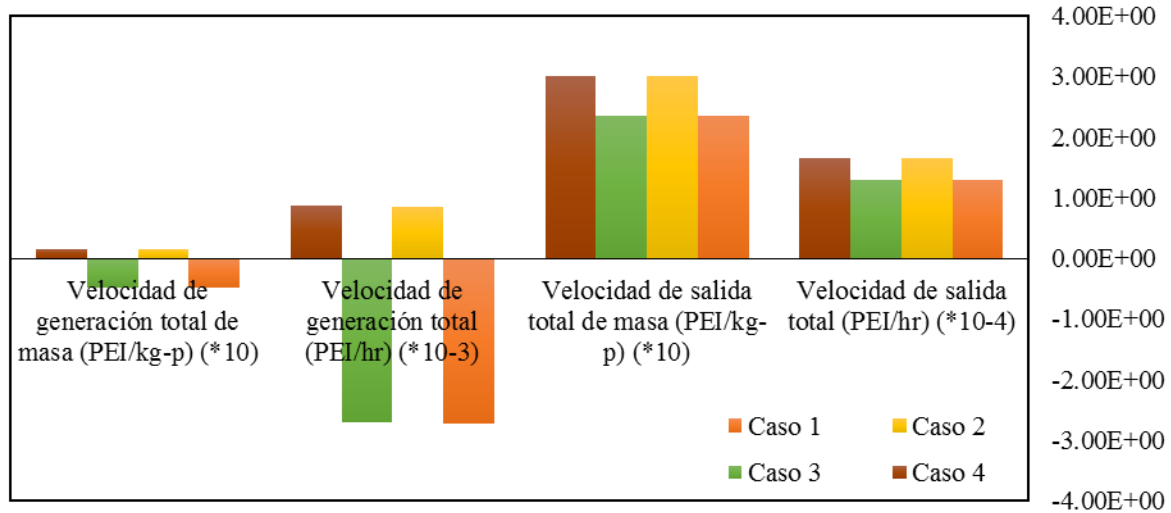
# 4. Evaluación ambiental de procesos asistida por computador (Producción de aceite crudo de palma)



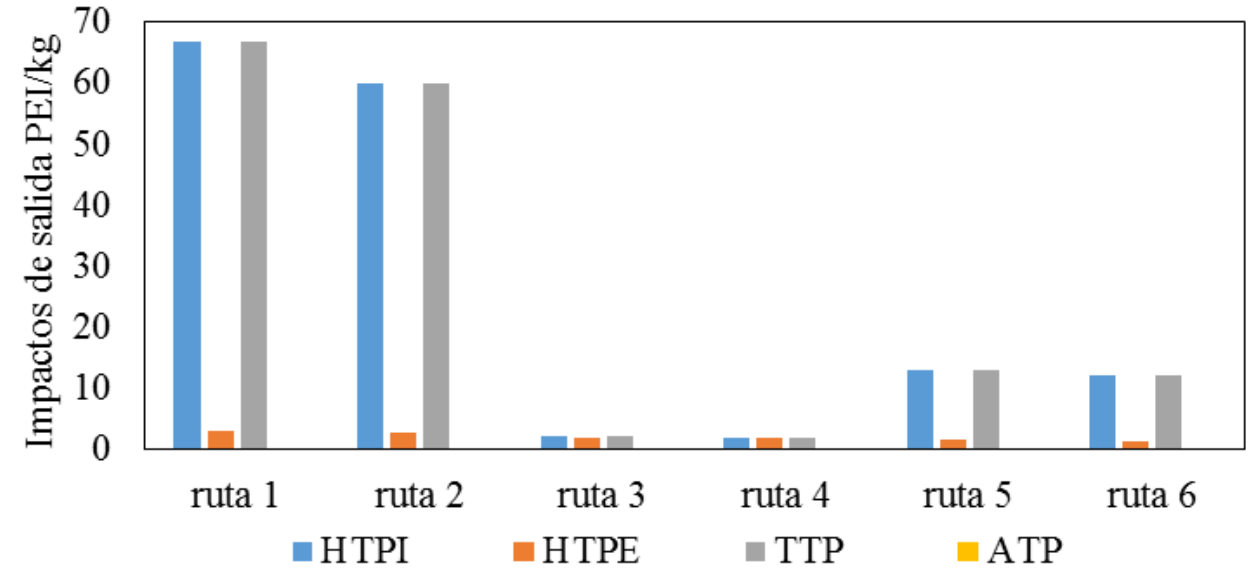
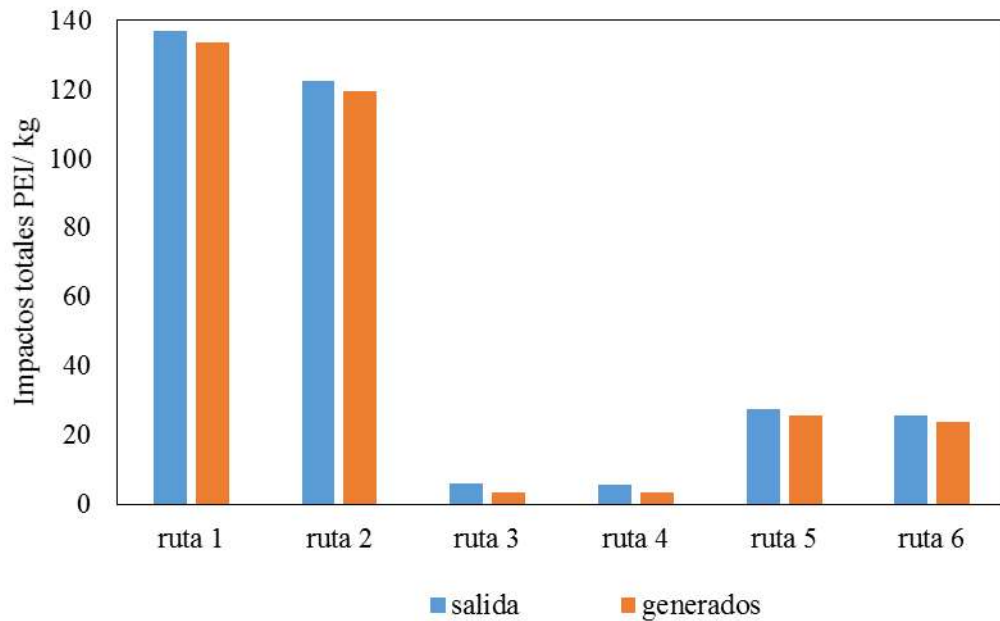
# 4. Evaluación ambiental de procesos asistida por computador (Producción de aceite crudo de palma)



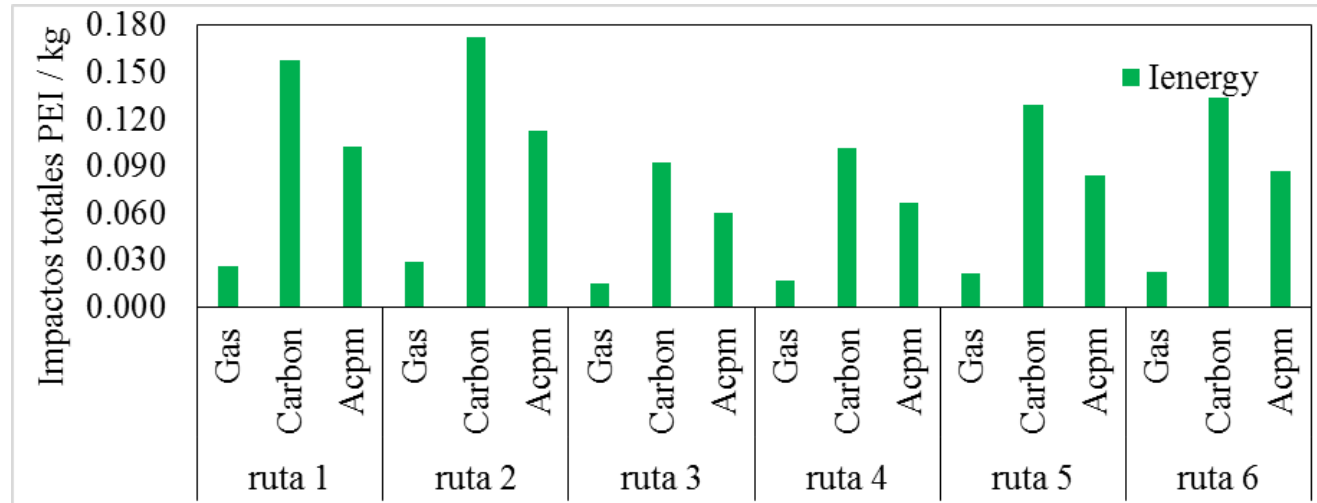
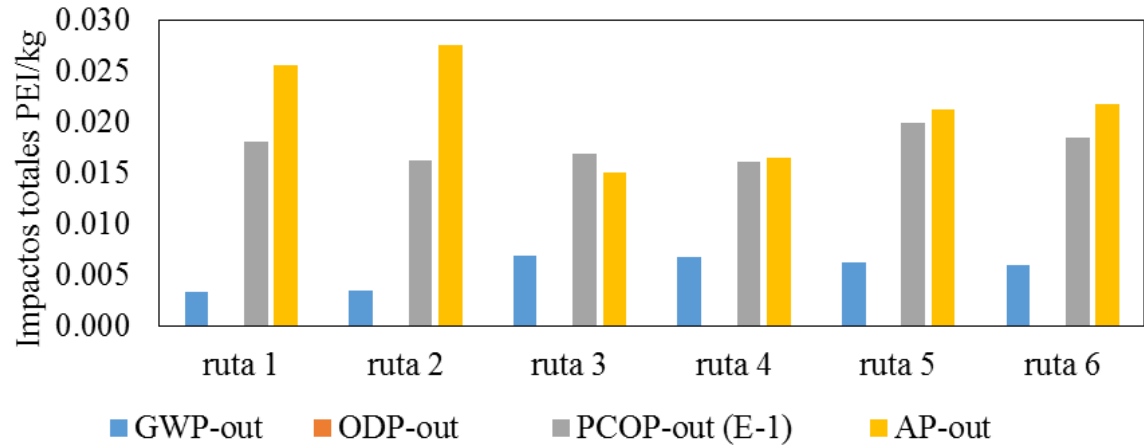
# 4. Evaluación ambiental de procesos asistida por computador (producción de aceites de palma y palmiste)



