



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Optimización de una planta piloto de aprovechamiento integral de naranja en términos energéticos y exergéticos.**

**Juan Fernando Arango Meneses**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de ingeniería Mecánica  
Medellín, Colombia

2021



# **Optimización de una planta piloto de aprovechamiento integral de naranja en términos energéticos y exergéticos.**

**Juan Fernando Arango Meneses**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Mecánica**

Director (a):

PhD. Héctor Iván Velásquez Arredondo

Línea de Investigación:

Sistemas Energéticos

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de minas, Departamento de ingeniería Mecánica  
Medellín, Colombia

2021



# Dedicatoria

*Graciela, Carlos Andrés, Felipe y Sofía  
Porque como mi familia, me han apoyado en cada momento*

.



# Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

La Universidad de Córdoba, por permitirme hacer parte de su plantel durante el desarrollo de este trabajo,

Al profesor Héctor Iván Velásquez Arredondo PhD, por su apoyo y consejos en el desarrollo de este trabajo. Gracias por su paciencia.

A los profesores Esperanza Medina y Luis Felipe Miranda, por su confianza para el desarrollo de este trabajo.

A Mario Palacio, Randy Sattar, Jhon Arcila. Porque su compañía y aprecio es irremplazable.

A Álvaro Araujo, Edison Ortega, Esteban Morelo, Andrés Herrera, Juan Manuel Mestra, Juan David Chaljub, Julio Valverde y Juan Luis Pacheco. Porque son mis amigos desde hace mucho tiempo y los aprecio de corazón.

A Hilsye Ruiz, porque más que un aporte físico, fue un aporte moral.

A mi familia, por su apoyo en todos los momentos.





## Resumen

La falta de políticas económico-productivas efectivas y la problemática ambiental ha conllevado a la implementación de técnicas que permitan llevar a cabo procesos productivos de aprovechamiento de manera efectiva, sin causar defectos en la producción.

En este trabajo de investigación se llevó a cabo una evaluación de diferentes casos de estudios propuestos con el fin de optimizar una planta de aprovechamiento integral de naranja., desde el punto de vista energético y exergético. Para ello se estableció un caso base a partir de la información del proyecto de Evaluación Integrada con Criterios de Sustentabilidad, del Proceso de Extracción por Arrastre de Vapor de Aceite Esencial de Cáscara de Naranja (*Citrus Sinensis*) de los Valles de la Provincia de Arequipa, en la Perspectiva de su Utilización Comercial. Al final de la investigación, se estableció la condición ideal que minimiza la exergía destruida con un valor de 17.14%, y así mismo otros elementos como el consumo de combustible del sistema.

Finalmente, como un añadido a esta investigación, se desarrolló un análisis termoeconómico que permita establecer los efectos de las configuraciones planteadas, en los costos exergéticos del sistema., y de esta forma comprobar que la minimización de la exergía destruida conlleva a una disminución en los costos exergéticos.

Palabras clave: Exergía destruida, Naranja, Casos de estudio.

# Optimization of a pilot plant for the integral use of orange in energy and exergy terms.

## Abstract

The lack of effective economic-productive policies and the environmental problem has caused the implementation of techniques that allows to carry out productive processes of effective use, without causing defects in production.

In this research, an evaluation of different case studies proposed was carried out, in order to optimize a plant for the integral use of orange, from the energy and exergy point of view. For this, a base case was established based on the information from Evaluación Integrada con Criterios de Sustentabilidad, del Proceso de Extracción por Arrastre de Vapor de Aceite Esencial de Cáscara de Naranja (*Citrus Sinensis*) de los Valles de la Provincia de Arequipa, en la Perspectiva de su Utilización Comercial. At the end of this research, the ideal condition that minimizes the exergy destroyed was established with a value of 17.14%, as well as other elements such as the fuel consumption of the system.

Finally, as an addition to this research, a thermoeconomic analysis was developed that allows to establish the effects of the proposed configurations on the exergetic costs of the system, and in this way to verify that the minimization of the destroyed exergy leads to a decrease in the exergy costs.

Keywords: Destroyed Exergy, Orange and Study cases.

---

# Contenido

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema y justificación. ....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos .....	2
1.3 Estructura del documento .....	3
<b>2. Marco teórico y Estado del arte</b> .....	<b>5</b>
2.1 Exergía .....	5
2.2 Optimización .....	8
2.3 Optimización de Exergía destruida .....	9
2.4 Termoeconomía .....	11
<b>3. Metodología y recursos</b> .....	<b>13</b>
3.1 Metodología .....	13
3.2 Descripción del proceso .....	19
<b>4. Evaluación de la planta base</b> .....	<b>25</b>
4.1 Consideraciones .....	25
4.2 Evaluación termodinámica .....	26
<b>5. Evaluación de los casos de estudio</b> .....	<b>31</b>
5.1 Consideraciones .....	31
5.2 Primer caso de estudio: Economizador de alimentación de la caldera. ....	31
5.3 Segundo caso de estudio: Segundo economizador de alimentación de la caldera. 39	
5.4 Selección del caso de estudio .....	46
<b>6. Análisis termoeconómico</b> .....	<b>50</b>
6.1 Evaluación de la planta base .....	50
6.2 Evaluación del primer caso de estudio .....	52
6.3 Evaluación del segundo caso de estudio .....	54
<b>7. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>57</b>
7.1 Conclusiones .....	57
7.2 Recomendaciones .....	58
<b>8. Anexos</b> .....	<b>59</b>
<b>9. Bibliografía</b> .....	<b>123</b>

---

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 2.1:</b> Evolución del estado del arte. ....	6
<b>Figura 3.1:</b> Diagrama de flujo de procesos.....	24
<b>Figura 4.1</b> exergía destruida por equipo.....	30
<b>Figura 5.1</b> Comparación de la exergía destruida por equipo .....	36
<b>Figura 5.2:</b> Diagrama de flujo de procesos propuesto para el primer caso.....	38
<b>Figura 5.3</b> Comparación de la exergía destruida por equipo .....	44
<b>Figura 5.4:</b> Diagrama de flujo de procesos propuesto para el segundo caso. ....	45
<b>Figura 5.5</b> Disminución de la exergía destruida por caso. ....	47
<b>Figura 5.6</b> Disminución del consumo de combustible destruida por caso.....	47

---

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 3.1:</b> Estado de referencia .....	15
<b>Tabla 3.2:</b> Composición elemental de la cáscara de naranja (Zapata et al., 2009). .....	16
<b>Tabla 3.3:</b> Composición elemental de la cáscara de naranja (Zapata et al., 2009). .....	17
<b>Tabla 3.4:</b> Plan de abono orientativo en los primeros cuatro años (cantidades de abono expresadas en gramos por árbol y año) (Srivastava, 2012) .....	19
<b>Tabla 4.1:</b> Estados termodinámicos definidos. ....	26
<b>Tabla 4.2:</b> Exergías físicas, químicas y totales .....	27
<b>Tabla 4.3:</b> Potencia de los equipos con base a un procesado de 120 kg/h de naranja. ....	28
<b>Tabla 4.4:</b> Exergía destruida por equipo.....	29
<b>Tabla 5.1:</b> Estados termodinámicos definidos. ....	32
<b>Tabla 5.2:</b> Exergías físicas, químicas y totales .....	33
<b>Tabla 5.3:</b> Potencia de los equipos con base a un procesado de 120kg/h de naranja. ....	35
<b>Tabla 5.4:</b> Exergía destruida por equipo.....	35
<b>Tabla 5.5:</b> Estados termodinámicos definidos. ....	39
<b>Tabla 5.6:</b> Exergías físicas, químicas y totales .....	41
<b>Tabla 5.7:</b> Potencia de los equipos con base a un procesado de 120 kg/h de naranja. ....	42
<b>Tabla 5.8:</b> Exergía destruida por equipo.....	43
<b>Tabla 5.9:</b> Resumen de los cambios por efecto de los casos evaluados. ....	46
<b>Tabla 5.10:</b> Exergía destruida de la planta. ....	48
<b>Tabla 6.1:</b> Coeficientes de enlaces externos y costos exergéticos. ....	50
<b>Tabla 6.2:</b> Coeficientes de enlaces externos y costos exergéticos. ....	52
<b>Tabla 6.3:</b> Coeficientes de enlaces externos y costos exergéticos. ....	54

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Caracteres latinos

Símbolo	Término	Unidad SI
Ash	Porcentaje de cenizas	
b	Exergía	kJ/kg
$\dot{B}$	Flujo de exergía	kW
C	Porcentaje de carbono	
C <sub>p</sub>	Calor específico	kJ/kg-°C
CU	Costos exergéticos por unidad de masa	kJ/kg
E	Equipo	
F	Fracción sólida	
$\bar{g}$	Energía libre de Gibbs	kJ/kmol
h	Entalpía	kJ/kg
H	Porcentaje de hidrógeno	%
K	Coeficientes de enlaces externos	
$\dot{m}$	Flujo másico	kg/s
M	Porcentaje de humedad	%
N	Porcentaje de Nitrógeno	
P	Presión	kPa
R	Constante de los gases ideales	kJ/kmol-K
s	Entropía	kJ/kg-K
S	Porcentaje de azufre	
T	Temperatura	°C
U	Energía Interna	kJ/kg
v	Volumen específico	m <sup>3</sup> /kg
$\dot{W}$	Potencia	kW
y	Fracción molar de un elemento	

### Caracteres griegos

Símbolo	Término	Unidad SI
$\phi$	Relación estándar de exergía química	

### Subíndices

Subíndice	Término
0	Estado de referencia
a	Agua
Calor	Factor del calor
ch	Factor químico
cha	Factor químico del agua
chs	Factor químico de un elemento que no es agua
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Destruída	Factor destruido
f	Combustible
fg	Elemento en cambio de fase de líquido a vapor
H <sub>2</sub> O	Agua
IN	Entrada
Número	Corriente determinada
O <sub>2</sub>	Oxígeno
ph	Factor físico
pha	Factor físico del agua
phs	Factor físico de un elemento que no es agua
s	Componente diferente al agua
Total	Factor total
Trabajo	Factor del trabajo

### Acrónimos

Abreviatura	Término
CE	Costos exergéticos
EES	Engineering Equation Solver
HHV	Poder calorífico superior
LHV	Poder calorífico inferior

# 1.Introducción

## 1.1 Planteamiento del problema y justificación.

Por falta de políticas económico-productivas efectivas y de compromiso estratégico con un desarrollo sustentable, la agroindustria en el Perú y en particular en la Región Arequipa no deja de ser predominantemente primaria, con muy poco valor agregado en sus procesos productivos (Valdez Tantani et al., 2016). Así pues, se deja de aprovechar el potencial de productos como la naranja, cultivo tradicional con una producción nacional de 165.100 toneladas aproximadamente en el 2016 (Ministerio de Agricultura y Riego del Perú, 2018), y cuyo aprovechamiento de sus derivados como valor agregado podría aportar al crecimiento económico del país.

Entre los subproductos principales que se pueden obtener a partir de la naranja se encuentran la pulpa, la pectina (Hosseini et al., 2016), el aceite esencial (Allaf et al., 2013) y el agua florida. Sin embargo, se carece de referencias de plantas de procesamiento de naranja en la zona de Arequipa que hagan un aprovechamiento integral de dicha fruta. Pero, en zonas cercanas existen plantas de procesamiento de limón, en donde se produce jugo a partir de la pulpa y aceite esencial de la cascara.

Al ser la naranja un cultivo típico de la región, que posee altos índices de producción, el aprovechamiento de la naranja para dar valor agregado a sus subproductos, es una oportunidad socio-económica que permite generar un aporte al crecimiento económico de la región. Gracias a esto, se lleva a cabo en la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa un proyecto de investigación denominado *Evaluación Integrada con Criterios de Sustentabilidad, del Proceso de Extracción por Arrastre de Vapor de Aceite Esencial de Cáscara de Naranja (Citrus Sinensis) de los Valles de la Provincia de Arequipa, en la Perspectiva de su Utilización Comercial* en donde se pretende estudiar la producción de aceite esencial a partir de la cascara de naranja, con miras a la construcción de un planta piloto de producción de aceite esencial de naranja con exigencias de sustentabilidad en el uso de recursos materiales y energéticos.



Así pues, el aprovechamiento de este fruto para la producción de aceite esencial abre la posibilidad del procesado de otros subproductos de este proceso. La pulpa, puede ser procesada para la producción de jugo de naranja el cual es un producto común en la alimentación humana; la pectina que se encuentra en la cascara, puede ser empleada para la producción de películas biodegradables para la manufacturación de bolsas (Nisar et al., 2018); El aceite esencial ubicado en la cáscara (D-Limoneno principalmente), posee componentes de múltiples aplicaciones a nivel doméstico e industriales, con amplios márgenes de rentabilidad (Virost et al., 2008); y el agua florida, es un subproducto proveniente de la extracción de aceite esencial a través del arrastre por vapor en donde el agua al estar en contacto con el aceite esencial adquiere ciertas cualidades odoríferas que pueden ser empleadas para elementos aromatizantes.

Asociando esto con la exigencia de sustentabilidad del proceso, se establece la necesidad de optimizar una planta de aprovechamiento integral de la naranja en el margen de dicho proyecto a solicitud de los mismos como parte de los resultados de este, desde el punto de vista exergo-económico para garantizar el uso óptimo de los recursos energéticos, esto pues la exergía permite establecer los puntos más irreversibles de un proceso, permitiendo así plantear estrategias que disminuyan dichas irreversibilidades y desde el punto de vista económico puesto que el proyecto en el que se enmarca esta tesis su fin último es generar un valor agregado a los subproductos, que a fin de cuentas se busca en una consecuencia económica.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Optimizar una planta piloto de aprovechamiento integral de la naranja en términos de energía y exergía para procesar 120 kg/h de naranja.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Generar diferentes opciones de configuraciones de optimización de una planta piloto de aprovechamiento integral de la naranja, a partir de una planta base ya establecida en el proyecto de investigación “Evaluación Integrada Con Criterios de Sustentabilidad, del Proceso de Extracción por Arrastre de Vapor de Aceite Esencial de Cáscara de Naranja (*Citrus Sinensis*) de los Valles de la Provincia de Arequipa, en la Perspectiva de su Utilización Comercial”.
- Evaluar las configuraciones desde el punto de vista exergético.
- Determinar las condiciones óptimas de operación utilizando el criterio de mínima exergía destruida

### 1.3 Estructura del documento

En los capítulos posteriores, se trabajará el desarrollo metodológico, el estudio del caso base de la planta, los casos de estudio evaluados y como un añadido de un análisis termoeconómico de la propuesta base y los casos de estudio propuestos.

En el capítulo 2, se realiza una revisión del estado del arte con referente a la exergía, la exergía destruida, la optimización como forma de mejorar el uso de los recursos, y la presentación de la brecha de conocimiento en la zona.

En el capítulo 3, se presenta la metodología empleada para el desarrollo de los cálculos usados a lo largo del documento, además, una descripción detallada de la planta y el proceso, en donde se describe la situación de la planta y el balance de masa de dicho sistema.

En el capítulo 4, se presenta el análisis termodinámico y exergético de la situación del caso base de la planta establecida bajo las consideraciones presentadas dentro del mismo capítulo, también se presenta y establece los equipos donde existe una mayor exergía destruida y las causas posibles de esto.

Por otra parte, en el capítulo 5 se trabaja la evaluación termodinámica de los casos de estudios propuestos, y como estas configuraciones afectan a propiedades como la exergía

---

y su efecto en la exergía destruida de los equipos. Para finalizar con la selección del caso usando el criterio d mínima exergía destruida

Como un añadido, en el capítulo 6 se realiza un análisis termoeconómico del caso base y los casos de estudio usando coeficientes de enlaces externos que permitan vislumbrar los efectos de los cambios e de las salidas con respecto a la exergía de entrada al subsistema.

Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones del trabajo y perspectivas para trabajos futuros.

## 2.Marco teórico y Estado del arte

### 2.1 Exergía

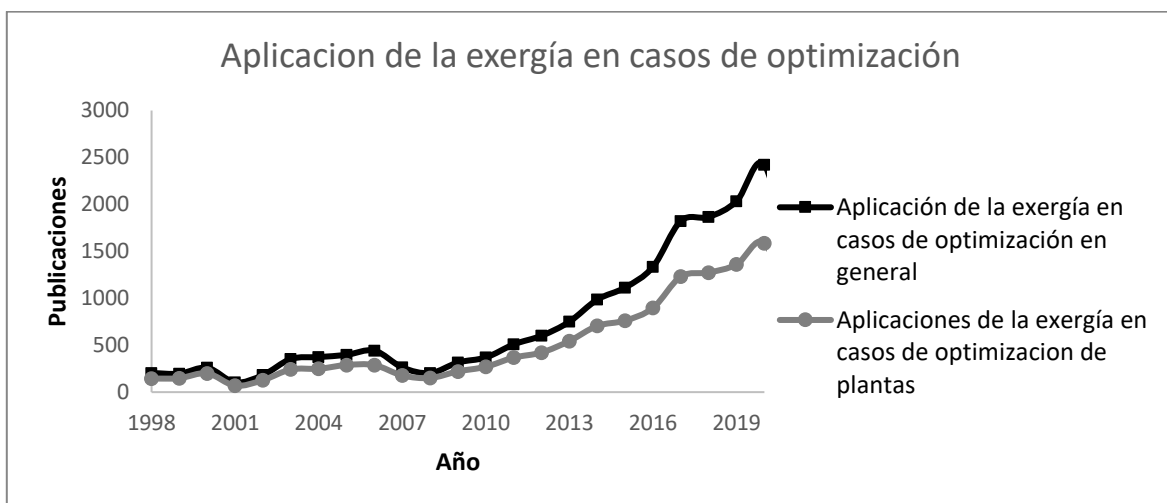
Es una propiedad que permita determinar el potencial de trabajo útil de una cantidad dada de energía en algún estado especificado. El potencial de trabajo de la energía contenida en un sistema en un estado especificado es simplemente el trabajo útil máximo que puede obtenerse del sistema (Cengel & Michael A, 2014). Ahora bien, la exergía de una corriente de un elemento determinado depende de propiedades como la presión y la temperatura, de esta forma la exergía de una corriente es una función de estado una vez sea definido el ambiente en el cual se encuentra, y se establece como una propiedad (Moran et al., 2010).

Además, discusiones posteriores muestran que la exergía no solo puede ser destruida por irreversibilidades, sino que también puede ser transferida hacia y desde los sistemas. La exergía transferida de un sistema a su entorno sin uso representa típicamente una pérdida. Se puede lograr una mejor utilización de los recursos energéticos mediante la reducción de la destrucción de la exergía dentro de un sistema y/o la reducción de las pérdidas (Moran et al., 2010).

Para el análisis termodinámico que involucra el concepto de exergía, es necesario modelar la atmósfera. El modelo resultante se llama ambiente de referencia, o simplemente la referencia. Cuando un sistema de interés está en  $T_0$  y  $P_0$  y en reposo en relación con el medio ambiente, decimos que el sistema está en estado muerto. En el estado muerto no puede haber interacción entre el sistema y el entorno, y por lo tanto no hay potencial para desarrollar el trabajo (Kotas, 1985b; Moran et al., 2010).

La exergía química de una sustancia debe tenerse en cuenta al calcular los cambios de exergía de las reacciones químicas. La exergía química está asociada con la desviación de la composición química de un sistema de la del medio ambiente. Para simplificar, la exergía química considerada en el análisis es una exergía química estándar, basada en los valores estándar de la temperatura en estado muerto de 25 C y la presión de 101.3 kPa (Dincer et al., 2014).

Con respecto al estado del arte, la Figura 2.1 muestra la evolución de las publicaciones del uso de la exergía como parámetro de optimización en casos generales y en casos específicos de plantas a lo largo del tiempo. Se nota que existe un crecimiento en las investigaciones de esta temática a partir de 2010 para ambos casos. Se encontraron 18310 resultados de búsqueda para casos generales donde se emplee la exergía como medio de optimización desde el 1998 hasta 2021, mientras que para casos empleados en plantas se encontraron 12557 resultados hasta la fecha<sup>1</sup>. Ahora bien, aunque se puede observar que los casos de plantas componen gran parte de los estudios de optimización de exergía, siguen siendo relevantes puesto que son evaluaciones de casos específicos.



**Figura 2.1:** Evolución del estado del arte.

Por otro lado, en la actualidad se ha reportado trabajos asociado a la optimización de procesos desde el punto de vista exergético. Por ejemplo, (Akbari Vakilabadi et al., 2018; Han et al., 2018; Yan et al., 2019) se enfocan en el uso de la exergía para mejorar un proceso ya sea por regeneración de energía o encontrar zonas de pérdida energética. Así pues, las investigaciones de los últimos cinco años se centran principalmente en optimizar teniendo como criterio la minimización de la destrucción de exergía. Se proponen por

<sup>1</sup> Búsquedas realizadas el día 16 de marzo de 2021 en ScienceDirect con los siguientes términos de búsqueda: "Exergy" AND "Optimization" AND "Plant"

ejemplo, la optimización de sistemas de refrigeración y acondicionamiento de espacios mediante la minimización de la exergía destruida (Flórez-Orrego & de Oliveira Junior, 2017; Singh & Das, 2017); también se han presentado optimizaciones para procesos de generación de energía y producción de coque que usan la misma metodología (C. Liu et al., 2017; Rashidi & Khorshidi, 2018).

Ahora bien, la evaluación exergética también se ha usado, por ejemplo, para analizar casos de generación de energía con fuentes alternas, casos como selección de la generación de energía en edificios, es decir definir si desde el punto de vista exergético, es mejor usar fuentes alternas o fuentes convencionales (Zhou, 2018); o medir el rendimiento de plantas de generación de energía a partir de fuentes alternas (Sukumaran & Sudhakar, 2018).

La exergía destruida también ha sido un criterio de evaluación en muchas investigaciones para realizar análisis de irreversibilidades (D. Liu et al., 2020; Zhang et al., 2020), también se ha usado la exergía destruida como un método para explorar emisiones de carbono evitables, en donde se predice el potencial de emisión de carbono evitable con la reducción de la destrucción de exergía (Wu & Wang, 2020). También se ha establecido como un criterio de selección para una estrategia como en (Gupta et al., 2020), en donde se propone una metodología que combina simulaciones fluidodinámicas con balances de energía y exergía termodinámicos para determinar la pérdida de exergía en diferentes componentes, facilitando la toma de decisiones y opciones de diseño para el refrigerado por aire basado en minimizar la irreversibilidad termodinámica.

Además, se ha reportado el uso de la optimización exergética como un medio para la optimización termoeconómica de procesos de poligeneración, de ciclos de potencia, plantas térmicas y en el área industrial (Fallah et al., 2018; Mata-Torres et al., 2019; Sahoo et al., 2018; Sánchez Villafana & Vargas Machuca Bueno, 2019; Taheri & Gadow, 2017)

Es claro, entonces, que el estado del arte con respecto a la exergía y la optimización, está centrado actualmente en el análisis de casos de estudio específicos, con miras a la selección de una alternativa que minimice las irreversibilidades y traiga como consecuencia un empleo óptimo de los recursos.

## 2.2 Optimización

Una optimización, permite responder preguntas de un proceso, es decir las configuraciones recomendadas de un proceso, los tamaños de un componente, como seleccionar equipos o como distribuir flujos. Para responder a estas preguntas, los ingenieros deben formular un problema de optimización apropiado. La formulación apropiada de problemas suele ser el paso más importante y, a veces el más difícil, de un estudio de optimización exitoso. A continuación, se presentan las características esenciales de los problemas de optimización (Bejan et al., 1996).

### A. Límites del sistema

El primer paso en un estudio de optimización es definir claramente los límites del sistema que se optimizará. Todos los subsistemas que afectan significativamente el rendimiento del sistema en estudio deberían incluirse en el problema de optimización (Bejan et al., 1996).

### B. Criterios de optimización.

La selección de criterios sobre la base de la cual el diseño del sistema será evaluado y optimizado es un elemento clave en la formulación de un problema de optimización. Los criterios de optimización pueden ser económicos (inversión de capital total, costos totales anuales, ganancia neta anual, rendimiento de la inversión o cualquiera de los criterios de evaluación de rentabilidad), tecnológicos (eficiencia termodinámica, tiempo de producción, tasa de producción, confiabilidad, peso total, etc.) y ambiental (por ejemplo, tasas de contaminantes emitidos). Un diseño optimizado se caracteriza por un valor mínimo o máximo, según corresponda, para cada criterio seleccionado (Bejan et al., 1996).

### C. Variables

Otro elemento esencial para formular un problema de optimización es la selección de las variables independientes que caracterizan adecuadamente las posibles opciones de diseño. Al seleccionar estas variables, es necesario (a) incluir todas las variables importantes que afectan el rendimiento y la rentabilidad del sistema, (b) no incluir variables de menor importancia, y (c) distinguir entre variables independientes cuyos valores son susceptibles de cambio: las variables de decisión y los parámetros cuyos valores son fijados por la aplicación particular (Bejan et al., 1996).

### D. Modelo matemático.

Un modelo matemático es una descripción en términos de relaciones matemáticas, que implica alguna idealización, de las funciones de un sistema físico. El modelo matemático describe la manera en que se relacionan todas las variables problemáticas y la forma en que las variables independientes afectan el criterio de rendimiento (Bejan et al., 1996).

#### **E. Suboptimización.**

La suboptimización generalmente se aplica a sistemas térmicos complejos, particularmente cuando la optimización de todo el sistema puede no ser factible debido a la complejidad. La suboptimización es la optimización de una parte de un problema o de un subsistema, ignorando algunas variables que afectan la función objetivo u otros subsistemas. La suboptimización es útil cuando ni la formulación del problema, ni las técnicas de optimización disponibles permiten solucionar todo el problema (Bejan et al., 1996).

### **2.3 Optimización de Exergía destruida**

La mayoría de los sistemas térmicos son alimentados con entradas de exergía derivadas directa o indirectamente del consumo de combustibles fósiles. En consecuencia, las destrucciones evitables y las pérdidas de exergía representan el desperdicio de estos recursos (Moran et al., 2010). La exergía destruida representa el potencial de trabajo perdido (Cengel & Michael A, 2014).

Ahora bien, la cuantificación de la exergía destruida se puede usar como una forma de optimizar procesos, puesto que esta está asociada directamente a la entropía generada. Dicha entropía generada representa que tan irreversible es un sistema, de tal forma que al no haber entropía generada se presenta un proceso completamente reversible (Cengel & Michael A, 2014; Moran et al., 2010).

$$b_{destruida} = T_0 S_{generada} \geq 0 \quad 2.1$$

En la actualidad se encuentran casos de estudio específicos y con metodologías diversas usando el criterio de minimización de la exergía destruida. (Ebrahimgol et al., 2020) presentaron una optimización de exérgica de una planta de energía nuclear WWER1000 utilizando Whale Optimization Algorithm (WOA) el cual imita el comportamiento social de



las ballenas jorobadas para la caza, el algoritmo se adquiere mediante la simulación matemática de la estrategia de caza de este mamífero (Mirjalili & Lewis, 2016). El valor inicial de la destrucción de exergía es 1968.95 MW mientras que por la implementación del WOA, la destrucción de exergía se minimizó a 1914.7 MW. La eficiencia térmica es el otro beneficio principal; La eficiencia térmica de la central nuclear (33.66%) aumenta a 36.42% (Ebrahimgol et al., 2020).

Otro ejemplo del uso de la destrucción de exergía como una forma de optimización es el presentado por (Akbarpour Ghiasi et al., 2020) en donde se presenta una optimización de un sistema de ciclo combinado basado en la destrucción de exergía. En el proceso de optimización, se consideraron los aspectos ambientales y de rendimiento del sistema, y se incorpora la destrucción de exergía. Esta optimización es llevada a cabo en conjunto a través Engineering Equation Solver (EES) y Matlab.

(Xiao et al., 2019) introducen un enfoque de optimización de transferencia de calor centrado en la destrucción de exergía para tratar adecuadamente la compensación entre la irreversibilidad del proceso de transferencia de calor y el consumo de energía de una bomba en flujo turbulento para un calentador de aire mediante energía solar. En el cual se concluyó que el rendimiento de la transferencia de calor mejora a medida que disminuye la destrucción total de la exergía de transferencia de calor.

Con respecto a estudios exergéticos enfocados a la optimización de plantas en Perú, se reportan pocos estudios en la zona, en (Meramo-Hurtado & González-Delgado, 2019) se presenta un enfoque de optimización multiobjetivo para la síntesis del proceso de biorrefinería que se basa en parámetros de sostenibilidad, la metodología que se aplicó fue la optimización multiobjetivo y métodos numéricos para desarrollar topologías óptimas de biorrefinería basadas en la selección de residuos/materias primas y del producto final, incorporando la destrucción de exergía química para la evaluación química en una biorrefinería. Pero en concreto, con respecto a optimización de plantas de procesado de naranja no se encontraron trabajos en Perú, presentándose así una brecha de aplicación de conocimiento para la optimización de procesos usando la exergía destruida como una forma de optimización. Esta brecha también se puede observar en menor medida, fuera de Perú puesto que se reportan pocos trabajos de del uso de la exergía como forma de optimización en plantas de naranja, por ejemplo en (Waheed et al., 2008), a pesar de ser

un trabajo de hace más de una década, es los pocos que presenta estudios de energía y exergía en una industria de fabricación de jugo de naranja en Nigeria para determinar el consumo de energía y establecer métodos de optimización energética en la empresa.

## 2.4 Termoeconomía

Para un sistema que funciona en estado estable, puede haber una serie de corrientes de material que entran y salen, así como interacciones de calor y trabajo con el entorno. Asociadas con estas transferencias de materia y energía están las transferencias de exergía dentro y fuera del sistema y las destrucciones de exergía causadas por las irreversibilidades dentro del sistema. Dado que la exergía mide el verdadero valor termodinámico de tales efectos, y los costos solo deben asignarse a las mercancías de valor, es significativo utilizar la exergía como base para asignar costos en los sistemas térmicos. De hecho, la termoeconomía se basa en la noción de que la exergía es la única base racional para asignar costos a las interacciones que experimenta un sistema térmico con su entorno y a las fuentes de ineficiencias dentro de él. Se puede referir a este enfoque como costeo exergético (Bejan et al., 1996).

La distribución de irreversibilidades y los flujos de exergía asociados entre los diversos componentes de una planta en funcionamiento constante pueden ser de gran valor en el análisis de una planta. Sin embargo, es de mayor interés la forma en que las tasas de irreversibilidad local y los flujos de exergía se alteran en relación con la tasa de irreversibilidad general de la planta, o la entrada de exergía a la planta, con cambios en un parámetro operativo seleccionado. Estos cambios relativos pueden expresarse convenientemente mediante dos tipos de coeficientes estructurales (Kotas, 1985c).

La exergía tiene algunas características en común con el valor económico, en tanto que ambas cantidades pueden aumentar con la utilidad de un portador de energía y pueden destruirse irreversiblemente. Por lo tanto, se han hecho muchas propuestas para las aplicaciones termoeconómicas de la exergía (Szargut et al., 1987).

Actualmente, se han evaluado casos de estudio que permiten tomar decisiones desde el punto de vista termoeconómico. En (Cao et al., 2020) se desarrollan y comparan tres configuraciones diferentes basadas en energía geotérmica para la generación de energía

e hidrógeno, desde el punto de vista energético, exergético y termoeconómico. De esta forma permitiendo un criterio de selección de los sistemas en donde se incluyó el aspecto termoeconómico como un factor de optimización.

Del mismo modo, existen estudio que usan el criterio de termoeconomía para la asignación de costos. En (Catrini et al., 2017) se realiza un análisis de exergía y de costos termoeconómicos de un ciclo de vapor combinado de calor y energía integrado con una planta de destilación de múltiples efectos y compresión de vapor térmico. El objetivo del estudio es mostrar cómo estas metodologías proporcionan un criterio racional para asignar los costos de producción de electricidad y agua dulce en un sistema de doble propósito. Los resultados presentan la variación de los costos exergéticos en dos escenarios estudiados.

Así mismo, en (Deng et al., 2008) se aplica un método de análisis de costes de exergía basado en la teoría estructural de la termoeconomía a un sistema de microtrigeneración a gas, que utiliza un grupo electrógeno a pequeña escala impulsado por un motor de gas y un nuevo enfriador de adsorción a pequeña escala. La metodología termoeconómica utilizada en este artículo puede ser beneficiosa en el análisis y diseño de sistemas complejos similares.

Así pues, se observa que el estado del arte asociado a la termoeconomía está ligado, principalmente pero no únicamente, a la evaluación de casos de estudio y el efecto de diferentes cambios en los aspectos termoeconómicos.

## 3. Metodología y recursos

En este capítulo, se presenta la metodología empleada para el desarrollo de los cálculos usados a lo largo del documento, y una descripción detallada de la planta y el proceso.

### 3.1 Metodología

A partir de una planta base ya establecida en el proyecto de investigación “Evaluación Integrada Con Criterios de Sustentabilidad, del Proceso de Extracción por Arrastre de Vapor de Aceite Esencial de Cáscara de Naranja (*Citrus Sinensis*) de los Valles de la Provincia de Arequipa, en la Perspectiva de su Utilización Comercial” a la cual se le realizarán las evaluaciones energéticas y exergéticas con el fin de tener un punto de comparación, se llevará a cabo una revisión bibliográfica de diferentes plantas con sistemas energéticos que presenten optimización en sus procesos, es decir, que presenten regeneración de energía, flujos, etc. Esto se realiza con el fin de definir las posibles formas de optimización actuales que se presentan en plantas con sistemas energéticos y de esta manera, se plantearán diferentes casos de estudio de optimización que serán evaluados desde el punto de vista exergético. Al final de esta fase, se entregará el diseño de diferentes casos de estudio de propuestas de optimización para una planta piloto de aprovechamiento integral de naranja.

Una vez establecidos los casos de estudio, se plantearán los balances de masa en Engineering Equation Solver (EES). Se establecerán los flujos y las relaciones de flujo de los subproductos con base en estudios previos de laboratorio provenientes del proyecto ya mencionado anteriormente. Con respecto a los intercambiadores de calor durante el sistema y los añadidos en los casos de estudio posteriores, son diseñado a partir de primera ley, pero se aseguró diferencias de temperatura reales, de tal forma que éstos puedan diseñarse en la vida real.

Además, se establecerán las condiciones termodinámicas de los flujos a partir de datos experimentales en el mismo software mencionado anteriormente, y con base a esto se realizarán balances de energía para cada uno de los casos de estudio y las eficiencias de primera ley, estos serán evaluados en un software de solución de sistemas no lineales.

Teniendo en cuenta lo anterior y los balances de masa, se establecerá la exergía en cada flujo, el balance de exergía en cada equipo y la exergía destruida, se plantearán estos balances en un software de solución de sistemas no lineales. La exergía física en función de la masa para cada estado es calculado a partir de la ecuación 3.1 presentada por (Cengel & Michael A, 2014; Moran et al., 2010):

$$b_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gZ \quad 3.1$$

Los valores de la exergía química de muchas sustancias se encuentran tabulados, sin embargo, muchos compuestos orgánicos con base C<sub>a</sub>, H<sub>b</sub>, O<sub>c</sub> no se encuentran, por tanto, la exergía química puede ser calculada en kJ/ kmol para gases ideales o hidrocarburos así (Moran et al., 2010):

$$b_{ch} = \left[ \bar{g}_f + \left( a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \bar{g}_{O_2} - a\bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O} \right] (T_0, P_0) + \bar{R}T_0 \ln \left( \frac{(y_{O_2}^e)^{a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}}}{(y_{CO_2}^e)^a (y_{H_2O}^e)^{\frac{b}{2}}} \right) \quad 3.2$$

Donde  $\bar{g}$ , a, b y c es la energía libre de Gibbs de los componentes, las moles de la molécula de carbono, las moles de la molécula de hidrógeno y las moles de la molécula de oxígeno, respectivamente.  $T_0$  y  $P_0$ , son los valores de la temperatura y presión en el estado muerto.

