



# **TRABAJO DE GRADO**

## **MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN**

Evaluación de la eficiencia energética y productiva de una planta productora de harina de subproductos del pollo mediante la aplicación de un análisis exergético avanzado y termoeconómico

**Autor: LILIANA ISABEL CASTELLÓN CERÓN**

**Universidad Tecnológica de Bolívar**  
**Facultad de Ingenierías**  
**Cartagena D. T. y C., Bolívar - Colombia**  
**2019**



**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y PRODUCTIVA  
DE UNA PLANTA PRODUCTORA DE HARINA DE  
SUBPRODUCTOS DEL POLLO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE  
UN ANÁLISIS EXERGÉTICO AVANZADO Y TERMOECONÓMICO**

**Autor: LILIANA ISABEL CASTELLÓN CERÓN**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN**

**Director: PH.D. JUAN GABRIEL FAJARDO CUADRO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
Cartagena D. T. y C., Bolívar - Colombia  
2019**



Universidad  
Tecnológica  
de Bolívar  
CARTAGENA DE INDIAS



## AGRADECIMIENTOS

*Primeramente a mi Padre Dios por haberme dado la vida y la sabiduría en medio de las dificultades para guiarme a alcanzar este logro.*

*A mi Director de Tesis, PhD. Juan G. Fajardo Cuadro, por su siempre buena actitud ante mis inquietudes y dudas, y por brindarme de su valioso conocimiento y experiencias en un marco de confianza, afecto y amistad.*

*A la Universidad Tecnológica de Bolívar y a los docentes del programa de Maestría de Ingeniería de Producción por todo lo que aportaron en mi formación como magíster, y por todas sus pertinentes sugerencias y aportes durante el desarrollo del proyecto.*

*A las empresa y trabajadores de la empresa agroindustrial en la cual realice el presente estudio, por la información y colaboración brindada fundamental para la elaboración de este trabajo de grado.*

*No por estar de últimos los menos importantes, mis queridos padres, mi abuelita materna hermosa y mi amado novio quienes con su amor, apoyo, ayuda incondicional y palabras de ánimo, no hubiera sido posible la culminación de esta tesis.*

## DEDICATORIA

*A Dios quien me dio todo lo que necesitaba para lograr este triunfo, al poner mi confianza en Él y reconocer que en Él todo es posible, me permitió poner mi empeño para soñar en el día que esta meta fuera alcanzada y escalara un peldaño más en mi crecimiento profesional.*

*A mis Padres Carmen Elena y Neiro, y mi abuelita materna Carmen, por brindarme su apoyo desde el principio hasta el final en el camino recorrido para finalizar estos estudios.*

*Finalmente al hombre que llegó a mi vida en el momento que menos esperaba pero justo en el momento en que más lo necesitaba, David Ramírez Brewer, Dios te envió como una bendición a mi vida, gracias por confiar en mis capacidades, tu amor y compañía en este proceso llamado tesis, junto con tus consejos e impulso que me diste en repetidas ocasiones fueron primordiales para que este proyecto llegara a su culminación. Te quiero mucho.*

## RESUMEN

La Industria avícola en los últimos años ha tenido un crecimiento vertiginoso en la producción de pollos, y según estudios se prevé que en los próximos años continúe en alza. Por lo anterior, es de interés para la industria que sus procesos sean cada vez más eficientes, rentables y que generen menor impacto al medio ambiente, estos tres aspectos tienen que ver con el buen aprovechamiento de los recursos y el buen manejo de los residuos que se generan a lo largo de los procesos de producción de productos.

La industria avícola ha encontrado una oportunidad económica en el aprovechamiento de los residuos que se generan en las plantas de beneficio, según estudios a partir de las vísceras plumas y sangre es posible la producción de harinas que son utilizadas como alimentos balanceados para animales de engorde debido a su alto contenido proteico, sin embargo debido a los procesos de esterilización y eliminación de posibles bacterias y agentes patógenos, estos procesos a los que son sometidos estos residuos consumen un alto nivel de energía.