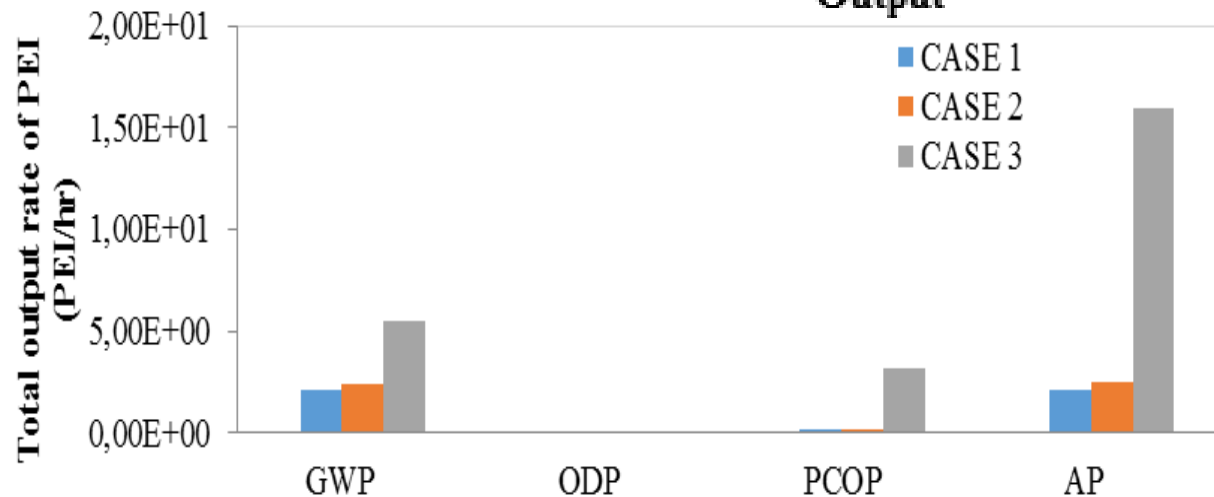
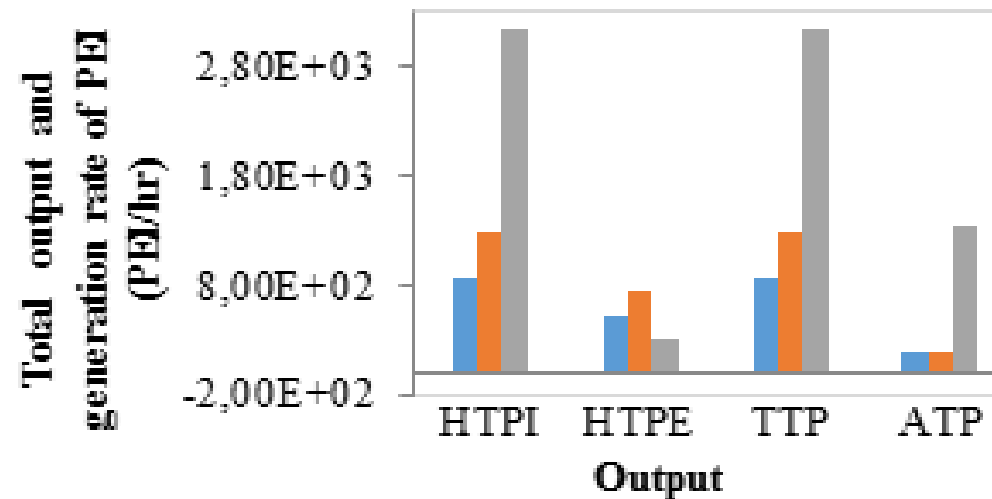
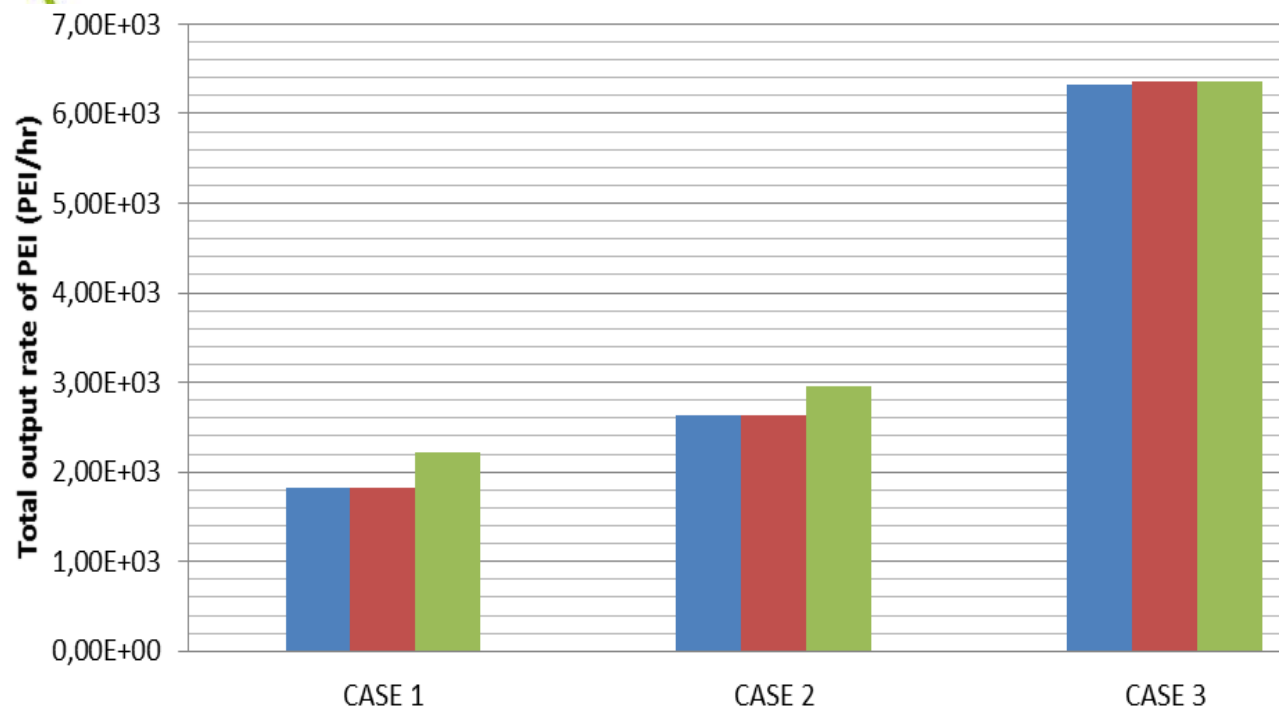
## 4. Evaluación ambiental de procesos asistida por computador (hidrogeno a partir de raquis de palma)



## 4. Evaluación ambiental de procesos asistida por computador (hidrogeno a partir de raquis de palma)



# 4. Evaluación ambiental de procesos asistida por computador (comparación procesos incrementales)





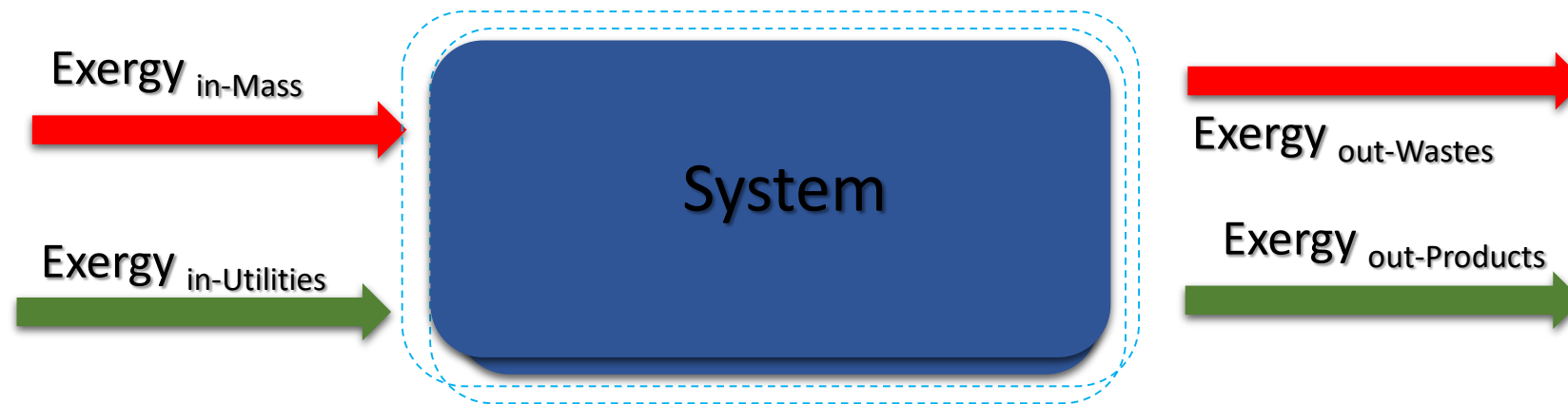
## 5. Evaluación exérgica de procesos

- Cuando dos sistemas en diferentes estados entran en contacto, hay una oportunidad de generar trabajo al pasar de su estado inicial a un estado de equilibrio.
- Si uno de los sistemas es el ambiente y el otro es la cerveza, la exérgia se define como el trabajo máximo que teóricamente se puede obtener cuando la cerveza pasa de su estado inicial al equilibrio con el ambiente.

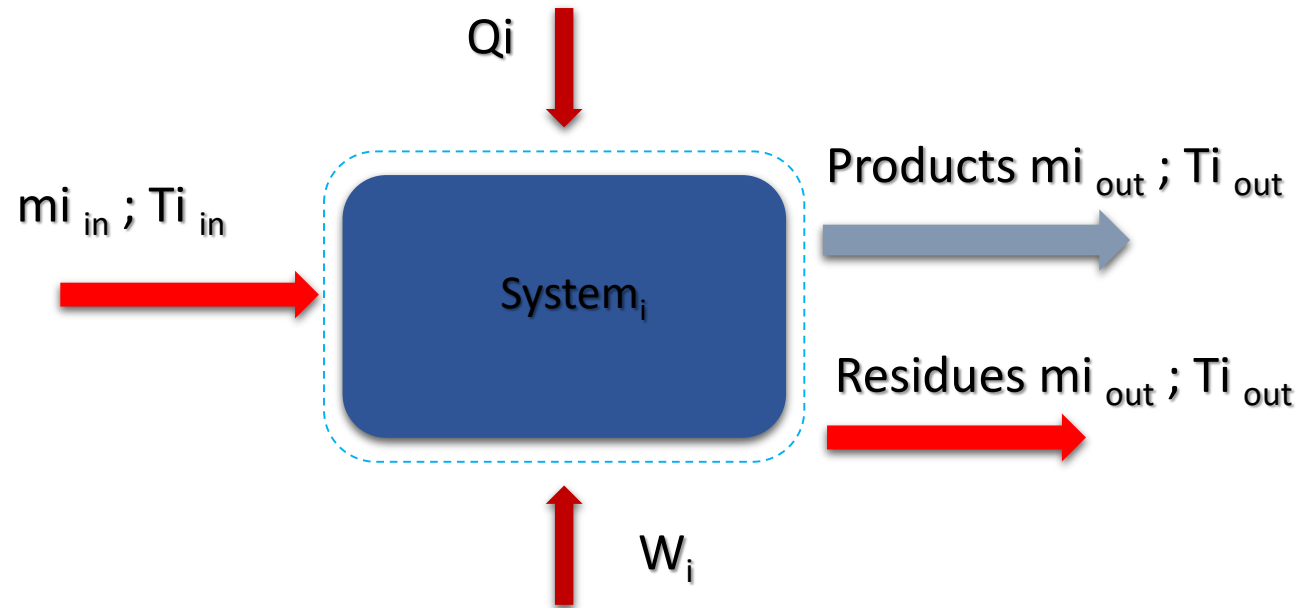


## 5. Evaluación exergética de procesos

- Un análisis exergético es una técnica de análisis basada en la segunda ley de la termodinámica que proporciona una alternativa para evaluar, analizar y comparar procesos químicos.



## 5. Evaluación exérgica de procesos

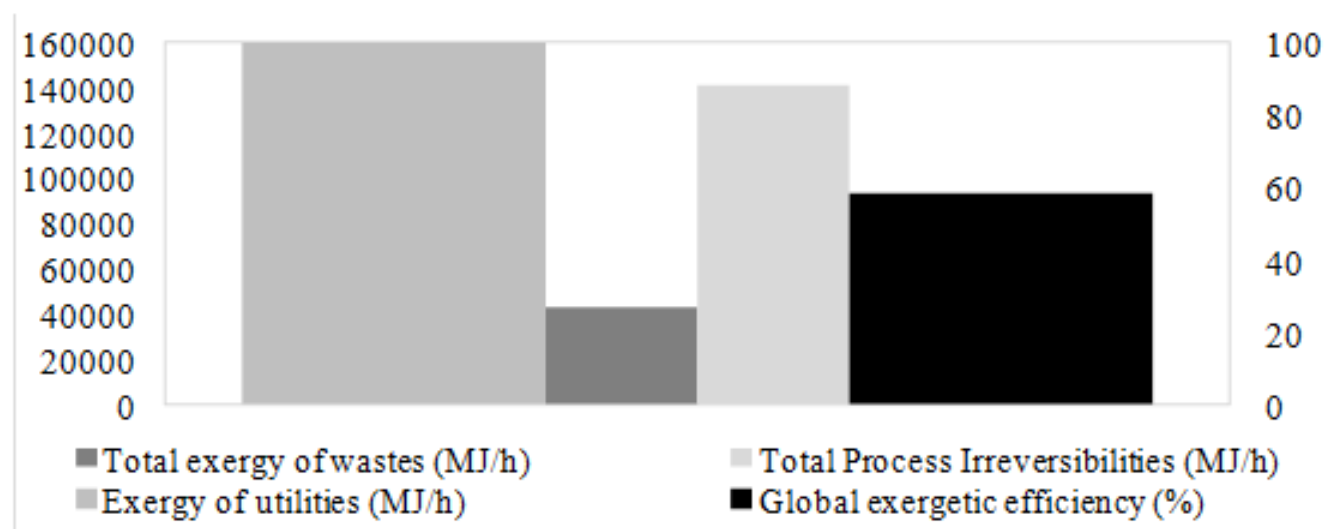
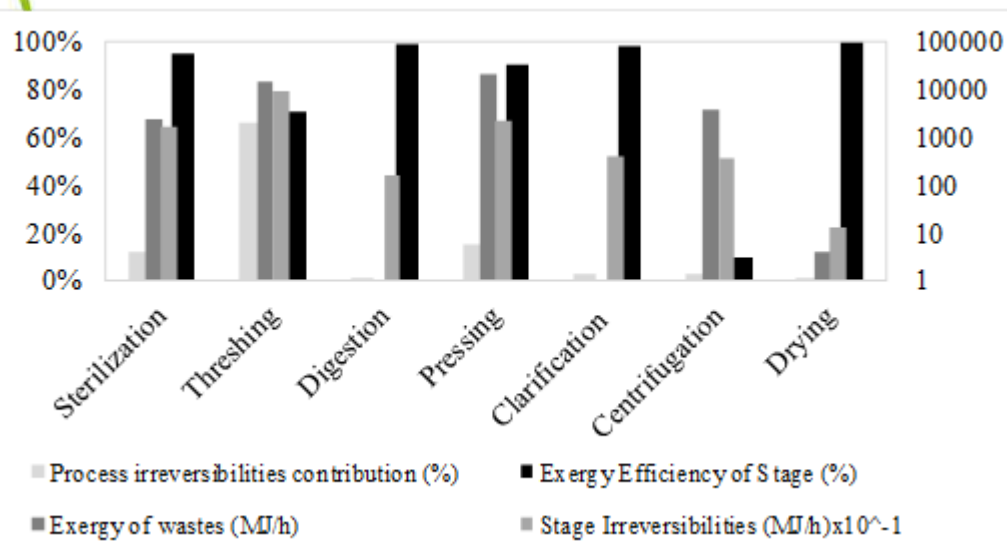