La exergía química del agua y el metano se encuentran tabuladas en (Kotas, 1985a) con un valor de 3120 y 836510 kJ/kmol respectivamente, y la exergía química de los gases de combustión es calculada a partir de la ecuación 3.3 presentada por (Kotas, 1985b; Moran et al., 2010), donde  $T_0$  es la temperatura en el estado muerto,  $y_i$  es la fracción molar de del elemento en la mezcla y  $y_i^e$  es la fracción molar del elemento en su estado de referencia.

$$b_{ch} = RT_0 \sum_{i=1}^j y_i \ln \left( \frac{y_i}{y_i^e} \right) \quad 3.3$$

La exergía total en función de la masa es la suma de la exergía física y la exergía química como se muestra en la ecuación 3.4. Y el flujo de exergía total es el producto del flujo másico y la exergía en función de la masa como se muestra en la ecuación 3.5.

$$b_{total} = b_{ph} + b_{ch} \quad 3.4$$

$$\dot{B}_{total} = \dot{m}b_{total} \quad 3.5$$

El ambiente de referencia es definido a continuación en la Tabla 3.1. En este estado la energía y la exergía de los componentes es cero.

**Tabla 3.1:** Estado de referencia

Propiedad	Valor	Unidades
Presión ( $P_0$ )	101.3	kPa
Temperatura ( $T_0$ )	25	°C
Fracción molar de O <sub>2</sub> ( $y_{O_2}$ )	0.2059	-
Fracción molar de N <sub>2</sub> ( $y_{N_2}$ )	0.7748	-
Fracción molar de CO <sub>2</sub> ( $y_{CO_2}$ )	0.0003	-
Fracción molar de H <sub>2</sub> O ( $y_{CO_2}$ )	0.0190	-

Finalmente, al completar la evaluación de exergética, se definirá la condición óptima para el diseño de la planta de aprovechamiento integral de Naranja, utilizando el criterio de mínima destrucción de exergía. El cálculo de esta se realizará a partir de un balance de exergía mostrada en la ecuación 3.6 y de exergía para volúmenes de control en estado estacionario de (Kotas, 1985b; Moran et al., 2010).

$$\dot{B}_{calor} - \dot{B}_{trabajo} + \dot{B}_{entrada} - \dot{B}_{salida} - \dot{B}_{destruida} = 0 \quad 3.6$$

Para el cálculo de la exergía del calor y el trabajo son empleadas las ecuaciones 3.7 y 3.8 de (Cengel & Michael A, 2014) presentadas a continuación, donde  $\dot{Q}$  es el flujo de calor que entra o sale del sistema y  $\dot{W}$  es la potencia que entra o sale al sistema.

$$\dot{B}_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad 3.7$$

$$\dot{B}_{trabajo} = \dot{W} \quad 3.8$$

El cálculo de la exergía química de la cascara de naranja (ecuación 3.11) es realizado usando el poder calorífico inferior (ecuación 3.10) a partir de poder calorífico superior (ecuación 3.9) presentado en (Basu, 2010), usando la composición de la Tabla 3.2 que se presenta en (Zapata et al., 2009), por la relación estándar de la exergía química ( $\Phi$ ) presentada en (Szargut et al., 1987).

**Tabla 3.2:** Composición elemental de la cáscara de naranja (Zapata et al., 2009).

Componente	Porcentaje (%)
Carbono	49,59
Hidrógeno	6,95
Oxígeno	39,7
Nitrógeno	0,66
Azufre	0,06
Cloro	0,001
Cenizas	3,05
Humedad	2,73

$$HHV = 349.1 * C + 1178.3 * H + 100.5 * S - 103.4 * O - 15.1 * N - 21.1 * Ash [kJ/kg] \quad 3.9$$

$$LHV = HHV - h_{fg} \left( \frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right) [kJ/kg] \quad 3.10$$

$$b_{ch} = \Phi LHV \quad 3.11$$

Donde HHV, LHV,  $h_{fg}$  y  $M$  son el poder calorífico superior, el poder calorífico inferior, el calor de vaporización y el contenido de humedad respectivamente. El valor de la relación estándar de la exergía química normalmente es muy cercano a 1, sin embargo en (Szargut et al., 1987) se presentan aproximaciones para compuestos sólidos de C, H, O, N. en la ecuación 3.12, se presenta la expresión usada para el cálculo del factor adimensional.

$$\phi = 1.0437 + 0.0140 \frac{H}{C} + 0.0968 \frac{O}{C} + 0.0467 \frac{N}{C} \quad 3.12$$

Como resultado de lo anterior, el valor de la relación estándar de la exergía química de la cáscara de naranja es de 1.049 y el poder calorífico inferior es de 19734 kJ/kg. Por tanto, el valor de la exergía química de la naranja es de 20691 kJ/kg.

Con respecto a las corrientes de naranja, bagazo y cascara, la exergía química final de estas se calcula como una mezcla de agua y biomasa. Para una mezcla sólido y líquido la exergía química se calcula a partir de la ecuación 3.13 (Kotas, 1985b).

$$b_{ch} = \sum_i x_i b_{total} + RT_0 x_i \ln(x_i) \quad 3.13$$

Para esto, se necesita la composición elemental del bagazo, el cual es presentada en (Lopez-Velazquez et al., 2013).

**Tabla 3.3:** Composición elemental de la cáscara de naranja (Zapata et al., 2009).

Componente	Porcentaje (%)
Carbono	47
Hidrógeno	6,9
Oxígeno	44,71
Nitrógeno	1,3
Azufre	0,09
Cloro	0,001
Cenizas	3,02
Humedad	5,7

Así pues, considerando la cascara como una corriente orgánica y una corriente de agua debido a su contenido de humedad. Para una mezcla de sólido y líquido, el contenido de exergía se puede escribir como:

$$\dot{B} = \dot{m}_{total} [(1 - F) * (b_{cha} + b_{pha}) + F(b_{chs} + b_{phs})] \quad 3.14$$



Donde  $F$  es la fracción sólida de la corriente, sin embargo esta misma expresión puede emplearse en mezclas de elementos no reactivos (Dincer & Rosen, 2013). Por otra parte, para el cálculo de la entalpía de la naranja, la cáscara y el limoneno, se usaron los calores específicos de estos componentes encontrados en (Cheméo, 2018; Kutz, 2019; Rewatkar & Basavaraj, 2020). Y así mismo, el cambio de la entropía de la cascara de naranja es calculado a través de la ecuación 3.15 presentada en (Moran et al., 2010).

$$(s_2 - s_1) = C_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad 3.15$$

Finalmente, la evaluación termoeconómica se realiza a través del método mostrado en (Kotas, 1985c) de coeficientes de enlaces externos y usando restricciones aplicables mostradas en (Bejan et al., 1996). Las ecuaciones 3.16 y 3.17, muestran el sistema de ecuaciones que se deben plantear por subsistema. Dichos subsistemas se diferencian del sistema al que pertenecen en que la calidad de sus entradas de exergía y la cantidad y calidad de sus salidas de exergía no pueden, en general, considerarse constantes. Esto hace que sea necesario, al analizar un subsistema, relacionar los flujos de exergía del subsistema con la entrada de exergía al sistema. (Kotas, 1985c). Al ser un sistema un conjunto de subsistemas, se desarrollará un sistema de ecuaciones la cuales deben ser limitadas con ciertas restricciones.

1. El costo exergético de las entradas es igual a la exergía, por tanto, el coeficiente de los insumos es igual a 1.
2. El costo exergético de los elementos que no tienen uso es 0, por tanto, el coeficiente de los productos sin uso es igual a 0.
3. La carga de los costos exergéticos de los equipos deben ser cargados a los productos de estos.
4. Cuando existen sistemas como intercambiadores de calor en donde la corriente caliente pierde energía, el coeficiente de entrada y salida es el mismo.

Cabe resaltar que una de las condiciones establecidas para cerrar el sistema de ecuaciones es que todos los subproductos tienen el mismo coeficiente de enlace externo, puesto que todos estos tienen la misma relevancia como producto final.

$$K_{j,i} = \left( \frac{\partial E_{IN}}{\partial E_j} \right)_{x_i=var} \quad 3.16$$

$$C_{j,i} = (K_{j,i} E_j)_{x_i=var} \quad 3.17$$

Donde j y i son el número de corrientes y el número de ecuaciones respectivamente. Para plantas grandes y complejas, se requiere un enfoque formalizado y sistemático que incluya programación para la resolución de los sistemas de ecuaciones.

## 3.2 Descripción del proceso

Actualmente, la naranja es un elemento muy común en la vida humana con una producción mundial de 73,3 millones de toneladas en el 2017 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017), tanto en forma de fruta como en forma de bebida. Sin embargo, es posible obtener diferentes subproductos de este fruto como el aceite esencial, agua florida, pectina y la obtención de biopelículas a partir de la cascara del fruto.

Para la obtención de estos subproductos, el proceso de producción de naranja inicia en el campo con la siembra de los cultivos, en las zonas tropicales, los cítricos se producen entre los 23 y 34 °C, con pluviosidades entre 900 y 1200 milímetros de lluvias anuales (DANE, 2016). En lo referente a las características agroquímicas del suelo, este debe tener un contenido satisfactorio de fósforo (P205) y de potasio (K20), asimilables por las raíces de los árboles (DANE, 2016; León Ruiz & Moréno Sepulveda, 2006). A continuación, se presenta un plan de abono sugerido para las condiciones de la planta:

**Tabla 3.4:** Plan de abono orientativo en los primeros cuatro años (cantidades de abono expresadas en gramos por árbol y año) (Srivastava, 2012)

Ítem	Orgánico		Convencional	
	Min	Max	Min	Max
Área de cultivo (ha)	0,4	6	0,17	27
Edad del cultivo (años)	5	49	8	70
Número de árboles (1/ha)	400	625	334	625

Ítem		Orgánico		Convencional	
		Min	Max	Min	Max
Aporte de fertilizantes de fuera (kg/ha)		423	1235		
Aporte de nutrientes de los fertilizantes agrícolas (kg/ha)	N	47	190	29	300
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	16	118	20	219
	K <sub>2</sub> O	13	156	26	250
Labranza (n.º de operaciones)		1	8	0	4
Reciclaje de material de poda (nº cultivos).		11		8	
Control de plagas		Siega		Herbicidas	

En el campo la recolección de la naranja se hace manual. La fruta es recolectada, almacenada y empacada en camiones para su entrega en la planta. Este cultivo debe proveer aproximadamente 135 kg/día de naranja para suplir la demanda de procesado de 120 kg/h. En planta se realiza la recepción de los frutos esta consta de una zona de recepción en donde la fruta es entregada, depositada y prelavada con el fin de eliminar los elementos con los que viene del cultivo (hojas, tierra, etc.). Pasado esto pasan a una banda transportadora en donde se clasificada la fruta y se elimina la que se encuentra en malas condiciones, en este punto se trata de establecer un flujo promedio de 120 kg/h luego de eliminar la fruta en malas condiciones. Dos tipos de métodos de extracción son utilizados principalmente por la industria. En la primera, la fruta se coloca entre dos copas de metal equipadas con tubos metálicos afilados. Cuando se presiona la fruta entre las dos copas, el jugo es presionado hacia afuera a través de los tubos que penetran en la fruta, la cáscara prensada entre las copas se lava con un rociador y es utilizada más adelante. En el segundo tipo de extracción, las naranjas se cortan por la mitad y el jugo se extrae moviendo las dos mitades contra escariadores giratorios. Los acabadores, hidrociclones y separadores se utilizan para eliminar la pulpa y las semillas excesivas que, junto con la cáscara y el bagazo, deben utilizarse como subproductos, hasta este punto se ha obtenido jugo fresco de naranja el cual es rico en antioxidantes y vitamina C (Galaverna & Dall'Asta, 2014), el cual es aproximadamente el 50% de la masa de la fruta total para la producción del jugo, es necesario que este jugo de pulpa sea clarificado con el fin de eliminar los elementos sólidos en él, esto se realiza en un clarificador para eliminar los elementos más grandes y luego es centrifugado con el fin de eliminar las partículas más pequeñas (Tetra Pak, 2004).

Después de la aclaración, el jugo va al evaporador. Dentro del circuito del evaporador, el jugo primero se precalienta y se mantiene a la temperatura de pasteurización. Luego pasa por las etapas de evaporación del proceso donde se concentra hasta 66 ° Brix, todo esto es llevado a cabo en un autoclave (Tetra Pak, 2004), y a partir de este punto se obtiene jugo de naranja pasteurizado listo para su empaclado.

A partir de este punto se presentan dos tipos de residuos; la cascara de la naranja, la cual no puede ser almacenada debido a que presentaría pérdida de compuestos importantes (Moncada et al., 2014, 2016); y el residuo proveniente de la extracción del jugo (Bagazo y semillas). Con respecto al residuo a partir de la extracción del jugo, se han presentado estudios que muestran la composición de este componente (Cypriano et al., 2018), se reportan valores de pectina entre el 15 y el 40% (w/w), la cual es normalmente usada en la industria alimenticia. Además, se presentan estudio acerca de la obtención de pectina mediante métodos como el Calentamiento Óhmico (Saberian et al., 2017).

Con respecto a la cascara recuperada, la cual representa aproximadamente el 10% de la masa total de naranja, según estudios realizados (Valdez Tantani et al., 2016), es introducida en una torre de extracción, en esta torre se da un proceso de separación por arrastre de vapor. Para llevar a cabo el arrastre por vapor, es necesario que ingresen aproximadamente 6,5 veces la cantidad de vapor con respecto a la cantidad de cascara de naranja por hora, es decir, se necesita aproximadamente un flujo de 78 kg/h de agua en forma de vapor para procesar los 12 kg de cascara de naranja de los cuales aproximadamente un 3% de peso es aceite esencial (Valdez Tantani et al., 2016), que en el caso de los cítricos como la naranja, este aceite está compuesto principalmente por D-Limoneno ( $C_{10}H_{25}$ ) el cual es una sustancia natural que se extrae de las cáscaras de los cítricos y da el olor característico a los mismos, este es usado principalmente como disolvente biodegradable, en muchos procesos farmacéuticos y de alimentos (Viot et al., 2008). El vapor se genera mediante una bomba que eleva la presión del agua a 400 kPa con el fin de movilizar el agua hacia una caldera que elevará la temperatura del agua hasta llegar al estado de vapor saturado, este vapor ingresa a la torre con el fin de realizar el arrastre del aceite, hasta este punto se ha obtenido una emulsión de aceite esencial y agua la cual se necesita enfriar para poder realizar su separación, además de unas pérdidas en la cantidad de agua causadas por la cascara de naranja de aproximadamente el 4% del

agua total empleada en la extracción (Valdez Tantani et al., 2016). Normalmente estas torres son de tipo empacadas y se realizan por lotes (Moncada et al., 2016), en las torres de empacadas, se presenta una inundación del lecho por efectos de la transferencia de calor (Geankoplis, 2003).

En esta torre se da un proceso de separación por arrastre de vapor el cual consiste en la vaporización selectiva del componente volátil de una mezcla formada por éste y otros "no volátiles", en este caso la cascara y el aceite. Lo anterior se logra por medio de la inyección de vapor de agua directamente en el seno de la mezcla, denominándose este "vapor de arrastre", pero en realidad su función no es la de "arrastrar" el componente volátil, sino condensarse formando otra fase inmiscible que cederá su calor latente a la mezcla a destilar para lograr su evaporación. En este caso se tendrá la presencia de dos fases inmiscibles a lo largo de la destilación (orgánica y acuosa), por lo tanto, cada líquido se comportará como si el otro no estuviera presente. Es decir, cada uno de ellos ejercerá su propia presión de vapor y corresponderá a la del líquido puro a una temperatura de referencia (Wankat, 1988). En este punto, se obtiene una emulsión de agua y aceite en dos fases inmiscibles que es enfriada. El enfriamiento es llevado a cabo en dos fases, primero se disminuye la temperatura de la emulsión a través de un intercambiador de calor para disminuir hasta que alcance temperaturas cercanas a 35°C, es decir 10 °C por encima de la temperatura ambiente, y una segunda fase que consiste en un sistema de refrigeración que permita un mayor rendimiento en la separación, llevando la emulsión hasta una temperatura cercana a 5°C. En este punto se obtienen dos subproductos, el aceite esencial de naranja el cual es el 0.5% de la masa total de la emulsión, y cuya composición es principalmente D-limoneno; y agua florida.

Finalmente, el agua florida proviene del agua resultante de la destilación de del aceite esencial de naranja. La cual puede ser empleada en procesos industriales de fragancia y cuya principal característica es su olor a naranja, sin embargo, poca o nula documentación es encontrada en su implementación en la industria, su principal uso es artesanal.

A partir de este punto se encuentran dos residuos en el proceso. La cascara de naranja resultante del proceso de separación de aceite esencial y el agua florida la cual es el producto del agua restante de la destilación del aceite. Hablando de la cascara, esta puede ser aprovechada para la generación de biopelículas con propiedades similares a las encontradas a elementos plásticos encontrados en el mercado (Baron et al., 2017; Sucheta

---

et al., 2019), la cascara de naranja húmeda que se usó en la extracción de aceite la cual contiene aproximadamente 60 % de agua y 5 % de pectina y trazas despreciable de aceite es llevado a molienda en un molino coloidal, seguidamente el residuo de la molienda es tamizado con un tamaño de malla -160. Luego, la cascara molida pasa a un tanque de agitado de acero inoxidable para la preparación de una solución filmogénica a 60 °C agitado durante 5 minutos a 2000 rpm con una potencia en agitador de 40w/l, dicha solución filmogénica se compone en un 10% cascara de naranja, 7% de glicerina, 7% de pectina, 6% de celulosa bacteriana y 70% de agua. Finalmente, el producto es secado en a temperaturas entre 60 y 40°C durante 5 horas con el fin de que la película llegue a tener humedades cercanas al 8%. En la Figura 3.1 se aprecia el diagrama de flujo de procesos de la planta de extracción integral de naranja. Sin embargo, esto es un proceso que se encuentra en montaje y se tienen pocos datos experimentales que permitan su modelado, por lo que se considera que el subproducto de esta corriente es la cascara hidratada.

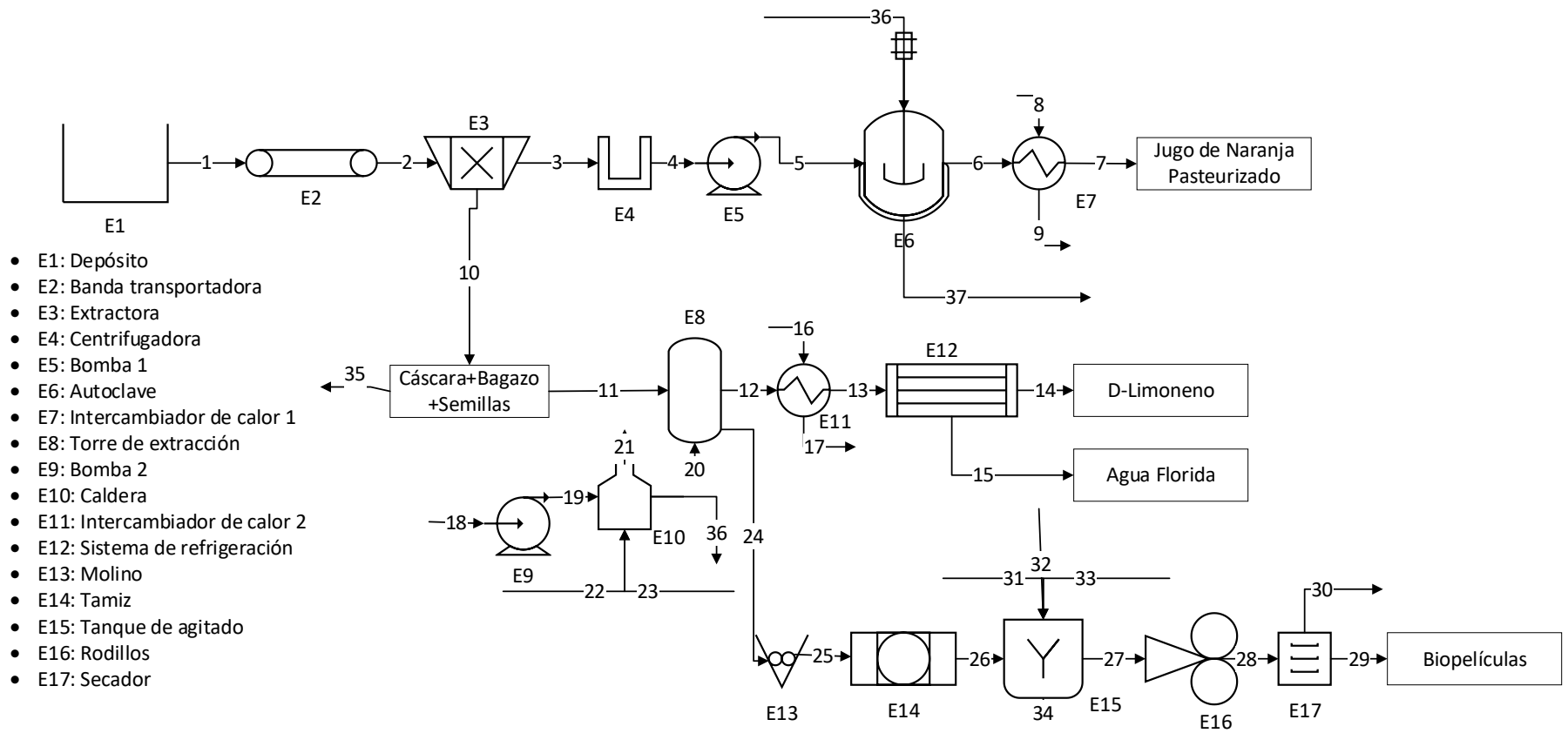


Figura 3.1: Diagrama de flujo de procesos

## 4. Evaluación de la planta base

En este capítulo, se llevará a cabo una evaluación termodinámica de la planta base, donde se establecerán las corrientes de energía, de exergía y la exergía destruida. Teniendo en cuenta ciertas consideraciones del proceso y condiciones establecidas en el proyecto (Valdez Tantani et al., 2016). El código de programación de este caso es mostrado en el Anexo: Código en EES del modelo de la planta base.

### 4.1 Consideraciones

A continuación, se presentarán las consideraciones del modelo de la planta establecida.

- La demanda de combustible es calculada a partir de la necesidad de calor necesario en la caldera.
- Los equipos son adiabáticos y no presentan pérdidas de calor.
- Las propiedades de las corrientes con agua y otros elementos son evaluados por separado puesto que no hay interacciones químicas que mezclen los componentes y por tanto modificando sus propiedades.
- Los calores específicos de la naranja, la cascara de la naranja y el limoneno son constantes.
- El COP del sistema de refrigeración se considera 1.5, para establecer el peor de los casos de refrigeración.
- La exergía de los elementos orgánicos diferentes a la cáscara es de 18.7 kJ/g para los detritus (Álvarez Hincapié & Velásquez Arredondo, 2013).
- La caldera trabaja con un 20% de aire en exceso y metano puro.
- La eficiencia de las bombas es del 80%.
- El ambiente se encuentra a 25°C y 80 kPa
- El estado de referencia se encuentra a 25°C y 101,3 kPa.
- El aceite en la cascara de naranja se agota totalmente.



- La potencia de extracción de 0.75 kW para un proceso de 120kg/h (referencia de Commercial Orange Juicer TT-J112A).
- En la exergía destruida en la extracción se carga los efectos de la exergía destruida de la clarificación y la separación del bagazo y las semillas.
- La temperatura de salida de la corriente fría del equipo 9 es de 85 °C para asegurar la existencia de una diferencia de temperaturas finitas en el intercambiador.
- Con respecto a la banda transportadora, en términos de exergía su consumo se considera despreciable.

## 4.2 Evaluación termodinámica

A partir de la descripción del capítulo anterior, teniendo en cuenta los datos porcentuales y de cantidades de masa, se definieron los estados termodinámicos en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Estados termodinámicos definidos.

Estado	Flujo másico [i] [kg/h]	$\dot{m}_a$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]	T[i] [C]	P[i] [kPa]	h[i] [kJ/kg]
1	120,0			25	80	
2	120,0	0,01737	0,01597	25	80	48,5
3	60,0			25	80	104,8
4	60,0			25	80	104,8
5	60,0			25	400	105,1
6	60,0			95	400	398,2
7	60,0			33,73	400	141,6
8	61,3			25	80	104,8
9	61,3			85	80	355,9
10	60,0					
11	12,0	0,000091	0,003242	25		160,9
12	76,3			143,6	400	2667
13	76,3			35	400	146,6
14	0,4			5	400	9,17
15	76,0			5	80	21,1
16	152,6			25	80	104,8
17	152,6			93,51	80	1365
18	85,1			25	80	104,8
19	85,1			25	400	105,1
20	78,0			143,6	400	2739
21	43,5			400	80	-2110

Estado	Flujo másico [i] [kg/h]	$\dot{m}_a$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]	T[i] [C]	P[i] [kPa]	h[i] [kJ/kg]
22	41,5			25	80	298,6
23	2,0			25	80	
24	13,7	0,0006549	0,003145	143,6	400	877
25	13,7					
26	13,7					
27	136,8					
28	136,8					
29	29,4					
30	107,4					
31	9,6					
32	9,6					
33	8,2					
34	95,8					
35	48,0	0,00076	0,01257	25	80	
36	7,1			143,6	400	2739
37	7,1	0,01843	0,0149	60	400	251,5

La definición de las exergías físicas, químicas y totales que se presentan la Tabla 4.2 son evaluadas a partir de las ecuaciones 3.1, 3.3, 3.4 y 3.5, con respecto al ambiente de referencia.

**Tabla 4.2:** Exergías físicas, químicas y totales

Estado	$b_{cha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{pha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{chs}$ [i] [kJ/kg]	$b_{phs}$ [i] [kJ/kg]	$\dot{B}$ [i] [kJ/s]
1					
2	173,3	0,02139	18700	0	194
3					
4	173,3	0,02139	0	0	2,889
5	173,3	0,2995	0	0	2,894
6	173,3	30,15	0	0	3,391
7	173,3	0,8241	0	0	2,903
8	173,3	0,02139	0	0	2,952
9	173,3	22,31	0	0	3,332
10					
11	173,3	0,2995	20691	0	24,41
12	173,3	679,2	18700	34,41	15,93
13	173,3	0,9856	18700	0,3009	5,548
14	0	0	18700	1,288	1,87

Estado	$b_{cha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{pha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{chs}$ [i] [kJ/kg]	$b_{phs}$ [i] [kJ/kg]	$\dot{B}$ [i] [kJ/s]
15	173,3	2,921	0	0	3,719
16	173,3	0,02139	0	0	7,35
17	173,3	210,5	0	0	16,27
18	173,3	0,02139	0	0	4,097
19	173,3	0,2995	0	0	4,103
20	173,3	687	0	0	18,64
21	0	0	61,25	131,4	2,326
22	0	0	0	20,22	0,233
23	0	0	52282	0	29,2
24	173,3	79,65	20691	122	22,93
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35	173,3	0	18700	0	166,1
36	173,3	687	0	0	1,69
37	173,3	8,271	0	0	0,3567

Las potencias de los equipos son calculadas a partir de balances de energía y consultadas en los valores promedio de equipos, las cuales son presentadas en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3:** Potencia de los equipos con base a un procesado de 120 kg/h de naranja.

Equipo	Nombre	Potencia	Unidad
E1	Deposito		
E2	Banda transportadora		
E3	Extractor	0,75	kW
E4	Centrifugadora		
E5	Bomba 1	0,006168	kW
E6	Autoclave		
E7	Intercambiador de calor 1		
E8	Torre de extracción		
E9	Bomba 2	0,008746	kW
E10	Caldera		

Equipo	Nombre	Potencia	Unidad
E11	Intercambiador de calor 2		
E12	Sistema de refrigeración	1,774	kW
E13	Molino		
E14	Tamiz		
E15	Tanque de agitado		
E16	Rodillos		
E17	Secador		

Así pues, definidos todos los estados termodinámicos y establecidas las potencias de los equipos incluidos dentro del proceso. Se puede calcular la exergía destruida de los equipos principales en la Tabla 4.4, y se puede apreciar gráficamente en la Figura 4.1.

**Tabla 4.4:** Exergía destruida por equipo.

Equipo	Nombre	Exergía destruida	Unidad
E1	Deposito		
E2	Banda transportadora		
E3	Extractora	1,363	kW
E4	Centrifugadora		
E5	Bomba 1	0,001533	kW
E6	Autoclave	0,8357	kW
E7	Intercambiador de calor 1	0,1092	kW
E8	Torre de extracción	4,187	kW
E9	Bomba 2	0,002173	kW
E10	Caldera	10,88	kW
E11	Intercambiador de calor 2	1,46	kW
E12	Sistema de refrigeración	1,733	kW
E13	Molino		
E14	Tamiz		
E15	Tanque de agitado		
E16	Rodillos		
E17	Secador		



**Figura 4.1** exergía destruida por equipo.

Hay que resaltar que todos los procesos que son evaluados presentan una exergía destruida positiva, es decir sin violar la segunda ley de la termodinámica, y factibles en la naturaleza, y esto es debido a que los valores de los balances de masa provienen de estudios realizados en el proyecto (Valdez Tantani et al., 2016)

Ahora bien, entre los procesos establecidos, hay un equipo que resalta en la exergía destruida con respecto a los demás y es la caldera, con un valor de 10,88 kW. La exergía destruida de ésta, es debido a los cambios termodinámicos en el proceso, esto es porque, a través de la caldera, fluye todo el flujo de vapor que es empleado en los procesos térmicos principales como el enclave para el pasteurizado y la torre de extracción para la obtención del aceite esencial y el agua florida, y al ser un proceso térmico con transferencia de calor, hay una alta generación de entropía. Indicando así que el enfoque de optimización debería ser la caldera y los procesos ligados a ésta.

Establecido lo anterior, una primera idea de optimización es establecer un economizador con el fin de precalentar el agua, de esta forma, minimizar la exergía destruida y por otra parte una consecuencia de esto es la disminución del consumo de combustible de la caldera.

## 5. Evaluación de los casos de estudio

En este capítulo, se evaluarán los casos propuestos de optimización y su efecto en la exergía destruida del sistema. Los códigos asociados a cada caso de estudio son presentados en el Anexo: Código EES para el primer caso de estudio y Anexo: Código EES para el segundo caso de estudio.

### 5.1 Consideraciones

A continuación, se presentarán las consideraciones del modelo de la planta. Como parte de la continuidad, las consideraciones establecidas en el capítulo de Evaluación de la planta base se siguen aplicando en este capítulo. Las consideraciones establecidas son las siguientes:

- La temperatura de salida de los gases de combustión del economizador es de 200 °C.
- Se utiliza una válvula de estrangulamiento para reducir la presión del sistema de calentamiento del enclave.
- En el segundo caso, las temperaturas de salida del intercambiador de calor 4 (E19) son iguales.

### 5.2 Primer caso de estudio: Economizador de alimentación de la caldera.

El primer caso de optimización propuesto, es el planteado al final del capítulo anterior, un economizador, cuya función es precalentar el agua que consume la caldera, por otra parte, se redirige el agua empleada en la autoclave, usada como fuente de calor para la pasteurización, la cual sale de dicho proceso a una temperatura alrededor de 60 °C, lo cual es energía que se puede aprovechar y recircular dentro del proceso, puesto es que esta misma proviene de la caldera.

En la Figura 5.2 se observa el diagrama de flujo de procesos para la propuesta de optimización planteada. Para el establecimiento de esta propuesta, se plantea el uso de los gases de combustión calientes que salen de la caldera a través del economizador, para precalentar el agua proveniente de la red pública. La temperatura de salida de los gases de este intercambiador debe ser mayor o igual de 200 °C, recomendado por The United States Environmental Protection Agency (Woodard, 1998). Además, también es representado el redireccionamiento del flujo de salida de agua caliente del autoclave (flujo 37). De esta forma, la entrada de agua a la caldera tiene una temperatura por encima de la temperatura de la obtenida a través de la red pública, y cuya finalidad es disminuir la exergía destruida.

A partir de la descripción anterior, se definieron los estados termodinámicos en la Tabla 5.1 de cada uno de los estados presentados en la Figura 5.2. Se puede advertir un aumento en la temperatura a la entrada de la bomba que alimenta la caldera debido al precalentamiento, y por ende un cambio en las propiedades termodinámicas.

**Tabla 5.1:** Estados termodinámicos definidos.

Estado	Flujo másico [i] [kg/h]	$\dot{m}_a$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]	T[i] [C]	P[i] [kPa]	h[i] [kJ/kg]
1	120,0			25	80	
2	120,0	0,01737	0,01597	25	80	48,5
3	60,0			25	80	104,8
4	60,0			25	80	104,8
5	60,0			25	400	105,1
6	60,0			95	400	398,2
7	60,0			33,73	400	141,6
8	61,3			25	80	104,8
9	61,3			85	80	355,9
10	60,0					
11	12,0	0,000091	0,003242	25	80	160,9
12	76,3			143,6	400	2667
13	76,3			35	400	146,6
14	0,4			5	400	9,17
15	76,0			5	80	21,1
16	152,6			25	80	104,8
17	152,6			93,51	80	1365
18	85,1			54,9	80	229,9
19	85,1			54,9	400	230,1
20	78,0			143,6	400	2739

Estado	Flujo másico [i] [kg/h]	$\dot{m}_a$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]	T[i] [C]	P[i] [kPa]	h[i] [kJ/kg]
21	41,2			400	80	-2110
22	39,3			25	80	298,6
23	1,9			25	80	
24	13,7	0,0006549	0,003145	143,6	400	877
25	13,7					
26	13,7					
27	136,8					
28	136,8					
29	29,4					
30	107,4					
31	9,6					
32	9,6					
33	8,2					
34	95,8					
35	48,0	0,00076	0,01257	25	80	
36	7,1			143,6	400	2739
37	7,1			60	400	251,5
38	78,0			25	80	104,8
39	78,0			54,44	80	227,9
40	41,2			200	80	-2343
41	7,1	0,01843	0,0149	60	80	251,2

La definición de las exergías físicas, químicas y totales que se presentan la Tabla 5.2 son evaluadas a partir de las ecuaciones 3.1, 3.3, 3.4 y 3.5, con respecto al ambiente de referencia. Así pues, al ser la exergía una función de estado, al haber un aumento en la temperatura en el flujo 18, también la exergía aumenta, lo que se puede apreciar en la tabla presentada a continuación.