Por consiguiente, el objetivo del presente estudio fue realizar una evaluación del uso de la energía y productividad en una planta productora de harina de vísceras de pollo mediante la aplicación de un análisis exergético avanzado y un análisis termoeconómico. El resultado del índice de consumo energético no dista del valor referenciado en la literatura, sin embargo los resultados de las eficiencias exergéticas fueron por debajo del 1%, exceptuando el proceso de cocción, con un 11%, lo anterior se obtuvo a causa de los altos valores de destrucción de exergía.

No obstante, por medio de los cálculos realizados con la metodología del análisis exergético avanzado fue posible identificar que de la tasa de destrucción de exergía en cada uno de los equipos aproximadamente del 65 al 80% corresponde a destrucción de exergía evitable, por lo cual, estos resultados contrastan con los obtenidos para el índice de potencial de mejora, lo que demuestra que existen oportunidades de mejora en el sistema productivo al adquirir tecnologías más eficientes que permitan reducir las ineficiencias y mejorar el aprovechamiento de los recursos.

## Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO 1 .....	188
1. ESTADO DEL ARTE .....	188
1.1. Análisis exergético convencional y termoeconómico en la industria alimentaria ..	188
1.2. Análisis exergético avanzado en la industria alimentaria .....	255
1.3. Investigaciones realizadas en la industria avícola y producción de piensos .....	277
CAPÍTULO 2 .....	31
2. METODOLOGÍA.....	31
2.1. Descripción general del proceso .....	31
2.2. Presentación áreas de proceso en la línea de víscera .....	333
2.3. Representación gráfica del proceso en estudio .....	344
2.4. Descripción del proceso de elaboración de harina de vísceras de pollo .....	344
2.4.1 Materia prima .....	344
2.4.2 Características generales de la harina de víscera de pollo .....	366
2.4.3 Área de subproductos .....	366
2.4.4 Área de materia Prima.....	377
2.4.5 Área de proceso.....	377
2.4.5.1 Proceso de cocción.....	40
2.4.5.2 Proceso de prensado.....	40
2.4.5.3 Proceso de molienda .....	41
2.4.5.4 Proceso de enfriado.....	41
2.4.6 Área de empaque y almacenamiento.....	41
2.5. Definición del ambiente de referencia .....	42
2.6. Análisis exergético convencional.....	43
2.6.1 Balance de masa.....	43
2.6.2 Balance de energía .....	433



2.6.2.1	Entalpía.....	44
2.6.2.2	Calor y trabajo.....	45
2.6.2.3	Eficiencia energética.....	45
2.6.2.4	Índice energético de producción.....	46
2.6.3	Balance de exergía .....	466
2.6.3.1	Eficiencia exergética.....	49
2.6.3.2	Índice de mejora potencial.....	50
2.6.3.3	Índice exergético de producción.....	50
2.6.3.4	Índice de sostenibilidad.....	51
2.7.	Análisis exergético avanzado: Exergía evitable e inevitable .....	522
2.8.	Análisis termoeconómico.....	533
2.8.1	Balance económico .....	544
2.8.2	Balance exergético contable.....	555
2.8.3	Parámetros termoeconómicos para la evaluación del sistema .....	588
2.8.3.1	Factor exergoeconómico.....	58
CAPÍTULO 3.....		60
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	60
3.1	Representación gráfica de los equipos y balances.....	60
3.2.	Análisis exergético convencional.....	60
3.2.1	Balance de masa.....	60
3.2.2	Balance de energía .....	63
3.2.3	Balance de exergía .....	655
3.3.	Análisis exergético avanzado.....	677
3.4.	Análisis termoeconómico.....	699
3.4.1	Balance económico .....	70
3.4.2	Balance exergético contable.....	71
3.5	Análisis de oportunidades de mejora.....	75

3.5.1 Efecto de la temperatura en los equipos de proceso.....	75
3.5.1.1 Variación de la temperatura de entrada del vapor al digestor.....	75
3.5.1.2 Variación de la temperatura de salida de las vísceras cocidas.....	76
3.5.2 Tecnología de molienda húmeda.....	76
CAPÍTULO 4.....	777
4. CONCLUSIONES .....	777
RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA .....	80
ANEXO A.	