$$Exergy\ Efficiency = 1 - (Exergy_{Lost} / Exergy_{Total-in})$$

## 5. Evaluación exergética (extracción ACP)

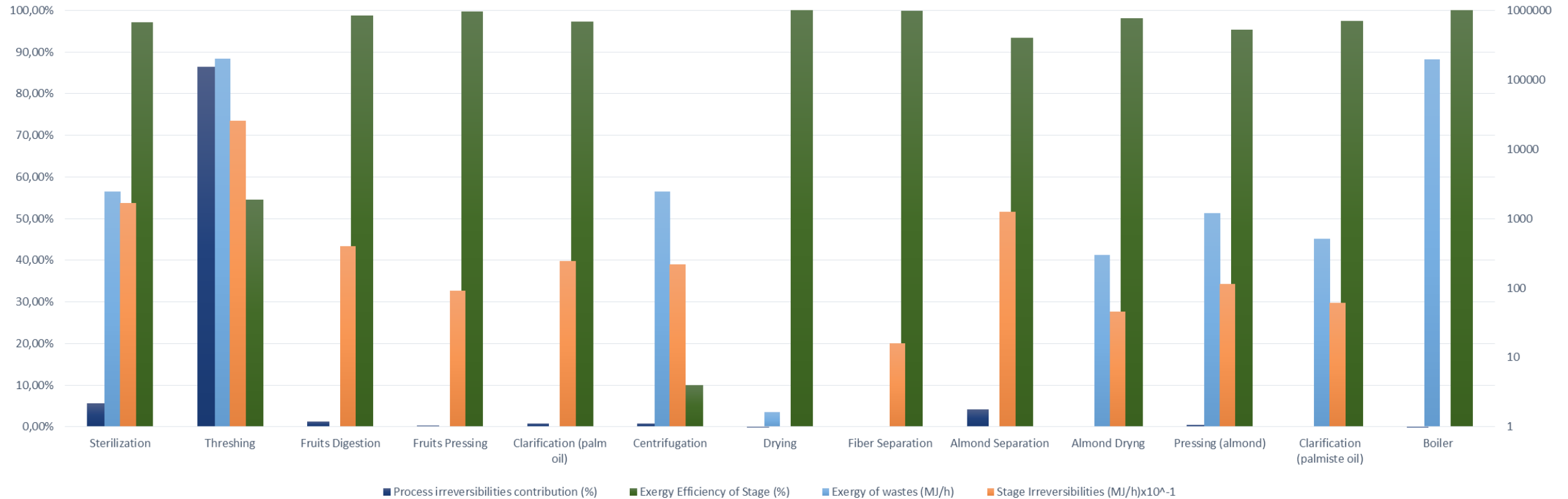
Flow	Chemical exergy (MJ/h)	Physical exergy (MJ/h)	Total mass exergy (MJ/h)
Palm bunch (FFBUNCH)	318,424	0	318,424
Vapor (DISSTEAM)	735	1,017	1,752
Condensed (COND+STM)	430	247	677
Saturated vapor (STEAM1)	4,244	5,873	10,117
Esteril bunch (CLUSTER)	318,439	720	319,159
Raquis (RACHIS)	14,220	209	14,430
Fruits (FRUITS)	225,766	510	226,286
Saturated Vapor (STEAM2)	701	694	1,395
Macerated fruits (HOTCLUST)	225,700	1,219	226,918
Palm presscake (CAKE)	20,668	948	21,626
Liquor (LIQUEUR)	205,132	263	205,395
Dilution water (DESTWATR)	108	62	170
Oily sludge (OILYSLUD)	3,830	0	3,830
Heavy sludge (HEAVYSLU)	3,447	561	4,007
Centrifugal recovery (RECOVERY)	383	6	389
Wet oil (WETOIL)	202,133	89	202,222
Moisture (MOISTURE)	4	0	4
Palm oil (DRYOIL)	202,160	13	202,173

## 5. Evaluación exérgica (extracción ACP)

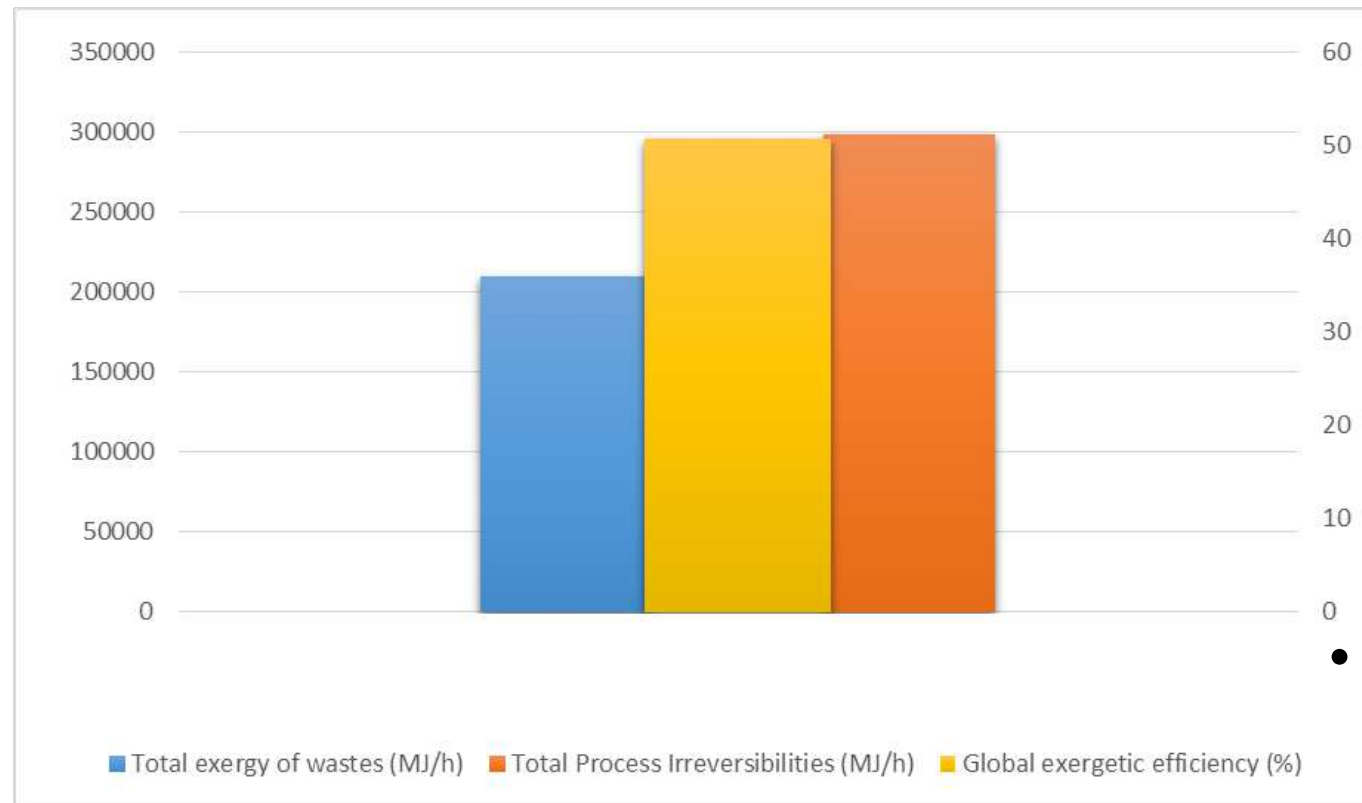


- Eficiencia global=59%

# 5. Evaluación exérgica (extracción ACP y AP)

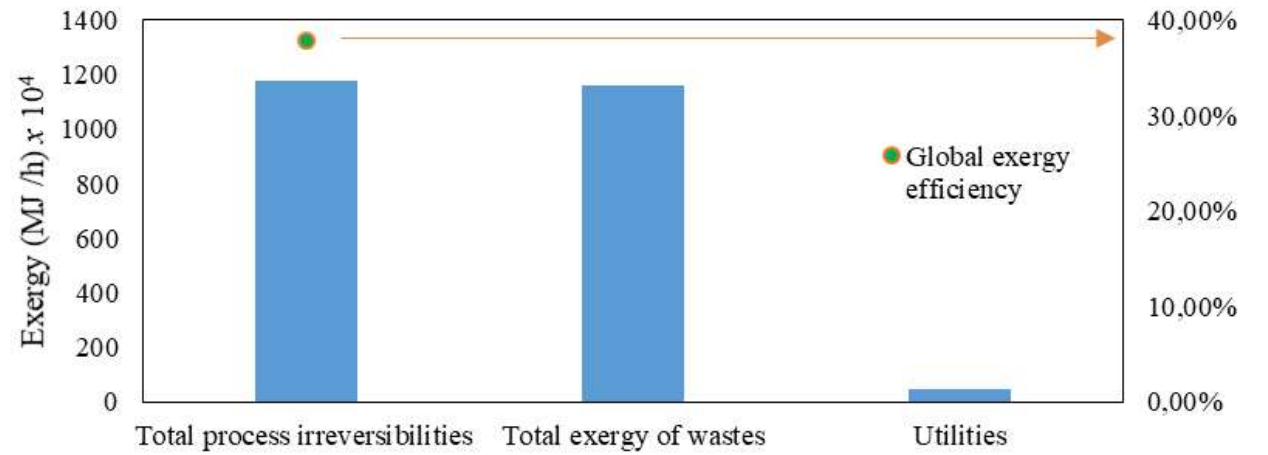
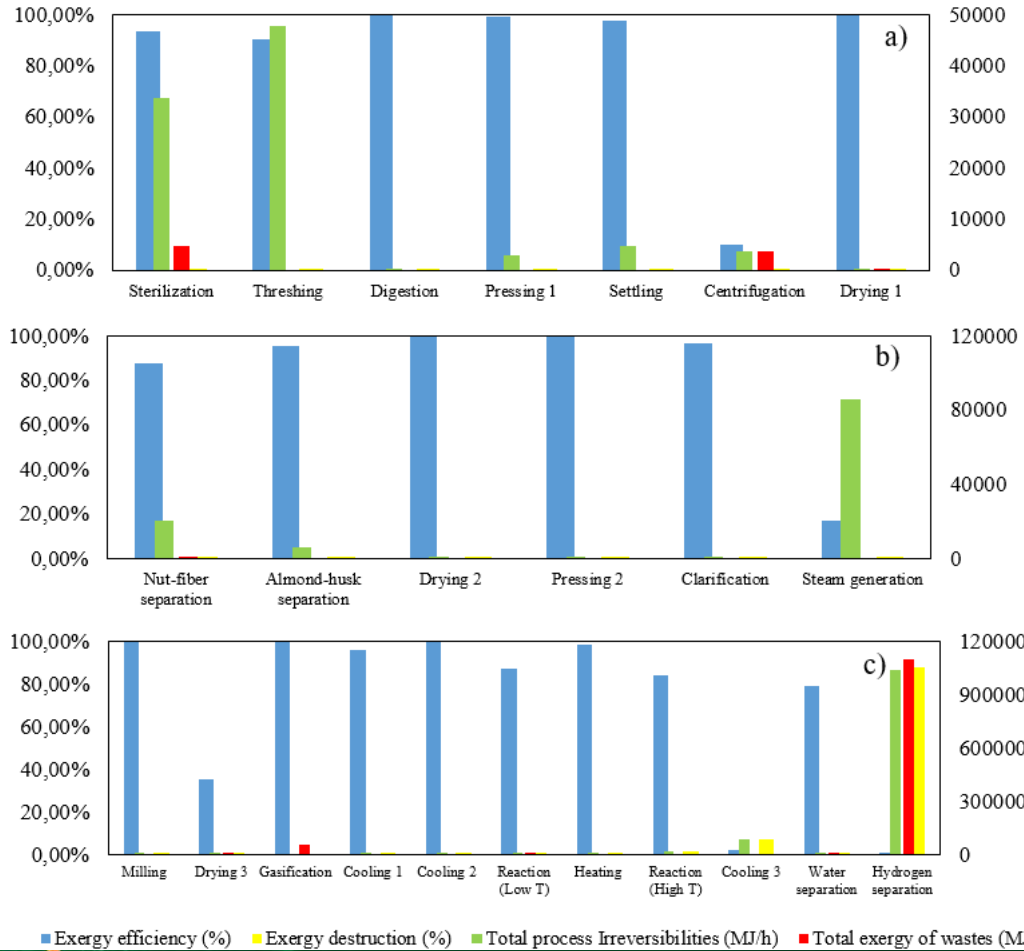