**Tabla 5.2:** Exergías físicas, químicas y totales

Estado	$b_{cha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{pha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{chs}$ [i] [kJ/kg]	$b_{phs}$ [i] [kJ/kg]	$\dot{B}$ [i] [kJ/s]
1					
2	173,3	0,02139	18700	0	194
3	173,3	0,02139	0	0	2,889
4	173,3	0,02139	0	0	2,889
5	173,3	0,2995	0	0	2,894
6	173,3	30,15	0	0	3,391
7	173,3	0,8241	0	0	2,903



Estado	$b_{cha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{pha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{chs}$ [i] [kJ/kg]	$b_{phs}$ [i] [kJ/kg]	$\dot{B}$ [i] [kJ/s]
8	173,3	0,02139	0	0	2,952
9	173,3	22,31	0	0	3,332
10					
11	173,3	0,2995	20691	0	24,41
12	173,3	679,2	18700	34,41	15,93
13	173,3	0,9856	18700	0,3009	5,548
14	0	0	18700	1,288	1,87
15	173,3	2,921	0	0	3,719
16	173,3	0,02139	0	0	7,35
17	173,3	210,5	0	0	16,27
18	173,3	5,858	0	0	4,234
19	173,3	6,177	0	0	4,242
20	173,3	687	0	0	18,64
21	0	0	61,25	131,4	2,206
22	0	0	0	20,22	0,2209
23	0	0	52282	0	27,68
24	173,3	79,65	20691	122	22,93
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35	173,3	0	18700	0	166,1
36	173,3	687	0	0	1,69
37	173,3	8,271	0	0	0,3567
38	173,3	0,02139	0	0	3,756
39	173,3	5,683	0	0	3,879
40	0	0	61,25	20,7	0,9385
41	173,3	7,952	0	0	0,3561

A continuación, se presentan las potencias de los equipos. Al haber un cambio en el estado termodinámico de la entrada de la bomba de alimentación de la caldera, la potencia de esta cambia, de esta forma la potencia del equipo disminuye con respecto a la presentada en la Tabla 4.3.

**Tabla 5.3:** Potencia de los equipos con base a un procesado de 120kg/h de naranja.

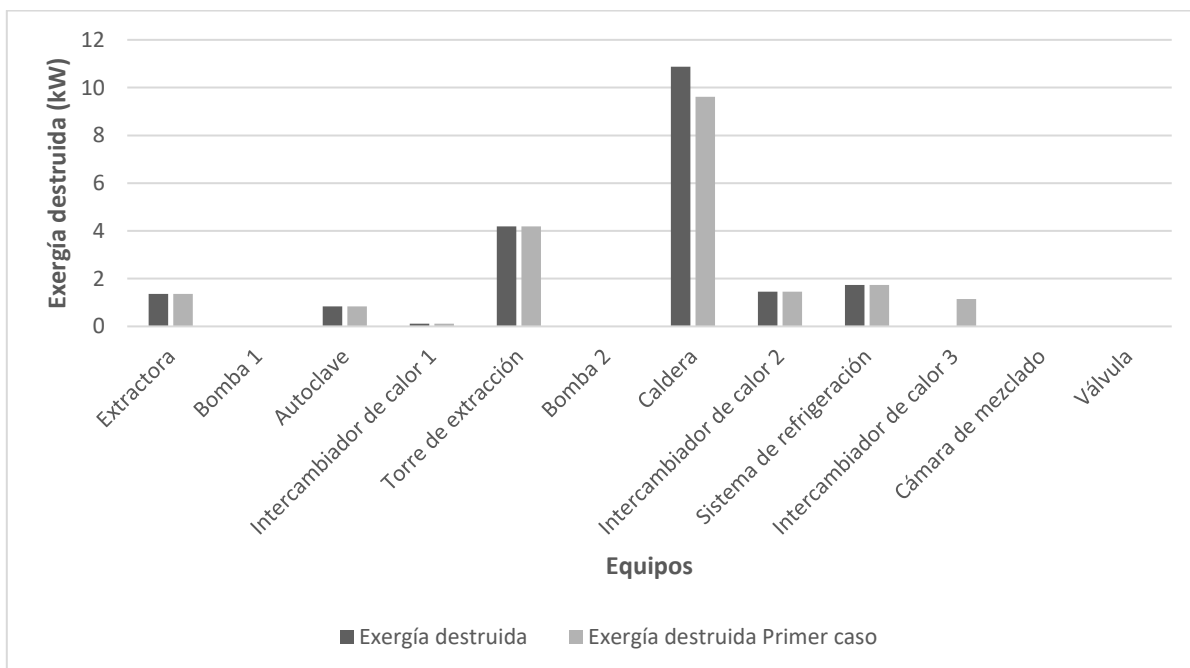
Equipo	Nombre	Potencia	Unidad
E1	Deposito		
E2	Banda transportadora		
E3	Extractor	0,75	kW
E4	Centrifugadora		
E5	Bomba 1	0,006168	kW
E6	Autoclave		
E7	Intercambiador de calor 1		
E8	Torre de extracción		
E9	Bomba 2	0,008048	kW
E10	Caldera		
E11	Intercambiador de calor 2		
E12	Sistema de refrigeración	1,774	kW
E13	Molino		
E14	Tamiz		
E15	Tanque de agitado		
E16	Rodillos		
E17	Secador		
E18	Intercambiador de calor 3		
E19	Cámara de mezclado		
E20	Válvula		

Así pues, definidos todos los estados termodinámicos y establecidas las potencias de los equipos incluidos dentro del proceso. Se puede calcular la exergía destruida de los equipos principales en la Tabla 5.4. Ahora bien, en dicha tabla se puede apreciar la exergía destruida de la caldera (E10). Si este valor es comparado con la exergía destruida de la caldera del primer caso en la Tabla 4.4, se puede apreciar una disminución de la exergía destruida del 11.67%, es decir, hubo cambio significativo de este valor, y se puede apreciar gráficamente en la Figura 5.1.

**Tabla 5.4:** Exergía destruida por equipo.

Equipo	Nombre	Exergía destruida	Unidad
E1	Deposito		
E2	Banda transportadora		
E3	Extractor	1,363	kW
E4	Centrifugadora		
E5	Bomba 1	0,001533	kW

Equipo	Nombre	Exergía destruida	Unidad
E6	Autoclave	0,8357	kW
E7	Intercambiador de calor 1	0,1092	kW
E8	Torre de extracción	4,187	kW
E9	Bomba 2	0,0004899	kW
E10	Caldera	9,61	kW
E11	Intercambiador de calor 2	1,46	kW
E12	Sistema de refrigeración	1,733	kW
E13	Molino		
E14	Tamiz		
E15	Tanque de agitado		
E16	Rodillos		
E17	Secador		
E18	Intercambiador de calor 3	1,144	kW
E19	Cámara de mezclado	0,0003201	kW
E20	Válvula	0,0006276	kW

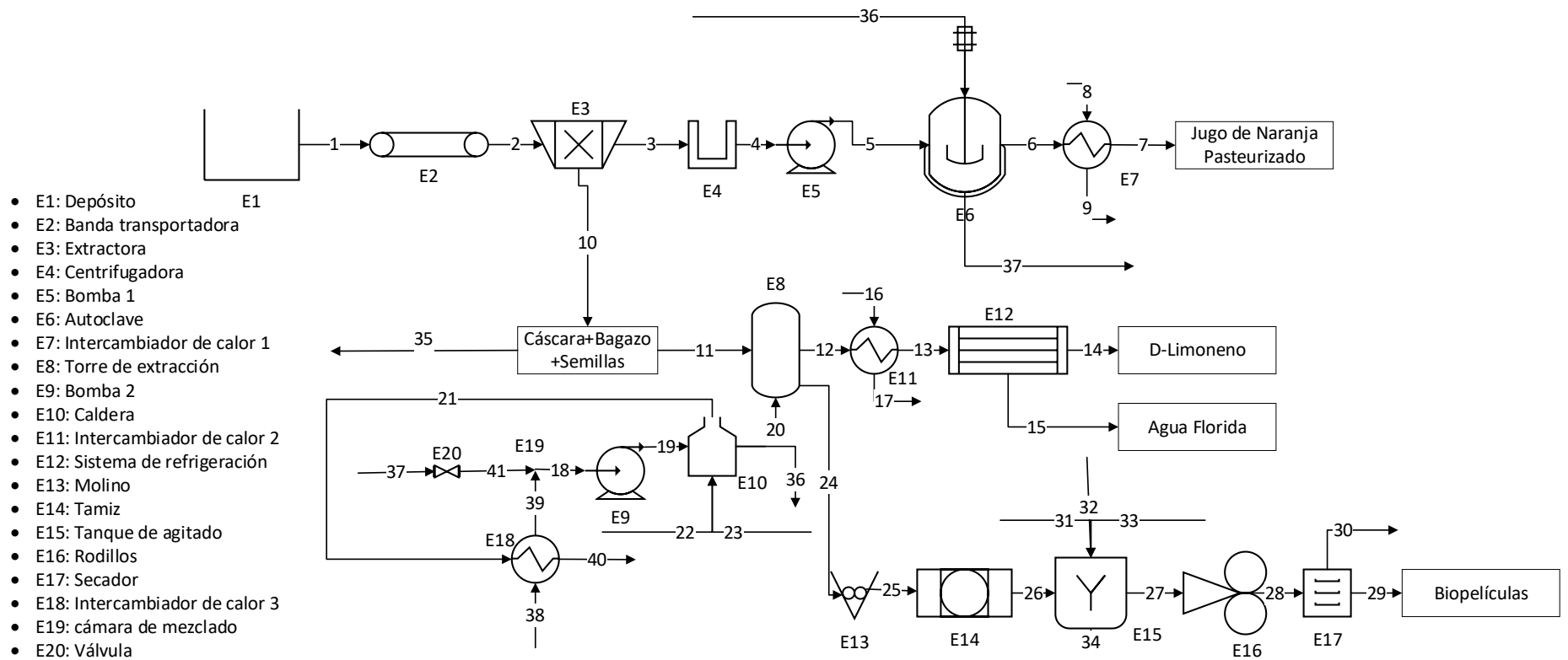


**Figura 5.1** Comparación de la exergía destruida por equipo

Ahora bien, en la Tabla 5.4 se puede apreciar la exergía destruida de la caldera (E10). Si este valor es comparado con la exergía destruida de la caldera del primer caso en la Tabla 4.4, se puede apreciar una disminución de la exergía destruida del 11.67%, es decir, hubo cambio significativo de este valor.

Además, una de las consecuencias adicionales del precalentamiento es la disminución de la exergía destruida y la potencia consumida en la bomba de alimentación de la caldera (E9). Esto es debido a que el precalentamiento sucede antes de ingresar a la bomba y de esta forma las corrientes de salida de agua caliente del enclave y el flujo restante demandado de la red pública se mezclarán a presión ambiente. Esto causa que la exergía destruida en esta bomba disminuya en un 77,46%. Una segunda consecuencia a resaltar en este caso, es la disminución del consumo de combustible a causa del precalentamiento. El flujo de combustible pasa de 2.01 kg/h a 1.91 kg/h de metano.

Así pues, el primer caso planteado como tentativa de optimización para la planta de aprovechamiento integral de naranja, presenta una respuesta significativa frente a un caso de un economizador para el precalentamiento de la caldera. Sin embargo, esta propuesta abre una alternativa a una opción de optimización. En la Tabla 5.1 se puede apreciar la temperatura de salida del agua (flujo 39) precalentada con los gases de combustión. Se puede apreciar que bajo las condiciones establecidas la temperatura alcanzada por el agua es de 54,44 °C, si se tiene en cuenta la temperatura de salida del agua del intercambiador de calor 1 (E7) es de 85 °C, existe una posibilidad de seguir precalentado el agua.



**Figura 5.2:** Diagrama de flujo de procesos propuesto para el primer caso.

### 5.3 Segundo caso de estudio: Segundo economizador de alimentación de la caldera.

El segundo caso de optimización es propuesto en la sección 5.2, puesto que se presenta la oportunidad de seguir precalentando el agua usando un segundo economizador, por otra parte, se redirige el agua empleada para disminuir la temperatura a la salida del proceso de pasteurizado, donde dicha corriente, según lo calculado en la sección anterior, sale del proceso a una temperatura mayor que la del flujo 39.

En la Figura 5.4 se esquematiza el diagrama de flujo de procesos para la propuesta de optimización planteada. Así pues, la idea es incrementar, aún más, la temperatura a la entrada de la caldera.

A partir de la descripción anterior, se definieron los estados termodinámicos en la Tabla 5.5 de cada uno de los estados presentados en la Figura 5.4. Como se esperaba, se presenta incluso un aumento mayor de la temperatura que el presentado en la sección anterior para el estado 18 (de 54,9 a 66,91 °C), y por ende un cambio en las propiedades termodinámicas. Otro cambio interesante, es que la temperatura de salida del agua en el primer economizador es un menor a la mostrada en la Tabla 5.1, esto es porque al disminuir el consumo de combustible, disminuye el flujo másico de los gases de combustión, por tanto, transportando menor cantidad de energía total, esto se traduce en una disminución de la temperatura lograda a través del economizador.

**Tabla 5.5:** Estados termodinámicos definidos.

Estado	Flujo másico [i] [kg/h]	$\dot{m}_a$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]	T[i] [C]	P[i] [kPa]	h[i] [kJ/kg]
1	120,0				80	
2	120,0	0,01737	0,01597	25	80	48,5
3	60,0		0	25	80	104,8
4	60,0			25	80	104,8
5	60,0			25	400	105,1
6	60,0			95	400	398,2
7	60,0			33,73	400	141,6
8	61,3			25	80	104,8

Estado	Flujo másico [i] [kg/h]	$\dot{m}_a$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]	T[i] [C]	P[i] [kPa]	h[i] [kJ/kg]
9	61,3			85	80	355,9
10	60,0					
11	12,0	0,000091	0,003242	25		160,9
12	76,3			143,6	400	2667
13	76,3			35	400	146,6
14	0,4			5	400	9,17
15	76,0			5	80	21,1
16	152,6			25	80	104,8
17	152,6			93,51	80	1365
18	85,1			66,91	80	280,1
19	85,1			66,91	400	280,4
20	78,0			143,6	400	2739
21	40,3			400	80	-2110
22	38,4			25	80	298,6
23	1,9			25	80	
24	13,7	0,0006549	0,003145	143,6	400	877
25	13,7					
26	13,7					
27	136,8					
28	136,8					
29	29,4					
30	107,4					
31	9,6					
32	9,6					
33	8,2					
34	95,8					
35	48,0	0,00076	0,01257	25	80	
36	7,1			143,6	400	2739
37	7,1			60	400	251,5
38	78,0			25	80	104,8
39	78,0			53,79	80	225,2
40	40,3			200	80	-2343
41	7,1			60	80	251,2
42	61,3			67,54	80	282,7
43	78,0	0,01843	0,0149	67,54	80	282,7

La definición de las exergías físicas, químicas y totales que se presentan son evaluadas a partir de las ecuaciones 3.1, 3.3, 3.4 y 3.5, con respecto al ambiente de referencia. y, como antes se mencionó, la exergía es una función de estado, y al haber un aumento en la

temperatura en el flujo 18, también la exergía aumenta, con respecto a la sección anterior hubo un aumento de 0,128 kJ/s, lo cual influirá en la exergía destruida asociada a la caldera y la bomba.

**Tabla 5.6:** Exergías físicas, químicas y totales

Estado	$b_{cha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{pha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{chs}$ [i] [kJ/kg]	$b_{phs}$ [i] [kJ/kg]	$\dot{B}$ [i] [kJ/s]
1					
2	173,3	0,02139	18700	0	194
3	173,3	0,02139	0	0	2,889
4	173,3	0,02139	0	0	2,889
5	173,3	0,2995	0	0	2,894
6	173,3	30,15	0	0	3,391
7	173,3	0,8241	0	0	2,903
8	173,3	0,02139	0	0	2,952
9	173,3	22,31	0	0	3,332
10					
11	173,3	0,2995	20691	0	24,1
12	173,3	679,2	18700	34,41	15,93
13	173,3	0,9856	18700	0,3009	5,548
14	0	0	18700	1,288	1,87
15	173,3	2,921	0	0	3,719
16	173,3	0,02139	0	0	7,35
17	173,3	210,5	0	0	16,27
18	173,3	11,25	0	0	4,362
19	173,3	11,57	0	0	4,37
20	173,3	687	0	0	18,64
21	0	0	61,25	131,4	2,157
22	0	0	0	20,22	0,216
23	0	0	52282	0	27,07
24	173,3	79,65	20691	122	22,93
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					



Estado	$b_{cha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{pha}$ [i] [kJ/kg]	$b_{chs}$ [i] [kJ/kg]	$b_{phs}$ [i] [kJ/kg]	$\dot{B}$ [i] [kJ/s]
35	173,3	0	18700		166,1
36	173,3	687	0	0	1,69
37	173,3	8,271	0	0	0,3567
38	173,3	0,02139	0	0	3,756
39	173,3	5,441	0	0	3,873
40	0	0	61,25	20,7	0,9178
41	173,3	7,952	0	0	0,3561
42	173,3	11,58	0	0	3,149
43	173,3	11,58	0	0	4,006

Así mismo, como se ha realizado anteriormente, se presentan los datos de la potencia de los equipos. Esto con el fin de vislumbrar, principalmente, el efecto en la bomba de alimentación de la caldera. Entonces, si este se compara con el presentado en la Tabla 5.3, se nota una disminución en el consumo de potencia.

**Tabla 5.7:** Potencia de los equipos con base a un procesado de 120 kg/h de naranja.

Equipo	Nombre	Potencia	Unidad
E1	Deposito		
E2	Banda transportadora		
E3	Extractor	0,75	kW
E4	Centrifugadora		
E5	Bomba 1	0,006168	kW
E6	Autoclave		
E7	Intercambiador de calor 1		
E8	Torre de extracción		
E9	Bomba 2	0,007795	kW
E10	Caldera		
E11	Intercambiador de calor 2		
E12	Sistema de refrigeración	1,774	kW
E13	Molino		
E14	Tamiz		
E15	Tanque de agitado		
E16	Rodillos		
E17	Secador		
E18	Intercambiador de calor 3		

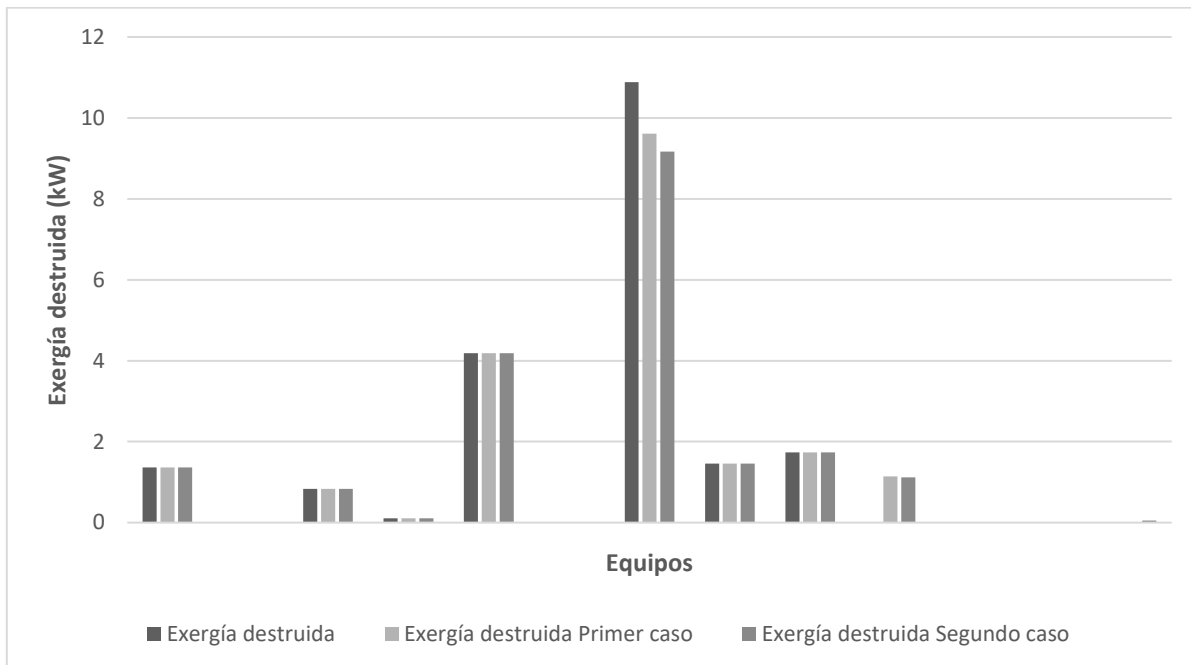
Sin embargo, el principal efecto que se desea apreciar es establecido por esta configuración en la exergía destruida. En la Tabla 5.8 se presenta la exergía destruida por equipo, con el

fin de establecer los cambios en la exergía destruida causados por el cambio en la configuración de la planta a partir de los estados termodinámicos calculados anteriormente.

**Tabla 5.8:** Exergía destruida por equipo.

Equipo	Nombre	Exergía destruida	Unidad
E1	Deposito		
E2	Banda transportadora		
E3	Extractor	1,363	kW
E4	Centrifugadora		
E5	Bomba 1	0,001533	kW
E6	Autoclave	0,8357	kW
E7	Intercambiador de calor 1	0,1092	kW
E8	Torre de extracción	4,187	kW
E9	Bomba 2	0,0002603	kW
E10	Caldera	9,171	kW
E11	Intercambiador de calor 2	1,46	kW
E12	Sistema de refrigeración	1,733	kW
E13	Molino		
E14	Tamiz		
E15	Tanque de agitado		
E16	Rodillos		
E17	Secador		
E18	Intercambiador de calor 3	1,122	kW
E19	Intercambiador de calor 4	0,0005575	kW
E20	válvula	0,0006276	
E21	Intercambiador de calor 4	0,04967	kW

Teniendo en cuenta los datos planteados en la Tabla 5.8, se puede observar una disminución de la exergía destruida en la caldera con respecto al caso base y al primer caso de estudio que se puede observar gráficamente en la Figura 5.3. Con respecto al caso base, se nota una disminución de la exergía destruida del 15,71% y con respecto al primer caso de estudio del 4,57%, es decir, hubo una disminución significativa de la exergía destruida de la caldera por efectos de la configuración planteada en esta sección.



**Figura 5.3** Comparación de la exergía destruida por equipo

Es importante entonces, aclarar los demás efectos de esta configuración en las variables mencionadas al final de la sección 1.1. con respecto a la exergía destruida en la bomba de alimentación de la caldera (E9), hubo una disminución de la exergía destruida del 88,02% con respecto al caso de estudio base y un 46,87 % con respecto al primer caso de estudio. La otra variable importante a resaltar, y mencionada anteriormente, es el consumo de combustible de la caldera el cual pasó de 2.01 kg/h para el caso base a 1.86 kg/h.

Todo lo anterior, implica que esta configuración también tuvo un efecto significativo en la exergía destruida del sistema, y así mismo presentando una mejoría en el proceso, puesto que parte de disminuir la exergía destruida en la caldera, se disminuye el consumo de potencia en una de las bombas y el consumo de combustible para lograr las condiciones necesarias de extracción y pasteurizado.

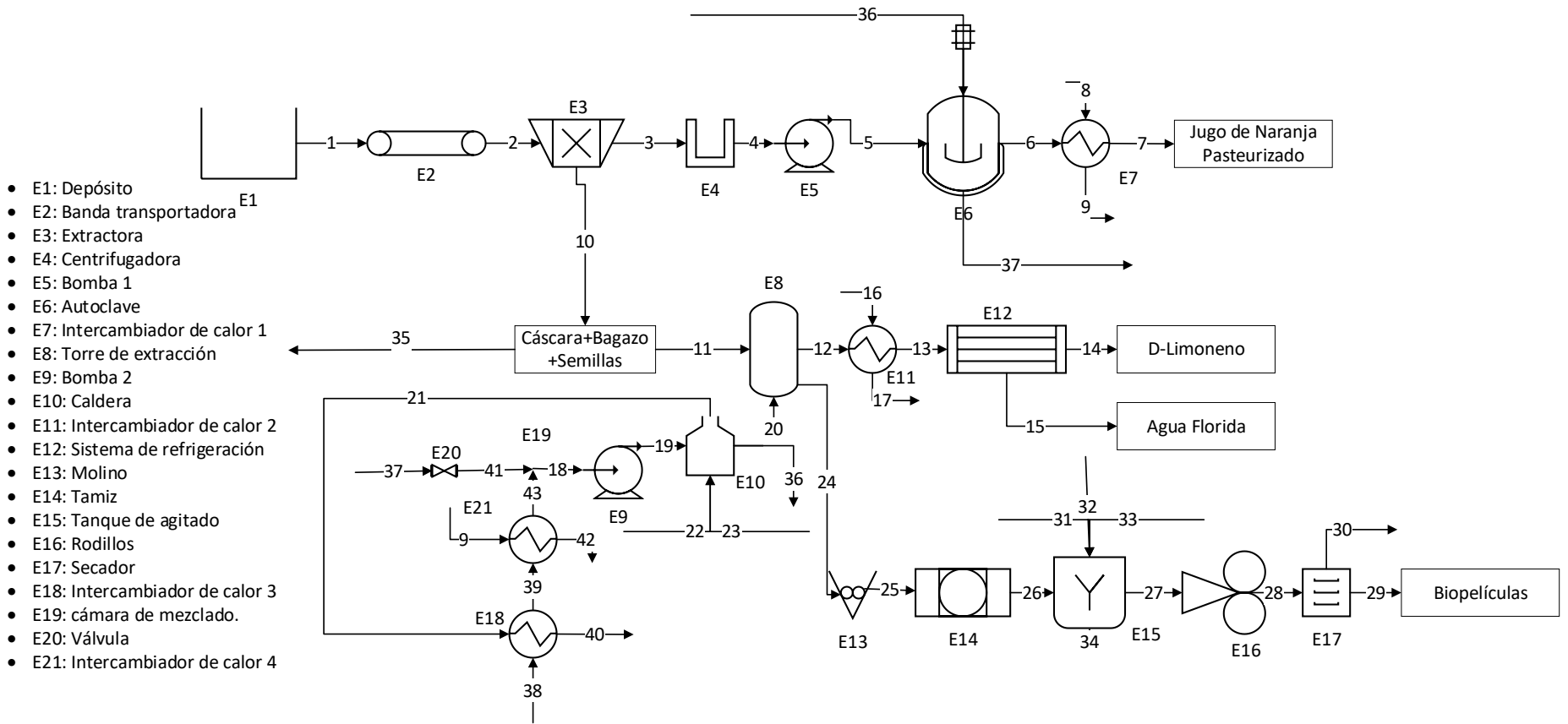


Figura 5.4: Diagrama de flujo de procesos propuesto para el segundo caso.

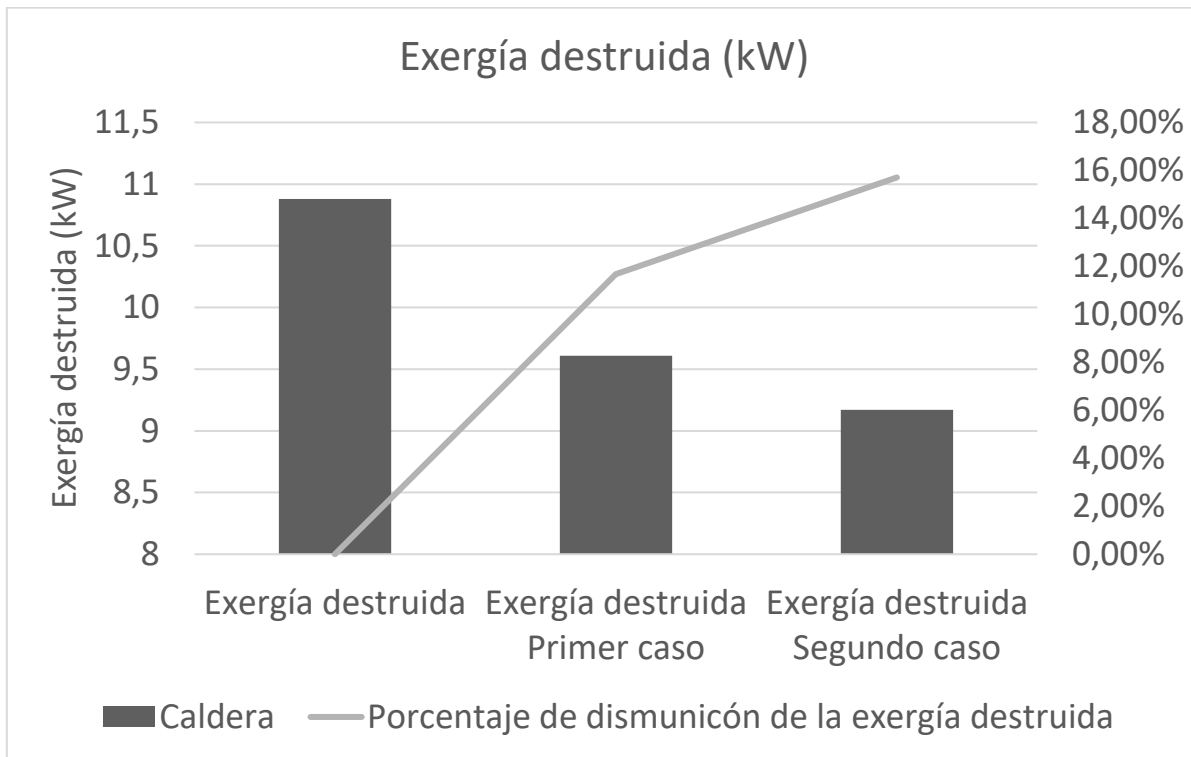
## 5.4 Selección del caso de estudio

En la Tabla 5.9, se muestra un resumen de los efectos de los casos de estudio en la exergía destruida y el consumo de combustible con respecto al caso de estudio base.

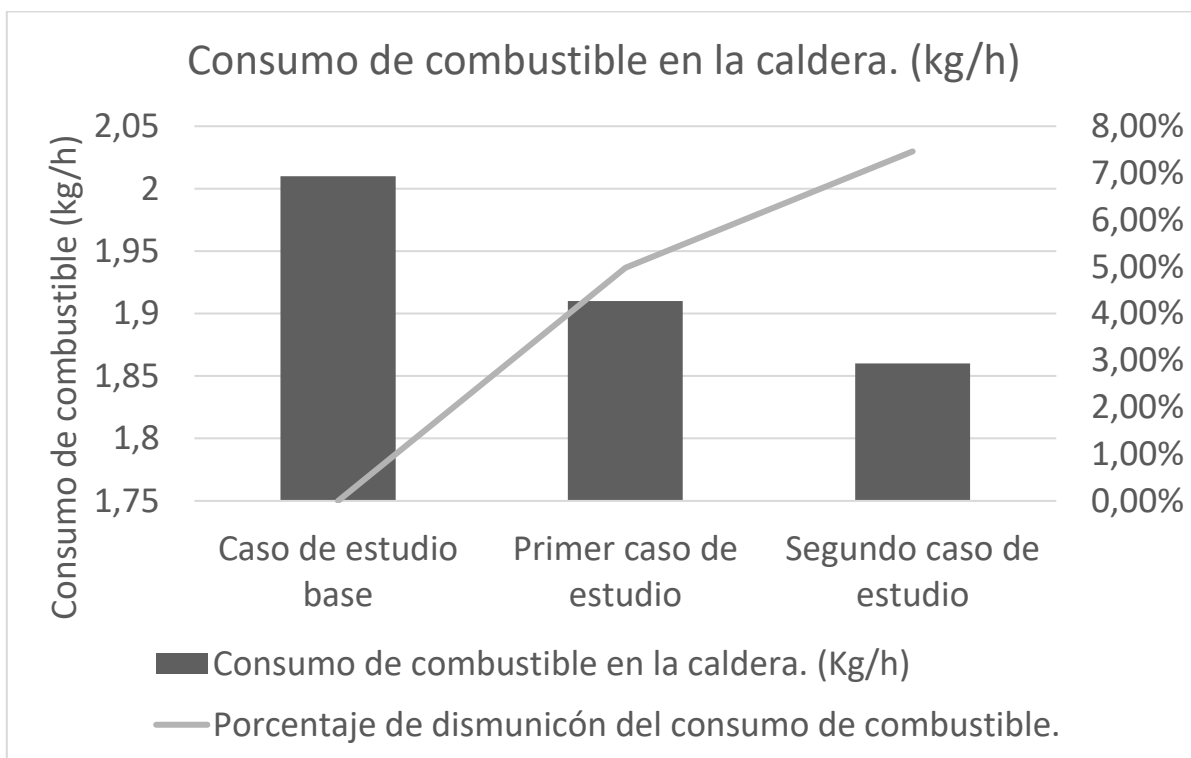
**Tabla 5.9:** Resumen de los cambios por efecto de los casos evaluados.

Variable	Caso de estudio base	Primer caso de estudio	Segundo caso de estudio
Exergía destruida en la caldera (kW).	10,88	9,61	9,171
Exergía destruida en la bomba de alimentación de la caldera (kW).	0,002173	0,0004899	0,0002603
Consumo de combustible en la caldera. (Kg/h)	2,01	1,91	1,86
Intercambiador de calor 3	NA	1,144	1,122

En cuanto a lo anterior, se resalta una disminución significativa, para ambos casos de estudio, de la exergía destruida dentro de la caldera mostrado gráficamente en la Figura 5.5, y una disminución significativa en el consumo de combustible, presentado gráficamente en la Figura 5.6. Del mismo modo, una disminución de la exergía destruida en la bomba de alimentación de la caldera y en el consumo de combustible en ambos casos. Sin embargo, el segundo caso presenta las mayores disminuciones de los valores mencionados. Desde el punto de vista del análisis individual de la exergía destruida para los casos de estudio el seleccionado debería ser el segundo caso de estudio.



**Figura 5.5** Disminución de la exergía destruida por caso.



**Figura 5.6** Disminución del consumo de combustible destruida por caso.

En la Tabla 5.10, se muestra la exergía destruida por equipo para cada caso, y así mismo la exergía destruida para la planta total en cada caso de estudio. El caso base presenta una exergía destruida total de 20,571 kW, la exergía destruida del primer caso de estudio 20,445kW y el último caso de estudio presenta una exergía destruida total de 20,034. Esto confirma la selección planteada anteriormente del segundo caso de estudio como el caso óptimo para configurar la planta, de tal forma que minimice la exergía destruida de los equipos, la exergía destruida total y el consumo de combustible de la caldera.

**Tabla 5.10:** Exergía destruida de la planta.

Equipo	Nombre	Exergía destruida caso base	Exergía destruida primer caso de estudio	Exergía destruida segundo caso de estudio	Unidad
E1	Deposito				
E2	Banda transportadora				
E3	Extractor	1,363	1,363	1,363	kW
E4	Centrifugadora				
E5	Bomba 1	0,001533	0,001533	0,001533	kW
E6	Autoclave	0,8357	0,8357	0,8357	kW
E7	Intercambiador de calor 1	0,1092	0,1092	0,1092	kW
E8	Torre de extracción	4,187	4,187	4,187	kW
E9	Bomba 2	0,002173	0,0004899	0,0002603	kW
E10	Caldera	10,88	9,61	9,171	kW
E11	Intercambiador de calor 2	1,46	1,46	1,46	kW
E12	Sistema de refrigeración	1,733	1,733	1,733	kW
E13	Molino				
E14	Tamiz				
E15	Tanque de agitado				
E16	Rodillos				
E17	Secador				
E18	Intercambiador de calor 3	NA	1,144	1,122	kW
E19	Cámara de mezclado	NA	0,0003201	0,0005575	kW
E20	válvula	NA	0,0006276	0,0006276	

---

Equipo	Nombre	Exergía destruida caso base	Exergía destruida primer caso de estudio	Exergía destruida segundo caso de estudio	Unidad
<b>E21</b>	Intercambiador de calor 4	NA	NA	0,04967	
<b>Total</b>		20,571	20,445	20,034	kW

---

Finalmente, como un añadido a la investigación es interesante el desarrollo de un análisis termoeconómico que permita establecer los efectos económicos que tienen los diferentes casos de estudio planteados en los productos finales. Sin embargo, al ser una metodología para el desarrollo en un proceso industrial en el ámbito internacional, se usa la metodología del coeficiente de enlaces externos. De esta forma se establecen los aumentos en los costos unitarios por efecto de los cambios exergéticos en el sistema.