## Lista de Tablas

<b>Tabla 2.1</b> Codificación de las líneas de proceso .....	33
<b>Tabla 2.2</b> Áreas de proceso en la línea de víscera.....	33
<b>Tabla 2.3</b> Convenciones para el diagrama de flujo de proceso.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Tabla 2.4</b> Especificaciones del diagrama de flujo.....	38
<b>Tabla 3.1</b> Representación gráfica de los volúmenes de control y ecuaciones de los balances.....	61
<b>Tabla 3.2</b> Balance de masa del proceso de cocción .....	622
<b>Tabla 3.3.</b> Balance de masa del proceso de prensado. ....	62
<b>Tabla 3.4.</b> Balance de masa en proceso de molienda. ....	62
<b>Tabla 3.5.</b> Balance de masa del proceso de enfriado. ....	62
<b>Tabla 3.6.</b> Descripción, composición y propiedades específicas de las corrientes másicas.63	
<b>Tabla 3.7.</b> Resultados del balance de energía.....	64
<b>Tabla 3.8.</b> Flujos exergéticos y eficiencia exergética del análisis exergético convencional65	
<b>Tabla 3.9</b> Resultados del índice de mejora potencial para cada equipo.....	66
<b>Tabla 3.10.</b> Datos base para el análisis exergético avanzado.....	677
<b>Tabla 3.11.</b> Resultados del análisis exergético avanzado.....	688
<b>Tabla 3.12.</b> Costos no exergéticos asociados a costos de capital de inversión y costos de operación y mantenimiento en los componentes del sistema.....	71
<b>Tabla 3.13</b> Balances de costos exergéticos y ecuaciones auxiliares.....	72



<b>Tabla 3.14.</b> Flujos de exergía, costos totales y costos unitarios de exergía asociados con cada flujo másico del proceso. ....	722
<b>Tabla 3.15.</b> Flujo de exergía destruida, costos exergéticos unitarios asociados con cada componente del sistema, costo total de destrucción de exergía, costo total de inversión y factor exergoeconómico. ....	733
<b>Tabla 3.16</b> Flujo de exergía destruida, costos exergéticos unitarios asociados con cada componente del sistema y costo total de destrucción de exergía con la máxima eficiencia .....	744
<b>Tabla 3.17</b> Comparación de los resultados para el índice de mejora potencial .....	755

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Producción de pollo y huevo en Colombia 2010-2016 .....	13
<b>Figura 1.1</b> Representación cualitativa de la relación entre la eficiencia exergética, el índice de sostenibilidad y el impacto ambiental. ....	25
<b>Figura 2.1</b> Representación gráfica de las etapas seleccionadas en el proceso de estudio... ..	34
<b>Figura 2.2</b> Diagrama de Flujo para la elaboración de harina de víscera de pollo.....	39
<b>Figura 3.1</b> Representación del consumo de energía eléctrica en el sistema en estudio .....	64
<b>Figura 3.2.</b> (a) Razón de destrucción de exergía con respecto a la exergía fuel total; (b) Razón de destrucción de exergía con respecto a la exergía destruida total del sistema.....	666
<b>Figura 3.3.</b> Porcentaje de partes de exergía destruida evitable e inevitable en cada proceso. ....	688
<b>Figura 3.4.</b> Comparación entre eficiencia energética y eficiencia exergética de cada proceso .....	69
<b>Figura 3.5</b> Variación porcentual de la eficiencia exergética, razón de destrucción de exergía y exergía destruida con respecto a la temperatura de entrada del vapor al digestor .....	75
<b>Figura 3.6</b> Variación porcentual de la eficiencia exergética, razón de destrucción de exergía y exergía destruida con respecto a la temperatura de salida de las vísceras del digestor. ....	76