## 5. Evaluación exérgica (extracción ACP y AP)



- Eficiencia global=50%

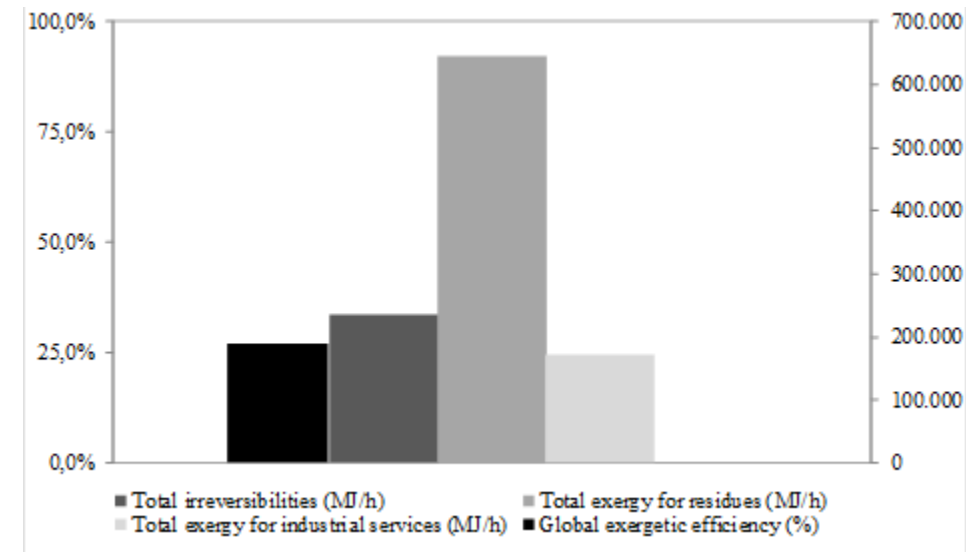
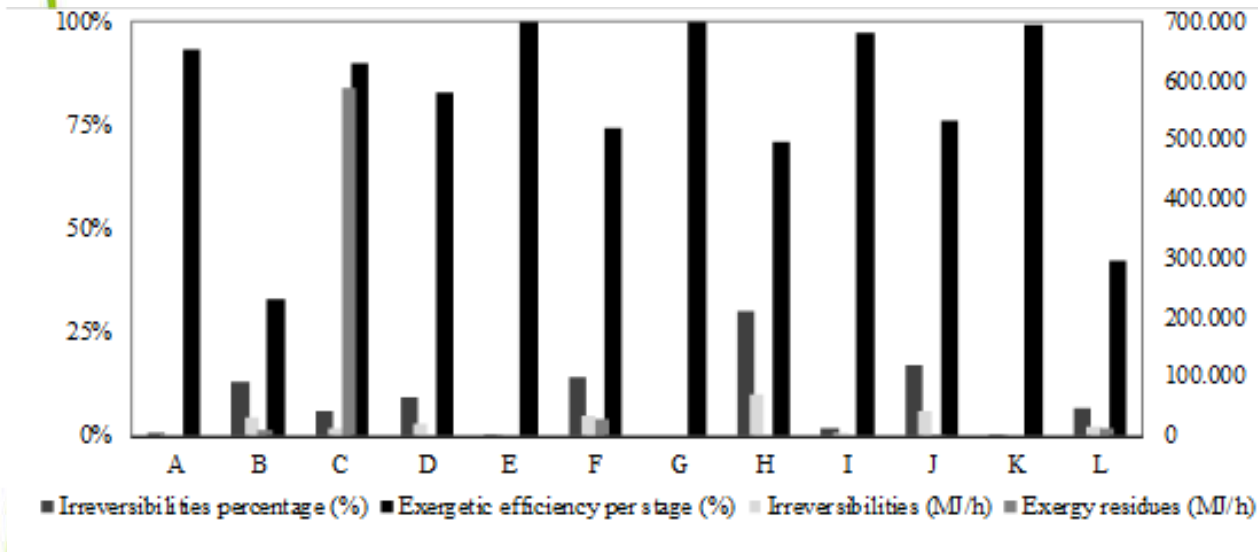
# 5. Evaluación exérgica (Biorefinería de palma)



• Eficiencia global=39%

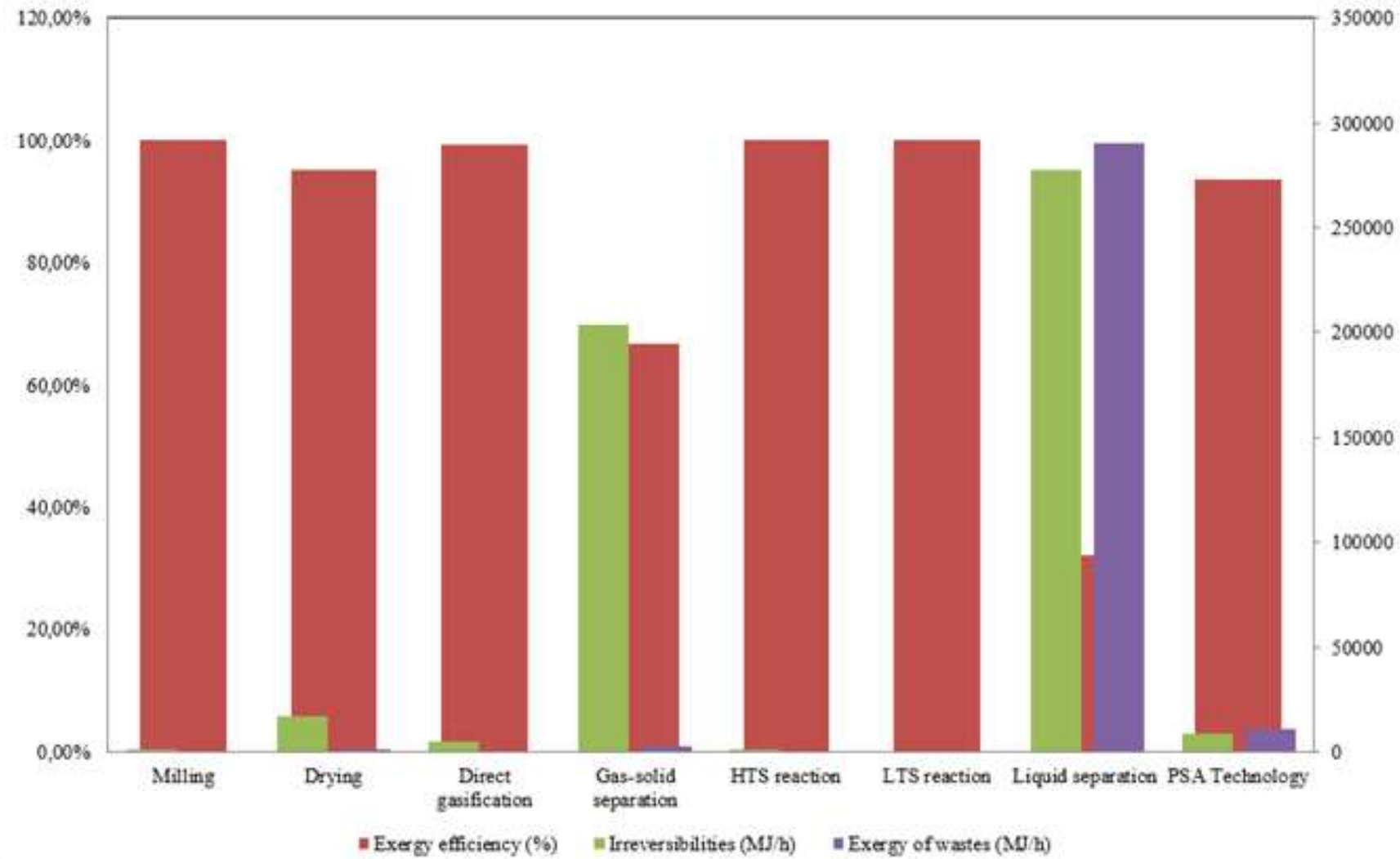


## 5. Evaluación exérgica (H2 a partir de raquis-absorción)

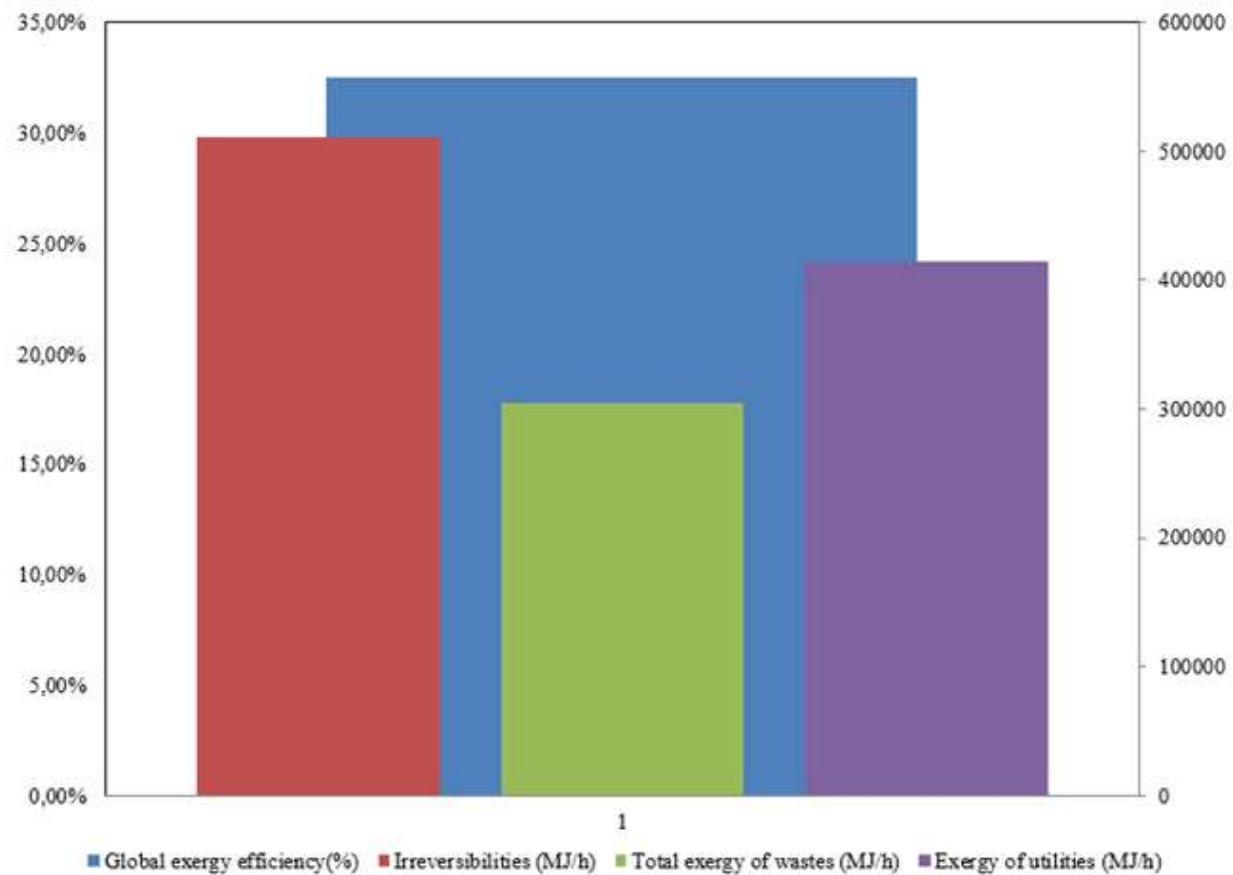
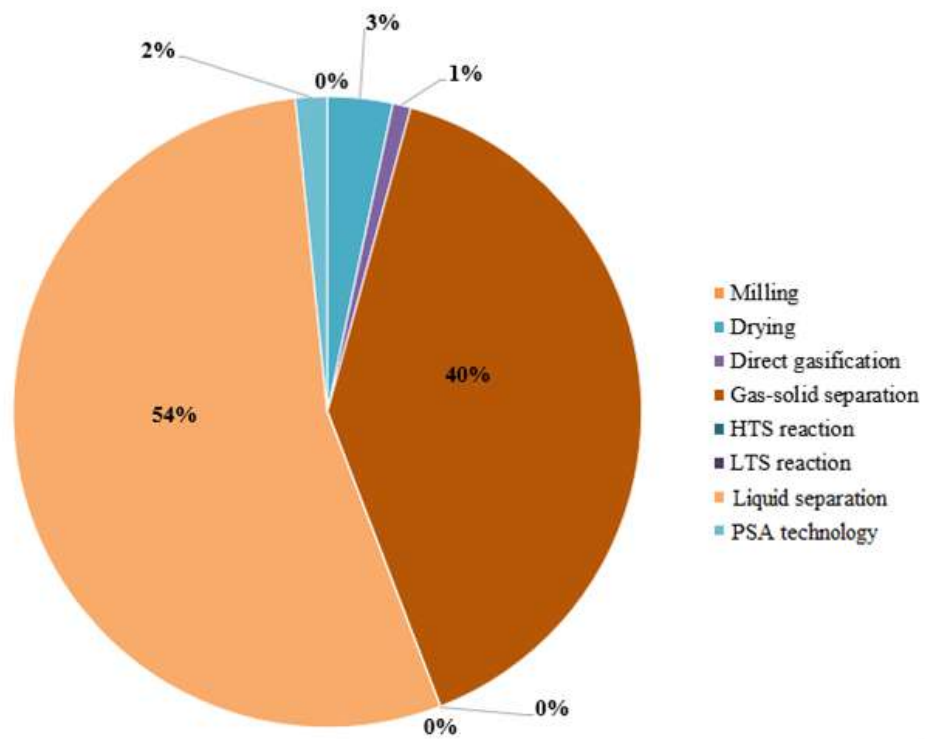