## 6. Análisis termoeconómico

Para el análisis termoeconómico de este capítulo se plantean las ecuaciones de los costos exergoeconómicos para cada uno de los casos presentados en EES. De esta forma, se puede realizar el cálculo de los coeficientes de enlaces externos y así calcular los costos exergoeconómicos a partir de las reglas planteadas en la sección de Metodología.

### 6.1 Evaluación de la planta base

Para cumplir los requisitos de la evaluación termoeconómica de la planta base, se establece que los coeficientes de las corrientes 2, 8, 16, 18, 22 y 23 son iguales a 1 puesto que estos son insumos necesarios para el desarrollo de la planta. Con respecto a las corrientes 9, 17, 21, y 35, los valores correspondientes a sus coeficientes son 0, puesto que estos son productos que no tendrán ningún otro uso, y de esta forma cargar los pesos de los componentes exergéticos sobre los productos. Finalmente, para cerrar el sistema de ecuaciones, la premisa usada es que todos los productos definitivos tienen el mismo coeficiente, puesto que todos tienen la misma importancia. Bajo estas condiciones, los coeficientes de enlaces externos para las corrientes evaluadas, los costos exergéticos y los costos por unidad de masa en el caso base son presentados a continuación:

**Tabla 6.1:** Coeficientes de enlaces externos y costos exergéticos.

Estado	$K_i$	$CE_i$ kW	$CU_i$ kJ/kg
1			
2	1	194	5819
3			
4	5,696	16,46	987,4
5	5,689	16,46	987,8
6	5,677	19,25	1155
7	7,649	22,2	1332
8	1	2,952	173,4
9	0	0	0
10			
11	7,304	178,3	53476

Estado	K <sub>i</sub>	CE <sub>i</sub> kW	CU <sub>i</sub> kJ/kg
12	2,111	33,63	1586
13	7,386	40,98	1933
14	7,649	14,31	143053
15	7,649	28,45	1348
16	1	7,35	173,4
17	0	0	0
18	1	4,097	173,4
19	1,001	4,105	173,7
20	1,65	30,75	1419
21	0	0	0
22	1	0,233	20,22
23	1	29,2	52282
24	7,649	175,4	46151
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35	0	0	0
36	1,65	2,788	1419
37	0	0	1,872E-15

En la Tabla 6.1, se puede notar a partir de los coeficientes que existe un aumento de los costos de los productos útiles de 7,649 veces con respecto a los costos de los insumos.

Entonces, puntualizando los costos exergéticos unitarios para el jugo de naranja (corriente 7), aceite esencial (corriente 14), Agua florida (corriente 15) y la cascara de la naranja agotada para el proceso de creación de biopelículas (corriente 24) son 1332, 143053, 1348 y 46151 kJ/kg, a partir de esto se obtiene un punto de comparación para evaluar los casos de estudio.

## 6.2 Evaluación del primer caso de estudio

Con respecto al primer caso de estudio, se establece que los coeficientes de las corrientes 2, 8, 16, 22, 23 y 38 son iguales a 1, puesto que estos son insumos necesarios para el desarrollo de la planta. Con respecto a las corrientes 9, 17, 35 y 40, los valores correspondientes a sus coeficientes son 0, puesto que estos son productos que no tendrán ningún otro uso, y de esta forma cargar los pesos de los componentes exergéticos sobre los productos.

Finalmente, para cerrar el sistema de ecuaciones, la premisa usada es que todos los productos definitivos tienen el mismo coeficiente, puesto que todos tienen la misma importancia, y según (Bejan et al., 1996) para una cámara de mezclado, los costos exergéticos de la salida son iguales a la suma de los costos exergéticos a la entrada. Bajo estas condiciones, los coeficientes de enlaces externos para las corrientes evaluadas, los costos exergéticos y los costos por unidad de masa en el caso base son presentados a continuación:

**Tabla 6.2:** Coeficientes de enlaces externos y costos exergéticos.

Estado	$K_i$	$CE_i$ kW	$CU_i$ kJ/kg
<b>1</b>			
<b>2</b>	1	194	5819
<b>3</b>			
<b>4</b>	5,869	16,96	1017
<b>5</b>	5,862	16,96	1018
<b>6</b>	5,626	19,08	1145
<b>7</b>	7,59	22,03	1322
<b>8</b>	1	2,952	173,4
<b>9</b>	0	0	0
<b>10</b>			
<b>11</b>	7,283	177,8	53326
<b>12</b>	2,09	33,3	1571
<b>13</b>	7,326	40,65	1917
<b>14</b>	7,59	14,19	141939
<b>15</b>	7,59	28,23	1338
<b>16</b>	1	7,35	173,4
<b>17</b>	0	0	0
<b>18</b>	1,02	4,32	182,8

Estado	K <sub>i</sub>	CE <sub>i</sub> kW	CU <sub>i</sub> kJ/kg
19	1,02	4,328	183,1
20	1,585	29,55	1364
21	0	0	-5,094E-16
22	1	0,2209	20,22
23	1	27,68	52282
24	7,59	174	45792
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35	0	0	0
36	1,585	2,679	1364
37	1,583	0,5645	287,4
38	1	3,756	173,4
39	0,9684	3,756	173,4
40	0	0	0
41	1,583	0,5635	286,9

En la Tabla 6.2, se presentan los efectos en los coeficientes a causa de los cambios realizados en el primer caso de estudio. Con respecto a los datos presentados en la sección anterior, se presenta una disminución en los coeficientes de enlaces externos de los productos a un valor de 7,59. Es decir, los productos tienen un valor de 5,286 veces con respecto a los insumos. Con respecto a los costos exergéticos para el jugo de naranja (corriente 7), aceite esencial (corriente 14), agua florida (corriente 15) y la cascara de la naranja agotada para el proceso de creación de biopelículas (corriente 24) son 1322, 141939, 1338 y 45792 kJ/kg. Por tanto, una disminución apreciable de los costos exergéticos a causa del primer caso de estudio.

### 6.3 Evaluación del segundo caso de estudio

Con respecto al primer caso de estudio, se establece que los coeficientes de las corrientes 2, 8, 16, 22, 23 y 38 son iguales a 1, puesto que estos son insumos necesarios para el desarrollo de la planta. Con respecto a las corrientes 17, 35, 40 y 42 los valores correspondientes a sus coeficientes son 0, puesto que estos son productos que no tendrán ningún otro uso, y de esta forma cargar los pesos de los componentes exergéticos sobre los productos.

Finalmente, para cerrar el sistema de ecuaciones, la premisa usada es que todos los productos definitivos tienen el mismo coeficiente, puesto que todos tienen la misma importancia, y según (Bejan et al., 1996), las relaciones termoeconómicas auxiliares para los intercambiadores de calor es que los coeficientes externos de la línea de calentamiento son iguales. Bajo estas condiciones, los coeficientes de enlaces externos para las corrientes evaluadas y los costos exergéticos en el caso base son presentados a continuación:

**Tabla 6.3:** Coeficientes de enlaces externos y costos exergéticos.

Estado	$K_i$	$CE_i$ kW	$CU_i$ kJ/kg
<b>1</b>			
<b>2</b>	1	194	5819
<b>3</b>			
<b>4</b>	5,616	16,23	973,5
<b>5</b>	5,609	16,23	973,9
<b>6</b>	5,609	19,02	1141
<b>7</b>	7,57	21,97	1318
<b>8</b>	1	2,952	173,4
<b>9</b>	0	0	0
<b>10</b>			
<b>11</b>	7,313	178,5	53546
<b>12</b>	2,083	33,19	1565
<b>13</b>	7,306	40,54	1912
<b>14</b>	7,57	14,16	141574
<b>15</b>	7,57	28,15	1334
<b>16</b>	1	7,35	173,4
<b>17</b>	0	0	0
<b>18</b>	0,8088	3,528	149,3
<b>19</b>	0,8092	3,536	149,6

Estado	$K_i$	$CE_i$ kW	$CU_i$ kJ/kg
20	1,516	28,26	1304
21	0	0	0
22	1	0,216	20,22
23	1	27,07	52282
24	7,57	173,6	45674
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35	0	0	0
36	1,516	2,562	1304
37	-0,639	-0,2279	-116
38	1	3,756	173,4
39	0,9697	3,756	173,4
40	0	0	0
41	-0,6401	-0,2279	-116
42	0	0	0
43	0,9375	3,756	173,4

En la Tabla 6.3 se presentan los efectos en los coeficientes de enlaces externos por efecto de los cambios realizados en el segundo caso de estudio. Con respecto a los productos, se presentó una disminución de valor de estos, de tal forma que los productos tienen un costo de 7,57 veces con respecto a los insumos. De esta forma, los costos exergéticos para el jugo de naranja (corriente 7), aceite esencial (corriente 14), Agua florida (corriente 15) y la cascara de la naranja agotada para el proceso de creación de biopelículas (corriente 24) son 1318, 141574, 1334 y 45674 kJ/kg, a partir de esto se obtiene un punto de comparación para evaluar los casos de estudio.

Ahora bien, como es de esperar de la configuración con la mínima cantidad de exergía destruida, esta presenta el mínimo valor de los productos con respecto a los insumos. De esta forma, se puede demostrar que una disminución en la exergía destruida ocasiona una

disminución en los costos exergéticos del sistema. Sin embargo, la disminución máxima de los costos exergéticos con respecto al caso base de es cercano a 1,033%.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

En la presente tesis de maestría se realizó una optimización de una planta piloto de aprovechamiento integral de naranja en términos energéticos y exergéticos. Esta optimización se realizó a partir del planteamiento de dos casos de estudio propuestos en función de una planta base de aprovechamiento integral de naranja, factor importante para la resolución de una necesidad surgida en el proyecto de *Evaluación Integrada con Criterios de Sustentabilidad, del Proceso de Extracción por Arrastre de Vapor de Aceite Esencial de Cáscara de Naranja (Citrus Sinensis) de los Valles de la Provincia de Arequipa, en la Perspectiva de su Utilización Comercial*.

Para el desarrollo de los objetivos del presente trabajo, se empleó la herramienta Engineering Equation Solver (EES), el cual es un programa general de resolución de ecuaciones que puede resolver ecuaciones algebraicas y diferenciales no lineales acopladas. De esta forma, se logró modelar la planta base a partir de los balances de masa e información de consumos planteados en el proyecto mencionado anteriormente. A partir del escenario base, se plantearon dos casos de estudio para ser evaluados desde el punto de vista exergético, con el fin de establecer el escenario óptimo a partir del criterio de mínima exergía destruida.

El primer caso evaluado fue el uso de un economizador con el fin de utilizar los gases de combustión provenientes de la caldera para precalentar el agua que entra a esta misma. Sin embargo, el primer caso dio cabida al planteamiento del segundo caso de estudio, el cual fue utilizar un segundo economizador que permita seguir aumentando la temperatura de entrada del agua a la caldera.

Empleando la primera alternativa se apreció una disminución de la exergía destruida en los equipos involucrados, en la planta en general y como consecuencia una disminución del consumo de combustible de la caldera. Pero, en el segundo caso planteado se observó una disminución mayor de la exergía destruida tanto en la planta como en los equipos asociados a los cambios, y una disminución incluso mayor de combustible. De esta forma y con los



datos aportados en la sección 5.4, el caso óptimo es el segundo caso de estudio. Como un añadido a esta investigación, se desarrolló un análisis termoeconómico que permitan establecer los costos exergéticos de los productos para todos los casos planteados.

Con respecto al análisis termoeconómico, se realizó una evaluación para las tres situaciones planteadas a lo largo del trabajo presentado, la evaluación se realizó utilizando la metodología de los coeficientes de enlaces externos presentada por (Kotas, 1985c) y usando las tasas de costo asociadas con el combustible y el producto presentados en (Bejan et al., 1996). Es así, en donde se concluye que una disminución de la exergía destruida, genera una disminución en los costos exergéticos cargados hacia los productos.

En resumen, los resultados de este trabajo permitieron establecer condiciones que minimicen la exergía destruida tanto de la caldera como la planta en general y así mismo los efectos de estos cambios en los costos exergéticos de un sistema

## **7.2 Recomendaciones**

Con los límites establecidos en este trabajo, las próximas investigaciones asociadas a la temática en dicha planta es el establecimiento de una optimización en la línea de desarrollo de biopelículas, en la cual el proyecto en el que se enmarca esta investigación no ha ahondado. Esto debido a todo aspecto químico asociado a esta etapa de planta, lo efectos termo químicos y costos exergéticos.

Por otra parte, es reevaluar la optimización utilizando otros fluidos como componente frío para la disminución de la temperatura en los intercambiadores de calor, de tal forma que permitía reevaluar las interacciones térmicas y termoeconómicas. Por otra parte, la evaluación de la implementación de un sistema de refrigeración por absorción utilizando el calor residual de los procesos generados en la planta y sus efectos en la exergía destruida de los equipos y la planta en general.

## 8. Anexos

### A. Anexo: Código en EES del modelo de la planta base.

#### OPTIMIZACIÓN

##### Equations

Optimización de una planta piloto de aprovechamiento integral de naranja en términos energéticos y exergéticos.

Variables de entrada

$$Fr = 0,5 \quad \% \text{ de jugo con respecto a la naranja} \quad (1)$$

$$Fc = 0,1 \quad \text{Fracción de cáscara} \quad (2)$$

$$Fv = 0,04 \quad \text{Fracción de vapor perdido en la extracción de aceite} \quad (3)$$

$$Fpn = 0,1 \quad \text{fracción de la naranja en la película} \quad (4)$$

$$Fpg = 0,07 \quad \text{Fracción de glicerina en las películas} \quad (5)$$

$$Fpp = 0,07 \quad \text{Fracción de pectina en las películas} \quad (6)$$

$$Fpc = 0,06 \quad \text{Fracción de celulosa en las películas} \quad (7)$$

$$Fs = 0,4 \quad \text{Fracción de semillas y bagazo} \quad (8)$$

$$Cp_N = 1,94 \quad (9)$$

$$Cp_{naranja} = 6,5 \quad \text{Calor específico de la naranja tomado de } \text{https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-8507-0}_{14} \quad (10)$$

$$COP_r = 1,5 \quad (11)$$

$$\eta_{bombas} = 0,8 \quad (12)$$

$$Cp_{limoneno} = 1,834 \quad \text{https://www.chemeo.com/cid/70-164-2/Limonene} \quad (13)$$

$$Mc = 2,73/100 \quad \text{Thermo-kinetics study of orange peel in air} \quad (14)$$

Composición de la cáscara, C= 49,59/100 H= 6,95/100 N=0,66/100 S= 0,06/100 O=39,7/100 Cinza=3,05/100 Thermo-kinetics study of orange peel in air

$$Cc = 49,59/100 \quad (15)$$

$$Hc = 6,95/100 \quad (16)$$

$$Oc = 39,7/100 \quad (17)$$

$$Nc = 0,66/100 \quad (18)$$

$$Sc = 0,06/100 \quad (19)$$

$$Ec = 3,05/100 \quad (20)$$

$$PMs = \left( \frac{Cc/12 + Hc/1 + Oc/16 + Sc/32}{0,9695} \right)^{-1} \quad \text{Peso molecular de la cáscara} \quad (21)$$

$$ys = \frac{\frac{1-Mc}{PMs}}{(Mc/18) + \left( \frac{1-Mc}{PMs} \right)} \quad (22)$$

$$y_a = \frac{Mc/18}{\left(\frac{1-Mc}{PM_s}\right) + (Mc/18)} \quad (23)$$

$$PM = y_s \cdot PM_s + y_a \cdot 18 \quad (24)$$

Composición del bagazo, C= 47/100 H= 6,9/100 N=1,3/100 S= 0,09/100 O=44,71/100 Cinza=3,05/100 Pyrolysis of orange waste: A thermo-kinetic study

$$Mcb = 5,7/100 \quad (25)$$

$$Cb = 47/100 \quad (26)$$

$$Hb = 6,9/100 \quad (27)$$

$$Ob = 44,71/100 \quad (28)$$

$$Nb = 1,3/100 \quad (29)$$

$$Sb = 0,09/100 \quad (30)$$

$$Eb = 3,05/100 \quad (31)$$

$$PMb = \left( \frac{Cb/12 + Hb/1 + Ob/16 + Sb/32}{1} \right)^{-1} \quad \text{Peso molecular del bagazo} \quad (32)$$

$$y_b = \frac{\frac{1-Mc}{PMb}}{(Mcb/18) + \left(\frac{1-Mcb}{PMb}\right)} \quad (33)$$

$$y_{ab} = \frac{Mcb/18}{\left(\frac{1-Mcb}{PMb}\right) + (Mcb/18)} \quad (34)$$

$$PMba = y_b \cdot PMb + y_{ab} \cdot 18 \quad (35)$$

Fracción molar de agua y naranja

$$Moles = 0,5/18 + 0,1/PM + 0,4/PMba \quad (36)$$

$$FMa = 0,5/18/Moles \quad (37)$$

$$FMn = 1 - FMa \quad (38)$$

$$PMT = 0,5 \cdot 18 + 0,1 \cdot PM + 0,4 \cdot PMba \quad (39)$$

Cálculo de la relación estandar de exergía química de la cáscara

$$PCSc = 349,1 \cdot Cc \cdot 100 + 1178,3 \cdot Hc \cdot 100 + 100,5 \cdot Sc \cdot 100 - 103,4 \cdot Oc \cdot 100 - 15,1 \cdot Nc \cdot 100 - 21,1 \cdot Ec \cdot 100 \quad (40)$$

$$PCIC = PCSc - 2441,7 \cdot (9 \cdot Hc + Mc) \quad (41)$$

$$\phi_c = \frac{1,0438 + 0,1882 \cdot (Hc/Cc) - 0,2509 \cdot (1 + 0,7256 \cdot (Hc/Cc))}{1 - 0,3035 \cdot (Oc/Cc)} \quad \text{Exergy analysis of the energy consumption in the Colombian e}$$

Ambiente de referencia

$$X_{O_{2ref}} = 0,2059 \quad (43)$$

$$X_{N_2ref} = 0,7748 \quad (44)$$

$$X_{CO_2ref} = 0,0003 \quad (45)$$

$$X_{H_2Oref} = 0,019 \quad (46)$$

Metano  $CH_4 + K \cdot \lambda (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow aCO_2 + bH_2O + cN_2 + dO_2$

$$k = 1, 2 \quad (47)$$

$$\lambda = 2 \quad (48)$$

$$a = 1 \quad (49)$$

$$b = 2 \quad (50)$$

$$c = K \cdot 7,52 \quad (51)$$

$$d = (K - 1) \cdot \lambda \quad (52)$$

$$N_T = a + b + c + d \quad (53)$$

$$R_{AC} = (K \cdot \lambda \cdot 4,76) \cdot \left( \frac{MW(Air)}{MW(CH_4)} \right) \quad (54)$$

$$X_{CO_2} = a/N_T \quad (55)$$

$$X_{H_2O} = b/N_T \quad (56)$$

$$X_{N_2} = c/N_T \quad (57)$$

$$X_{O_2} = d/N_T \quad (58)$$

$$Y_{CO_2} = \left( \frac{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2)}{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (59)$$

$$Y_{H_2O} = \left( \frac{X_{H_2O} \cdot MW(H_2O)}{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (60)$$

$$Y_{N_2} = \left( \frac{X_{N_2} \cdot MW(N_2)}{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (61)$$

$$Y_{O_2} = \left( \frac{X_{O_2} \cdot MW(O_2)}{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (62)$$

$$MM_{mix} = X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2) \quad (63)$$

Estados

Estado 0

$$T_0 = 25 \quad (64)$$

$$P_0 = 101,325 \quad (65)$$

$$h_0 = h(Water; T = T_0; P = P_0) \quad (66)$$

$$s_0 = s(Water; T = T_0; P = P_0) \quad (67)$$

$$h_{ref} = Y_{CO_2} \cdot h(CO_2; T = T_0) + Y_{H_2O} \cdot h(H_2O; T = T_0) + Y_{N_2} \cdot h(N_2; T = T_0) + Y_{O_2} \cdot h(O_2; T = T_0) \quad (68)$$

$$s_{ref} = Y_{CO_2} \cdot s(CO_2; T = T_0; P = P_0) + Y_{H_2O} \cdot s(H_2O; T = T_0; P = P_0) + Y_{N_2} \cdot s(N_2; T = T_0; P = P_0) + Y_{O_2} \cdot s(O_2; T = T_0; P = P_0)$$

Estado 1

$$\dot{m}_1 = (120/3600) \text{ [kg/s]} \quad (70)$$

Estado 2

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad (71)$$

$$T_2 = 25 \quad (72)$$

$$P_2 = 80 \quad (73)$$

$$h_{a_2} = h(\text{Water}; T = T_2; P = P_2) \quad (74)$$

$$s_{a_2} = s(\text{Water}; T = T_2; P = P_2) \quad (75)$$

$$bpha_2 = (h_0 - h_{a_2}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_{a_2}) \quad (76)$$

$$bcha_2 = 3120/18 \quad (77)$$

$$bchs_2 = 18700 \quad (78)$$

$$bphs_2 = 0 \quad (79)$$

$$ma_2 = 0,521 \cdot \dot{m}_2 \quad (80)$$

$$ms_2 = (1 - 0,521) \cdot \dot{m}_2 \quad (81)$$

$$\dot{B}_2 = ma_2 \cdot (bphs_2 + bchs_2) + ms_2 \cdot (bpha_2 + bcha_2) + (8,314/PMT) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,5 \cdot \ln(0,5) + (8,314/PMT) \cdot (T_0 + 273) \cdot (0,5) \cdot \ln(0,5)$$

Estado 3

$$\dot{m}_3 = Fr \cdot \dot{m}_2 \quad (83)$$

$$T_3 = 25 \quad (84)$$

$$P_3 = 80 \quad (85)$$

$$h_3 = h(\text{Water}; T = T_3; P = P_3) \quad (86)$$

Estado 4

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (87)$$

$$T_4 = 25 \quad (88)$$

$$P_4 = 80 \quad (89)$$

$$h_4 = h(\text{Water}; T = T_4; P = P_4) \quad (90)$$

$$s_4 = s(\text{Water}; T = T_4; P = P_4) \quad (91)$$

$$bpha_4 = (h_0 - h_4) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_4) \quad (92)$$

$$bcha_4 = 3120/18 \quad (93)$$

$$bchs_4 = 0 \quad (94)$$

$$bphs_4 = 0 \quad (95)$$

$$\dot{E}_4 = \dot{m}_4 \cdot h_4 \quad (96)$$

$$\dot{B}_4 = \dot{m}_4 \cdot (bpha_4 + bcha_4) \quad (97)$$

Estado 5

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 \quad (98)$$

$$P_5 = 400 \quad 3 \text{ o } 4 \text{ bar, irreversible} \quad (99)$$

$$s_5 = s(\text{Water}; T = T_5; P = P_5) \quad (100)$$

$$h_5 = h(\text{Water}; T = T_5; P = P_5) \quad (101)$$

$$T_5 = T_4 \quad (102)$$

$$bpha_5 = (h_5 - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_5 - s_0) \quad (103)$$

$$bcha_5 = 3120/18 \quad (104)$$

$$bchs_5 = 0 \quad (105)$$

$$bphs_5 = 0 \quad (106)$$

$$\dot{E}_5 = \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (107)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{m}_5 \cdot (bpha_5 + bcha_5) \quad (108)$$

Estado 6

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_5 \quad (109)$$

$$P_6 = P_5 \quad (110)$$

$$T_6 = 95 \quad (111)$$

$$h_6 = h(\text{Water}; T = T_6; P = P_6) \quad (112)$$

$$s_6 = s(\text{Water}; T = T_6; P = P_6) \quad (113)$$

$$bpha_6 = (h_6 - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_6 - s_0) \quad (114)$$

$$bcha_6 = 3120/18 \quad (115)$$

$$bchs_6 = 0 \quad (116)$$

$$bphs_6 = 0 \quad (117)$$

$$\dot{E}_6 = \dot{m}_6 \cdot h_6 \quad (118)$$

$$\dot{B}_6 = \dot{m}_6 \cdot (bpha_6 + bcha_6) \quad (119)$$

$$Q_{\text{pasteurizado}} = \dot{E}_6 - \dot{E}_5 \quad (120)$$

Estado 7

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6 \quad (121)$$

$$P_7 = P_6 \quad (122)$$

$$h_7 = h(\text{Water}; T = T_7; P = P_7) \quad (123)$$

$$s_7 = s(\text{Water}; T = T_7; P = P_7) \quad (124)$$

$$bpha_7 = (h_7 - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_7 - s_0) \quad (125)$$

$$bcha_7 = 3120/18 \quad (126)$$

$$bchs_7 = 0 \quad (127)$$

$$bphs_7 = 0 \quad (128)$$

$$\dot{E}_7 = \dot{m}_7 \cdot h_7 \quad (129)$$

$$\dot{B}_7 = \dot{m}_7 \cdot (bpha_7 + bcha_7) \quad (130)$$

$$\dot{E}_6 - \dot{E}_7 = Q_{\text{pasteurización}} \quad (131)$$

Estado 8

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (132)$$

$$T_8 = 25 \quad (133)$$

$$P_8 = 80 \quad (134)$$

$$h_8 = h(\text{Water}; T = T_8; P = P_8) \quad (135)$$

$$s_8 = s(\text{Water}; T = T_8; P = P_8) \quad (136)$$

$$bpha_8 = (h_0 - h_8) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_0 - s_8) \quad (137)$$

$$bcha_8 = 3120/18 \quad (138)$$

$$bchs_8 = 0 \quad (139)$$

$$bphs_8 = 0 \quad (140)$$

$$\dot{E}_8 = \dot{m}_8 \cdot h_8 \quad (141)$$

$$\dot{B}_8 = \dot{m}_8 \cdot (bpha_8 + bcha_8) \quad (142)$$

Estado 9

$$\dot{m}_9 = 0,01703 \quad (143)$$

$$P_9 = P_8 \quad (144)$$

$$T_9 = 85 \quad (145)$$

$$h_9 = h(\text{Water}; T = T_9; P = P_9) \quad (146)$$

$$s_9 = s(\text{Water}; T = T_9; P = P_9) \quad (147)$$

$$bpha_9 = (h_9 - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_9 - s_0) \quad (148)$$

$$bcha_9 = 3120/18 \quad (149)$$

$$bchs_9 = 0 \quad (150)$$

$$bphs_9 = 0 \quad (151)$$

$$\dot{E}_9 = \dot{m}_9 \cdot h_9 \quad (152)$$

$$\dot{B}_9 = \dot{m}_9 \cdot (bpha_9 + bcha_9) \quad (153)$$

$$Q_{pasteurización} = \dot{E}_9 - \dot{E}_8 \quad (154)$$

Estado 10

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \quad (155)$$

Estado 11

$$\dot{m}_{11} = Fc \cdot \dot{m}_2 \quad (156)$$

$$ma_{11} = \dot{m}_{11} \cdot Mc \quad (157)$$

$$ms_{11} = \dot{m}_{11} \cdot (1 - Mc) \quad (158)$$

$$ha_{11} = h(\text{Water}; T = T_{11}; P = 400) \quad (159)$$

$$hs_{11} = Cp_{naranja} \cdot T_{11} \quad (160)$$

$$sa_{11} = s(\text{Water}; T = T_{11}; P = 400) \quad (161)$$

$$T_{11} = 25 \quad (162)$$

$$h_{11} = \frac{ma_{11} \cdot ha_{11} + ms_{11} \cdot hs_{11}}{\dot{m}_{11}} \quad (163)$$

$$\dot{E}_{11} = \dot{m}_{11} \cdot h_{11} \quad (164)$$

$$bchs_{11} = \phi_c \cdot PCIc \quad (165)$$

$$bcha_{11} = 3120/18 \quad (166)$$

$$bpha_{11} = (ha_{11} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (sa_{11} - s_0) \quad (167)$$

$$bphs_{11} = Cp_{naranja} \cdot (T_{11} - T_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot Cp_{naranja} \cdot \ln\left(\frac{T_{11} + 273, 15}{T_0 + 273, 15}\right) \quad (168)$$

$$\dot{B}_{11} = ma_{11} \cdot (bcha_{11} + bpha_{11}) + (bphs_{11} + bchs_{11}) \cdot ms_{11} + (8, 314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0, 0273 \cdot \ln(0, 0273) + (8, 314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot (1$$

Estado 12

$$\dot{m}_{12} = (\dot{m}_{20} - 0, 17 \cdot \dot{m}_{11}) + 0, 03 \cdot \dot{m}_{11} \quad (170)$$

$$FMAC = 0, 03 \cdot \frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_{12}} \quad (171)$$

$$FMagua = \frac{\dot{m}_{20} - 0, 17 \cdot \dot{m}_{11}}{\dot{m}_{12}} \quad (172)$$



$$P_{12} = 400 \quad (173)$$

$$T_{12} = T(\text{Water}; \mathbf{P} = P_{12}; \mathbf{h} = h_{12}) \quad (174)$$

$$x_{12} = x(\text{Water}; \mathbf{T} = T_{12}; \mathbf{h} = h_{12}) \quad (175)$$

$$s_{12} = s(\text{Water}; \mathbf{h} = h_{12}; \mathbf{P} = P_{12}) \quad (176)$$

$$bchs_{12} = 18700 \quad (177)$$

$$bphs_{12} = Cp_{\text{limoneno}} \cdot (T_{12} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{\text{limoneno}} \cdot \ln\left(\frac{T_{12} + 273,15}{T_0 + 273,15}\right) \quad (178)$$

$$bpha_{12} = (h_{12} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s(\text{Water}; \mathbf{x} = x_{12}; \mathbf{P} = P_{12}) - s_0) \quad (179)$$

$$bcha_{12} = 3120/18 \quad (180)$$

$$\frac{ha_{12} \cdot (\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot Cp_{\text{limoneno}}}{\dot{m}_{12}} = h_{12} \quad (181)$$

$$\dot{E}_{12} = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} \quad (182)$$

$$\dot{B}_{12} = (\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot (bpha_{12} + bcha_{12}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot (bchs_{11} + bphs_{11}) + (8,314/18) \cdot (T_0 + 273) \cdot (FMAC) \cdot \ln(FMAC) + (8,314,$$

$$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{24} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{20} \quad (184)$$

Estado 13

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{12} \quad (185)$$

$$P_{13} = P_{12} \quad (186)$$

$$T_{13} = 25 + 10 \quad (187)$$

$$h_{13} = \frac{(\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot h(\text{Water}; \mathbf{T} = T_{13}; \mathbf{P} = P_{13}) + Cp_{\text{limoneno}} \cdot T_{13} \cdot 0,03 \cdot \dot{m}_{11}}{\dot{m}_{13}} \quad (188)$$

$$ha_{13} = h(\text{Water}; \mathbf{T} = T_{13}; \mathbf{P} = P_{13}) \quad (189)$$

$$sa_{13} = s(\text{Water}; \mathbf{T} = T_{13}; \mathbf{P} = P_{13}) \quad (190)$$

$$bchs_{13} = 18700 \quad (191)$$

$$bphs_{13} = Cp_{\text{limoneno}} \cdot (T_{13} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{\text{limoneno}} \cdot \ln\left(\frac{T_{13} + 273,15}{T_0 + 273,15}\right) \quad (192)$$

$$bpha_{13} = (h_{13} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (sa_{13} - s_0) \quad (193)$$

$$bcha_{13} = 3120/18 \quad (194)$$

$$\dot{E}_{13} = \dot{m}_{13} \cdot h_{13} \quad (195)$$

$$\dot{B}_{13} = (\dot{m}_{13} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot (bpha_{13} + bcha_{13}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot (bchs_{13} + bphs_{13}) \quad (196)$$

Estado 14

$$\dot{m}_{14} = 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \quad (197)$$

$$T_{14} = 5 \quad (198)$$

$$P_{13} = P_{14} \quad (199)$$

$$h_{14} = Cp_{limoneno} \cdot T_{14} \quad (200)$$

$$bchs_{14} = 18700 \quad (201)$$

$$bphs_{14} = Cp_{limoneno} \cdot (T_{14} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{limoneno} \cdot \ln \left( \frac{T_{14} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (202)$$

$$bpha_{14} = 0 \quad (203)$$

$$bcha_{14} = 0 \quad (204)$$

$$\dot{B}_{14} = (bphs_{14} + bchs_{14}) \cdot \dot{m}_{14} \quad (205)$$

Estado 15

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{13} - \dot{m}_{14} \quad (206)$$

$$T_{15} = 5 \quad (207)$$

$$P_{15} = 80 \quad (208)$$

$$h_{15} = h(\text{Water}; T = T_{15}; P = P_{15}) \quad (209)$$

$$s_{15} = s(\text{Water}; T = T_{15}; P = P_{15}) \quad (210)$$

$$bpha_{15} = (h_{15} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{15} - s_0) \quad (211)$$

$$bcha_{15} = 3120/18 \quad (212)$$

$$bchs_{15} = 0 \quad (213)$$

$$bphs_{15} = 0 \quad (214)$$

$$\dot{E}_{15} = \dot{m}_{15} \cdot h_{15} \quad (215)$$

$$\dot{B}_{15} = \dot{m}_{15} \cdot (bpha_{15} + bcha_{15}) \quad (216)$$

Estado 16

$$\dot{m}_{16} = 2 \cdot \dot{m}_{12} \quad (217)$$

$$T_{16} = 25 \quad (218)$$

$$P_{16} = 80 \quad (219)$$

$$h_{16} = h(\text{Water}; T = T_{16}; P = P_{16}) \quad (220)$$

$$s_{16} = s(\text{Water}; T = T_{16}; P = P_{16}) \quad (221)$$

$$bpha_{16} = (h_0 - h_{16}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_{16}) \quad (222)$$

$$bcha_{16} = 3120/18 \quad (223)$$

$$bchs_{16} = 0 \quad (224)$$

$$bphs_{16} = 0 \quad (225)$$

$$\dot{E}_{16} = \dot{m}_{16} \cdot h_{16} \quad (226)$$

$$\dot{B}_{16} = \dot{m}_{16} \cdot (bpha_{16} + bcha_{16}) \quad (227)$$

Estado 17

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{16} \quad (228)$$

$$P_{17} = P_{16} \quad (229)$$

$$-\dot{E}_{13} + \dot{E}_{12} = Q_{accite} \quad (230)$$

$$Q_{accite} = \dot{E}_{17} - \dot{E}_{16} \quad (231)$$

$$T_{17} = T(\text{Water}; \mathbf{P} = P_{17}; \mathbf{h} = h_{17}) \quad (232)$$

$$s_{17} = s(\text{Water}; \mathbf{h} = h_{17}; \mathbf{P} = P_{17}) \quad (233)$$

$$bpha_{17} = (h_{17} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{17} - s_0) \quad (234)$$

$$bcha_{17} = 3120/18 \quad (235)$$

$$bchs_{17} = 0 \quad (236)$$

$$bphs_{17} = 0 \quad (237)$$

$$\dot{E}_{17} = \dot{m}_{17} \cdot h_{17} \quad (238)$$

$$\dot{B}_{17} = \dot{m}_{17} \cdot (bpha_{17} + bcha_{17}) \quad (239)$$

Estado 18

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} \quad (240)$$

$$T_{18} = 25 \quad (241)$$

$$P_{18} = 80 \quad (242)$$

$$h_{18} = h(\text{Water}; \mathbf{T} = T_{18}; \mathbf{P} = P_{18}) \quad (243)$$

$$s_{18} = s(\text{Water}; \mathbf{T} = T_{18}; \mathbf{P} = P_{18}) \quad (244)$$

$$bpha_{18} = (h_0 - h_{18}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_{18}) \quad (245)$$

$$bcha_{18} = 3120/18 \quad (246)$$

$$bchs_{18} = 0 \quad (247)$$

$$bphs_{18} = 0 \quad (248)$$

$$\dot{E}_{18} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} \quad (249)$$

$$\dot{B}_{18} = \dot{m}_{18} \cdot (bpha_{18} + bcha_{18}) \quad (250)$$

Estado 19

$$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{20} + \dot{m}_{36} \quad (251)$$

$$P_{19} = 400 \quad 3 \text{ o } 4 \text{ bar} \quad (252)$$

$$T_{19} = T_{18} \quad (253)$$

$$h_{19} = h(\text{Water}; T = T_{19}; P = P_{19}) \quad (254)$$

$$s_{19} = s(\text{Water}; T = T_{19}; P = P_{19}) \quad (255)$$

$$bpha_{19} = (h_{19} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{19} - s_0) \quad (256)$$

$$bcha_{19} = 3120/18 \quad (257)$$

$$bchs_{19} = 0 \quad (258)$$

$$bphs_{19} = 0 \quad (259)$$

$$\dot{E}_{19} = \dot{m}_{19} \cdot h_{19} \quad (260)$$

$$\dot{B}_{19} = \dot{m}_{19} \cdot (bpha_{19} + bcha_{19}) \quad (261)$$

Ir de atras para adelante!