## NOMENCLATURA

$\dot{m}$ : Flujo másico, kg/s, Ton /h

$\dot{Q}$ : Tasa de transferencia de calor, kJ/s

$\dot{W}$ : Trabajo, kJ/s

$h$ : Entalpía específica, kJ/kg

$s$ : Entropía específica, kJ/kg K

$V$ : Velocidad, m/s

$g$ : Fuerza de gravedad, m/s<sup>2</sup>

$z$ : Altura, m

$T$ : Temperatura, K

$\dot{E}$ : Energía total, kJ/s

$H$ : Entalpía total, kJ

$C_p$ : Calor específico, kJ/ kg K

$p$ : Presión, kPa

$\dot{E}_x$ : Exergía, kJ/s

$v$ : Volumen, m<sup>3</sup>

$P$ : Potencia, W

$I$ : Intensidad, A

$V$ : Voltaje, V

$w_p$ : Fracción másica de proteína

$w_G$ : Fracción másica de grasa

$w_A$ : Fracción másica de agua

$y$ : Fracción de pérdidas de exergía, %

$y^*$ : Fracción de destrucción de exergía, %

$A$ : Anualidad equivalente, \$/año

$P_0$ : Gastos principios de año, \$

$k$ : Factor de nivelación

$r_n$ : Tasa nominal de escalamiento

$i_{eff}$ : Tasa efectiva anual

$n$ : Años

$\tau$ : Horas/ año que funciona la planta

$\dot{Z}$ : Costos no exergéticos, \$/día

$OMC_L$ : Costos de operación y mantenimiento, \$/año

$PEC$ : Costo de compra de los equipos, \$

$f$ : Factor exergoeconómico

$r$ : Diferencia relativa

$\dot{C}$ : Costos exergoeconómico o exergético total, \$/día

$c$ : Costo exergoeconómico o exergético unitario, \$/kJ



### Subíndices

$i$  : Entrada

$e$  : Salida

$k$  : K-ésimo

$net$  : Neto

$ref$  : Estado de referencia

$D$  : Destrucción

$Q$  : Calor

$W$  : Trabajo

$L$  : Pérdidas

$P$  : Producto

$F$  : Fuel

$ex$  : Exergético (a)

$tot$  : Total

$p$  : Presión Constante

### Superíndices

$PH$  : Física, total

$K$  : Cinética, total

$P$  : Potencial, total

$CH$  : Química, total

$AV$  : Evitable

$UN$  : Inevitable

$CI$  : Costos indirectos

$OM$  : Operación y mantenimiento

### Símbolos griegos

$\psi$  : Exergía específica, kJ/ kg K

$\varepsilon_I$  : Eficiencia energética, %

$\varepsilon_{II}$  : Eficiencia exergética, %

## INTRODUCCIÓN

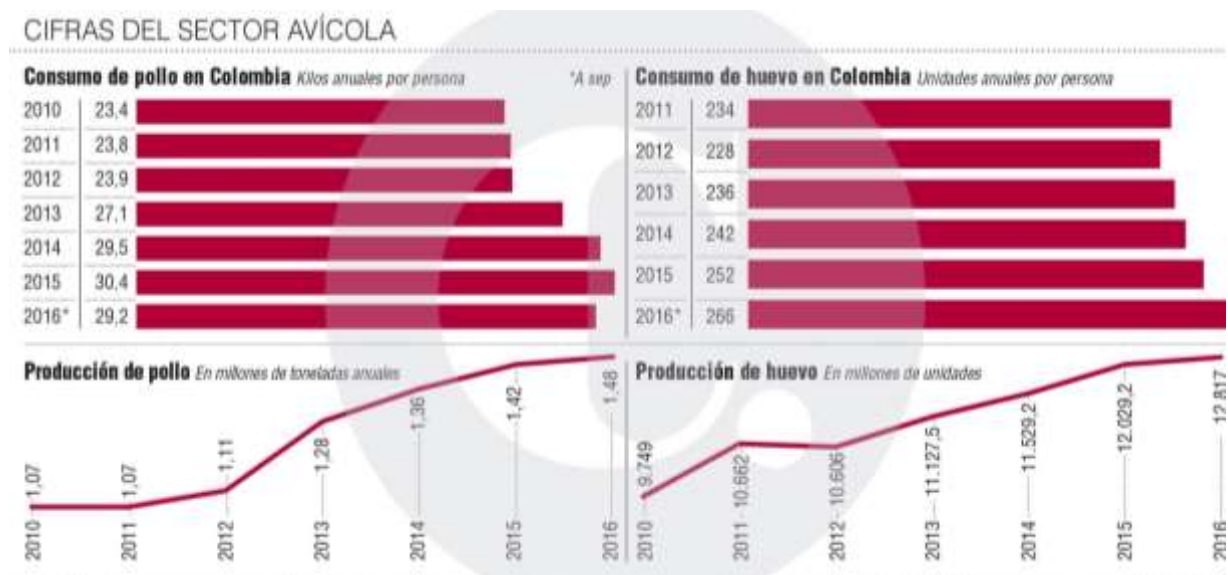
En Colombia aún no se explota todo el potencial para implementar nuevas tendencias enfocadas al ahorro energético y a la reducción del impacto ambiental, a pesar de los beneficios obtenidos al invertir en este tipo de estrategias de eficiencia energética. Esto se debe en general, a que los empresarios en su mayoría piensan que a mayor producción mayor productividad, pero esto no es necesariamente cierto. Producción se refiere a la actividad de producir bienes y servicios, y productividad se hace referencia a la utilización eficiente de los recursos al producir bienes o servicios [1].