- Eficiencia global=27,1%

## 5. Evaluación exergética (H2 a partir de raquis-PSA)



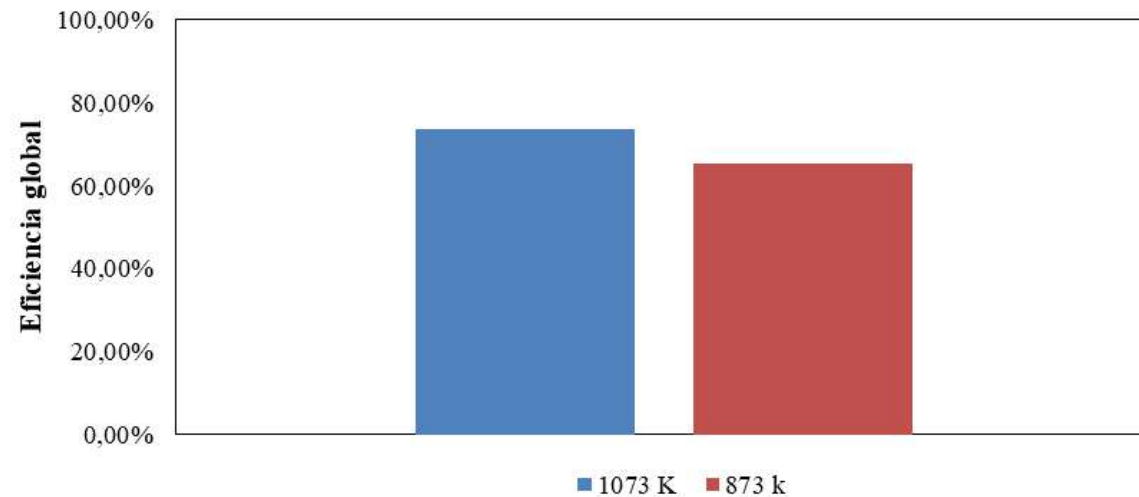
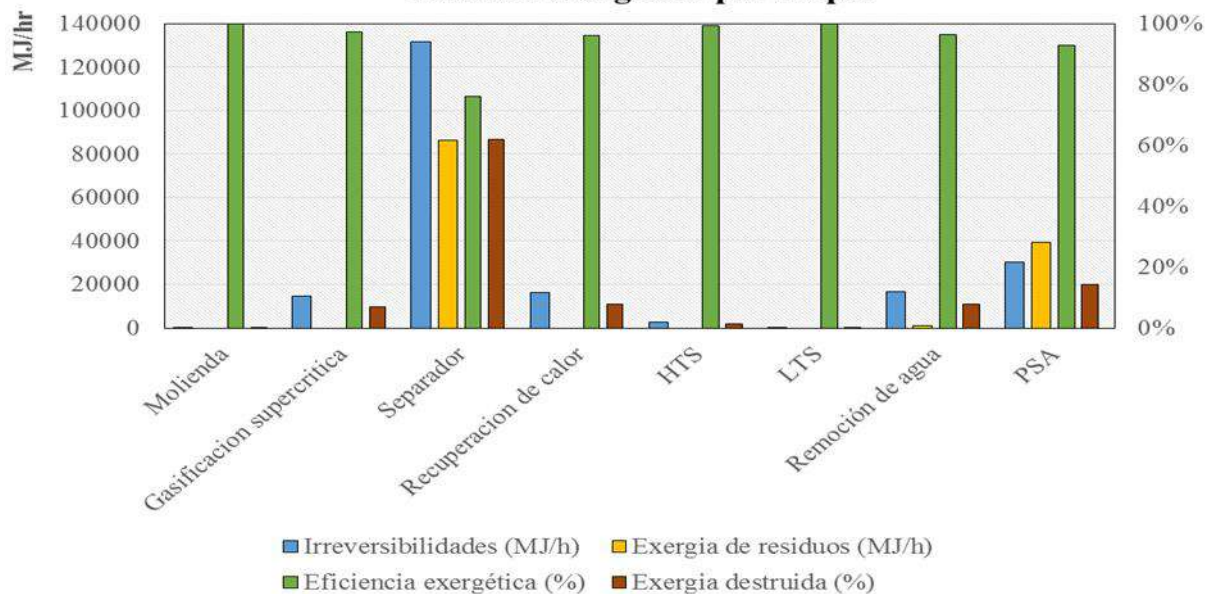
## 5. Evaluación exergética (H2 a partir de raquis-PSA)



- Eficiencia global aumenta a 32%

## 5. Evaluación exergetica (H2 a partir de raquis-SCWG-PSA)

Analisis exergetico por etapa.



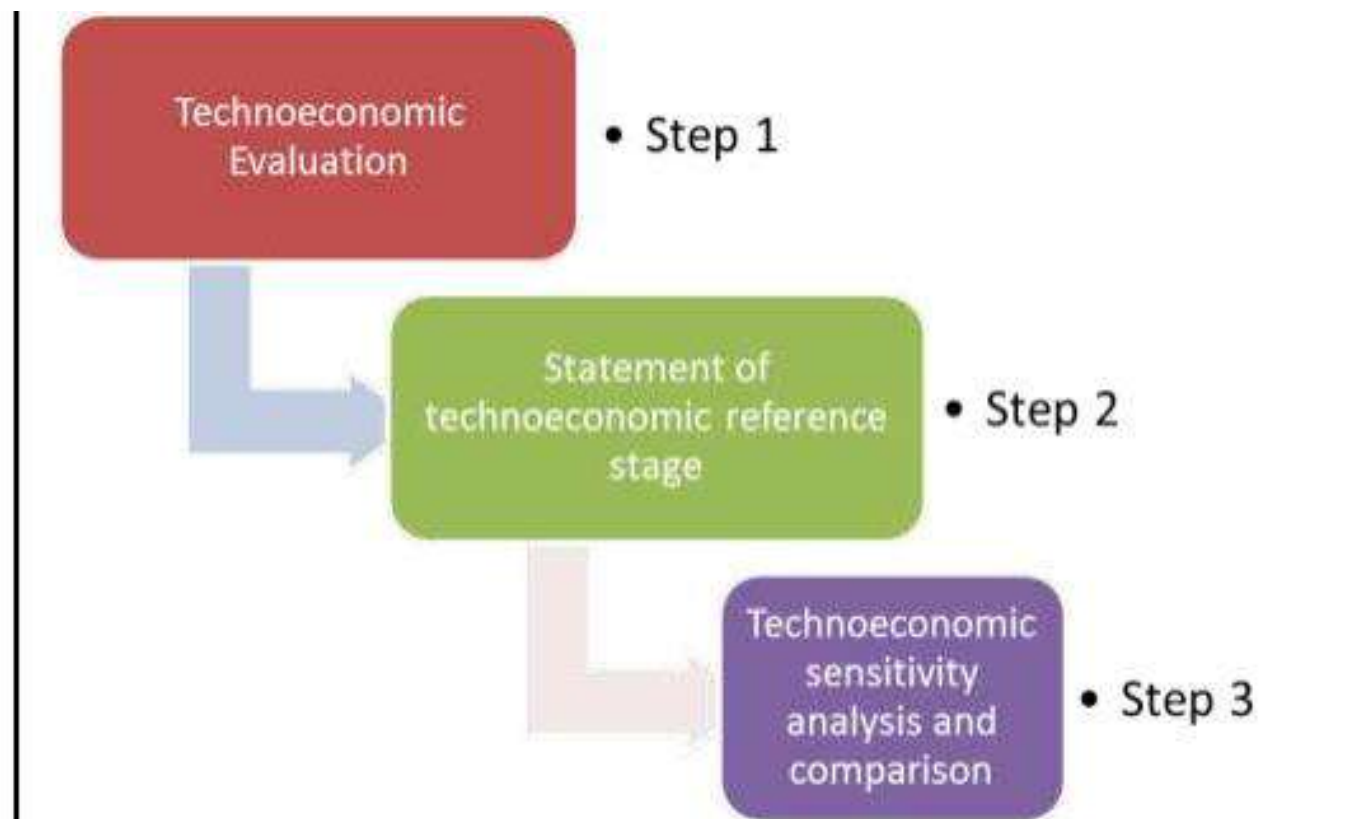
Eficiencia exergetica global del proceso

- Eficiencia global aumenta a 70%

## 6. Análisis de sensibilidad técnico-económica de procesos

- Permite evaluar la respuesta de un proceso ante cambios en su entorno técnico-económico.
- Permite evaluar el efecto técnico-económico de cambios en el proceso, incorporación de etapas y/o valorización de residuos
- Establecimiento de políticas de acuerdo con los objetivos del proceso y producto (por ejemplo, cuestiones relacionadas con el medio ambiente, la seguridad y la calidad, entre otros).

## 6. Análisis de sensibilidad técnico-económica de procesos



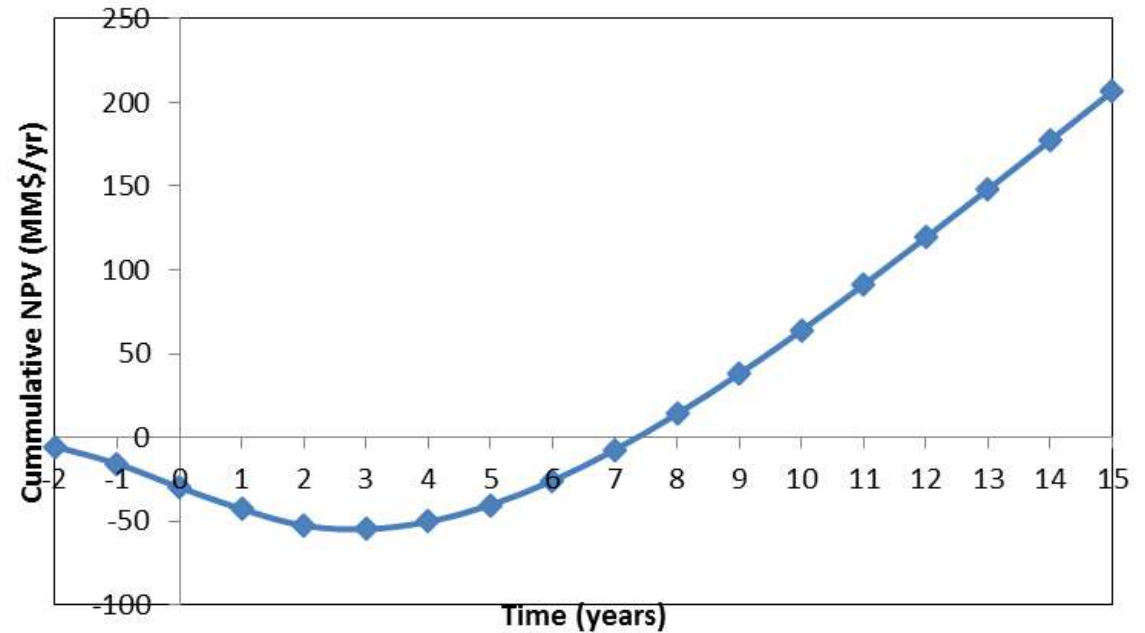
## 6.1. Evaluación económica

Item	Total (\$ 2017)
Purchased equipment	x.xxx.xxx,xx
Installation of purchased equipment	x.xxx.xxx,xx
Instrumentation and control (installed)	x.xxx.xxx,xx
Piping (installed)	xxx.xxx,xx
Electrical installations (installed)	xxx.xxx,xx
Buildings (including services)	xxx.xxx,xx
Service facilities	x.xxx.xxx,xx
<b>Total DFCI</b>	<b>xx.xxx.xxx,xx</b>
Lands	x.xxx.xxx,xx
Yard Improvements	x.xxx.xxx,xx
Engineering and supervision	x.xxx.xxx,xx
Equipments (I+D)	x,xx
Construction expenses	x.xxx.xxx,xx
Legal expenses	xx.xxx,xx
Contractor fees	x.xxx.xxx,xx
Contingencies	x.xxx.xxx,xx
<b>Total IFCI</b>	<b>xx.xxx.xxx,xx</b>
<b>Fixed capital investment(FCI)</b>	<b>xx.xxx.xxx,xx</b>
<b>Work capital investement (WCI)</b>	<b>xx.xxx.xxx,xx</b>
<b>Start-up costs (SUC)</b>	<b>x.xxx.xxx,xx</b>
<b>Total capital investment (TCI)</b>	<b>xxx.xxx.xxx,xx</b>