$$\dot{m}_{20} = 6, 5 \cdot \dot{m}_{11} \quad (262)$$

$$P_{20} = P_{19} \quad (263)$$

$$T_{20} = T_{\text{sat}}(\text{Water}; P = P_{20}) \quad (264)$$

$$h_{20} = h(\text{Water}; x = 1; P = P_{20}) \quad (265)$$

$$s_{20} = s(\text{Water}; x = 1; P = P_{20}) \quad (266)$$

$$bpha_{20} = (h_{20} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{20} - s_0) \quad (267)$$

$$bcha_{20} = 3120/18 \quad (268)$$

$$bchs_{20} = 0 \quad (269)$$

$$bphs_{20} = 0 \quad (270)$$

$$\dot{E}_{20} = \dot{m}_{20} \cdot h_{20} \quad (271)$$

$$\dot{B}_{20} = \dot{m}_{20} \cdot (bpha_{20} + bcha_{20}) \quad (272)$$

$$Q_{\text{vaporización}} = \dot{E}_{20} + \dot{E}_{36} - \dot{E}_{19} \quad (273)$$

Estado 21

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{23} + \dot{m}_{22} \quad (274)$$

$$T_{21} = 400 \quad (275)$$

$$h_{21} = Y_{CO_2} \cdot h(CO_2; T = T_{21}) + Y_{H_2O} \cdot h(H_2O; T = T_{21}) + Y_{N_2} \cdot h(N_2; T = T_{21}) + Y_{O_2} \cdot h(O_2; T = T_{21}) \quad (276)$$

$$P_{21} = 80 \quad (277)$$

$$s_{21} = Y_{CO_2} \cdot s(CO_2; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{H_2O} \cdot s(H_2O; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{N_2} \cdot s(N_2; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{O_2} \cdot s(O_2; T = T_{21}; P = P_{21}) \quad (278)$$

$$bphs_{21} = (h_{21} - h_{ref}) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{21} - s_{ref}) \quad (279)$$

$$\dot{m}_{21} \cdot h_{21} = \dot{m}_{22} \cdot h_{22} + \dot{m}_{23} \cdot LHV + \dot{m}_{19} \cdot h_{19} - \dot{m}_{20} \cdot h_{20} \quad (280)$$

$$bchs_{21} = (8, 314/MM_{\text{mix}}) \cdot (T_0 + 273, 15) \cdot (X_{CO_2} \cdot \ln(X_{CO_2}/X_{CO_2ref}) + X_{H_2O} \cdot \ln(X_{H_2O}/X_{H_2Oref}) + X_{N_2} \cdot \ln(X_{N_2}/X_{N_2ref}) +$$

$$bpha_{21} = 0 \quad (282)$$

$$bcha_{21} = 0 \quad (283)$$

$$\dot{E}_{21} = \dot{m}_{21} \cdot h_{21} \quad (284)$$

$$\dot{B}_{21} = \dot{m}_{21} \cdot (bphs_{21} + bchs_{21}) \quad (285)$$

Estado 22

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23} \cdot R_{AC} \quad (286)$$

$$T_{22} = 25 \quad (287)$$

$$P_{22} = 80 \quad (288)$$

$$h_{22} = h(Air; T = T_{22}) \quad (289)$$

$$s_{22} = s(Air; T = T_{22}; P = P_{22}) \quad (290)$$

$$bphs_{22} = (h(Air; T = 25) - h_{22}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s(Air; T = 25; P = 101,325) - s_{22}) \quad (291)$$

$$bchs_{22} = 0 \quad (292)$$

$$bpha_{22} = 0 \quad (293)$$

$$bcha_{22} = 0 \quad (294)$$

$$\dot{E}_{22} = \dot{m}_{22} \cdot h_{22} \quad (295)$$

$$\dot{B}_{22} = \dot{m}_{22} \cdot (bphs_{22} + bchs_{22}) \quad (296)$$

Estado 23

$$T_{23} = 25 \quad (297)$$

$$P_{23} = 80 \quad (298)$$

$$LHV = 50000 \quad (299)$$

$$bphs_{23} = 0 \quad (300)$$

$$bchs_{23} = 52281,875 \quad (301)$$

$$bpha_{23} = 0 \quad (302)$$

$$bcha_{23} = 0 \quad (303)$$

$$\dot{B}_{23} = \dot{m}_{23} \cdot (bchs_{23} + bpha_{23}) \quad (304)$$

Estado 24

$$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{11} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11} + 0,17 \cdot \dot{m}_{11} \quad (305)$$

$$ma_{24} = (\dot{m}_{11} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot Mc+ , 17 \cdot \dot{m}_{11} \quad (306)$$

$$ms_{24} = \dot{m}_{24} - ma_{24} \quad (307)$$

$$T_{24} = T_{\text{sat}}(Water; P = P_{24}) \quad (308)$$

$$P_{24} = 400 \quad (309)$$

$$h_{24} = \frac{ms_{24} \cdot Cp_{naranja} \cdot T_{24} + ma_{24} \cdot h(Water; x = 0; P = P_{24})}{\dot{m}_{24}} \quad (310)$$

$$\dot{E}_{24} = \dot{m}_{24} \cdot h_{24} \quad (311)$$

$$sa_{24} = s(Water; x = 0; P = P_{24}) \quad (312)$$

$$bpha_{24} = (h(Water; x = 0; P = P_{24}) - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (sa_{24} - s_0) \quad (313)$$

$$bcha_{24} = 3120/18 \quad (314)$$

$$bchs_{24} = \phi_c \cdot PCIc \quad (315)$$

$$bphs_{24} = Cp_{naranja} \cdot (T_{24} - T_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot Cp_{naranja} \cdot \ln\left(\frac{T_{24} + 273, 15}{T_0 + 273, 15}\right) \quad (316)$$

$$\dot{B}_{24} = ma_{24} \cdot (bpha_{24} + bcha_{24}) + ms_{24} \cdot (bchs_{24} + bphs_{24}) + (8, 314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0, 0273 \cdot \ln(0, 0273) + (8, 314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot (1$$

Estado 25

$$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{24} \quad (318)$$

Estado 26

$$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{25} \quad (319)$$

Estado 27

$$\dot{m}_{27} = \frac{\dot{m}_{26}}{F_{pn}} \quad (320)$$

Estado 28

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{27} \quad (321)$$

Mientras se conoce las pérdidas en masa de las películas al secarse

$$\dot{m}_{29} = \frac{\dot{m}_{31} + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{33}}{0, 93} \quad (322)$$

Estado 30

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{28} - \dot{m}_{29} \quad (323)$$

Estado 31 Glicerina

$$\dot{m}_{31} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pg} \quad (324)$$

Estado 32 Pectina

$$\dot{m}_{32} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pp} \quad (325)$$

Estado 33 Celulosa bacteriana

$$\dot{m}_{33} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pc} \quad (326)$$

Estado 34 Celulosa bacteriana

$$\dot{m}_{34} = \dot{m}_{27} - \dot{m}_{33} - \dot{m}_{32} - \dot{m}_{31} - \dot{m}_{25} \quad (327)$$

Estado 35

$$\dot{m}_{35} = F_s \cdot \dot{m}_2 \quad (328)$$

$$m a_{35} = 0,057 \cdot \dot{m}_{35} \quad (329)$$

$$m s_{35} = \dot{m}_{35} - m a_{35} \quad (330)$$

$$T_{35} = 25 \quad (331)$$

$$P_{35} = 80 \quad (332)$$

$$bpha_{35} = 0 \quad (333)$$

$$bcha_{35} = 3120/18 \quad (334)$$

$$bchs_{35} = 18700 \quad (335)$$

$$bphs_{35} = 0 \quad (336)$$

$$\dot{B}_{35} = m a_{35} \cdot (bpha_{35} + bcha_{35}) + m s_{35} \cdot (bphs_{35} + bchs_{35}) + (8,314/PMba) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,057 \cdot \ln(0,057) + (8,314/PMba) \cdot (T_0 + 273) \cdot$$

Estado 36

$$\dot{m}_{36} = \dot{m}_{37} \quad (338)$$

$$T_{36} = T_{20} \quad (339)$$

$$P_{36} = P_{20} \quad (340)$$

$$h_{36} = h_{20} \quad (341)$$

$$s_{36} = s_{20} \quad (342)$$

$$bpha_{36} = (h_{36} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{36} - s_0) \quad (343)$$

$$bcha_{36} = 3120/18 \quad (344)$$

$$bchs_{36} = 0 \quad (345)$$

$$bphs_{36} = 0 \quad (346)$$

$$\dot{E}_{36} = \dot{m}_{36} \cdot h_{36} \quad (347)$$

$$\dot{B}_{36} = \dot{m}_{36} \cdot (bpha_{36} + bcha_{36}) \quad (348)$$

Estado 37

$$T_{37} = 60 \quad (349)$$

$$P_{37} = P_{36} \quad (350)$$

$$h_{37} = h(\text{Water}; T = T_{37}; P = P_{37}) \quad (351)$$

$$s_{37} = s(\text{Water}; T = T_{37}; P = P_{37}) \quad (352)$$

$$bpha_{37} = (h_{37} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{37} - s_0) \quad (353)$$

$$bcha_{37} = 3120/18 \quad (354)$$

$$bchs_{37} = 0 \quad (355)$$

$$bphs_{37} = 0 \quad (356)$$

$$\dot{E}_{37} = \dot{m}_{37} \cdot h_{37} \quad (357)$$

$$\dot{B}_{37} = \dot{m}_{37} \cdot (bpha_{37} + bcha_{37}) \quad (358)$$

$$Q_{pasteurizado} = \dot{E}_{36} - \dot{E}_{37} \quad (359)$$

ciclo de refrigeración

$$Q_L = \dot{m}_{13} \cdot h_{13} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} \quad (360)$$

$$Q_L/W_{neto} = COP_r \quad (361)$$

Trabajo de equipos

$$W_{E5} = \dot{m}_5 \cdot \frac{h_4 - h_5}{\eta_{bombas}} \quad E5 \quad (362)$$

$$W_{E9} = \frac{\dot{E}_{18} - \dot{E}_{19}}{\eta_{bombas}} \quad E9 \quad (363)$$

$$W_{E3} = 0, 75 \quad (364)$$

exergía destruida

$$\dot{B}_2 - \dot{B}_4 - \dot{B}_{11} - \dot{B}_{35} + W_{E3} = B_{d3} \quad E3 \quad (365)$$

$$-W_{E5} + \dot{B}_4 - \dot{B}_5 = B_{d5} \quad E5 \quad (366)$$

$$\dot{B}_5 + \dot{B}_{36} - \dot{B}_{37} - \dot{B}_6 = B_{d6} \quad E6 \quad (367)$$

$$\dot{B}_6 + \dot{B}_8 - \dot{B}_7 - \dot{B}_9 = B_{d7} \quad E7 \quad (368)$$

$$\dot{B}_{11} + \dot{B}_{20} - \dot{B}_{12} - \dot{B}_{24} = B_{d8} \quad E8 \quad (369)$$

$$-W_{E9} + \dot{B}_{18} - \dot{B}_{19} = B_{d9} \quad E9 \quad (370)$$

$$\dot{B}_{22} + \dot{B}_{23} + \dot{B}_{19} - \dot{B}_{21} - \dot{B}_{20} - \dot{B}_{36} = B_{d10} \quad E10 \quad (371)$$

$$\dot{B}_{12} + \dot{B}_{16} - \dot{B}_{17} - \dot{B}_{13} = B_{d11} \quad E11 \quad (372)$$

$$W_{neto} + \dot{B}_{13} - \dot{B}_{14} - \dot{B}_{15} = B_{d12} \quad E12 \quad (373)$$

Análisis termoeconómico

$$K_2 = 1 \quad (374)$$

$$K_{35} = 0 \quad (375)$$

$$K_{E5} = 1 \quad (376)$$

$$K_{37} = 0 \quad (377)$$



$$K_8 = 1 \quad (378)$$

$$K_9 = 0 \quad (379)$$

$$K_{24} = K_{15} \quad (380)$$

$$K_{15} = K_{14} \quad (381)$$

$$K_{14} = K_7 \quad (382)$$

$$K_{18} = 1 \quad (383)$$

$$K_{22} = 1 \quad (384)$$

$$K_{21} = 0 \quad (385)$$

$$K_{16} = 1 \quad (386)$$

$$K_{17} = 0 \quad (387)$$

$$K_{20} = K_{36} \quad (388)$$

$$K_{E12} = 1 \quad (389)$$

$$K_{E9} = 1 \quad (390)$$

$$K_{23} = 1 \quad (391)$$

$$K_{E3} = 1 \quad (392)$$

$$K_2 \cdot \dot{B}_2 - K_4 \cdot \dot{B}_4 - K_{11} \cdot \dot{B}_{11} - K_{35} \cdot \dot{B}_{35} + K_{E3} \cdot W_{E3} = 0 \quad E3 \quad (393)$$

$$-K_{E5} \cdot W_{E5} + K_4 \cdot \dot{B}_4 - K_5 \cdot \dot{B}_5 = 0 \quad E5 \quad (394)$$

$$K_5 \cdot \dot{B}_5 + K_{36} \cdot \dot{B}_{36} - K_{37} \cdot \dot{B}_{37} - K_6 \cdot \dot{B}_6 = 0 \quad E6 \quad (395)$$

$$K_6 \cdot \dot{B}_6 + K_8 \cdot \dot{B}_8 - k_7 \cdot \dot{B}_7 - K_9 \cdot \dot{B}_9 = 0 \quad E7 \quad (396)$$

$$K_{11} \cdot \dot{B}_{11} + K_{20} \cdot \dot{B}_{20} - K_{12} \cdot \dot{B}_{12} - K_{24} \cdot \dot{B}_{24} = 0 \quad E8 \quad (397)$$

$$-K_{E9} \cdot W_{E9} + K_{18} \cdot \dot{B}_{18} - K_{19} \cdot \dot{B}_{19} = 0 \quad E9 \quad (398)$$

$$K_{22} \cdot \dot{B}_{22} + K_{23} \cdot \dot{B}_{23} + K_{19} \cdot \dot{B}_{19} - K_{21} \cdot \dot{B}_{21} - K_{20} \cdot \dot{B}_{20} - K_{36} \cdot \dot{B}_{36} = 0 \quad E10 \quad (399)$$

$$K_{12} \cdot \dot{B}_{12} + K_{16} \cdot \dot{B}_{16} - K_{17} \cdot \dot{B}_{17} - K_{13} \cdot \dot{B}_{13} = 0 \quad E11 \quad (400)$$

$$K_{E12} \cdot W_{neto} + K_{13} \cdot \dot{B}_{13} - K_{14} \cdot \dot{B}_{14} - K_{15} \cdot \dot{B}_{15} = 0 \quad E12 \quad (401)$$

$$C_2 = K_2 \cdot \dot{B}_2 \quad (402)$$

$$C_4 = K_4 \cdot \dot{B}_4 \quad (403)$$

$$C_5 = K_5 \cdot \dot{B}_5 \quad (404)$$

$$C_6 = K_6 \cdot \dot{B}_6 \quad (405)$$

$$C_7 = K_7 \cdot \dot{B}_7 \quad (406)$$

$$C_8 = K_8 \cdot \dot{B}_8 \quad (407)$$

$$C_9 = K_9 \cdot \dot{B}_9 \quad (408)$$

$$C_{11} = K_{11} \cdot \dot{B}_{11} \quad (409)$$

$$C_{12} = K_{12} \cdot \dot{B}_{12} \quad (410)$$

$$C_{13} = K_{13} \cdot \dot{B}_{13} \quad (411)$$

$$C_{14} = K_{14} \cdot \dot{B}_{14} \quad (412)$$

$$C_{15} = K_{15} \cdot \dot{B}_{15} \quad (413)$$

$$C_{16} = K_{16} \cdot \dot{B}_{16} \quad (414)$$

$$C_{17} = K_{17} \cdot \dot{B}_{17} \quad (415)$$

$$C_{18} = K_{18} \cdot \dot{B}_{18} \quad (416)$$

$$C_{19} = K_{19} \cdot \dot{B}_{19} \quad (417)$$

$$C_{20} = K_{20} \cdot \dot{B}_{20} \quad (418)$$

$$C_{21} = K_{21} \cdot \dot{B}_{21} \quad (419)$$

$$C_{22} = K_{22} \cdot \dot{B}_{22} \quad (420)$$

$$C_{23} = K_{23} \cdot \dot{B}_{23} \quad (421)$$

$$C_{24} = K_{24} \cdot \dot{B}_{24} \quad (422)$$

$$C_{35} = K_{35} \cdot \dot{B}_{35} \quad (423)$$

$$C_{36} = K_{36} \cdot \dot{B}_{36} \quad (424)$$

$$C_{37} = K_{37} \cdot \dot{B}_{37} \quad (425)$$

$$CU_2 = \frac{C_2}{\dot{m}_2} \quad (426)$$

$$CU_4 = \frac{C_4}{\dot{m}_4} \quad (427)$$

$$CU_5 = \frac{C_5}{\dot{m}_5} \quad (428)$$

$$CU_6 = \frac{C_6}{\dot{m}_6} \quad (429)$$

$$CU_7 = \frac{C_7}{\dot{m}_7} \quad (430)$$

$$CU_8 = \frac{C_8}{\dot{m}_8} \quad (431)$$

$$CU_9 = \frac{C_9}{\dot{m}_9} \quad (432)$$

$$CU_{11} = \frac{C_{11}}{\dot{m}_{11}} \quad (433)$$

$$CU_{12} = \frac{C_{12}}{\dot{m}_{12}} \quad (434)$$

$$CU_{13} = \frac{C_{13}}{\dot{m}_{13}} \quad (435)$$

$$CU_{14} = \frac{C_{14}}{\dot{m}_{14}} \quad (436)$$

$$CU_{15} = \frac{C_{15}}{\dot{m}_{15}} \quad (437)$$

$$CU_{16} = \frac{C_{16}}{\dot{m}_{16}} \quad (438)$$

$$CU_{17} = \frac{C_{17}}{\dot{m}_{17}} \quad (439)$$

$$CU_{18} = \frac{C_{18}}{\dot{m}_{18}} \quad (440)$$

$$CU_{19} = \frac{C_{19}}{\dot{m}_{19}} \quad (441)$$

$$CU_{20} = \frac{C_{20}}{\dot{m}_{20}} \quad (442)$$

$$CU_{21} = \frac{C_{21}}{\dot{m}_{21}} \quad (443)$$

$$CU_{22} = \frac{C_{22}}{\dot{m}_{22}} \quad (444)$$

$$CU_{23} = \frac{C_{23}}{\dot{m}_{23}} \quad (445)$$

$$CU_{24} = \frac{C_{24}}{\dot{m}_{24}} \quad (446)$$

$$CU_{35} = \frac{C_{35}}{\dot{m}_{35}} \quad (447)$$

$$CU_{36} = \frac{C_{36}}{\dot{m}_{36}} \quad (448)$$

$$CU_{37} = \frac{C_{37}}{\dot{m}_{37}} \quad (449)$$



## B. Anexo: Código EES para el primer caso de estudio

### OPTIMIZACIÓN - CASO1

#### Equations

Optimización de una planta piloto de aprovechamiento integral de naranja en términos energéticos y exergéticos.

VARIABLES DE ENTRADA

$$Fr = 0,5 \quad \% \text{ de jugo con respecto a la naranja} \quad (1)$$

$$Fc = 0,1 \quad \text{Fracción de cáscara} \quad (2)$$

$$Fv = 0,04 \quad \text{Fracción de vapor perdido en la extracción de aceite} \quad (3)$$

$$Fpm = 0,1 \quad \text{fracción de la naranja en la película} \quad (4)$$

$$Fpg = 0,07 \quad \text{Fracción de glicerina en las películas} \quad (5)$$

$$Fpp = 0,07 \quad \text{Fracción de pectina en las películas} \quad (6)$$

$$Fpc = 0,06 \quad \text{Fracción de celulosa en las películas} \quad (7)$$

$$Fs = 0,4 \quad \text{Fracción de semillas y bagazo} \quad (8)$$

$$Cp_{naranja} = 6,5 \quad \text{Calor específico de la naranja tomado de } \text{https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-8507-0_14(9)}$$

$$COP_r = 1,5 \quad (10)$$

$$\eta_{bombas} = 0,8 \quad (11)$$

$$Cp_{limoneno} = 1,834 \quad \text{https://www.chemed.com/cid/70-164-2/Limonene} \quad (12)$$

$$Mc = 2,73/100 \quad \text{Thermo-kinetics study of orange peel in air} \quad (13)$$

Composición de la cascara, C= 49,59/100 H= 6,95/100 N=0,66/100 S= 0,06/100 O=39,7/100 Cinza=3,05/100 Thermo-kinetics study of orange peel in air

$$Cc = 49,59/100 \quad (14)$$

$$Hc = 6,95/100 \quad (15)$$

$$Oc = 39,7/100 \quad (16)$$

$$Nc = 0,66/100 \quad (17)$$

$$Sc = 0,06/100 \quad (18)$$

$$Ec = 3,05/100 \quad (19)$$

$$PMs = \left( \frac{Cc/12 + Hc/1 + Oc/16 + Sc/32}{0,9695} \right)^{-1} \quad \text{Peso molecular de la cascara} \quad (20)$$

$$ys = \frac{\frac{1-Mc}{PMs}}{(Mc/18) + \left( \frac{1-Mc}{PMs} \right)} \quad (21)$$

$$y_a = \frac{M_c/18}{\left(\frac{1-M_c}{PMS}\right) + (M_c/18)} \quad (22)$$

$$PM = y_s \cdot PMS + y_a \cdot 18 \quad (23)$$

Composición del bagazo, C= 47/100 H= 6,9/100 N=1,3/100 S= 0,09/100 O=44,71/100 Cinza=3,05/100 Pyrolysis of orange waste: A thermo-kinetic study

$$M_{cb} = 5,7/100 \quad (24)$$

$$C_b = 47/100 \quad (25)$$

$$H_b = 6,9/100 \quad (26)$$

$$O_b = 44,71/100 \quad (27)$$

$$N_b = 1,3/100 \quad (28)$$

$$S_b = 0,09/100 \quad (29)$$

$$E_b = 3,05/100 \quad (30)$$

$$PM_b = \left( \frac{C_b/12 + H_b/1 + O_b/16 + S_b/32}{1} \right)^{-1} \quad \text{Peso molecular del bagazo} \quad (31)$$

$$y_b = \frac{\frac{1-M_c}{PMB}}{(M_{cb}/18) + \left(\frac{1-M_{cb}}{PMB}\right)} \quad (32)$$

$$y_{ab} = \frac{M_{cb}/18}{\left(\frac{1-M_{cb}}{PMB}\right) + (M_{cb}/18)} \quad (33)$$

$$PM_{ba} = y_b \cdot PM_b + y_{ab} \cdot 18 \quad (34)$$

Fracción molar de agua y naranja

$$Moles = 0,5/18 + 0,1/PM + 0,4/PM_{ba} \quad (35)$$

$$FM_a = 0,5/18/Moles \quad (36)$$

$$FM_n = 1 - FM_a \quad (37)$$

$$PMT = 0,5 \cdot 18 + 0,1 \cdot PM + 0,4 \cdot PM_{ba} \quad (38)$$

Cálculo de la relación estandar de exergía química de la cáscara

$$PCSc = 349,1 \cdot C_c \cdot 100 + 1178,3 \cdot H_c \cdot 100 + 100,5 \cdot S_c \cdot 100 - 103,4 \cdot O_c \cdot 100 - 15,1 \cdot N_c \cdot 100 - 21,1 \cdot E_c \cdot 100 \quad (39)$$

$$PCIC = PCSc - 2441,7 \cdot (9 \cdot H_c + M_c) \quad (40)$$

$$\phi_c = \frac{1,0438 + 0,1882 \cdot (H_c/C_c) - 0,2509 \cdot (1 + 0,7256 \cdot (H_c/C_c))}{1 - 0,3035 \cdot (O_c/C_c)} \quad \text{Exergy analysis of the energy consumption in the Colombian e}$$

Ambiente de referencia

$$X_{O_2ref} = 0,2059 \quad (42)$$

$$X_{N2ref} = 0,7748 \quad (43)$$

$$X_{CO2ref} = 0,0003 \quad (44)$$

$$X_{H2Oref} = 0,019 \quad (45)$$

Metano  $CH_4 + K \cdot \lambda (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow aCO_2 + bH_2O + cN_2 + dO_2$

$$k = 1,2 \quad (46)$$

$$\lambda = 2 \quad (47)$$

$$a = 1 \quad (48)$$

$$b = 2 \quad (49)$$

$$c = K \cdot 7,52 \quad (50)$$

$$d = (K - 1) \cdot \lambda \quad (51)$$

$$N_T = a + b + c + d \quad (52)$$

$$R_{AC} = (K \cdot \lambda \cdot 4,76) \cdot \left( \frac{MW(Air)}{MW(CH_4)} \right) \quad (53)$$

$$X_{CO2} = a/N_T \quad (54)$$

$$X_{H2O} = b/N_T \quad (55)$$

$$X_{N2} = c/N_T \quad (56)$$

$$X_{O2} = d/N_T \quad (57)$$

$$Y_{CO2} = \left( \frac{X_{CO2} \cdot MW(CO_2)}{X_{CO2} \cdot MW(CO_2) + X_{H2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N2} \cdot MW(N_2) + X_{O2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (58)$$

$$Y_{H2O} = \left( \frac{X_{H2O} \cdot MW(H_2O)}{X_{CO2} \cdot MW(CO_2) + X_{H2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N2} \cdot MW(N_2) + X_{O2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (59)$$

$$Y_{N2} = \left( \frac{X_{N2} \cdot MW(N_2)}{X_{CO2} \cdot MW(CO_2) + X_{H2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N2} \cdot MW(N_2) + X_{O2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (60)$$

$$Y_{O2} = \left( \frac{X_{O2} \cdot MW(O_2)}{X_{CO2} \cdot MW(CO_2) + X_{H2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N2} \cdot MW(N_2) + X_{O2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (61)$$

$$MM_{mix} = X_{CO2} \cdot MW(CO_2) + X_{H2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N2} \cdot MW(N_2) + X_{O2} \cdot MW(O_2) \quad (62)$$

Estados

Estado 0

$$T_0 = 25 \quad (63)$$

$$P_0 = 101,325 \quad (64)$$

$$h_0 = h(Water; T = T_0; P = P_0) \quad (65)$$

$$s_0 = s(Water; T = T_0; P = P_0) \quad (66)$$

$$h_{ref} = Y_{CO_2} \cdot h(CO_2; T = T_0) + Y_{H_2O} \cdot h(H_2O; T = T_0) + Y_{N_2} \cdot h(N_2; T = T_0) + Y_{O_2} \cdot h(O_2; T = T_0) \quad (67)$$

$$s_{ref} = Y_{CO_2} \cdot s(CO_2; T = T_0; P = P_0) + Y_{H_2O} \cdot s(H_2O; T = T_0; P = P_0) + Y_{N_2} \cdot s(N_2; T = T_0; P = P_0) + Y_{O_2} \cdot s(O_2; T = T_0; P = P_0) \quad (68)$$

Estado 1

$$\dot{m}_1 = (120/3600) \text{ [kg/s]} \quad (69)$$

Estado 2

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad (70)$$

$$T_2 = 25 \quad (71)$$

$$P_2 = 80 \quad (72)$$

$$h_{a2} = h(\text{Water}; T = T_2; P = P_2) \quad (73)$$

$$s_{a2} = s(\text{Water}; T = T_2; P = P_2) \quad (74)$$

$$bpha_2 = (h_0 - h_{a2}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_{a2}) \quad (75)$$

$$bcha_2 = 3120/18 \quad (76)$$

$$bchs_2 = 18700 \quad (77)$$

$$bphs_2 = 0 \quad (78)$$

$$ma_2 = 0,521 \cdot \dot{m}_2 \quad (79)$$

$$ms_2 = (1 - 0,521) \cdot \dot{m}_2 \quad (80)$$

$$\dot{E}_2 = ma_2 \cdot (bphs_2 + bchs_2) + ms_2 \cdot (bpha_2 + bcha_2) + (8,314/PMT) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,5 \cdot \ln(0,5) + (8,314/PMT) \cdot (T_0 + 273) \cdot (0,5) \cdot \ln(0,5) \quad (81)$$

Estado 3

$$\dot{m}_3 = Fr \cdot \dot{m}_2 \quad (82)$$

$$ma_3 = \dot{m}_3 \quad (83)$$

$$ms_3 = 0 \quad (84)$$

$$T_3 = 25 \quad (85)$$

$$P_3 = 80 \quad (86)$$

$$h_3 = h(\text{Water}; T = T_3; P = P_3) \quad (87)$$

$$s_3 = s(\text{Water}; T = T_3; P = P_3) \quad (88)$$

$$bpha_3 = (h_0 - h_3) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_3) \quad (89)$$

$$bcha_3 = 3120/18 \quad (90)$$

$$bchs_3 = 0 \quad (91)$$

$$bphs_3 = 0 \quad (92)$$

$$\dot{E}_3 = \dot{m}_3 \cdot h_3 \quad (93)$$



$$\dot{B}_3 = \dot{m}_3 \cdot (bpha_3 + bcha_3) \quad (94)$$

**Estado 4**

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (95)$$

$$T_4 = 25 \quad (96)$$

$$P_4 = 80 \quad (97)$$

$$h_4 = h(\text{Water}; T = T_4; P = P_4) \quad (98)$$

$$s_4 = s(\text{Water}; T = T_4; P = P_4) \quad (99)$$

$$bpha_4 = (h_0 - h_4) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_4) \quad (100)$$

$$bcha_4 = 3120/18 \quad (101)$$

$$bchs_4 = 0 \quad (102)$$

$$bphs_4 = 0 \quad (103)$$

$$\dot{E}_4 = \dot{m}_4 \cdot h_4 \quad (104)$$

$$\dot{B}_4 = \dot{m}_4 \cdot (bpha_4 + bcha_4) \quad (105)$$

**Estado 5**

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 \quad (106)$$

$$P_5 = 400 \quad 3 \text{ o } 4 \text{ bar, irreversible} \quad (107)$$

$$s_5 = s(\text{Water}; T = T_5; P = P_5) \quad (108)$$

$$h_5 = h(\text{Water}; T = T_5; P = P_5) \quad (109)$$

$$T_5 = T_4 \quad (110)$$

$$bpha_5 = (h_5 - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_5 - s_0) \quad (111)$$

$$bcha_5 = 3120/18 \quad (112)$$

$$bchs_5 = 0 \quad (113)$$

$$bphs_5 = 0 \quad (114)$$

$$\dot{E}_5 = \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (115)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{m}_5 \cdot (bpha_5 + bcha_5) \quad (116)$$

**Estado 6**

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_5 \quad (117)$$

$$P_6 = P_5 \quad (118)$$

$$T_6 = 95 \quad (119)$$

$$h_6 = h(\text{Water}; T = T_6; P = P_6) \quad (120)$$

$$s_6 = s(\text{Water}; T = T_6; P = P_6) \quad (121)$$

$$bpha_6 = (h_6 - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_6 - s_0) \quad (122)$$

$$bcha_6 = 3120/18 \quad (123)$$

$$bchs_6 = 0 \quad (124)$$

$$bphs_6 = 0 \quad (125)$$

$$\dot{E}_6 = \dot{m}_6 \cdot h_6 \quad (126)$$

$$\dot{B}_6 = \dot{m}_6 \cdot (bpha_6 + bcha_6) \quad (127)$$

$$Q_{\text{pasteurizado}} = \dot{E}_6 - \dot{E}_5 \quad (128)$$

#### Estado 7

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6 \quad (129)$$

$$P_7 = P_6 \quad (130)$$

$$h_7 = h(\text{Water}; T = T_7; P = P_7) \quad (131)$$

$$s_7 = s(\text{Water}; T = T_7; P = P_7) \quad (132)$$

$$bpha_7 = (h_7 - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_7 - s_0) \quad (133)$$

$$bcha_7 = 3120/18 \quad (134)$$

$$bchs_7 = 0 \quad (135)$$

$$bphs_7 = 0 \quad (136)$$

$$\dot{E}_7 = \dot{m}_7 \cdot h_7 \quad (137)$$

$$\dot{B}_7 = \dot{m}_7 \cdot (bpha_7 + bcha_7) \quad (138)$$

$$\dot{E}_6 - \dot{E}_7 = Q_{\text{pasteurización}} \quad (139)$$

#### Estado 8

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (140)$$

$$T_8 = 25 \quad (141)$$

$$P_8 = 80 \quad (142)$$

$$h_8 = h(\text{Water}; T = T_8; P = P_8) \quad (143)$$

$$s_8 = s(\text{Water}; T = T_8; P = P_8) \quad (144)$$

$$bpha_8 = (h_0 - h_8) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_8) \quad (145)$$

$$bcha_8 = 3120/18 \quad (146)$$

$$bchs_8 = 0 \quad (147)$$

$$bphs_8 = 0 \quad (148)$$

$$\dot{E}_8 = \dot{m}_8 \cdot h_8 \quad (149)$$

$$\dot{B}_8 = \dot{m}_8 \cdot (bpha_8 + bcha_8) \quad (150)$$

**Estado 9**

$$\dot{m}_9 = 0,01703 \quad (151)$$

$$P_9 = P_8 \quad (152)$$

$$T_9 = 85 \quad (153)$$

$$h_9 = h(\text{Water}; T = T_9; P = P_9) \quad (154)$$

$$s_9 = s(\text{Water}; T = T_9; P = P_9) \quad (155)$$

$$bpha_9 = (h_9 - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_9 - s_0) \quad (156)$$

$$bcha_9 = 3120/18 \quad (157)$$

$$bchs_9 = 0 \quad (158)$$

$$bphs_9 = 0 \quad (159)$$

$$\dot{E}_9 = \dot{m}_9 \cdot h_9 \quad (160)$$

$$\dot{B}_9 = \dot{m}_9 \cdot (bpha_9 + bcha_9) \quad (161)$$

$$Q_{\text{pasteurización}} = \dot{E}_9 - \dot{E}_8 \quad \text{Estado 10} \quad (162)$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \quad (163)$$