Es por lo anterior, que los empresarios no toman riesgos en áreas que están fuera de sus actividades básicas (como producir y vender sus productos), como lo muestran los resultados del Programa de Transformación Productiva (PTP) liderado por el Ministerio de Comercio y Agricultura, el cual va dirigido a las pequeñas y medianas empresas (Pymes) (las cuales representan el 66% de la industria nacional [2] ), y que en su diagnóstico registrado a través de Colombia Productiva da cuenta de que 8 de cada 10 empresas no implementan medidas de eficiencia y tienen equipos muy viejos que generan un alto consumo energético [3]. Lo anterior, junto a aspectos como la dificultad para certificarse en calidad, la alta rotación del personal y el mal manejo de los procesos, impiden la reducción del costo unitario de sus productos, generando trabas en la comercialización, y por ende dificulta el aumento de la productividad.

Por otro lado, cabe resaltar para el caso de la industria en estudio, de acuerdo a estimaciones realizadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en 2014 la producción internacional de carne de aves alcanzó 108,7 millones de toneladas, lo que representó un incremento de 1,6% en comparación con la producción de 2013 [4], luego a nivel de Latinoamérica entre 2016 y 2017 la producción de pollo creció en un ritmo del 5,35% en pollos [5]. En el mismo sentido, informes de la Federación Nacional de Avicultura (Fenavi) de Colombia, reportan que la industria avícola colombiana se ubica

en el tercer lugar de importancia a nivel latinoamericano (después de México y Brasil) en la producción de pollo [6].

Además a nivel nacional, se puede observar en la figura 1.1, que el crecimiento de la producción de carne de pollo junto a la producción de huevo desde el 2010 su crecimiento se ha mantenido y con tendencia a la alza. En el 2015, el sector produjo 1,42 millones de toneladas de carne de pollo, lo cual representa un consumo de 30,4 kg de pollo per cápita al año, para el 2016 creció un 3,8% cumpliéndose las proyecciones que hizo Fenavi por encima de las expectativas [7]. No obstante, la industria del pollo sigue teniendo un crecimiento estable, en el 2017 tuvo un aumento del 6,4% en relación con el año 2016, así las cosas, hoy el pollo participa con el 47 % de los 70 kilos que consume de proteína en promedio un colombiano en el año, alcanzando un consumo per cápita de pollo de 32,8 kilos por persona en 2017. Se espera que la cifra siga en aumento, pues se considera que en Colombia todavía hay un margen amplio de crecimiento en cuanto al consumo de pollo, ya que en países como Chile o Brasil se superan los 40 kilos per cápita anuales [8] .



**Figura 1.** Producción de pollo y huevo en Colombia 2010-2016 [9]

No obstante, los avicultores colombianos se enfrentan a varios aspectos de la producción que deben superar para mantener su competitividad en el mercado nacional y seguir creciendo en

su sector como lo han venido logrando durante los últimos años [10]. El mayor aspecto a tratar es la reducción de costos de producción, lo cual aumentaría los niveles de competitividad y rentabilidad, según Fenavi, el reto de disminuir los costos de producción se aproxima a un 40%, puesto que producir un kilo de pollo en Colombia cuesta US\$0,80, y en Brasil cuesta US\$0,38, que es el país líder de producción de carne de pollo a nivel mundial junto con Estados Unidos [11]. Analistas del sector identifican siete vías claves por medio de las cuales esto se podría lograr, entre ellas se destacan: el mejoramiento en los sistemas de producción y tecnologías limpias [12]. Lo anterior, apoya la existente necesidad de analizar la viabilidad de las modificaciones en las tecnologías existentes y/o del planteamiento de nuevos sistemas en el sector industrial que permitan optimizar los recursos.