Item	Total (\$ 2017)
Raw materials	xxx.xxx.xxx,xx
Industrial utilities	xxx.xxx,xx
Maintenance and repairs	x.xxx.xxx,xx
Operational supplies	xxx.xxx,xx
Operational manpower	xxx.xxx,xx
Direct supervision and office work	xx.xxx,xx
Laboratory Charges	xx.xxx,xx
Patents and royalties	x,xx
<b>Total DPC</b>	<b>xxx.xxx.xxx,xx</b>
Depreciation (D)	xxx.xxx.xxx,xx
Local taxes	xxx.xxx.xxx,xx
Insurance	xx.xxx,xx
Interest / income	x.xxx.xxx,xx
<b>Total FCH</b>	<b>xxx.xxx.xxx,xx</b>
<b>Overhead (POH)</b>	<b>xx.xxx,xx</b>
<b>General expenses (GE)</b>	<b>x.xxx.xxx,xx</b>
<b>Total operating costs (OC)</b>	<b>x.xxx.xxx,xx</b>

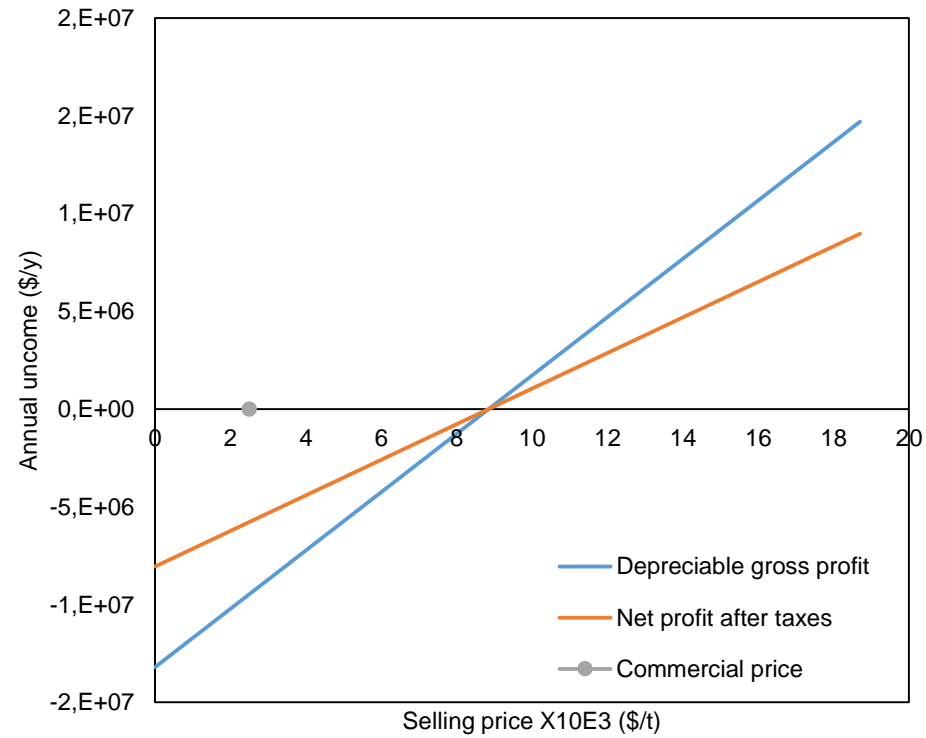
# 6.1. Evaluación económica

- Gross Profit (GP)
- Profitability After Tax (PAT)
- Economic Potentials (EP)
- Accumulated Cash Flow (CCF)
- Payback Period (PBP)
- Return of investment (ROI)
- Net Present Value (NPV)
- Annual Cost / Benefit (ACR)





## 6.2. Selección de entorno técnico-económico de referencia



## 6.3. Sensibilidad Técnico-económica (extracción ACP-Biorefinería)

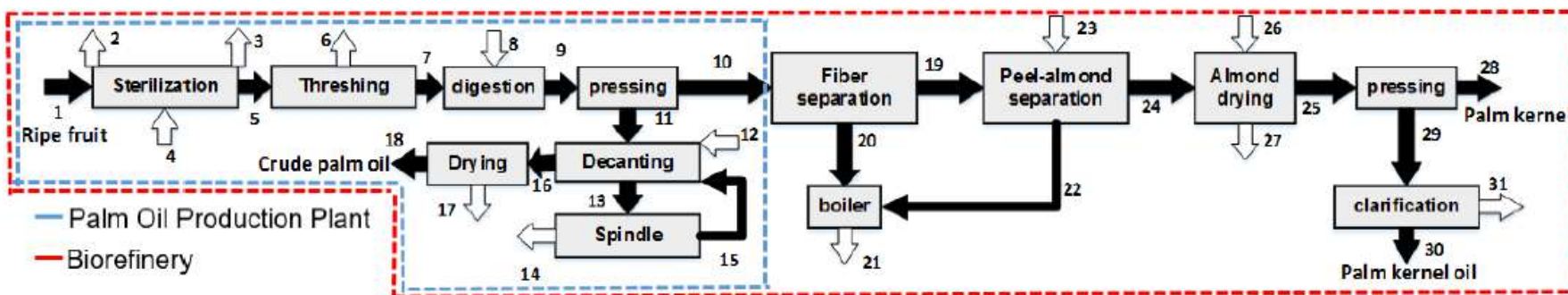
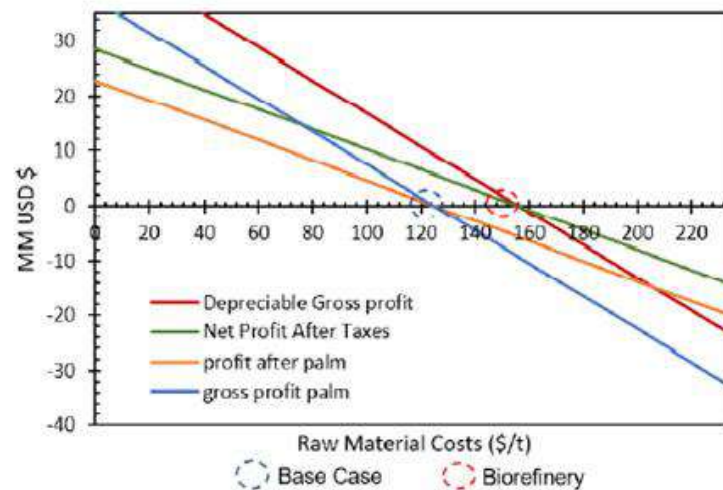


Figure 1: Block diagram for palm oil linear production chain and palm-based Biorefinery



### 6.3. Sensibilidad Tecnico-económica (extracción ACP-Biorefinería)

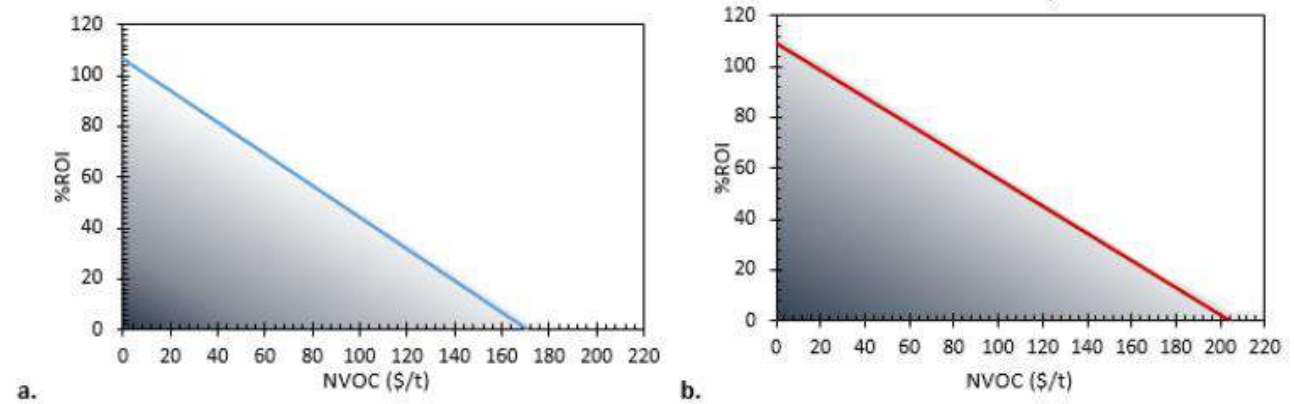


Figure 5: Effect of operating costs on the process ROI for a) palm oil production chain and b) biorefinery

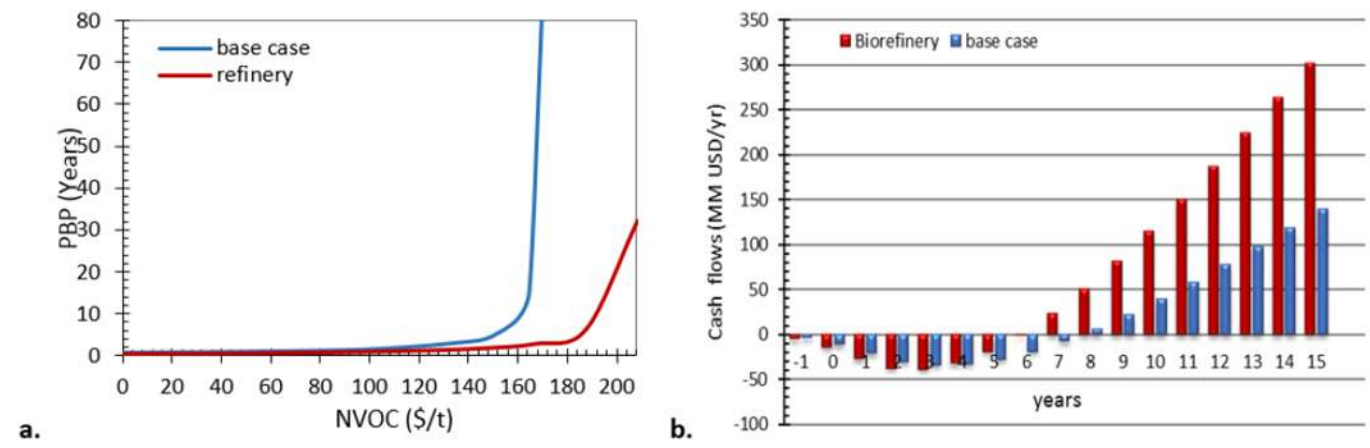
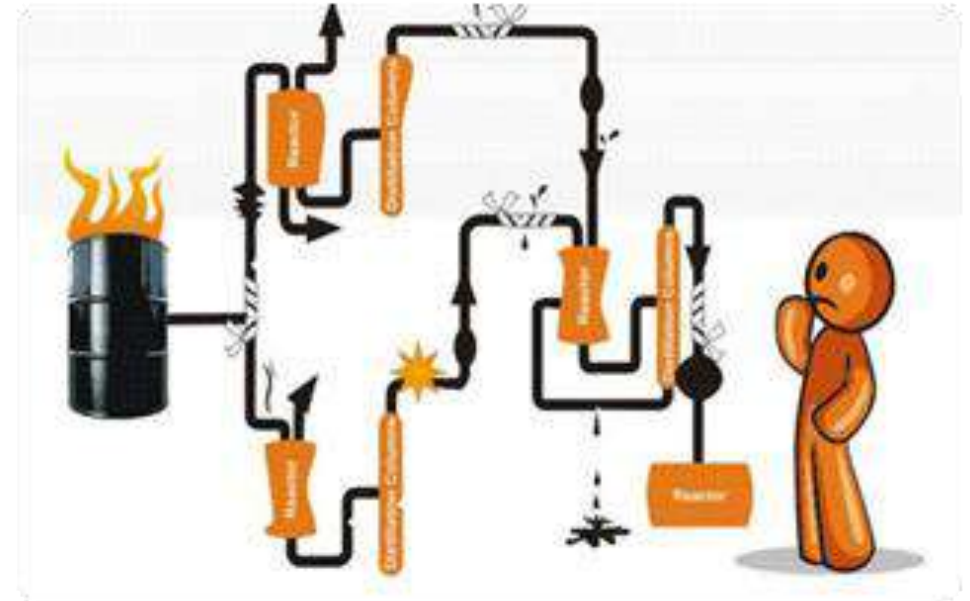


Figure 6: Sensitivity of a) PBP to operating costs and b) NPV for base case and palm-based biorefinery