**Estado 11**

$$\dot{m}_{11} = Fc \cdot \dot{m}_2 \quad (164)$$

$$ma_{11} = \dot{m}_{11} \cdot Mc \quad (165)$$

$$ms_{11} = \dot{m}_{11} \cdot (1 - Mc) \quad (166)$$

$$ha_{11} = h(\text{Water}; T = T_{11}; P = 400) \quad (167)$$

$$hs_{11} = Cp_{\text{naranja}} \cdot T_{11} \quad (168)$$

$$sa_{11} = s(\text{Water}; T = T_{11}; P = 400) \quad (169)$$

$$T_{11} = 25 \quad (170)$$

$$h_{11} = \frac{ma_{11} \cdot ha_{11} + ms_{11} \cdot hs_{11}}{\dot{m}_{11}} \quad (171)$$

$$\dot{E}_{11} = \dot{m}_{11} \cdot h_{11} \quad (172)$$

$$bchs_{11} = \phi_c \cdot PCIc \quad (173)$$

$$bcha_{11} = 3120/18 \quad (174)$$

$$bpha_{11} = (ha_{11} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (sa_{11} - s_0) \quad (175)$$

$$bphs_{11} = Cp_{naranaja} \cdot (T_{11} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{naranaja} \cdot \ln \left( \frac{T_{11} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (176)$$

$$\dot{E}_{11} = ma_{11} \cdot (bcha_{11} + bpha_{11}) + (bphs_{11} + bchs_{11}) \cdot ms_{11} + (8,314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,0273 \cdot \ln(0,0273) + (8,314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot (1$$

Estado 12

$$\dot{m}_{12} = (\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \quad (178)$$

$$FMAC = 0,03 \cdot \frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_{12}} \quad (179)$$

$$FMagua = \frac{\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}}{\dot{m}_{12}} \quad (180)$$

$$P_{12} = 400 \quad (181)$$

$$T_{12} = T(\text{Water}; P = P_{12}; h = ha_{12}) \quad (182)$$

$$x_{12} = x(\text{Water}; T = T_{12}; h = h_{12}) \quad (183)$$

$$s_{12} = s(\text{Water}; h = h_{12}; P = P_{12}) \quad (184)$$

$$bchs_{12} = 18700 \quad (185)$$

$$bphs_{12} = Cp_{limoneno} \cdot (T_{12} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{limoneno} \cdot \ln \left( \frac{T_{12} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (186)$$

$$bpha_{12} = (ha_{12} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s(\text{Water}; x = x_{12}; P = P_{12}) - s_0) \quad (187)$$

$$bcha_{12} = 3120/18 \quad (188)$$

$$\frac{ha_{12} \cdot (\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot Cp_{limoneno}}{\dot{m}_{12}} = h_{12} \quad (189)$$

$$\dot{E}_{12} = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} \quad (190)$$

$$\dot{B}_{12} = (\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot (bpha_{12} + bcha_{12}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot (bchs_{11} + bphs_{11}) + (8,314/18) \cdot (T_0 + 273) \cdot (FMAC) \cdot \ln(FMAC) + (8,314,$$

$$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{24} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{20} \quad (192)$$

Estado 13

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{12} \quad (193)$$

$$P_{13} = P_{12} \quad (194)$$

$$T_{13} = 25 + 10 \quad (195)$$

$$h_{13} = \frac{(\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot h(\text{Water}; T = T_{13}; P = P_{13}) + Cp_{limoneno} \cdot T_{13} \cdot 0,03 \cdot \dot{m}_{11}}{\dot{m}_{13}} \quad (196)$$

$$ha_{13} = h(\text{Water}; T = T_{13}; P = P_{13}) \quad (197)$$

$$sa_{13} = s(\text{Water}; T = T_{13}; P = P_{13}) \quad (198)$$

$$bchs_{13} = 18700 \quad (199)$$

$$bphs_{13} = Cp_{limoneno} \cdot (T_{13} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{limoneno} \cdot \ln \left( \frac{T_{13} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (200)$$

$$bpha_{13} = (ha_{13} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (sa_{13} - s_0) \quad (201)$$

$$bcha_{13} = 3120/18 \quad (202)$$

$$\dot{E}_{13} = \dot{m}_{13} \cdot h_{13} \quad (203)$$

$$\dot{B}_{13} = (\dot{m}_{13} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot (bpha_{13} + bcha_{13}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot (bchs_{13} + bphs_{13}) \quad (204)$$

#### Estado 14

$$\dot{m}_{14} = 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \quad (205)$$

$$T_{14} = 5 \quad (206)$$

$$P_{13} = P_{14} \quad (207)$$

$$h_{14} = Cp_{\text{timoneno}} \cdot T_{14} \quad (208)$$

$$bchs_{14} = 18700 \quad (209)$$

$$bphs_{14} = Cp_{\text{timoneno}} \cdot (T_{14} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{\text{timoneno}} \cdot \ln \left( \frac{T_{14} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (210)$$

$$bpha_{14} = 0 \quad (211)$$

$$bcha_{14} = 0 \quad (212)$$

$$\dot{B}_{14} = (bphs_{14} + bchs_{14}) \cdot \dot{m}_{14} \quad (213)$$

#### Estado 15

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{13} - \dot{m}_{14} \quad (214)$$

$$T_{15} = 5 \quad (215)$$

$$P_{15} = 80 \quad (216)$$

$$h_{15} = h(\text{Water}; T = T_{15}; P = P_{15}) \quad (217)$$

$$s_{15} = s(\text{Water}; T = T_{15}; P = P_{15}) \quad (218)$$

$$bpha_{15} = (h_{15} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{15} - s_0) \quad (219)$$

$$bcha_{15} = 3120/18 \quad (220)$$

$$bchs_{15} = 0 \quad (221)$$

$$bphs_{15} = 0 \quad (222)$$

$$\dot{E}_{15} = \dot{m}_{15} \cdot h_{15} \quad (223)$$

$$\dot{B}_{15} = \dot{m}_{15} \cdot (bpha_{15} + bcha_{15}) \quad (224)$$

#### Estado 16

$$\dot{m}_{16} = 2 \cdot \dot{m}_{12} \quad (225)$$

$$T_{16} = 25 \quad (226)$$

$$P_{16} = 80 \quad (227)$$

$$h_{16} = h(\text{Water}; T = T_{16}; P = P_{16}) \quad (228)$$

$$s_{16} = s(\text{Water}; T = T_{16}; P = P_{16}) \quad (229)$$

$$bpha_{16} = (h_0 - h_{16}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_{16}) \quad (230)$$

$$bcha_{16} = 3120/18 \quad (231)$$

$$bchs_{16} = 0 \quad (232)$$

$$bphs_{16} = 0 \quad (233)$$

$$\dot{E}_{16} = \dot{m}_{16} \cdot h_{16} \quad (234)$$

$$\dot{B}_{16} = \dot{m}_{16} \cdot (bpha_{16} + bcha_{16}) \quad (235)$$

Estado 17

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{16} \quad (236)$$

$$P_{17} = P_{16} \quad (237)$$

$$-\dot{E}_{13} + \dot{E}_{12} = Q_{accite} \quad (238)$$

$$Q_{accite} = \dot{E}_{17} - \dot{E}_{16} \quad (239)$$

$$T_{17} = T(\text{Water}; P = P_{17}; h = h_{17}) \quad (240)$$

$$s_{17} = s(\text{Water}; h = h_{17}; P = P_{17}) \quad (241)$$

$$bpha_{17} = (h_{17} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{17} - s_0) \quad (242)$$

$$bcha_{17} = 3120/18 \quad (243)$$

$$bchs_{17} = 0 \quad (244)$$

$$bphs_{17} = 0 \quad (245)$$

$$\dot{E}_{17} = \dot{m}_{17} \cdot h_{17} \quad (246)$$

$$\dot{B}_{17} = \dot{m}_{17} \cdot (bpha_{17} + bcha_{17}) \quad (247)$$

Estado 18

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} \quad (248)$$

$$T_{18} = T(\text{Water}; P = P_{18}; h = h_{18}) \quad (249)$$

$$P_{18} = 80 \quad (250)$$

$$\dot{m}_{41} \cdot h_{41} + \dot{m}_{39} \cdot h_{39} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} \quad (251)$$

$$s_{18} = s(\text{Water}; T = T_{18}; P = P_{18}) \quad (252)$$

$$bpha_{18} = (h_{18} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{18} - s_0) \quad (253)$$

$$bcha_{18} = 3120/18 \quad (254)$$

$$bchs_{18} = 0 \quad (255)$$

$$bphs_{18} = 0 \quad (256)$$

$$\dot{E}_{18} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} \quad (257)$$

$$\dot{B}_{18} = \dot{m}_{18} \cdot (bpha_{18} + bcha_{18}) \quad (258)$$

Estado 19

$$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{20} + \dot{m}_{36} \quad (259)$$

$$P_{19} = 400 \quad 3 \text{ o } 4 \text{ bar} \quad (260)$$

$$T_{19} = T_{18} \quad (261)$$

$$h_{19} = h(\text{Water}; T = T_{19}; P = P_{19}) \quad (262)$$

$$s_{19} = s(\text{Water}; T = T_{19}; P = P_{19}) \quad (263)$$

$$bpha_{19} = (h_{19} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{19} - s_0) \quad (264)$$

$$bcha_{19} = 3120/18 \quad (265)$$

$$bchs_{19} = 0 \quad (266)$$

$$bphs_{19} = 0 \quad (267)$$

$$\dot{E}_{19} = \dot{m}_{19} \cdot h_{19} \quad (268)$$

$$\dot{B}_{19} = \dot{m}_{19} \cdot (bpha_{19} + bcha_{19}) \quad (269)$$

Ir de atras para adelante!

$$\dot{m}_{20} = 6,5 \cdot \dot{m}_{11} \quad (270)$$

$$P_{20} = P_{19} \quad (271)$$

$$T_{20} = T_{\text{sat}}(\text{Water}; P = P_{20}) \quad (272)$$

$$h_{20} = h(\text{Water}; x = 1; P = P_{20}) \quad (273)$$

$$s_{20} = s(\text{Water}; x = 1; P = P_{20}) \quad (274)$$

$$bpha_{20} = (h_{20} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{20} - s_0) \quad (275)$$

$$bcha_{20} = 3120/18 \quad (276)$$

$$bchs_{20} = 0 \quad (277)$$

$$bphs_{20} = 0 \quad (278)$$

$$\dot{E}_{20} = \dot{m}_{20} \cdot h_{20} \quad (279)$$

$$\dot{B}_{20} = \dot{m}_{20} \cdot (bpha_{20} + bcha_{20}) \quad (280)$$

$$Q_{\text{vaporización}} = \dot{E}_{20} + \dot{E}_{36} - \dot{E}_{19} \quad (281)$$

Estado 21

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{23} + \dot{m}_{22} \quad (282)$$

$$T_{21} = 400 \quad (283)$$

$$h_{21} = Y_{CO_2} \cdot h(CO_2; T = T_{21}) + Y_{H_2O} \cdot h(H_2O; T = T_{21}) + Y_{N_2} \cdot h(N_2; T = T_{21}) + Y_{O_2} \cdot h(O_2; T = T_{21}) \quad (284)$$

$$P_{21} = 80 \quad (285)$$

$$s_{21} = Y_{CO_2} \cdot s(CO_2; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{H_2O} \cdot s(H_2O; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{N_2} \cdot s(N_2; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{O_2} \cdot s(O_2; T = T_{21}; P = P_{21}) \quad (286)$$

$$bphs_{21} = (h_{21} - h_{ref}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{21} - s_{ref}) \quad (287)$$

$$\dot{m}_{21} \cdot h_{21} = \dot{m}_{22} \cdot h_{22} + \dot{m}_{23} \cdot LHV + \dot{m}_{19} \cdot h_{19} - \dot{m}_{20} \cdot h_{20} \quad (288)$$

$$bchs_{21} = (8,314/MM_{mix}) \cdot (T_0 + 273,15) \cdot (X_{CO_2} \cdot \ln(X_{CO_2}/X_{CO_2ref}) + X_{H_2O} \cdot \ln(X_{H_2O}/X_{H_2Oref}) + X_{N_2} \cdot \ln(X_{N_2}/X_{N_2ref}) + X_{O_2} \cdot \ln(X_{O_2}/X_{O_2ref})) \quad (289)$$

$$bpha_{21} = 0 \quad (290)$$

$$bcha_{21} = 0 \quad (291)$$

$$\dot{E}_{21} = \dot{m}_{21} \cdot h_{21} \quad (292)$$

$$\dot{B}_{21} = \dot{m}_{21} \cdot (bphs_{21} + bchs_{21}) \quad (293)$$

Estado 22

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23} \cdot R_{AC} \quad (294)$$

$$T_{22} = 25 \quad (295)$$

$$P_{22} = 80 \quad (296)$$

$$h_{22} = h(Air; T = T_{22}) \quad (297)$$

$$s_{22} = s(Air; T = T_{22}; P = P_{22}) \quad (298)$$

$$bphs_{22} = (h(Air; T = 25) - h_{22}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s(Air; T = 25; P = 101,325) - s_{22}) \quad (299)$$

$$bchs_{22} = 0 \quad (300)$$

$$bpha_{22} = 0 \quad (301)$$

$$bcha_{22} = 0 \quad (302)$$

$$\dot{E}_{22} = \dot{m}_{22} \cdot h_{22} \quad (303)$$

$$\dot{B}_{22} = \dot{m}_{22} \cdot (bphs_{22} + bchs_{22}) \quad (304)$$

Estado 23

$$T_{23} = 25 \quad (305)$$

$$P_{23} = 80 \quad (306)$$

$$LHV = 50000 \quad (307)$$

$$bphs_{23} = 0 \quad (308)$$

$$bchs_{23} = 52281,875 \quad (309)$$

$$bpha_{23} = 0 \quad (310)$$



$$bcha_{23} = 0 \quad (311)$$

$$\dot{B}_{23} = \dot{m}_{23} \cdot (bchs_{23} + bpha_{23}) \quad (312)$$

Estado 24

$$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{11} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11} + 0,17 \cdot \dot{m}_{11} \quad (313)$$

$$ma_{24} = (\dot{m}_{11} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot Mc + 0,17 \cdot \dot{m}_{11} \quad (314)$$

$$ms_{24} = \dot{m}_{24} - ma_{24} \quad (315)$$

$$T_{24} = T_{sat}(\text{Water}; P = P_{24}) \quad (316)$$

$$P_{24} = 400 \quad (317)$$

$$h_{24} = \frac{ms_{24} \cdot Cp_{naranja} \cdot T_{24} + ma_{24} \cdot h(\text{Water}; x = 0; P = P_{24})}{\dot{m}_{24}} \quad (318)$$

$$\dot{E}_{24} = \dot{m}_{24} \cdot h_{24} \quad (319)$$

$$sa_{24} = s(\text{Water}; x = 0; P = P_{24}) \quad (320)$$

$$bpha_{24} = (h(\text{Water}; x = 0; P = P_{24}) - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (sa_{24} - s_0) \quad (321)$$

$$bcha_{24} = 3120/18 \quad (322)$$

$$bchs_{24} = \phi_c \cdot PCIc \quad (323)$$

$$bphs_{24} = Cp_{naranja} \cdot (T_{24} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{naranja} \cdot \ln\left(\frac{T_{24} + 273,15}{T_0 + 273,15}\right) \quad (324)$$

$$\dot{B}_{24} = ma_{24} \cdot (bpha_{24} + bcha_{24}) + ms_{24} \cdot (bchs_{24} + bphs_{24}) + (8,314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,0273 \cdot \ln(0,0273) + (8,314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot (1$$

Estado 25

$$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{24} \quad (326)$$

Estado 26

$$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{25} \quad (327)$$

Estado 27

$$\dot{m}_{27} = \frac{\dot{m}_{26}}{F_{pm}} \quad (328)$$

Estado 28

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{27} \quad (329)$$

Mientras se conoce las perdidas en masa de las películas al secarse

$$\dot{m}_{29} = \frac{\dot{m}_{31} + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{33}}{0,93} \quad (330)$$

Estado 30

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{28} - \dot{m}_{29} \quad (331)$$

Estado 31 Glicerina

$$\dot{m}_{31} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pg} \quad (332)$$

Estado 32 Pectina

$$\dot{m}_{32} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pp} \quad (333)$$

Estado 33 Celulosa bacteriana

$$\dot{m}_{33} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pc} \quad (334)$$

Estado 34 Celulosa bacteriana

$$\dot{m}_{34} = \dot{m}_{27} - \dot{m}_{33} - \dot{m}_{32} - \dot{m}_{31} - \dot{m}_{25} \quad (335)$$

Estado 35

$$\dot{m}_{35} = F_s \cdot \dot{m}_2 \quad (336)$$

$$m_{a35} = 0,057 \cdot \dot{m}_{35} \quad (337)$$

$$m_{s35} = \dot{m}_{35} - m_{a35} \quad (338)$$

$$T_{35} = 25 \quad (339)$$

$$P_{35} = 80 \quad (340)$$

$$bpha_{35} = 0 \quad (341)$$

$$bcha_{35} = 3120/18 \quad (342)$$

$$bchs_{35} = 18700 \quad (343)$$

$$bphs_{35} = 0 \quad (344)$$

$$\dot{B}_{35} = m_{a35} \cdot (bpha_{35} + bcha_{35}) + m_{s35} \cdot (bphs_{35} + bchs_{35}) + (8,314/PMba) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,057 \cdot \ln(0,057) + (8,314/PMba) \cdot (T_0 + 273) \cdot$$

Estado 36

$$\dot{m}_{36} = \dot{m}_{37} \quad (346)$$

$$T_{36} = T_{20} \quad (347)$$

$$P_{36} = P_{20} \quad (348)$$

$$h_{36} = h_{20} \quad (349)$$

$$s_{36} = s_{20} \quad (350)$$

$$bpha_{36} = (h_{36} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{36} - s_0) \quad (351)$$

$$bcha_{36} = 3120/18 \quad (352)$$

$$bchs_{36} = 0 \quad (353)$$

$$bphs_{36} = 0 \quad (354)$$

$$\dot{E}_{36} = \dot{m}_{36} \cdot h_{36} \quad (355)$$

$$\dot{B}_{36} = \dot{m}_{36} \cdot (bpha_{36} + bcha_{36}) \quad (356)$$

Estado 37

$$T_{37} = 60 \quad (357)$$

$$P_{37} = P_{36} \quad (358)$$

$$h_{37} = h(\text{Water}; T = T_{37}; P = P_{37}) \quad (359)$$

$$s_{37} = s(\text{Water}; T = T_{37}; P = P_{37}) \quad (360)$$

$$bpha_{37} = (h_{37} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{37} - s_0) \quad (361)$$

$$bcha_{37} = 3120/18 \quad (362)$$

$$bchs_{37} = 0 \quad (363)$$

$$bphs_{37} = 0 \quad (364)$$

$$\dot{E}_{37} = \dot{m}_{37} \cdot h_{37} \quad (365)$$

$$\dot{B}_{37} = \dot{m}_{37} \cdot (bpha_{37} + bcha_{37}) \quad (366)$$

$$Q_{\text{pasteurizado}} = \dot{E}_{36} - \dot{E}_{37} \quad (367)$$

Estado 38

$$\dot{m}_{38} = \dot{m}_{20} \quad (368)$$

$$T_{38} = 25 \quad (369)$$

$$P_{38} = 80 \quad (370)$$

$$h_{38} = h(\text{Water}; T = T_{38}; P = P_{38}) \quad (371)$$

$$s_{38} = s(\text{Water}; T = T_{38}; P = P_{38}) \quad (372)$$

$$bpha_{38} = (h_0 - h_{38}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_{38}) \quad (373)$$

$$bcha_{38} = 3120/18 \quad (374)$$

$$bchs_{38} = 0 \quad (375)$$

$$bphs_{38} = 0 \quad (376)$$

$$\dot{E}_{38} = \dot{m}_{38} \cdot h_{38} \quad (377)$$

$$\dot{B}_{38} = \dot{m}_{38} \cdot (bpha_{38} + bcha_{38}) \quad (378)$$

Estado 39

$$P_{39} = 80 \quad (379)$$

$$\dot{m}_{38} = \dot{m}_{39} \quad (380)$$

$$\dot{m}_{39} \cdot h_{39} + \dot{m}_{40} \cdot h_{40} = \dot{m}_{38} \cdot h_{38} + \dot{m}_{21} \cdot h_{21} \quad (381)$$

$$T_{39} = T(\text{Water}; P = P_{39}; h = h_{39}) \quad (382)$$

$$s_{39} = s(\text{Water}; h = h_{39}; P = P_{39}) \quad (383)$$

$$bpha_{39} = (h_{39} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{39} - s_0) \quad (384)$$

$$bcha_{39} = 3120/18 \quad (385)$$

$$bchs_{39} = 0 \quad (386)$$

$$bphs_{39} = 0 \quad (387)$$

$$\dot{E}_{39} = \dot{m}_{39} \cdot h_{39} \quad (388)$$

$$\dot{B}_{39} = \dot{m}_{39} \cdot (bpha_{39} + bcha_{39}) \quad (389)$$

#### Estado 40

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{40} \quad (390)$$

$$T_{40} = 200 \quad (391)$$

$$h_{40} = Y_{CO_2} \cdot h(CO_2; T = T_{40}) + Y_{H_2O} \cdot h(H_2O; T = T_{40}) + Y_{N_2} \cdot h(N_2; T = T_{40}) + Y_{O_2} \cdot h(O_2; T = T_{40}) \quad (392)$$

$$P_{40} = 80 \quad (393)$$

$$s_{40} = Y_{CO_2} \cdot s(CO_2; T = T_{40}; P = P_{40}) + Y_{H_2O} \cdot s(H_2O; T = T_{40}; P = P_{40}) + Y_{N_2} \cdot s(N_2; T = T_{40}; P = P_{40}) + Y_{O_2} \cdot s(O_2; T = T_{40}; P = P_{40}) \quad (394)$$

$$bpha_{40} = (h_{40} - h_{ref}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{40} - s_{ref}) \quad (395)$$

$$bchs_{40} = (8,314/MM_{mix}) \cdot (T_0 + 273,15) \cdot (X_{CO_2} \cdot \ln(X_{CO_2}/X_{CO_2ref}) + X_{H_2O} \cdot \ln(X_{H_2O}/X_{H_2Oref}) + X_{N_2} \cdot \ln(X_{N_2}/X_{N_2ref}) + X_{O_2} \cdot \ln(X_{O_2}/X_{O_2ref})) \quad (396)$$

$$bcha_{40} = 0 \quad (397)$$

$$bpha_{40} = 0 \quad (398)$$

$$\dot{E}_{40} = \dot{m}_{40} \cdot h_{40} \quad (399)$$

$$\dot{B}_{40} = \dot{m}_{40} \cdot (bpha_{40} + bchs_{40}) \quad (400)$$

#### Estado 41

$$\dot{m}_{41} = \dot{m}_{37} \quad (401)$$

$$P_{41} = 80 \quad (402)$$

$$T_{41} = T_{37} \quad (403)$$

$$h_{41} = h(\text{Water}; T = T_{41}; P = P_{41}) \quad (404)$$

$$s_{41} = s(\text{Water}; T = T_{41}; P = P_{41}) \quad (405)$$

$$bpha_{41} = (h_{41} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{41} - s_0) \quad (406)$$

$$bcha_{41} = 3120/18 \quad (407)$$

$$bchs_{41} = 0 \quad (408)$$

$$bphs_{41} = 0 \quad (409)$$

$$\dot{E}_{41} = \dot{m}_{41} \cdot h_{41} \quad (410)$$

$$\dot{B}_{41} = \dot{m}_{41} \cdot (bpha_{41} + bcha_{41}) \quad (411)$$

ciclo de refrigeración

$$Q_L = \dot{m}_{13} \cdot h_{13} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} \quad (412)$$

$$Q_L/W_{neto} = COP_r \quad (413)$$

Trabajo de equipos

$$W_{E5} = \dot{m}_5 \cdot \frac{h_4 - h_5}{\eta_{bombas}} \quad E5 \quad (414)$$

$$W_{E9} = \frac{\dot{E}_{18} - \dot{E}_{19}}{\eta_{bombas}} \quad E9 \quad (415)$$

$$W_{E3} = 0,75 \quad (416)$$

exergía destruida

$$\dot{B}_2 - \dot{B}_4 - \dot{B}_{11} - \dot{B}_{35} + W_{E3} = B_{d3} \quad E3 \quad (417)$$

$$-W_{E5} + \dot{B}_4 - \dot{B}_5 = B_{d5} \quad E5 \quad (418)$$

$$\dot{B}_5 + \dot{B}_{36} - \dot{B}_{37} - \dot{B}_6 = B_{d6} \quad E6 \quad (419)$$

$$\dot{B}_6 + \dot{B}_8 - \dot{B}_7 - \dot{B}_9 = B_{d7} \quad E7 \quad (420)$$

$$\dot{B}_{11} + \dot{B}_{20} - \dot{B}_{12} - \dot{B}_{24} = B_{d8} \quad E8 \quad (421)$$

$$-W_{E9} + \dot{B}_{18} - \dot{B}_{19} = B_{d9} \quad E9 \quad (422)$$

$$\dot{B}_{22} + \dot{B}_{23} + \dot{B}_{19} - \dot{B}_{21} - \dot{B}_{20} - \dot{B}_{36} = B_{d10} \quad E10 \quad (423)$$

$$\dot{B}_{12} + \dot{B}_{16} - \dot{B}_{17} - \dot{B}_{13} = B_{d11} \quad E11 \quad (424)$$

$$W_{neto} + \dot{B}_{13} - \dot{B}_{14} - \dot{B}_{15} = B_{d12} \quad E12 \quad (425)$$

$$\dot{B}_{21} + \dot{B}_{38} - \dot{B}_{39} - \dot{B}_{40} = B_{d18} \quad E18 \quad (426)$$

$$\dot{B}_{41} + \dot{B}_{39} - \dot{B}_{18} = B_{d19} \quad E19 \quad (427)$$

$$\dot{B}_{37} - \dot{B}_{41} = B_{d20} \quad E20 \quad (428)$$

análisis termoeconómico

$$K_2 = 1 \quad (429)$$

$$K_{35} = 0 \quad (430)$$

$$K_{E3} = 1 \quad (431)$$

$$K_{E5} = 1 \quad (432)$$

$$K_8 = 1 \quad (433)$$

$$K_9 = 0 \quad (434)$$

$$K_7 = K_{14} \quad (435)$$

$$K_{14} = K_{15} \quad (436)$$

$$K_{15} = K_{24} \quad (437)$$

$$K_{E9} = 1 \quad (438)$$

$$K_{22} = 1 \quad (439)$$

$$K_{23} = 1 \quad (440)$$

$$K_{20} = K_{36} \quad (441)$$

$$K_{16} = 1 \quad (442)$$

$$K_{17} = 0 \quad (443)$$

$$K_{E12} = 1 \quad (444)$$

$$K_{38} = 1 \quad (445)$$

$$K_{40} = 0 \quad (446)$$

$$K_{37} = K_{41} \quad (447)$$

$$K_{21} = K_{40} \quad (448)$$

$$K_2 \cdot \dot{B}_2 - K_4 \cdot \dot{B}_4 - K_{11} \cdot \dot{B}_{11} - K_{35} \cdot \dot{B}_{35} + K_{E3} \cdot W_{E3} = 0 \quad E3 \quad (449)$$

$$-K_{E5} \cdot W_{E5} + K_4 \cdot \dot{B}_4 - K_5 \cdot \dot{B}_5 = 0 \quad E5 \quad (450)$$

$$K_5 \cdot \dot{B}_5 + K_{36} \cdot \dot{B}_{36} - K_{37} \cdot \dot{B}_{37} - K_6 \cdot \dot{B}_6 = 0 \quad E6 \quad (451)$$

$$K_6 \cdot \dot{B}_6 + K_8 \cdot \dot{B}_8 - K_7 \cdot \dot{B}_7 - K_9 \cdot \dot{B}_9 = 0 \quad E7 \quad (452)$$

$$K_{11} \cdot \dot{B}_{11} + K_{20} \cdot \dot{B}_{20} - K_{12} \cdot \dot{B}_{12} - K_{24} \cdot \dot{B}_{24} = 0 \quad E8 \quad (453)$$

$$-K_{E9} \cdot W_{E9} + K_{18} \cdot \dot{B}_{18} - K_{19} \cdot \dot{B}_{19} = 0 \quad E9 \quad (454)$$

$$K_{22} \cdot \dot{B}_{22} + K_{23} \cdot \dot{B}_{23} + K_{19} \cdot \dot{B}_{19} - K_{21} \cdot \dot{B}_{21} - K_{20} \cdot \dot{B}_{20} - K_{36} \cdot \dot{B}_{36} = 0 \quad E10 \quad (455)$$

$$K_{12} \cdot \dot{B}_{12} + K_{16} \cdot \dot{B}_{16} - K_{17} \cdot \dot{B}_{17} - K_{13} \cdot \dot{B}_{13} = 0 \quad E11 \quad (456)$$

$$K_{E12} \cdot W_{neto} + K_{13} \cdot \dot{B}_{13} - K_{14} \cdot \dot{B}_{14} - K_{15} \cdot \dot{B}_{15} = 0 \quad E12 \quad (457)$$

$$K_{21} \cdot \dot{B}_{21} + K_{38} \cdot \dot{B}_{38} - K_{39} \cdot \dot{B}_{39} - K_{40} \cdot \dot{B}_{40} = 0 \quad E18 \quad (458)$$

$$K_{41} \cdot \dot{B}_{41} + K_{39} \cdot \dot{B}_{39} - K_{18} \cdot \dot{B}_{18} = 0 \quad E19 \quad (459)$$

$$K_{37} \cdot \dot{B}_{37} - K_{36} \cdot \dot{B}_{41} = 0 \quad E20 \quad (460)$$

$$C_2 = K_2 \cdot \dot{B}_2 \quad (461)$$

$$C_4 = K_4 \cdot \dot{B}_4 \quad (462)$$

$$C_5 = K_5 \cdot \dot{B}_5 \quad (463)$$

$$C_6 = K_6 \cdot \dot{B}_6 \quad (464)$$

$$C_7 = K_7 \cdot \dot{B}_7 \quad (465)$$

$$C_8 = K_8 \cdot \dot{B}_8 \quad (466)$$

$$C_9 = K_9 \cdot \dot{B}_9 \quad (467)$$

$$C_{11} = K_{11} \cdot \dot{B}_{11} \quad (468)$$

$$C_{12} = K_{12} \cdot \dot{B}_{12} \quad (469)$$

$$C_{13} = K_{13} \cdot \dot{B}_{13} \quad (470)$$

$$C_{14} = K_{14} \cdot \dot{B}_{14} \quad (471)$$

$$C_{15} = K_{15} \cdot \dot{B}_{15} \quad (472)$$

$$C_{16} = K_{16} \cdot \dot{B}_{16} \quad (473)$$

$$C_{17} = K_{17} \cdot \dot{B}_{17} \quad (474)$$

$$C_{18} = K_{18} \cdot \dot{B}_{18} \quad (475)$$

$$C_{19} = K_{19} \cdot \dot{B}_{19} \quad (476)$$

$$C_{20} = K_{20} \cdot \dot{B}_{20} \quad (477)$$

$$C_{21} = K_{21} \cdot \dot{B}_{21} \quad (478)$$

$$C_{22} = K_{22} \cdot \dot{B}_{22} \quad (479)$$

$$C_{23} = K_{23} \cdot \dot{B}_{23} \quad (480)$$

$$C_{24} = K_{24} \cdot \dot{B}_{24} \quad (481)$$

$$C_{35} = K_{35} \cdot \dot{B}_{35} \quad (482)$$

$$C_{36} = K_{36} \cdot \dot{B}_{36} \quad (483)$$

$$C_{37} = K_{37} \cdot \dot{B}_{37} \quad (484)$$

$$C_{38} = K_{38} \cdot \dot{B}_{38} \quad (485)$$

$$C_{39} = K_{39} \cdot \dot{B}_{39} \quad (486)$$

$$C_{40} = K_{40} \cdot \dot{B}_{40} \quad (487)$$

$$C_{41} = K_{41} \cdot \dot{B}_{41} \quad (488)$$

$$CU_2 = \frac{C_2}{\dot{m}_2} \quad (489)$$

$$CU_4 = \frac{C_4}{\dot{m}_4} \quad (490)$$

$$CU_5 = \frac{C_5}{\dot{m}_5} \quad (491)$$

$$CU_6 = \frac{C_6}{\dot{m}_6} \quad (492)$$

$$CU_7 = \frac{C_7}{\dot{m}_7} \quad (493)$$

$$CU_8 = \frac{C_8}{\dot{m}_8} \quad (494)$$

$$CU_9 = \frac{C_9}{\dot{m}_9} \quad (495)$$

$$CU_{11} = \frac{C_{11}}{\dot{m}_{11}} \quad (496)$$

$$CU_{12} = \frac{C_{12}}{\dot{m}_{12}} \quad (497)$$

$$CU_{13} = \frac{C_{13}}{\dot{m}_{13}} \quad (498)$$

$$CU_{14} = \frac{C_{14}}{\dot{m}_{14}} \quad (499)$$

$$CU_{15} = \frac{C_{15}}{\dot{m}_{15}} \quad (500)$$

$$CU_{16} = \frac{C_{16}}{\dot{m}_{16}} \quad (501)$$

$$CU_{17} = \frac{C_{17}}{\dot{m}_{17}} \quad (502)$$

$$CU_{18} = \frac{C_{18}}{\dot{m}_{18}} \quad (503)$$

$$CU_{19} = \frac{C_{19}}{\dot{m}_{19}} \quad (504)$$

$$CU_{20} = \frac{C_{20}}{\dot{m}_{20}} \quad (505)$$

$$CU_{21} = \frac{C_{21}}{\dot{m}_{21}} \quad (506)$$

$$CU_{22} = \frac{C_{22}}{\dot{m}_{22}} \quad (507)$$

$$CU_{23} = \frac{C_{23}}{\dot{m}_{23}} \quad (508)$$

$$CU_{24} = \frac{C_{24}}{\dot{m}_{24}} \quad (509)$$

$$CU_{35} = \frac{C_{35}}{\dot{m}_{35}} \quad (510)$$

$$CU_{36} = \frac{C_{36}}{\dot{m}_{36}} \quad (511)$$

$$CU_{37} = \frac{C_{37}}{\dot{m}_{37}} \quad (512)$$

$$CU_{38} = \frac{C_{38}}{\dot{m}_{38}} \quad (513)$$

$$CU_{39} = \frac{C_{39}}{\dot{m}_{39}} \quad (514)$$

$$CU_{40} = \frac{C_{40}}{\dot{m}_{40}} \quad (515)$$

$$CU_{41} = \frac{C_{41}}{\dot{m}_{41}} \quad (516)$$





## C. Anexo: Código EES para el segundo caso de estudio.

### OPTIMIZACIÓN - CASO2

#### Equations

Optimización de una planta piloto de aprovechamiento integral de naranja en términos energéticos y exergéticos.

Variables de entrada

$$Fr = 0,5 \quad \% \text{ de jugo con respecto a la naranja} \quad (1)$$

$$Fc = 0,1 \quad \text{Fracción de cáscara} \quad (2)$$

$$Fv = 0,04 \quad \text{Fracción de vapor perdido en la extracción de aceite} \quad (3)$$

$$Fpm = 0,1 \quad \text{fracción de la naranja en la película} \quad (4)$$

$$Fpg = 0,07 \quad \text{Fracción de glicerina en las películas} \quad (5)$$

$$Fpp = 0,07 \quad \text{Fracción de pectina en las películas} \quad (6)$$

$$Fpc = 0,06 \quad \text{Fracción de celulosa en las películas} \quad (7)$$

$$Fs = 0,4 \quad \text{Fracción de semillas y bagazo} \quad (8)$$

$$Cp_{naranja} = 6,5 \quad \text{Calor específico de la naranja tomado de } \text{https://link.springer.com/chapter/10.1007\%2F978-981-13-8507-0}_{14}(9)$$

$$COP_r = 1,5 \quad (10)$$

$$\eta_{bombas} = 0,8 \quad (11)$$

$$Cp_{limoneno} = 1,834 \quad \text{https://www.chemeo.com/cid/70-164-2/Limonene} \quad (12)$$

$$Mc = 2,73/100 \quad \text{Thermo-kinetics study of orange peel in air} \quad (13)$$

Composición de la cascara, C= 49,59/100 H= 6,95/100 N=0,66/100 S= 0,06/100 O=39,7/100 Cinza=3,05/100 Thermo-kinetics study of orange peel in air

$$Cc = 49,59/100 \quad (14)$$

$$Hc = 6,95/100 \quad (15)$$

$$Oc = 39,7/100 \quad (16)$$

$$Nc = 0,66/100 \quad (17)$$

$$Sc = 0,06/100 \quad (18)$$

$$Ec = 3,05/100 \quad (19)$$

$$PMs = \left( \frac{Cc/12 + Hc/1 + Oc/16 + Sc/32}{0,9695} \right)^{-1} \quad \text{Peso molecular de la cascara} \quad (20)$$

$$ys = \frac{\frac{1-Mc}{PMs}}{(Mc/18) + \left( \frac{1-Mc}{PMs} \right)} \quad (21)$$

$$y_a = \frac{Mc/18}{\left(\frac{1-Mc}{PM_s}\right) + (Mc/18)} \quad (22)$$

$$PM = y_s \cdot PM_s + y_a \cdot 18 \quad (23)$$

Composición del bagazo, C= 47/100 H= 6,9/100 N=1,3/100 S= 0,09/100 O=44,71/100 Cinza=3,05/100 Pyrolysis of orange waste: A thermo-kinetic study

$$Mcb = 5,7/100 \quad (24)$$

$$Cb = 47/100 \quad (25)$$

$$Hb = 6,9/100 \quad (26)$$

$$Ob = 44,71/100 \quad (27)$$

$$Nb = 1,3/100 \quad (28)$$

$$Sb = 0,09/100 \quad (29)$$

$$Eb = 3,05/100 \quad (30)$$

$$PMb = \left( \frac{Cb/12 + Hb/1 + Ob/16 + Sb/32}{1} \right)^{-1} \quad \text{Peso molecular del bagazo} \quad (31)$$

$$y_b = \frac{\frac{1-Mc}{PMb}}{(Mcb/18) + \left(\frac{1-Mcb}{PMb}\right)} \quad (32)$$

$$y_{ab} = \frac{Mcb/18}{\left(\frac{1-Mcb}{PMb}\right) + (Mcb/18)} \quad (33)$$

$$PMba = y_b \cdot PMb + y_{ab} \cdot 18 \quad (34)$$

Fracción molar de agua y naranja

$$Moles = 0,5/18 + 0,1/PM + 0,4/PMba \quad (35)$$

$$FMa = 0,5/18/Moles \quad (36)$$

$$FMn = 1 - FMa \quad (37)$$

$$PMT = 0,5 \cdot 18 + 0,1 \cdot PM + 0,4 \cdot PMba \quad (38)$$

Cálculo de la relación estandar de exergía química de la cáscara

$$PCSc = 349,1 \cdot Cc \cdot 100 + 1178,3 \cdot Hc \cdot 100 + 100,5 \cdot Sc \cdot 100 - 103,4 \cdot Oc \cdot 100 - 15,1 \cdot Nc \cdot 100 - 21,1 \cdot Ec \cdot 100 \quad (39)$$

$$PCIC = PCSc - 2441,7 \cdot (9 \cdot Hc + Mc) \quad (40)$$

$$\phi_c = \frac{1,0438 + 0,1882 \cdot (Hc/Cc) - 0,2509 \cdot (1 + 0,7256 \cdot (Hc/Cc))}{1 - 0,3035 \cdot (Oc/Cc)} \quad \text{Exergy analysis of the energy consumption in the Colombian e}$$

Ambiente de referencia

$$X_{O_{2ref}} = 0,2059 \quad (42)$$

$$X_{N_2ref} = 0,7748 \quad (43)$$

$$X_{CO_2ref} = 0,0003 \quad (44)$$

$$X_{H_2Oref} = 0,019 \quad (45)$$

Metano  $CH_4 + K \cdot \lambda (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow aCO_2 + bH_2O + cN_2 + dO_2$

$$k = 1, 2 \quad (46)$$

$$\lambda = 2 \quad (47)$$

$$a = 1 \quad (48)$$

$$b = 2 \quad (49)$$

$$c = K \cdot 7,52 \quad (50)$$

$$d = (K - 1) \cdot \lambda \quad (51)$$

$$N_T = a + b + c + d \quad (52)$$

$$R_{AC} = (K \cdot \lambda \cdot 4,76) \cdot \left( \frac{MW(Air)}{MW(CH_4)} \right) \quad (53)$$

$$X_{CO_2} = a/N_T \quad (54)$$

$$X_{H_2O} = b/N_T \quad (55)$$

$$X_{N_2} = c/N_T \quad (56)$$

$$X_{O_2} = d/N_T \quad (57)$$

$$Y_{CO_2} = \left( \frac{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2)}{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (58)$$

$$Y_{H_2O} = \left( \frac{X_{H_2O} \cdot MW(H_2O)}{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (59)$$

$$Y_{N_2} = \left( \frac{X_{N_2} \cdot MW(N_2)}{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (60)$$

$$Y_{O_2} = \left( \frac{X_{O_2} \cdot MW(O_2)}{X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2)} \right) \quad (61)$$

$$MM_{mix} = X_{CO_2} \cdot MW(CO_2) + X_{H_2O} \cdot MW(H_2O) + X_{N_2} \cdot MW(N_2) + X_{O_2} \cdot MW(O_2) \quad (62)$$

Estados

Estado 0

$$T_0 = 25 \quad (63)$$

$$P_0 = 101,325 \quad (64)$$

$$h_0 = h(Water; T = T_0; P = P_0) \quad (65)$$

$$s_0 = s(Water; T = T_0; P = P_0) \quad (66)$$

$$h_{ref} = Y_{CO_2} \cdot h(CO_2; T = T_0) + Y_{H_2O} \cdot h(H_2O; T = T_0) + Y_{N_2} \cdot h(N_2; T = T_0) + Y_{O_2} \cdot h(O_2; T = T_0) \quad (67)$$

$$s_{ref} = Y_{CO_2} \cdot s(CO_2; T = T_0; P = P_0) + Y_{H_2O} \cdot s(H_2O; T = T_0; P = P_0) + Y_{N_2} \cdot s(N_2; T = T_0; P = P_0) + Y_{O_2} \cdot s(O_2; T = T_0; P = P_0)$$

Estado 1

$$\dot{m}_1 = (120/3600) \text{ [kg/s]} \quad (69)$$

Estado 2

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad (70)$$

$$T_2 = 25 \quad (71)$$

$$P_2 = 80 \quad (72)$$

$$h_{a2} = h(\text{Water}; T = T_2; P = P_2) \quad (73)$$

$$s_{a2} = s(\text{Water}; T = T_2; P = P_2) \quad (74)$$

$$bpha_2 = (h_0 - h_{a2}) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_{a2}) \quad (75)$$

$$bcha_2 = 3120/18 \quad (76)$$

$$bchs_2 = 18700 \quad (77)$$

$$bphs_2 = 0 \quad (78)$$

$$ma_2 = 0,521 \cdot \dot{m}_2 \quad (79)$$

$$ms_2 = (1 - 0,521) \cdot \dot{m}_2 \quad (80)$$

$$\dot{B}_2 = ma_2 \cdot (bphs_2 + bchs_2) + ms_2 \cdot (bpha_2 + bcha_2) + (8,314/PMT) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,5 \cdot \ln(0,5) + (8,314/PMT) \cdot (T_0 + 273) \cdot (0,5) \cdot \ln(0,5)$$

Estado 3

$$\dot{m}_3 = Fr \cdot \dot{m}_2 \quad (82)$$

$$ma_3 = \dot{m}_3 \quad (83)$$

$$ms_3 = 0 \quad (84)$$

$$T_3 = 25 \quad (85)$$

$$P_3 = 80 \quad (86)$$

$$h_3 = h(\text{Water}; T = T_3; P = P_3) \quad (87)$$

$$s_3 = s(\text{Water}; T = T_3; P = P_3) \quad (88)$$

$$bpha_3 = (h_0 - h_3) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_0 - s_3) \quad (89)$$

$$bcha_3 = 3120/18 \quad (90)$$

$$bchs_3 = 0 \quad (91)$$

$$bphs_3 = 0 \quad (92)$$

$$\dot{E}_3 = \dot{m}_3 \cdot h_3 \quad (93)$$

$$\dot{B}_3 = \dot{m}_3 \cdot (bpha_3 + bcha_3) \quad (94)$$

Estado 4

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (95)$$

$$T_4 = 25 \quad (96)$$

$$P_4 = 80 \quad (97)$$

$$h_4 = h(\text{Water}; T = T_4; P = P_4) \quad (98)$$

$$s_4 = s(\text{Water}; T = T_4; P = P_4) \quad (99)$$

$$bpha_4 = (h_0 - h_4) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_0 - s_4) \quad (100)$$

$$bcha_4 = 3120/18 \quad (101)$$

$$bchs_4 = 0 \quad (102)$$

$$bphs_4 = 0 \quad (103)$$

$$\dot{E}_4 = \dot{m}_4 \cdot h_4 \quad (104)$$

$$\dot{B}_4 = \dot{m}_4 \cdot (bpha_4 + bcha_4) \quad (105)$$

Estado 5

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 \quad (106)$$

$$P_5 = 400 \quad 3 \text{ o } 4 \text{ bar, irreversible} \quad (107)$$

$$s_5 = s(\text{Water}; T = T_5; P = P_5) \quad (108)$$

$$h_5 = h(\text{Water}; T = T_5; P = P_5) \quad (109)$$

$$T_5 = T_4 \quad (110)$$

$$bpha_5 = (h_5 - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_5 - s_0) \quad (111)$$

$$bcha_5 = 3120/18 \quad (112)$$

$$bchs_5 = 0 \quad (113)$$

$$bphs_5 = 0 \quad (114)$$

$$\dot{E}_5 = \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (115)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{m}_5 \cdot (bpha_5 + bcha_5) \quad (116)$$

Estado 6

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_5 \quad (117)$$

$$P_6 = P_5 \quad (118)$$

$$T_6 = 95 \quad (119)$$

$$h_6 = h(\text{Water}; T = T_6; P = P_6) \quad (120)$$

$$s_6 = s(\text{Water}; T = T_6; P = P_6) \quad (121)$$

$$bpha_6 = (h_6 - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_6 - s_0) \quad (122)$$

$$bcha_6 = 3120/18 \quad (123)$$

$$bchs_6 = 0 \quad (124)$$

$$bphs_6 = 0 \quad (125)$$

$$\dot{E}_6 = \dot{m}_6 \cdot h_6 \quad (126)$$

$$\dot{B}_6 = \dot{m}_6 \cdot (bpha_6 + bcha_6) \quad (127)$$

$$Q_{\text{pasteurizado}} = \dot{E}_6 - \dot{E}_5 \quad (128)$$

Estado 7

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6 \quad (129)$$

$$P_7 = P_6 \quad (130)$$

$$h_7 = h(\text{Water}; T = T_7; P = P_7) \quad (131)$$

$$s_7 = s(\text{Water}; T = T_7; P = P_7) \quad (132)$$

$$bpha_7 = (h_7 - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_7 - s_0) \quad (133)$$

$$bcha_7 = 3120/18 \quad (134)$$

$$bchs_7 = 0 \quad (135)$$

$$bphs_7 = 0 \quad (136)$$

$$\dot{E}_7 = \dot{m}_7 \cdot h_7 \quad (137)$$

$$\dot{B}_7 = \dot{m}_7 \cdot (bpha_7 + bcha_7) \quad (138)$$

$$\dot{E}_6 - \dot{E}_7 = Q_{\text{pasteurización}} \quad (139)$$

Estado 8

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (140)$$

$$T_8 = 25 \quad (141)$$

$$P_8 = 80 \quad (142)$$

$$h_8 = h(\text{Water}; T = T_8; P = P_8) \quad (143)$$

$$s_8 = s(\text{Water}; T = T_8; P = P_8) \quad (144)$$

$$bpha_8 = (h_0 - h_8) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_0 - s_8) \quad (145)$$

$$bcha_8 = 3120/18 \quad (146)$$

$$bchs_8 = 0 \quad (147)$$

$$bphs_8 = 0 \quad (148)$$

$$\dot{E}_8 = \dot{m}_8 \cdot h_8 \quad (149)$$

$$\dot{B}_8 = \dot{m}_8 \cdot (bpha_8 + bcha_8) \quad (150)$$

Estado 9

$$\dot{m}_9 = 0,01703 \quad (151)$$

$$P_9 = P_8 \quad (152)$$

$$T_9 = 85 \quad (153)$$

$$h_9 = h(\text{Water}; T = T_9; P = P_9) \quad (154)$$

$$s_9 = s(\text{Water}; T = T_9; P = P_9) \quad (155)$$

$$bpha_9 = (h_9 - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_9 - s_0) \quad (156)$$

$$bcha_9 = 3120/18 \quad (157)$$

$$bchs_9 = 0 \quad (158)$$

$$bphs_9 = 0 \quad (159)$$

$$\dot{E}_9 = \dot{m}_9 \cdot h_9 \quad (160)$$

$$\dot{B}_9 = \dot{m}_9 \cdot (bpha_9 + bcha_9) \quad (161)$$

$$Q_{\text{pasteurización}} = \dot{E}_9 - \dot{E}_8 \quad (162)$$

Estado 10

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \quad (163)$$

Estado 11

$$\dot{m}_{11} = Fc \cdot \dot{m}_2 \quad (164)$$

$$ma_{11} = \dot{m}_{11} \cdot Mc \quad (165)$$

$$ms_{11} = \dot{m}_{11} \cdot (1 - Mc) \quad (166)$$

$$ha_{11} = h(\text{Water}; T = T_{11}; P = 400) \quad (167)$$

$$hs_{11} = Cp_{\text{naranja}} \cdot T_{11} \quad (168)$$

$$sa_{11} = s(\text{Water}; T = T_{11}; P = 400) \quad (169)$$

$$T_{11} = 25 \quad (170)$$

$$h_{11} = \frac{ma_{11} \cdot ha_{11} + ms_{11} \cdot hs_{11}}{\dot{m}_{11}} \quad (171)$$

$$\dot{E}_{11} = \dot{m}_{11} \cdot h_{11} \quad (172)$$

$$bchs_{11} = \phi_c \cdot PCIC \quad (173)$$

$$bcha_{11} = 3120/18 \quad (174)$$

$$bpha_{11} = (ha_{11} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (sa_{11} - s_0) \quad (175)$$



$$bphs_{11} = Cp_{naranja} \cdot (T_{11} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{naranja} \cdot \ln \left( \frac{T_{11} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (176)$$

$$\dot{B}_{11} = ma_{11} \cdot (bcha_{11} + bpha_{11}) + (bphs_{11} + bchs_{11}) \cdot ms_{11} + (8,314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,0273 \cdot \ln(0,0273) + (8,314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot (1$$

Estado 12

$$\dot{m}_{12} = (\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \quad (178)$$

$$FMAC = 0,03 \cdot \frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_{12}} \quad (179)$$

$$FMagua = \frac{\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}}{\dot{m}_{12}} \quad (180)$$

$$P_{12} = 400 \quad (181)$$

$$T_{12} = T(Water; P = P_{12}; h = ha_{12}) \quad (182)$$

$$x_{12} = x(Water; T = T_{12}; h = h_{12}) \quad (183)$$

$$s_{12} = s(Water; h = h_{12}; P = P_{12}) \quad (184)$$

$$bchs_{12} = 18700 \quad (185)$$

$$bphs_{12} = Cp_{limoneno} \cdot (T_{12} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{limoneno} \cdot \ln \left( \frac{T_{12} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (186)$$

$$bpha_{12} = (ha_{12} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s(Water; x = x_{12}; P = P_{12}) - s_0) \quad (187)$$

$$bcha_{12} = 3120/18 \quad (188)$$

$$\frac{ha_{12} \cdot (\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot Cp_{limoneno}}{\dot{m}_{12}} = h_{12} \quad (189)$$

$$\dot{E}_{12} = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} \quad (190)$$

$$\dot{B}_{12} = (\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot (bpha_{12} + bcha_{12}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot (bchs_{11} + bphs_{11}) + (8,314/18) \cdot (T_0 + 273) \cdot (FMAC) \cdot \ln(FMAC) + (8,314,$$

$$\dot{E}_{12} + \dot{E}_{24} = \dot{E}_{11} + \dot{E}_{20} \quad (192)$$

Estado 13

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{12} \quad (193)$$

$$P_{13} = P_{12} \quad (194)$$

$$T_{13} = 25 + 10 \quad (195)$$

$$h_{13} = \frac{(\dot{m}_{20} - 0,17 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot h(Water; T = T_{13}; P = P_{13}) + Cp_{limoneno} \cdot T_{13} \cdot 0,03 \cdot \dot{m}_{11}}{\dot{m}_{13}} \quad (196)$$

$$ha_{13} = h(Water; T = T_{13}; P = P_{13}) \quad (197)$$

$$sa_{13} = s(Water; T = T_{13}; P = P_{13}) \quad (198)$$

$$bchs_{13} = 18700 \quad (199)$$

$$bphs_{13} = Cp_{limoneno} \cdot (T_{13} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{limoneno} \cdot \ln \left( \frac{T_{13} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (200)$$

$$bpha_{13} = (ha_{13} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (sa_{13} - s_0) \quad (201)$$

$$bcha_{13} = 3120/18 \quad (202)$$

$$\dot{E}_{13} = \dot{m}_{13} \cdot h_{13} \quad (203)$$

$$\dot{B}_{13} = (\dot{m}_{13} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot (bpha_{13} + bcha_{13}) + 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \cdot (bchs_{13} + bphs_{13}) \quad (204)$$

Estado 14

$$\dot{m}_{14} = 0,03 \cdot \dot{m}_{11} \quad (205)$$

$$T_{14} = 5 \quad (206)$$

$$P_{13} = P_{14} \quad (207)$$

$$h_{14} = C_{p_{\text{limoneno}}} \cdot T_{14} \quad (208)$$

$$bchs_{14} = 18700 \quad (209)$$

$$bphs_{14} = C_{p_{\text{limoneno}}} \cdot (T_{14} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot C_{p_{\text{limoneno}}} \cdot \ln \left( \frac{T_{14} + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \quad (210)$$

$$bpha_{14} = 0 \quad (211)$$

$$bcha_{14} = 0 \quad (212)$$

$$\dot{B}_{14} = (bphs_{14} + bchs_{14}) \cdot \dot{m}_{14} \quad (213)$$

Estado 15

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{13} - \dot{m}_{14} \quad (214)$$

$$T_{15} = 5 \quad (215)$$

$$P_{15} = 80 \quad (216)$$

$$h_{15} = h(\text{Water}; T = T_{15}; P = P_{15}) \quad (217)$$

$$s_{15} = s(\text{Water}; T = T_{15}; P = P_{15}) \quad (218)$$

$$bpha_{15} = (h_{15} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{15} - s_0) \quad (219)$$

$$bcha_{15} = 3120/18 \quad (220)$$

$$bchs_{15} = 0 \quad (221)$$

$$bphs_{15} = 0 \quad (222)$$

$$\dot{E}_{15} = \dot{m}_{15} \cdot h_{15} \quad (223)$$

$$\dot{B}_{15} = \dot{m}_{15} \cdot (bpha_{15} + bcha_{15}) \quad (224)$$

Estado 16

$$\dot{m}_{16} = 2 \cdot \dot{m}_{12} \quad (225)$$

$$T_{16} = 25 \quad (226)$$

$$P_{16} = 80 \quad (227)$$

$$h_{16} = h(\text{Water}; T = T_{16}; P = P_{16}) \quad (228)$$

$$s_{16} = s(\text{Water}; T = T_{16}; P = P_{16}) \quad (229)$$

$$bpha_{16} = (h_0 - h_{16}) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_0 - s_{16}) \quad (230)$$

$$bcha_{16} = 3120/18 \quad (231)$$

$$bchs_{16} = 0 \quad (232)$$

$$bphs_{16} = 0 \quad (233)$$

$$\dot{E}_{16} = \dot{m}_{16} \cdot h_{16} \quad (234)$$

$$\dot{B}_{16} = \dot{m}_{16} \cdot (bpha_{16} + bcha_{16}) \quad (235)$$

Estado 17

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{16} \quad (236)$$

$$P_{17} = P_{16} \quad (237)$$

$$-\dot{E}_{13} + \dot{E}_{12} = Q_{aceite} \quad (238)$$

$$Q_{aceite} = \dot{E}_{17} - \dot{E}_{16} \quad (239)$$

$$T_{17} = T(\text{Water}; P = P_{17}; h = h_{17}) \quad (240)$$

$$s_{17} = s(\text{Water}; h = h_{17}; P = P_{17}) \quad (241)$$

$$bpha_{17} = (h_{17} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{17} - s_0) \quad (242)$$

$$bcha_{17} = 3120/18 \quad (243)$$

$$bchs_{17} = 0 \quad (244)$$

$$bphs_{17} = 0 \quad (245)$$

$$\dot{E}_{17} = \dot{m}_{17} \cdot h_{17} \quad (246)$$

$$\dot{B}_{17} = \dot{m}_{17} \cdot (bpha_{17} + bcha_{17}) \quad (247)$$

Estado 18

$$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} \quad (248)$$

$$T_{18} = T(\text{Water}; P = P_{18}; h = h_{18}) \quad (249)$$

$$P_{18} = 80 \quad (250)$$

$$\dot{m}_{18} \cdot h_{18} = \dot{m}_{41} \cdot h_{41} + \dot{m}_{43} \cdot h_{43} \quad (251)$$

$$s_{18} = s(\text{Water}; T = T_{18}; P = P_{18}) \quad (252)$$

$$bpha_{18} = (h_{18} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{18} - s_0) \quad (253)$$

$$bcha_{18} = 3120/18 \quad (254)$$

$$bchs_{18} = 0 \quad (255)$$

$$bphs_{18} = 0 \quad (256)$$

$$\dot{E}_{18} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} \quad (257)$$

$$\dot{B}_{18} = \dot{m}_{18} \cdot (bpha_{18} + bcha_{18}) \quad (258)$$

Estado 19

$$\dot{m}_{19} = \dot{m}_{20} + \dot{m}_{36} \quad (259)$$

$$P_{19} = 400 \quad 3 \text{ o } 4 \text{ bar} \quad (260)$$

$$T_{19} = T_{18} \quad (261)$$

$$h_{19} = h(\text{Water}; T = T_{19}; P = P_{19}) \quad (262)$$

$$s_{19} = s(\text{Water}; T = T_{19}; P = P_{19}) \quad (263)$$

$$bpha_{19} = (h_{19} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{19} - s_0) \quad (264)$$

$$bcha_{19} = 3120/18 \quad (265)$$

$$bchs_{19} = 0 \quad (266)$$

$$bphs_{19} = 0 \quad (267)$$

$$\dot{E}_{19} = \dot{m}_{19} \cdot h_{19} \quad (268)$$

$$\dot{B}_{19} = \dot{m}_{19} \cdot (bpha_{19} + bcha_{19}) \quad (269)$$

Ir de atras para adelante!

$$\dot{m}_{20} = 6,5 \cdot \dot{m}_{11} \quad (270)$$

$$P_{20} = P_{19} \quad (271)$$

$$T_{20} = T_{\text{sat}}(\text{Water}; P = P_{20}) \quad (272)$$

$$h_{20} = h(\text{Water}; x = 1; P = P_{20}) \quad (273)$$

$$s_{20} = s(\text{Water}; x = 1; P = P_{20}) \quad (274)$$

$$bpha_{20} = (h_{20} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{20} - s_0) \quad (275)$$

$$bcha_{20} = 3120/18 \quad (276)$$

$$bchs_{20} = 0 \quad (277)$$

$$bphs_{20} = 0 \quad (278)$$

$$\dot{E}_{20} = \dot{m}_{20} \cdot h_{20} \quad (279)$$

$$\dot{B}_{20} = \dot{m}_{20} \cdot (bpha_{20} + bcha_{20}) \quad (280)$$

$$Q_{\text{vaporización}} = \dot{E}_{20} + \dot{E}_{36} - \dot{E}_{19} \quad (281)$$

Estado 21

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{23} + \dot{m}_{22} \quad (282)$$

$$T_{21} = 400 \quad (283)$$

$$h_{21} = Y_{CO_2} \cdot h(CO_2; T = T_{21}) + Y_{H_2O} \cdot h(H_2O; T = T_{21}) + Y_{N_2} \cdot h(N_2; T = T_{21}) + Y_{O_2} \cdot h(O_2; T = T_{21}) \quad (284)$$

$$P_{21} = 80 \quad (285)$$

$$s_{21} = Y_{CO_2} \cdot s(CO_2; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{H_2O} \cdot s(H_2O; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{N_2} \cdot s(N_2; T = T_{21}; P = P_{21}) + Y_{O_2} \cdot s(O_2; T = T_{21}; P = P_{21}) \quad (286)$$

$$bphs_{21} = (h_{21} - h_{ref}) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{21} - s_{ref}) \quad (287)$$

$$\dot{m}_{21} \cdot h_{21} = \dot{m}_{22} \cdot h_{22} + \dot{m}_{23} \cdot LHV + \dot{m}_{19} \cdot h_{19} - \dot{m}_{20} \cdot h_{20} \quad (288)$$

$$bchs_{21} = (8, 314 / MM_{mix}) \cdot (T_0 + 273, 15) \cdot (X_{CO_2} \cdot \ln(X_{CO_2} / X_{CO_2ref}) + X_{H_2O} \cdot \ln(X_{H_2O} / X_{H_2Oref}) + X_{N_2} \cdot \ln(X_{N_2} / X_{N_2ref}) + X_{O_2} \cdot \ln(X_{O_2} / X_{O_2ref})) \quad (289)$$

$$bpha_{21} = 0 \quad (290)$$

$$bcha_{21} = 0 \quad (291)$$

$$\dot{E}_{21} = \dot{m}_{21} \cdot h_{21} \quad (292)$$

$$\dot{B}_{21} = \dot{m}_{21} \cdot (bphs_{21} + bchs_{21}) \quad (293)$$

Estado 22

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23} \cdot R_{AC} \quad (294)$$

$$T_{22} = 25 \quad (295)$$

$$P_{22} = 80 \quad (296)$$

$$h_{22} = h(Air; T = T_{22}) \quad (297)$$

$$s_{22} = s(Air; T = T_{22}; P = P_{22}) \quad (298)$$

$$bphs_{22} = (h(Air; T = 25) - h_{22}) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s(Air; T = 25; P = 101, 325) - s_{22}) \quad (299)$$

$$bchs_{22} = 0 \quad (300)$$

$$bpha_{22} = 0 \quad (301)$$

$$bcha_{22} = 0 \quad (302)$$

$$\dot{E}_{22} = \dot{m}_{22} \cdot h_{22} \quad (303)$$

$$\dot{B}_{22} = \dot{m}_{22} \cdot (bphs_{22} + bchs_{22}) \quad (304)$$

Estado 23

$$T_{23} = 25 \quad (305)$$

$$P_{23} = 80 \quad (306)$$

$$LHV = 50000 \quad (307)$$

$$bphs_{23} = 0 \quad (308)$$

$$bchs_{23} = 52281, 875 \quad (309)$$

$$bpha_{23} = 0 \quad (310)$$

$$bcha_{23} = 0 \quad (311)$$

$$\dot{B}_{23} = \dot{m}_{23} \cdot (bchs_{23} + bpha_{23}) \quad (312)$$

Estado 24

$$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{11} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11} + 0,17 \cdot \dot{m}_{11} \quad (313)$$

$$ma_{24} = (\dot{m}_{11} - 0,03 \cdot \dot{m}_{11}) \cdot Mc + 0,17 \cdot \dot{m}_{11} \quad (314)$$

$$ms_{24} = \dot{m}_{24} - ma_{24} \quad (315)$$

$$T_{24} = T_{\text{sat}}(\text{Water}; P = P_{24}) \quad (316)$$

$$P_{24} = 400 \quad (317)$$

$$h_{24} = \frac{ms_{24} \cdot Cp_{\text{naranja}} \cdot T_{24} + ma_{24} \cdot h(\text{Water}; x = 0; P = P_{24})}{\dot{m}_{24}} \quad (318)$$

$$\dot{E}_{24} = \dot{m}_{24} \cdot h_{24} \quad (319)$$

$$sa_{24} = s(\text{Water}; x = 0; P = P_{24}) \quad (320)$$

$$bpha_{24} = (h(\text{Water}; x = 0; P = P_{24}) - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (sa_{24} - s_0) \quad (321)$$

$$bcha_{24} = 3120/18 \quad (322)$$

$$bchs_{24} = \phi_c \cdot PCIC \quad (323)$$

$$bphs_{24} = Cp_{\text{naranja}} \cdot (T_{24} - T_0) - (T_0 + 273,15) \cdot Cp_{\text{naranja}} \cdot \ln\left(\frac{T_{24} + 273,15}{T_0 + 273,15}\right) \quad (324)$$

$$\dot{B}_{24} = ma_{24} \cdot (bpha_{24} + bcha_{24}) + ms_{24} \cdot (bchs_{24} + bphs_{24}) + (8,314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,0273 \cdot \ln(0,0273) + (8,314/PM) \cdot (T_0 + 273) \cdot (1$$

Estado 25

$$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{24} \quad (326)$$

Estado 26

$$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{25} \quad (327)$$

Estado 27

$$\dot{m}_{27} = \frac{\dot{m}_{26}}{F_{pn}} \quad (328)$$

Estado 28

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{27} \quad (329)$$

Mientras se conoce las pérdidas en masa de las películas al secarse

$$\dot{m}_{29} = \frac{\dot{m}_{31} + \dot{m}_{32} + \dot{m}_{33}}{0,93} \quad (330)$$

Estado 30

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{28} - \dot{m}_{29} \quad (331)$$

Estado 31 Glicerina

$$\dot{m}_{31} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pg} \quad (332)$$

Estado 32 Pectina

$$\dot{m}_{32} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pp} \quad (333)$$

Estado 33 Celulosa bacteriana

$$\dot{m}_{33} = \dot{m}_{27} \cdot F_{pc} \quad (334)$$

Estado 34 Celulosa bacteriana

$$\dot{m}_{34} = \dot{m}_{27} - \dot{m}_{33} - \dot{m}_{32} - \dot{m}_{31} - \dot{m}_{25} \quad (335)$$

Estado 35

$$\dot{m}_{35} = F_s \cdot \dot{m}_2 \quad (336)$$

$$m_{a35} = 0,057 \cdot \dot{m}_{35} \quad (337)$$

$$m_{s35} = \dot{m}_{35} - m_{a35} \quad (338)$$

$$T_{35} = 25 \quad (339)$$

$$P_{35} = 80 \quad (340)$$

$$bpha_{35} = 0 \quad (341)$$

$$bcha_{35} = 3120/18 \quad (342)$$

$$bchs_{35} = 18700 \quad (343)$$

$$bphs_{35} = 0 \quad (344)$$

$$\dot{B}_{35} = m_{a35} \cdot (bpha_{35} + bcha_{35}) + m_{s35} \cdot (bphs_{35} + bchs_{35}) + (8,314/PMba) \cdot (T_0 + 273) \cdot 0,057 \cdot \ln(0,057) + (8,314/PMba) \cdot (T_0 + 273) \cdot$$