## 7. Evaluación de la seguridad de procesos químicos

- HAZOP
- LOPA
- SIL
- **ISI**
- Entre otros



## 7. Índice de seguridad inherente

<i>Chemical Inherent Safety index (<math>I_{ch}</math>)</i>	<i>Process Inherent Safety index (<math>I_{ps}</math>)</i>
<i>Subíndices por reacciones químicas</i>	<i>Subíndice por condiciones de proceso</i>
Calor de reacción principal	Inventario
Calor de reacción secundaria	Temperatura de proceso
Interacción química	Presión de proceso
<i>Subíndice por peligros de las sustancias</i>	<i>Subíndice por sistema de proceso</i>
Inflamabilidad	Equipos
Toxicidad	Estructura de proceso
Explosividad	
Corrosividad	

$$ISI = I_{ch} + I_{ps}$$

# 7. Índice de seguridad inherente (etanol a partir de raquis SSCF- Acido oxálico)

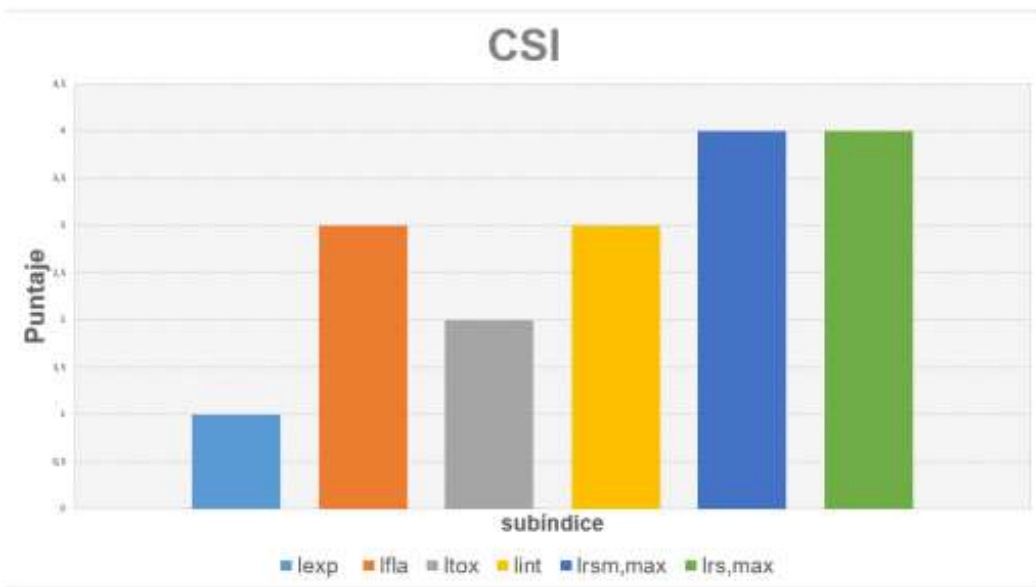
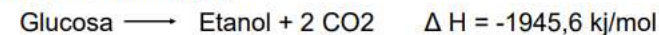


Figura 3. Diagrama de barras Indicadores CSI

De la figura 3 podemos observar que los subíndices de calor de las reacciones, tanto primaria como secundaria, generan los mas altos puntajes de peligrosidad en el indicador químico de seguridad inherente; Debido , entre otras cosas, a que son reacciones altamente **Exotérmicas**.

## Reacción principal



## Reacción Secundaria

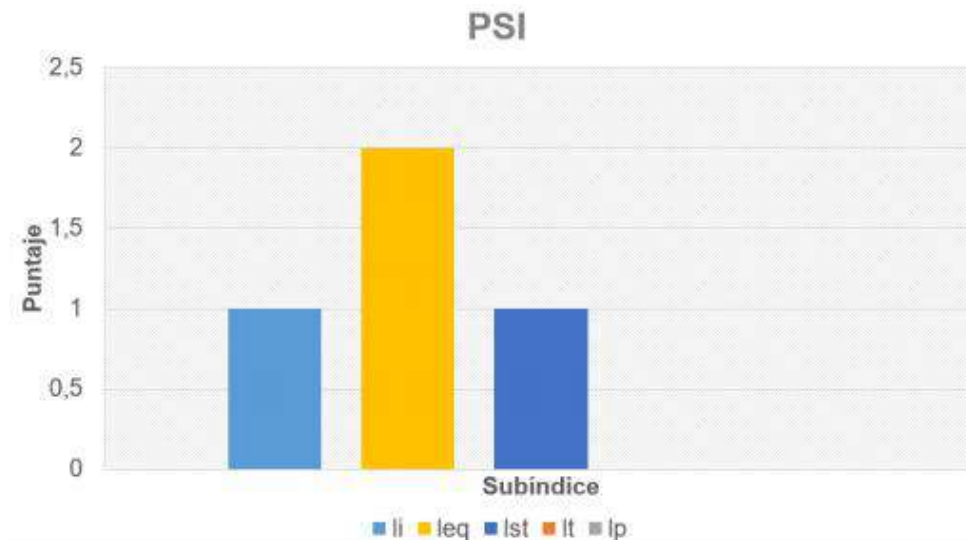
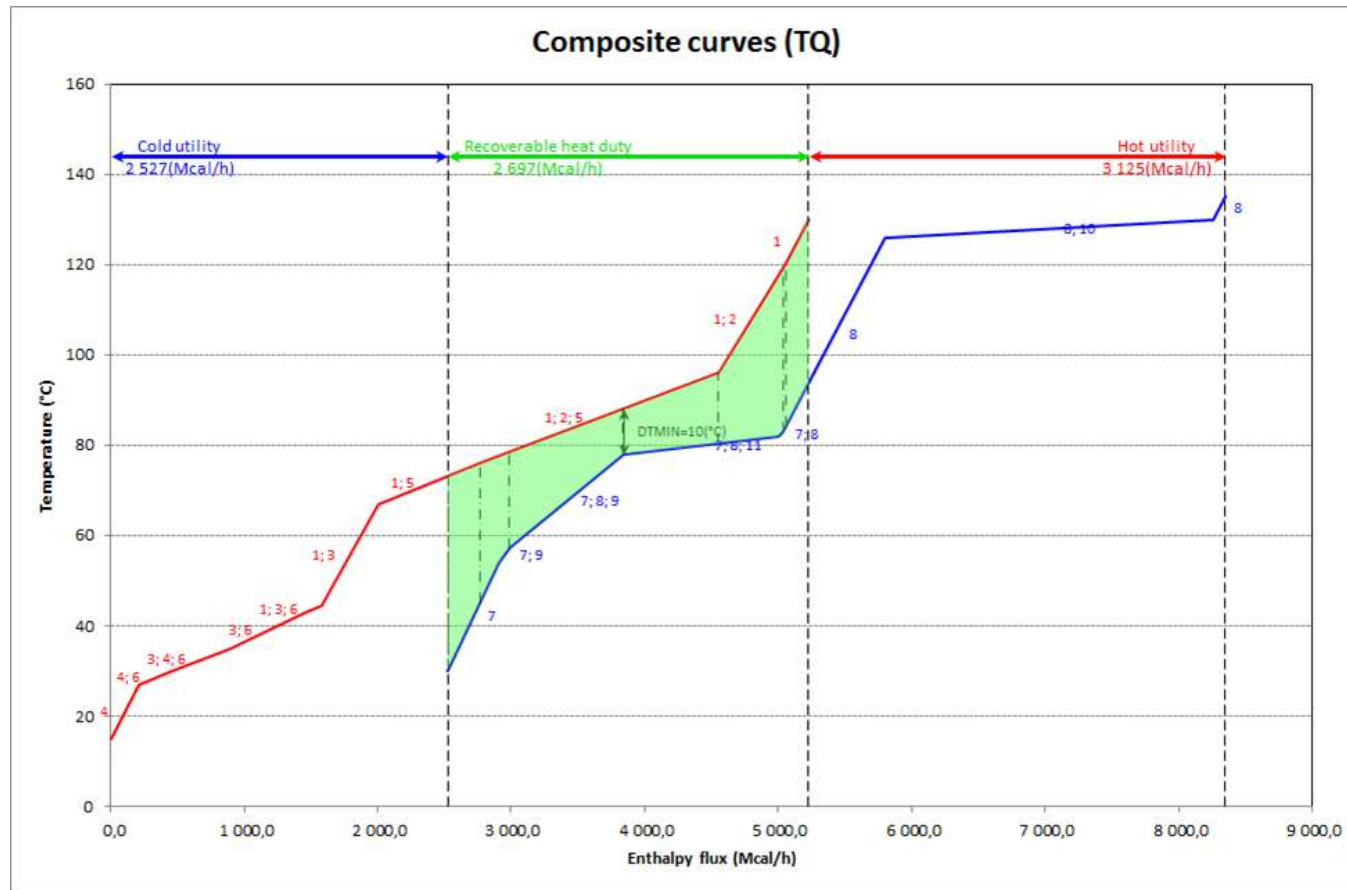


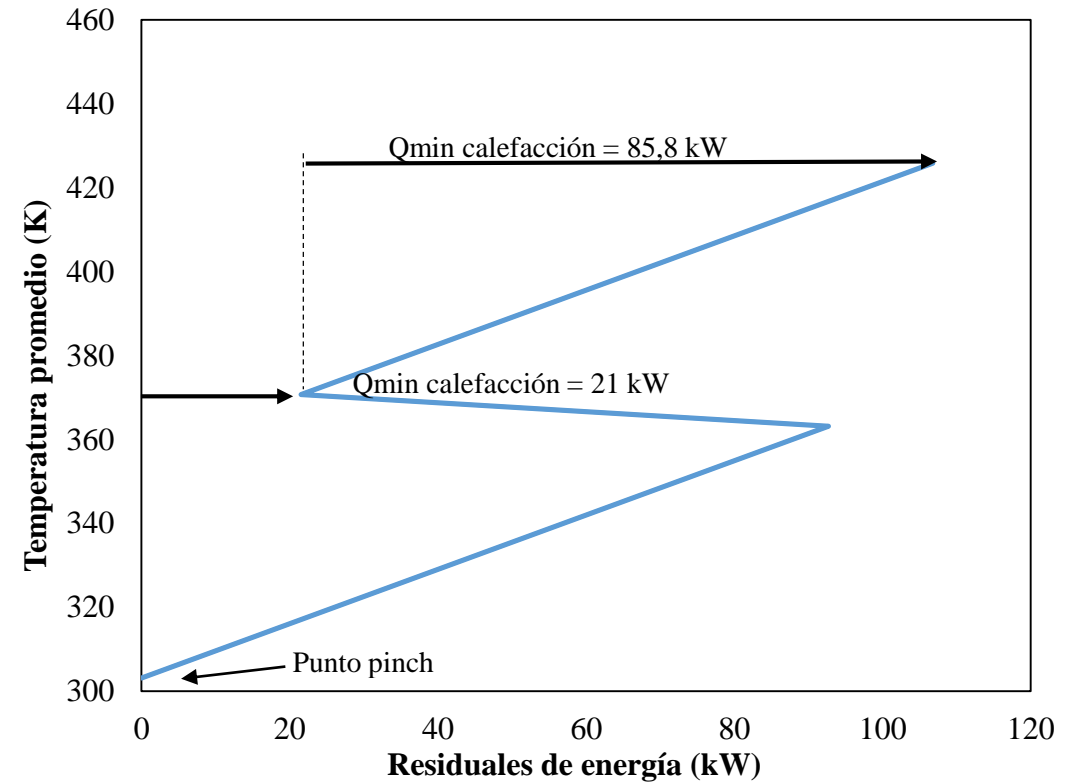
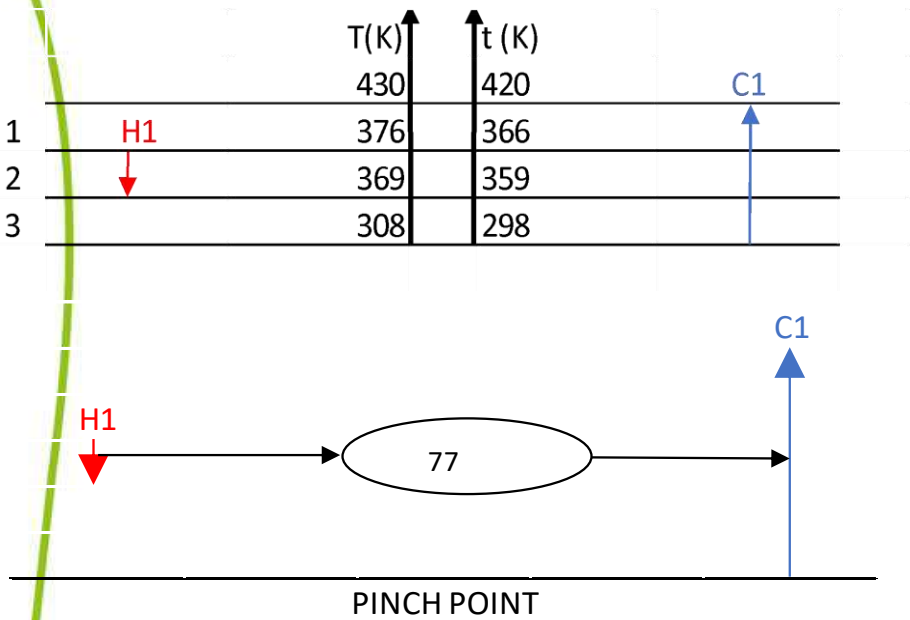
Figura 4. Diagrama de barras Indicadores PSI

De la figura 4 se puede afirmar que el subíndice de seguridad de los equipos del proceso representa el mayor puntaje de peligrosidad, mientras el resto de indicadores se mantienen en valores relativamente bajos o despreciables.

## 8. Integración de procesos



# 8. Integración energética Producción ACP

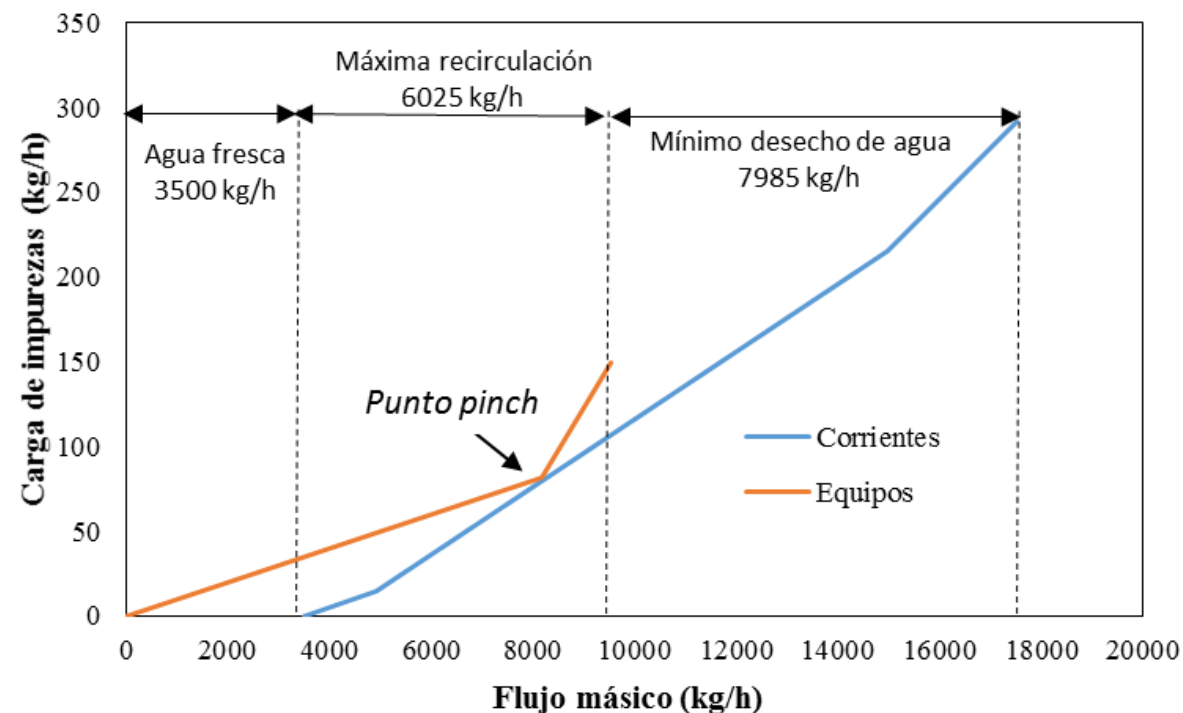
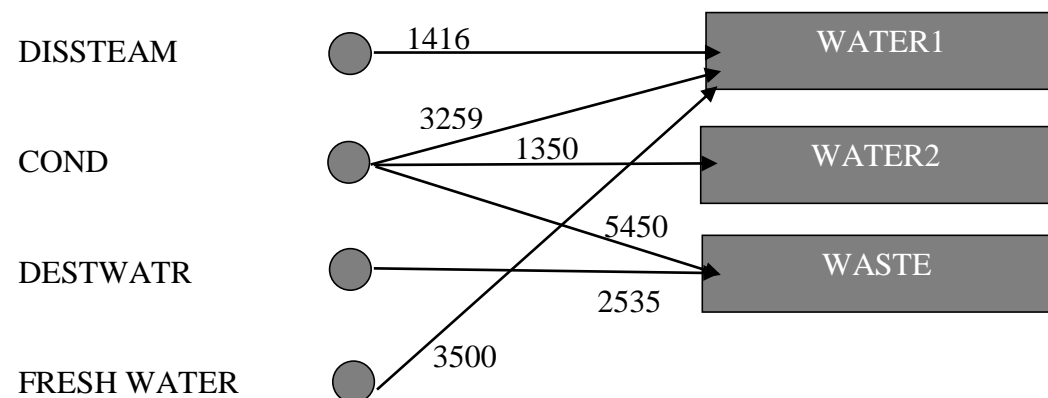


- Fuente: Sanchez-Tuiran y González-Delgado, 2018



## 8. Integración másica Producción ACP

Nombre	Flujo másico (kg/h)	Fracción másica de impurezas	Carga de impurezas (kg/h)
DISSTEAM	1416,02	0,01	14,1602
COND	10059,1	0,02	201,182
DESWATR	2535	0,03	76,05



- Fuente: Sanchez-Tuiran y González-Delgado, 2018

## 8. Integración másica y energética Producción ACP

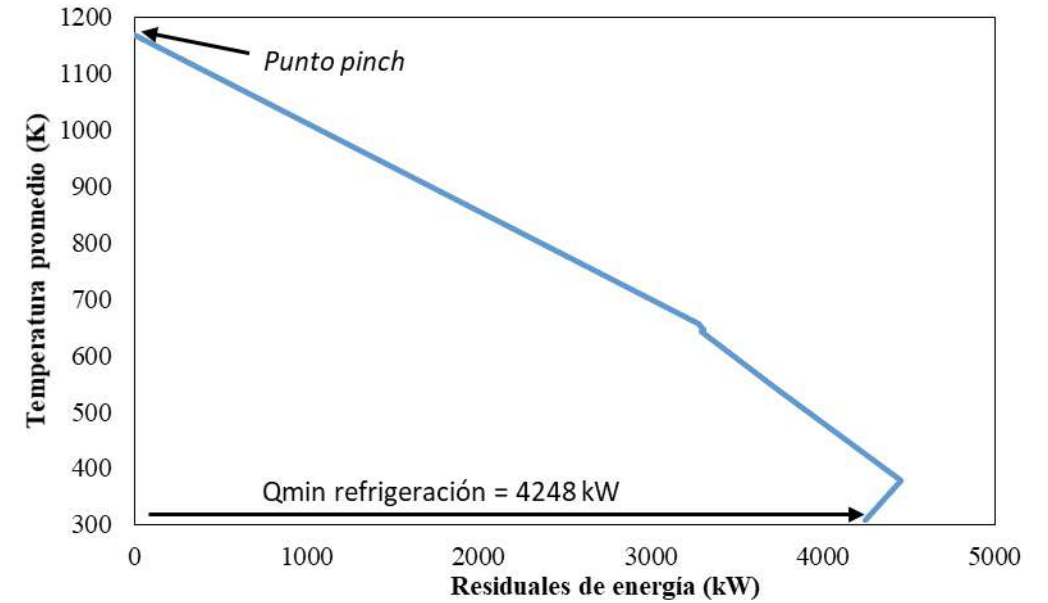
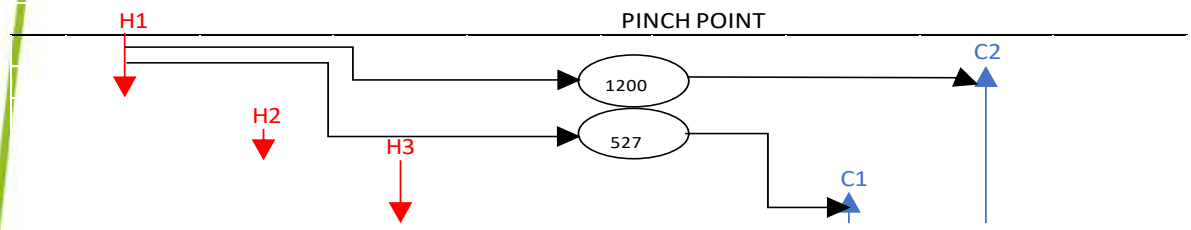
Con integración energética se satisfacen las **necesidades totales de calefacción** con una combinación de vapor de baja presión para suplir las necesidades hasta los 370 K (21 kW) y vapor de media presión para suplir las necesidades hasta 430,85 K. Utilizando un solo intercambiador de calor.

Con integración másica el consumo de agua fresca se puede reducir hasta en un **63,3%** y al mismo tiempo, se puede reducir el agua de desecho que sale del proceso en un **43,0%**.

- Fuente: Sanchez-Tuiran y González-Delgado, 2018

# 8. Integración energética (H2-raquis)

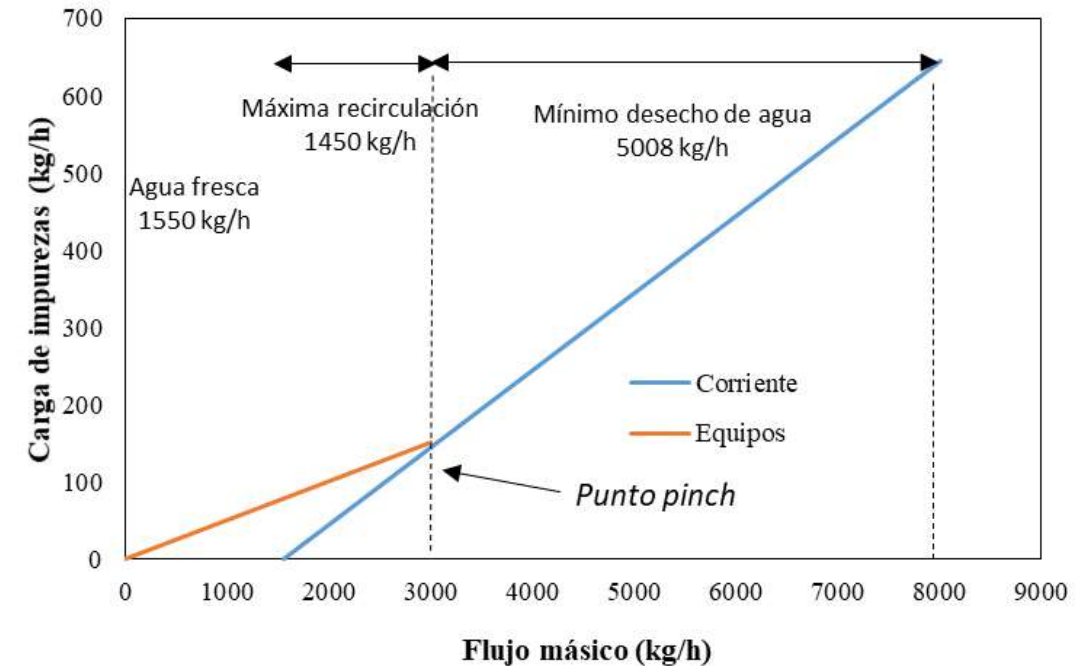
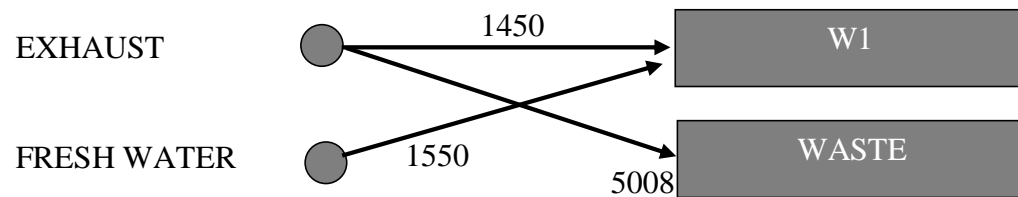
	T(K)	t (K)
	1173,15	1163,15
1	661,15	651,15
2	651,15	641,15
3	647,15	637,15
4	547,15	537,15
5	384,15	374,15
6	313,15	303,15



- Fuente: Sanchez-Tuiran y González-Delgado, 2018

## 8. Integración másica (H2-raquis)

Nombre	Flujo másico (kg/h)	Fracción másica de impurezas	Carga de impurezas (kg/h)
EXHAUST	6458	0,1	645,8



- Fuente: Sanchez-Tuiran y González-Delgado, 2018

## 8. Integración másica y energética H2-raquis

Mediante integración energética se mostró que se pueden suplir las necesidades de refrigeración con servicios industriales que operen por debajo de 303 K, si se utiliza agua de enfriamiento, se obtendrá la combinación de costos/beneficio más apropiada ya que su precio oscila entre los 0.03 y 0.10 dólares por metro cubico.

De igual manera, aplicando integración másica enfocada en corrientes de agua al proceso, el consumo de agua fresca se puede reducir en un **48.3%** respecto al caso inicial sin integración y el agua de desecho que sale del proceso se puede reducir en un **22.5%**.

- Fuente: Sanchez-Tuiran y González-Delgado, 2018

# CONCLUSIONES

La aplicación de Ingeniería de procesos asistida por computador (CAPE) a la cadena agrícola de la palma, contribuye a satisfacer las demandas de la cadena plasmadas en la agenda de I-D-I.

La validez de los resultados obtenidos depende de la certidumbre y nivel de detalle de la información operativa y de diseño de los procesos estudiados tanto para su diagnóstico como para su mejoramiento.

El proceso tipo de extracción de ACP presenta consumo y baja emisión de Impactos ambientales potenciales, eficiencia exergética baja debido al desaprovechamiento de algunos subproductos, pero mayor a otros procesos de extracción de aceite. El proceso es susceptible de mejora utilizando integración másica y energética de procesos.

Los procesos de valorización de raquis presentan buena seguridad inherente, baja eficiencia exergética con potencial de mejora mediante cambios tecnológicos y mejora la sensibilidad económica del caso base.



Muchas gracias:

[agonzalezd1@unicartagena.edu.co](mailto:agonzalezd1@unicartagena.edu.co)