Estado 36

$$\dot{m}_{36} = \dot{m}_{37} \quad (346)$$

$$T_{36} = T_{20} \quad (347)$$

$$P_{36} = P_{20} \quad (348)$$

$$h_{36} = h_{20} \quad (349)$$

$$s_{36} = s_{20} \quad (350)$$

$$bpha_{36} = (h_{36} - h_0) - (T_0 + 273,15) \cdot (s_{36} - s_0) \quad (351)$$

$$bcha_{36} = 3120/18 \quad (352)$$

$$bchs_{36} = 0 \quad (353)$$

$$bphs_{36} = 0 \quad (354)$$

$$\dot{E}_{36} = \dot{m}_{36} \cdot h_{36} \quad (355)$$

$$\dot{B}_{36} = \dot{m}_{36} \cdot (bpha_{36} + bcha_{36}) \quad (356)$$

Estado 37

$$T_{37} = 60 \quad (357)$$

$$P_{37} = P_{36} \quad (358)$$

$$h_{37} = h(\text{Water}; T = T_{37}; P = P_{37}) \quad (359)$$

$$s_{37} = s(\text{Water}; T = T_{37}; P = P_{37}) \quad (360)$$

$$bpha_{37} = (h_{37} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{37} - s_0) \quad (361)$$

$$bcha_{37} = 3120/18 \quad (362)$$

$$bchs_{37} = 0 \quad (363)$$

$$bphs_{37} = 0 \quad (364)$$

$$\dot{E}_{37} = \dot{m}_{37} \cdot h_{37} \quad (365)$$

$$\dot{B}_{37} = \dot{m}_{37} \cdot (bpha_{37} + bcha_{37}) \quad (366)$$

$$Q_{pasteurizado} = \dot{E}_{36} - \dot{E}_{37} \quad (367)$$

Estado 38

$$\dot{m}_{38} = \dot{m}_{20} \quad (368)$$

$$T_{38} = 25 \quad (369)$$

$$P_{38} = 80 \quad (370)$$

$$h_{38} = h(\text{Water}; T = T_{38}; P = P_{38}) \quad (371)$$

$$s_{38} = s(\text{Water}; T = T_{38}; P = P_{38}) \quad (372)$$

$$bpha_{38} = (h_0 - h_{38}) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_0 - s_{38}) \quad (373)$$

$$bcha_{38} = 3120/18 \quad (374)$$

$$bchs_{38} = 0 \quad (375)$$

$$bphs_{38} = 0 \quad (376)$$

$$\dot{E}_{38} = \dot{m}_{38} \cdot h_{38} \quad (377)$$

$$\dot{B}_{38} = \dot{m}_{38} \cdot (bpha_{38} + bcha_{38}) \quad (378)$$

Estado 39

$$P_{39} = 80 \quad (379)$$

$$\dot{m}_{38} = \dot{m}_{39} \quad (380)$$

$$\dot{m}_{39} \cdot h_{39} + \dot{m}_{40} \cdot h_{40} = \dot{m}_{38} \cdot h_{38} + \dot{m}_{21} \cdot h_{21} \quad (381)$$

$$T_{39} = T(\text{Water}; P = P_{39}; h = h_{39}) \quad (382)$$



$$s_{39} = s(\text{Water}; h = h_{39}; P = P_{39}) \quad (383)$$

$$bpha_{39} = (h_{39} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{39} - s_0) \quad (384)$$

$$bcha_{39} = 3120/18 \quad (385)$$

$$bchs_{39} = 0 \quad (386)$$

$$bphs_{39} = 0 \quad (387)$$

$$\dot{E}_{39} = \dot{m}_{39} \cdot h_{39} \quad (388)$$

$$\dot{B}_{39} = \dot{m}_{39} \cdot (bpha_{39} + bcha_{39}) \quad (389)$$

Estado 40

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{40} \quad (390)$$

$$T_{40} = 200 \quad (391)$$

$$h_{40} = Y_{CO_2} \cdot h(CO_2; T = T_{40}) + Y_{H_2O} \cdot h(H_2O; T = T_{40}) + Y_{N_2} \cdot h(N_2; T = T_{40}) + Y_{O_2} \cdot h(O_2; T = T_{40}) \quad (392)$$

$$P_{40} = 80 \quad (393)$$

$$s_{40} = Y_{CO_2} \cdot s(CO_2; T = T_{40}; P = P_{40}) + Y_{H_2O} \cdot s(H_2O; T = T_{40}; P = P_{40}) + Y_{N_2} \cdot s(N_2; T = T_{40}; P = P_{40}) + Y_{O_2} \cdot s(O_2; T = T_{40}; P = P_{40}) \quad (394)$$

$$bphs_{40} = (h_{40} - h_{ref}) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{40} - s_{ref}) \quad (395)$$

$$bchs_{40} = (8, 314/MM_{mix}) \cdot (T_0 + 273, 15) \cdot (X_{CO_2} \cdot \ln(X_{CO_2}/X_{CO_2ref}) + X_{H_2O} \cdot \ln(X_{H_2O}/X_{H_2Oref}) + X_{N_2} \cdot \ln(X_{N_2}/X_{N_2ref}) + X_{O_2} \cdot \ln(X_{O_2}/X_{O_2ref})) \quad (396)$$

$$bcha_{40} = 0 \quad (397)$$

$$bpha_{40} = 0 \quad (398)$$

$$\dot{E}_{40} = \dot{m}_{40} \cdot h_{40} \quad (399)$$

$$\dot{B}_{40} = \dot{m}_{40} \cdot (bphs_{40} + bchs_{40}) \quad (400)$$

Estado 41

$$\dot{m}_{41} = \dot{m}_{37} \quad (401)$$

$$P_{41} = 80 \quad (402)$$

$$T_{41} = T_{37} \quad (403)$$

$$h_{41} = h(\text{Water}; T = T_{41}; P = P_{41}) \quad (404)$$

$$s_{41} = s(\text{Water}; T = T_{41}; P = P_{41}) \quad (405)$$

$$bpha_{41} = (h_{41} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{41} - s_0) \quad (406)$$

$$bcha_{41} = 3120/18 \quad (407)$$

$$bchs_{41} = 0 \quad (408)$$

$$bphs_{41} = 0 \quad (409)$$

$$\dot{E}_{41} = \dot{m}_{41} \cdot h_{41} \quad (410)$$

$$\dot{B}_{41} = \dot{m}_{41} \cdot (bpha_{41} + bcha_{41}) \quad (411)$$

Estado 42

$$\dot{m}_{42} = \dot{m}_9 \quad (412)$$

$$P_{42} = P_9 \quad (413)$$

$$T_{42} = T_{43} \quad (414)$$

$$h_{42} = h(\text{Water}; T = T_{42}; P = P_{42}) \quad (415)$$

$$s_{42} = s(\text{Water}; T = T_{42}; P = P_{42}) \quad (416)$$

$$bpha_{42} = (h_{42} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{42} - s_0) \quad (417)$$

$$bcha_{42} = 3120/18 \quad (418)$$

$$bchs_{42} = 0 \quad (419)$$

$$bphs_{42} = 0 \quad (420)$$

$$\dot{E}_{42} = \dot{m}_{42} \cdot h_{42} \quad (421)$$

$$\dot{B}_{42} = \dot{m}_{42} \cdot (bpha_{42} + bcha_{42}) \quad (422)$$

estado 43

$$\dot{m}_{43} = \dot{m}_{39} \quad (423)$$

$$P_{43} = P_{39} \quad (424)$$

$$h_{43} = h(\text{Water}; T = T_{43}; P = P_{43}) \quad (425)$$

$$\dot{m}_{43} \cdot h_{43} + \dot{m}_{42} \cdot h_{42} = \dot{m}_{39} \cdot h_{39} + \dot{m}_9 \cdot h_9 \quad (426)$$

$$s_{43} = s(\text{Water}; T = T_{43}; P = P_{43}) \quad (427)$$

$$bpha_{43} = (h_{43} - h_0) - (T_0 + 273, 15) \cdot (s_{43} - s_0) \quad (428)$$

$$bcha_{43} = 3120/18 \quad (429)$$

$$bchs_{43} = 0 \quad (430)$$

$$bphs_{43} = 0 \quad (431)$$

$$\dot{E}_{43} = \dot{m}_{43} \cdot h_{43} \quad (432)$$

$$\dot{B}_{43} = \dot{m}_{43} \cdot (bpha_{43} + bcha_{43}) \quad (433)$$

ciclo de refrigeración

$$Q_L = \dot{m}_{13} \cdot h_{13} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} \quad (434)$$

$$Q_L/W_{neto} = COP_r \quad (435)$$

Trabajo de equipos

$$W_{E5} = \dot{m}_5 \cdot \frac{h_4 - h_5}{\eta_{bombas}} \quad E5 \quad (436)$$

$$W_{E9} = \frac{\dot{E}_{18} - \dot{E}_{19}}{\eta_{bombas}} \quad E9 \quad (437)$$

$$W_{E3} = 0,75 \quad (438)$$

exergía destruida

$$\dot{B}_2 - \dot{B}_4 - \dot{B}_{11} - \dot{B}_{35} + W_{E3} = B_{d3} \quad E3 \quad (439)$$

$$-W_{E5} + \dot{B}_4 - \dot{B}_5 = B_{d5} \quad E5 \quad (440)$$

$$\dot{B}_5 + \dot{B}_{36} - \dot{B}_{37} - \dot{B}_6 = B_{d6} \quad E6 \quad (441)$$

$$\dot{B}_6 + \dot{B}_8 - \dot{B}_7 - \dot{B}_9 = B_{d7} \quad E7 \quad (442)$$

$$\dot{B}_{11} + \dot{B}_{20} - \dot{B}_{12} - \dot{B}_{24} = B_{d8} \quad E8 \quad (443)$$

$$-W_{E9} + \dot{B}_{18} - \dot{B}_{19} = B_{d9} \quad E9 \quad (444)$$

$$\dot{B}_{22} + \dot{B}_{23} + \dot{B}_{19} - \dot{B}_{21} - \dot{B}_{20} - \dot{B}_{36} = B_{10} \quad E10 \quad (445)$$

$$\dot{B}_{12} + \dot{B}_{16} - \dot{B}_{17} - \dot{B}_{13} = B_{d11} \quad E11 \quad (446)$$

$$W_{neto} + \dot{B}_{13} - \dot{B}_{14} - \dot{B}_{15} = B_{d12} \quad E12 \quad (447)$$

$$\dot{B}_{21} + \dot{B}_{38} - \dot{B}_{39} - \dot{B}_{40} = B_{d18} \quad E18 \quad (448)$$

$$\dot{B}_{41} + \dot{B}_{43} - \dot{B}_{18} = B_{d19} \quad E19 \quad (449)$$

$$\dot{B}_{37} - \dot{B}_{41} = B_{d20} \quad E20 \quad (450)$$

$$\dot{B}_9 + \dot{B}_{39} - \dot{B}_{42} - \dot{B}_{43} = B_{d21} \quad E21 \quad (451)$$

Análisis termoeconómico

$$K_2 = 1 \quad (452)$$

$$K_{E5} = 1 \quad (453)$$

$$K_{E3} = 1 \quad (454)$$

$$K_{E9} = 1 \quad (455)$$

$$K_{E12} = 1 \quad (456)$$

$$K_8 = 1 \quad (457)$$

$$K_{35} = 0 \quad (458)$$

$$K_7 = K_{14} \quad (459)$$

$$K_{14} = K_{15} \quad (460)$$

$$K_{15} = K_{24} \quad (461)$$

$$K_5 = K_6 \quad (462)$$

$$K_{16} = 1 \quad (463)$$

$$K_{17} = 0 \quad (464)$$

$$K_{22} = 1 \quad (465)$$

$$K_{23} = 1 \quad (466)$$

$$K_{38} = 1 \quad (467)$$

$$K_{40} = 0 \quad (468)$$

$$K_{42} = 0 \quad (469)$$

$$K_{20} = K_{36} \quad (470)$$

$$K_2 \cdot \dot{B}_2 - K_4 \cdot \dot{B}_4 - K_{11} \cdot \dot{B}_{11} - K_{35} \cdot \dot{B}_{35} + K_{E3} \cdot W_{E3} = 0 \quad E3 \quad (471)$$

$$-K_{E5} \cdot W_{E5} + K_4 \cdot \dot{B}_4 - K_5 \cdot \dot{B}_5 = 0 \quad E5 \quad (472)$$

$$K_5 \cdot \dot{B}_5 + K_{36} \cdot \dot{B}_{36} - K_{37} \cdot \dot{B}_{37} - K_6 \cdot \dot{B}_6 = 0 \quad E6 \quad (473)$$

$$K_6 \cdot \dot{B}_6 + K_8 \cdot \dot{B}_8 - K_7 \cdot \dot{B}_7 - K_9 \cdot \dot{B}_9 = 0 \quad E7 \quad (474)$$

$$K_{11} \cdot \dot{B}_{11} + K_{20} \cdot \dot{B}_{20} - K_{12} \cdot \dot{B}_{12} - K_{24} \cdot \dot{B}_{24} = 0 \quad E8 \quad (475)$$

$$-K_{E9} \cdot W_{E9} + K_{18} \cdot \dot{B}_{18} - K_{19} \cdot \dot{B}_{19} = 0 \quad E9 \quad (476)$$

$$K_{22} \cdot \dot{B}_{22} + K_{23} \cdot \dot{B}_{23} + K_{19} \cdot \dot{B}_{19} - K_{21} \cdot \dot{B}_{21} - K_{20} \cdot \dot{B}_{20} - K_{36} \cdot \dot{B}_{36} = 0 \quad E10 \quad (477)$$

$$K_{12} \cdot \dot{B}_{12} + K_{16} \cdot \dot{B}_{16} - K_{17} \cdot \dot{B}_{17} - K_{13} \cdot \dot{B}_{13} = 0 \quad E11 \quad (478)$$

$$K_{E12} \cdot W_{neto} + K_{13} \cdot \dot{B}_{13} - K_{14} \cdot \dot{B}_{14} - K_{15} \cdot \dot{B}_{15} = 0 \quad E12 \quad (479)$$

$$K_{21} \cdot \dot{B}_{21} + K_{38} \cdot \dot{B}_{38} - K_{39} \cdot \dot{B}_{39} - K_{40} \cdot \dot{B}_{40} = 0 \quad E18 \quad (480)$$

$$K_{41} \cdot \dot{B}_{41} + K_{43} \cdot \dot{B}_{43} - K_{18} \cdot \dot{B}_{18} = 0 \quad E19 \quad (481)$$

$$K_{37} \cdot \dot{B}_{37} - K_{41} \cdot \dot{B}_{41} = 0 \quad E20 \quad (482)$$

$$K_9 \cdot \dot{B}_9 + K_{39} \cdot \dot{B}_{39} - K_{42} \cdot \dot{B}_{42} - K_{43} \cdot \dot{B}_{43} = 0 \quad E21 \quad (483)$$

$$K_9 = K_{42} \quad (484)$$

$$K_{21} = K_{40} \quad (485)$$

$$C_{E3} = K_{E3} \cdot W_{E3} \quad (486)$$

$$C_{E5} = K_{E5} \cdot W_{E5} \quad (487)$$

$$C_{E9} = K_{E9} \cdot W_{E9} \quad (488)$$

$$C_{E12} = K_{E12} \cdot W_{neto} \quad (489)$$

$$C_2 = K_2 \cdot \dot{B}_2 \quad (490)$$

$$C_4 = K_4 \cdot \dot{B}_4 \quad (491)$$

$$C_5 = K_5 \cdot \dot{B}_5 \quad (492)$$

$$C_6 = K_6 \cdot \dot{B}_6 \quad (493)$$

$$C_7 = K_7 \cdot \dot{B}_7 \quad (494)$$

$$C_8 = K_8 \cdot \dot{B}_8 \quad (495)$$

$$C_9 = K_9 \cdot \dot{B}_9 \quad (496)$$

$$C_{11} = K_{11} \cdot \dot{B}_{11} \quad (497)$$

$$C_{12} = K_{12} \cdot \dot{B}_{12} \quad (498)$$

$$C_{13} = K_{13} \cdot \dot{B}_{13} \quad (499)$$

$$C_{14} = K_{14} \cdot \dot{B}_{14} \quad (500)$$

$$C_{15} = K_{15} \cdot \dot{B}_{15} \quad (501)$$

$$C_{16} = K_{16} \cdot \dot{B}_{16} \quad (502)$$

$$C_{17} = K_{17} \cdot \dot{B}_{17} \quad (503)$$

$$C_{18} = K_{18} \cdot \dot{B}_{18} \quad (504)$$

$$C_{19} = K_{19} \cdot \dot{B}_{19} \quad (505)$$

$$C_{20} = K_{20} \cdot \dot{B}_{20} \quad (506)$$

$$C_{21} = K_{21} \cdot \dot{B}_{21} \quad (507)$$

$$C_{22} = K_{22} \cdot \dot{B}_{22} \quad (508)$$

$$C_{23} = K_{23} \cdot \dot{B}_{23} \quad (509)$$

$$C_{24} = K_{24} \cdot \dot{B}_{24} \quad (510)$$

$$C_{35} = K_{35} \cdot \dot{B}_{35} \quad (511)$$

$$C_{36} = K_{36} \cdot \dot{B}_{36} \quad (512)$$

$$C_{37} = K_{37} \cdot \dot{B}_{37} \quad (513)$$

$$C_{38} = K_{38} \cdot \dot{B}_{38} \quad (514)$$

$$C_{39} = K_{39} \cdot \dot{B}_{39} \quad (515)$$

$$C_{40} = K_{40} \cdot \dot{B}_{40} \quad (516)$$

$$C_{41} = K_{41} \cdot \dot{B}_{41} \quad (517)$$

$$C_{42} = K_{42} \cdot \dot{B}_{42} \quad (518)$$

$$C_{43} = K_{43} \cdot \dot{B}_{43} \quad (519)$$

$$CU_2 = \frac{C_2}{\dot{m}_2} \quad (520)$$

$$CU_4 = \frac{C_4}{\dot{m}_4} \quad (521)$$

$$CU_5 = \frac{C_5}{\dot{m}_5} \quad (522)$$

$$CU_6 = \frac{C_6}{\dot{m}_6} \quad (523)$$

$$CU_7 = \frac{C_7}{\dot{m}_7} \quad (524)$$

$$CU_8 = \frac{C_8}{\dot{m}_8} \quad (525)$$

$$CU_9 = \frac{C_9}{\dot{m}_9} \quad (526)$$

$$CU_{11} = \frac{C_{11}}{\dot{m}_{11}} \quad (527)$$

$$CU_{12} = \frac{C_{12}}{\dot{m}_{12}} \quad (528)$$

$$CU_{13} = \frac{C_{13}}{\dot{m}_{13}} \quad (529)$$

$$CU_{14} = \frac{C_{14}}{\dot{m}_{14}} \quad (530)$$

$$CU_{15} = \frac{C_{15}}{\dot{m}_{15}} \quad (531)$$

$$CU_{16} = \frac{C_{16}}{\dot{m}_{16}} \quad (532)$$

$$CU_{17} = \frac{C_{17}}{\dot{m}_{17}} \quad (533)$$

$$CU_{18} = \frac{C_{18}}{\dot{m}_{18}} \quad (534)$$

$$CU_{19} = \frac{C_{19}}{\dot{m}_{19}} \quad (535)$$

$$CU_{20} = \frac{C_{20}}{\dot{m}_{20}} \quad (536)$$

$$CU_{21} = \frac{C_{21}}{\dot{m}_{21}} \quad (537)$$

$$CU_{22} = \frac{C_{22}}{\dot{m}_{22}} \quad (538)$$

$$CU_{23} = \frac{C_{23}}{\dot{m}_{23}} \quad (539)$$

$$CU_{24} = \frac{C_{24}}{\dot{m}_{24}} \quad (540)$$

$$CU_{35} = \frac{C_{35}}{\dot{m}_{35}} \quad (541)$$

$$CU_{36} = \frac{C_{36}}{\dot{m}_{36}} \quad (542)$$

$$CU_{37} = \frac{C_{37}}{\dot{m}_{37}} \quad (543)$$

$$CU_{38} = \frac{C_{38}}{\dot{m}_{38}} \quad (544)$$

$$CU_{39} = \frac{C_{39}}{\dot{m}_{39}} \quad (545)$$

$$CU_{40} = \frac{C_{40}}{\dot{m}_{40}} \quad (546)$$

$$CU_{41} = \frac{C_{41}}{\dot{m}_{41}} \quad (547)$$

$$CU_{42} = \frac{C_{42}}{\dot{m}_{42}} \quad (548)$$

$$CU_{43} = \frac{C_{43}}{\dot{m}_{43}} \quad (549)$$

### Solution

$$a = 1$$

$$B_{10} = 9,171 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d12} = 1,733$$

$$B_{d19} = 0,0005575 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d21} = 0,04967 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d5} = 0,001533 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d7} = 0,1092 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d9} = 0,0002603 \text{ [kJ/s]}$$

$$Cb = 0,47$$

$$COP_r = 1,5 \text{ [kJ/s]}$$

$$Cp_{naranja} = 6,5$$

$$C_{E3} = 0,75 \text{ [kJ/s]}$$

$$C_{E9} = -0,007795 \text{ [kJ/s]}$$

$$Eb = 0,0305$$

$$\eta_{bombas} = 0,8$$

$$FMA = 0,2998$$

$$F_{Magua} = 0,9953$$

$$F_{pc} = 0,06$$

$$F_{pn} = 0,1$$

$$F_r = 0,5$$

$$F_v = 0,04$$

$$Hc = 0,0695$$

$$k = 1,2$$

$$K_{E3} = 1$$

$$K_{E9} = 1$$

$$LHV = 50000 \text{ [kJ/kg]}$$

$$M_{cb} = 0,057$$

$$Moles = 0,09264$$

$$Nc = 0,0066$$

$$Ob = 0,4471$$

$$PCIC = 19734$$

$$\phi_c = 1,049$$

$$PMb = 7,345$$

$$PMS = 7,147$$

$$Q_{accite} = 53,43 \text{ [kJ/s]}$$

$$b = 2$$

$$B_{d11} = 1,46 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d18} = 1,122 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d20} = 0,0006276 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d3} = 1,363 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d6} = 0,8357 \text{ [kJ/s]}$$

$$B_{d8} = 4,187 \text{ [kJ/s]}$$

$$c = 9,024$$

$$Cc = 0,4959$$

$$Cp_{limoneno} = 1,834$$

$$C_{E12} = 1,774 \text{ [kJ/s]}$$

$$C_{E5} = -0,006168 \text{ [kJ/s]}$$

$$d = 0,4$$

$$Ec = 0,0305$$

$$Fc = 0,1$$

$$FMAC = 0,004717$$

$$FMn = 0,7002$$

$$F_{pg} = 0,07$$

$$F_{pp} = 0,07$$

$$Fs = 0,4$$

$$Hb = 0,069$$

$$h_{ref} = -2538 \text{ [kJ/kg]}$$

$$K_{E12} = 1$$

$$K_{E5} = 1$$

$$\lambda = 2$$

$$Mc = 0,0273$$

$$MM_{mix} = 27,82 \text{ [kg/kmol]}$$

$$Nb = 0,013$$

$$N_T = 12,42$$

$$Oc = 0,397$$

$$PCSc = 21328$$

$$PM = 7,266$$

$$PMba = 7,828$$

$$PMT = 12,86$$

$$QL = 2,661 \text{ [kJ/s]}$$

$Q_{pasteurización} = 4,276$ [kJ/s]	$Q_{pasteurizado} = 4,885$ [kJ/s]
$Q_{vaporización} = 58,09$ [kJ/s]	$R_{AC} = 20,63$
$S_b = 0,0009$	$S_c = 0,0006$
$s_{ref} = 6,947$ [kJ/kg-K]	$W_{E3} = 0,75$ [kJ/s]
$W_{E5} = -0,006168$ [kJ/s]	$W_{E9} = -0,007795$ [kJ/s]
$W_{neto} = 1,774$ [kJ/s]	$X_{CO2} = 0,08049$
$X_{CO2ref} = 0,0003$	$X_{H2O} = 0,161$
$X_{H2Oref} = 0,019$	$X_{N2} = 0,7263$
$X_{N2ref} = 0,7748$	$X_{O2} = 0,0322$
$X_{O2ref} = 0,2059$	$ya = 0,01102$
$y_{ab} = 0,02407$	$y_b = 1,007$
$y_s = 0,989$	$Y_{CO2} = 0,1273$
$Y_{H2O} = 0,1042$	$Y_{N2} = 0,7314$
$Y_{O2} = 0,03703$	





## 9. Bibliografía

- Akbari Vakilabadi, M., Bidi, M., & Najafi, A. F. (2018). Energy, Exergy analysis and optimization of solar thermal power plant with adding heat and water recovery system. *Energy Conversion and Management*.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.094>
- Akbarpour Ghiasi, R., Fallah, M., Lofan, S., & Rosen, M. A. (2020). A new approach for optimization of combined cycle system based on first level of exergy destruction splitting. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*.  
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100600>
- Allaf, T., Tomao, V., Besombes, C., & Chemat, F. (2013). Thermal and mechanical intensification of essential oil extraction from orange peel via instant autovaporization. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 72.  
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.06.005>
- Álvarez Hincapié, C., & Velásquez Arredondo, H. (2013). Exergía en sistemas biológicos: Aproximación holística para el estudio de ecosistemas y el manejo ambiental. *Producción + Limpia*.
- Baron, R. D., Pérez, L. L., Salcedo, J. M., Córdoba, L. P., & Sobral, P. J. do A. (2017). Production and characterization of films based on blends of chitosan from blue crab (*Callinectes sapidus*) waste and pectin from Orange (*Citrus sinensis* Osbeck) peel. *International Journal of Biological Macromolecules*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.004>
- Basu, P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis practical design and theory. In *Elsevier* (p. 376). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00001-5>
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). Thermal Design and Optimization. In *Thermal Design and Optimization*. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(97\)87632-3](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(97)87632-3)
- Cao, Y., Mihardjo, L. W., Farhang, B., Ghaebi, H., & Parikhani, T. (2020). Development, assessment and comparison of three high-temperature geothermal-driven configurations for power and hydrogen generation: Energy, exergy thermo-economic and optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.013>
- Catrini, P., Cipollina, A., Micale, G., Piacentino, A., & Tamburini, A. (2017). Exergy analysis

- and thermoeconomic cost accounting of a Combined Heat and Power steam cycle integrated with a Multi Effect Distillation-Thermal Vapour Compression desalination plant. *Energy Conversion and Management*.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.032>
- Cengel, Y., & Michael A, B. (2014). Termodinámica. In *Mc Graw Hill* (Vol. 7).  
<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Cheméo. (2018). *Chemical Properties of D-Limonene*. <https://www.chemeo.com/cid/32-729-7/D-Limonene#ref-joback>
- Cypriano, D. Z., da Silva, L. L., & Tasic, L. (2018). High value-added products from the orange juice industry waste. *Waste Management*.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.028>
- DANE. (2016). *INSUMOS Y FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN AGROPECUARIA: El cultivo de la naranja Valencia (Citrus sinensis [L.] Osbeck) y su producción como respuesta a la aplicación de correctivos y fertilizantes y al efecto de la polinización dirigida con abeja Apis*. 99.  
[https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol\\_Insumos\\_oct\\_2016.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Insumos_oct_2016.pdf)
- Deng, J., Wang, R., Wu, J., Han, G., Wu, D., & Li, S. (2008). Exergy cost analysis of a micro-trigeneration system based on the structural theory of thermoeconomics. *Energy*.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.05.001>
- Dincer, I., Midilli, A., & Kucuk, H. (2014). Progress in exergy, energy, and the environment. In *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04681-5>
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). Chapter 9 - Exergy Analysis of Thermal Energy Storage Systems. In I. Dincer & M. A. Rosen (Eds.), *Exergy (Second Edition)* (Second Edi, pp. 133–166). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097089-9.00009-7>
- Ebrahimgol, H., Aghaie, M., Zolfaghari, A., & Naserbegi, A. (2020). A novel approach in exergy optimization of a WWER1000 nuclear power plant using whale optimization algorithm. *Annals of Nuclear Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107540>
- Fallah, M., Ghiasi, R. A., & Mokarram, N. H. (2018). A comprehensive comparison among different types of geothermal plants from exergy and thermoeconomic points of view. *Thermal Science and Engineering Progress*.  
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.10.017>

- Flórez-Orrego, D., & de Oliveira Junior, S. (2017). Modeling and optimization of an industrial ammonia synthesis unit: An exergy approach. *Energy*, 137, 234–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.157>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). *FAO Statistics*. [www.fao.org](http://www.fao.org)
- Galaverna, G., & Dall'Asta, C. (2014). Production Processes of Orange Juice and Effects on Antioxidant Components. In *Processing and Impact on Antioxidants in Beverages*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404738-9.00021-0>
- Geankoplis, C. J. (2003). Transport Processes and Separation Process Principles. In *Transport processes and separation process principles* (p. 696). <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2008.04.005>
- Gupta, R., Asgari, S., Moazamigoodarzi, H., Pal, S., & Puri, I. K. (2020). Cooling architecture selection for air-cooled Data Centers by minimizing exergy destruction. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117625>
- Han, T., Wang, C., Zhu, C., & Che, D. (2018). Optimization of waste heat recovery power generation system for cement plant by combining pinch and exergy analysis methods. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.039>
- Hosseini, S. S., Khodaiyan, F., & Yarmand, M. S. (2016). Aqueous extraction of pectin from sour orange peel and its preliminary physicochemical properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 82, 920–926. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.007>
- Kotas, T. J. (1985a). Appendix A - Chemical exergy and enthalpy of devaluation. In T. J. B. T.-T. E. M. of T. P. A. Kotas (Ed.), *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis* (pp. 236–262). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01350-5.50014-3>
- Kotas, T. J. (1985b). Chapter 2 - Basic exergy concepts. In T. J. B. T.-T. E. M. of T. P. A. Kotas (Ed.), *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis* (pp. 29–56). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01350-5.50009-X>
- Kotas, T. J. (1985c). Chapter 6 - Thermoeconomic applications of exergy. In T. J. Kotas (Ed.), *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis* (pp. 197–235). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01350-5.50013-1>
- Kutz, M. (2019). Handbook of farm, dairy and food machinery engineering. In *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01578-1>

- León Ruiz, Y., & Moréno Sepulveda, J. C. (2006). *EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA POLINIZACIÓN DIRIGIDA A CULTIVOS DE NARANJA (Citrus sinensis VALENCIA " Y " OMBLIGON CON EL USO DE LA ABEJA Apis mellifera EN EL MUNICIPIO DE SASAIMA, CUNDINAMARCA.*
- Liu, C., Xie, Z., Sun, F., & Chen, L. (2017). Exergy analysis and optimization of coking process. *Energy*, 139, 694–705. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.006>
- Liu, D., Wang, H., Liu, H., Zheng, Z., Zhang, Y., & Yao, M. (2020). Identification of factors affecting exergy destruction and engine efficiency of various classes of fuel. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118897>
- Lopez-Velazquez, M. A., Santes, V., Balmaseda, J., & Torres-Garcia, E. (2013). Pyrolysis of orange waste: A thermo-kinetic study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 99, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.09.016>
- Mata-Torres, C., Zurita, A., Cardemil, J. M., & Escobar, R. A. (2019). Exergy cost and thermoeconomic analysis of a Rankine Cycle + Multi-Effect Distillation plant considering time-varying conditions. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.023>
- Meramo-Hurtado, S. I., & González-Delgado, Á. D. (2019). Biorefinery synthesis and design using sustainability parameters and hierarchical/3D multi-objective optimization. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118134>
- Ministerio de Agricultura y Riego del Perú. (2018). *Serie de Estadísticas de Producción Agrícola (SEPA)*. [http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta\\_cult](http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult)
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- Moncada, J., Tamayo, J. A., & Cardona, C. A. (2014). Techno-economic and environmental assessment of essential oil extraction from Citronella (*Cymbopogon winteriana*) and Lemongrass (*Cymbopogon citrus*): A Colombian case to evaluate different extraction technologies. *Industrial Crops and Products*, 54, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.035>
- Moncada, J., Tamayo, J. A., & Cardona, C. A. (2016). Techno-economic and environmental assessment of essential oil extraction from Oregano (*Origanum vulgare*) and Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 112, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.067>
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. (2010). *Fundamentals of*

- Engineering Thermodynamics. In *John Wiley & Sons, Inc.*  
<http://books.google.com/books?id=oyt8iW6B4aUC&pgis=1>
- Nisar, T., Wang, Z. C., Yang, X., Tian, Y., Iqbal, M., & Guo, Y. (2018). Characterization of citrus pectin films integrated with clove bud essential oil: Physical, thermal, barrier, antioxidant and antibacterial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 106, 670–680. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.068>
- Rashidi, H., & Khorshidi, J. (2018). Exergy analysis and multiobjective optimization of a biomass gasification based multigeneration system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(5), 2631–2644. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.073>
- Rewatkar, P. M., & Basavaraj, M. (2020). Determination of Specific Heat of Nagpur Orange Fruit (*Citrus-Sinesis L*) as a Function of Temperature and Moisture Content. In *ICRRM 2019 – System Reliability, Quality Control, Safety, Maintenance and Management*. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8507-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8507-0_14)
- Saberian, H., Hamidi-Esfahani, Z., Ahmadi Gavlighi, H., & Barzegar, M. (2017). Optimization of pectin extraction from orange juice waste assisted by ohmic heating. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.03.025>
- Sahoo, U., Kumar, R., Singh, S. K., & Tripathi, A. K. (2018). Energy, exergy, economic analysis and optimization of polygeneration hybrid solar-biomass system. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.093>
- Sánchez Villafana, E. D., & Vargas Machuca Bueno, J. P. (2019). Thermo-economic and environmental analysis and optimization of the supercritical CO<sub>2</sub> cycle integration in a simple cycle power plant. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.052>
- Singh, K., & Das, R. (2017). Exergy optimization of cooling tower for HGSH and HVAC applications. *Energy Conversion and Management*, 136, 418–430. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.024>
- Srivastava, A. K. (2012). Advances in citrus nutrition. In *Advances in Citrus Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4171-3>
- Sucheta, Rai, S. K., Chaturvedi, K., & Yadav, S. K. (2019). Evaluation of structural integrity and functionality of commercial pectin based edible films incorporated with corn flour, beetroot, orange peel, muesli and rice flour. *Food Hydrocolloids*. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.01.022>
- Sukumaran, S., & Sudhakar, K. (2018). Performance analysis of solar powered airport

- based on energy and exergy analysis. *Energy*, 149, 1000–1009. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.095>
- Szargut, J., Morris, D. R., & Steward, F. R. (1987). *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. Hemisphere Publishing, New York, NY. <https://www.osti.gov/biblio/6157620>
- Taheri, K., & Gadow, R. (2017). Industrial compressed air system analysis: Exergy and thermoeconomic analysis. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.004>
- Tetra Pak. (2004). *The Orange Book* (Ulla Ringblom (ed.); 2nd ed.). Tetra Pak Processing Systems AB.
- Valdez Tantani, V., Cordova Huaracha, V., Condori Flores, S. S., Cordova Hanco, Y. L., Soria Miranda, L. A., Cardenas Malaga, M. A., Medina de Miranda, E. A., Miranda Zanardi, L. F., & Alencastre Medrano, Y. A. (2016). *Evaluación Integrada Con Criterios de Sustentabilidad, del Proceso de Extracción por Arrastre de Vapor de Aceite Esencial de Cáscara de Naranja (Citrus Sinensis) de los Valles de la Provincia de Arequipa, en la Perspectiva de su Utilización Comercial* (p. 16).
- Viro, M., Tomao, V., Ginies, C., Visinoni, F., & Chemat, F. (2008). Green procedure with a green solvent for fats and oils' determination. Microwave-integrated Soxhlet using limonene followed by microwave Clevenger distillation. *Journal of Chromatography A*, 1196–1197(1–2), 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.04.035>
- Waheed, M. A., Jekayinfa, S. O., Ojediran, J. O., & Imeokparia, O. E. (2008). Energetic analysis of fruit juice processing operations in Nigeria. *Energy*, 33(1), 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.001>
- Wankat, P. C. (1988). Separations in chemical yield and chemical composition of the essential oil of *Satureja hortensis*. *Equilibrium Staged Separation*, 99, 19–23.
- Woodard, K. (1998). *Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter* (Vol. 1).
- Wu, J., & Wang, N. (2020). Exploring avoidable carbon emissions by reducing exergy destruction based on advanced exergy analysis: A case study. *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118246>
- Xiao, H., Wang, J., Liu, Z., & Liu, W. (2019). Turbulent heat transfer optimization for solar air heater with variation method based on exergy destruction minimization principle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.071>

- Yan, C., Lv, L., Wei, S., Eslamimanesh, A., & Shen, W. (2019). Application of retrofitted design and optimization framework based on the exergy analysis to a crude oil distillation plant. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.128>
- Zapata, B., Balmaseda, J., Fregoso-Israel, E., & Torres-García, E. (2009). Thermo-kinetics study of orange peel in air. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-009-0146-9>
- Zhang, Y., Yao, E., Tian, Z., Gao, W., & Yang, K. (2020). Exergy destruction analysis of a low-temperature Compressed Carbon dioxide Energy Storage system based on conventional and advanced exergy methods. *Applied Thermal Engineering*, 116421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116421>
- Zhou, Y. (2018). Evaluation of renewable energy utilization efficiency in buildings with exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 137(March), 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.064>