Sin embargo, el suministro de materias primas y la nutrición, son factores relevantes que se deben cuidar, y no dejar de lado para obtener un producto final de calidad que siga favoreciendo la confianza del mercado consumidor. Por tanto, el sector está cada vez más atento a la búsqueda de nuevas opciones para mejorar el desempeño de los animales mediante la alimentación. La industria está segura que para alcanzar óptimos índices de productividad necesita acompañar su desarrollo con una nutrición cada vez más precisa y con mejor aprovechamiento de los nutrientes [13]. La implementación de soluciones nutricionales con comprobación científica para superar los desafíos de este campo, ya están siendo probados por muchos productores latinoamericanos logrando excelentes resultados. Además, es de vital importancia reconocer que la formulación de alimentos balanceados no consiste en mezclar simplemente ingredientes, sino en aportar los nutrimentos necesarios para el óptimo crecimiento del pollo, como lo son las proteínas (aminoácidos), energía (carbohidratos y ácidos grasos), minerales y vitaminas, lo que conforma un buen alimento en un primer paso; luego, el segundo paso es conocer qué tan digestibles son esos nutrimentos y si éstos proveen los resultados esperados con el mejor retorno de la inversión posible [14].

Por lo anterior, los subproductos de origen animal se han convertido en materia prima para la producción de alimentos balanceados para la industria avícola, debido a que estudios han ratificado que son una fuente muy valiosa de nutrimentos altamente digestibles, y al ser

dietas más altas en energía, proporcionan un crecimiento más rápido y una mejor conversión alimenticia, lo que brinda una ventaja competitiva. Ejemplo de ellos son la harina de carne y hueso, harina de sangre, harina de vísceras, harina de pluma, sebo, aceite de pollo, manteca y mezclas de todo lo anterior [15]. Estos subproductos se obtienen a partir de un proceso de reciclado de residuos de origen animal o “rendering” (palabra de origen francés), el cual consiste en cocinar, secar y moler los residuos “no aprovechables” de aquellos animales destinados para el consumo humano.

Estos subproductos son excelentes fuentes de calcio, fósforo, aminoácidos y ácidos grasos, dicho en otras palabras, fuentes de proteína, energía y minerales de alta digestibilidad. Al mismo tiempo, el rendering ofrece entre otras ventajas la valorización de esos residuos, al aplicarse un tratamiento adecuado y económicamente viable para su utilización, y la reducción del impacto que puedan generar estos residuos al medio ambiente [16]. Según estudios, el porcentaje de desechos (porcentaje sobre el peso vivo) obtenidos de centros de matanza corresponde aproximadamente a un 17% y 55% en el sector vacuno y porcino respectivamente (lo cual corresponde a hueso, vísceras, órganos genitales, sangre, patas con cascos y grasa), y para el sector avícola, de un 25% (correspondiente a plumas, sangre y vísceras); lo que refleja que existe una oportunidad de sacar provecho a estos residuos [17].

El rendering se ha convertido en la manera de reducir costos de manejo de residuos y/o aumentar las ganancias de las empresas al darle un uso y valor a estos. No obstante, como todo proceso, seguido de los costos de materia prima, el segundo más importante es el costo energético, por lo cual para obtener un mayor beneficio, se requiere analizar el consumo de los recursos energéticos, y así lograr un aumento en la eficiencia del proceso [17]. Sin embargo, la metodología de análisis desde el punto de vista de la conservación de la energía queda incompleto, lo cual varios autores han afirmado al decir que este tipo de análisis no permiten definir apropiadamente el grado de aprovechamiento de la energía suministrada a los procesos [18]. Por lo anterior, el análisis exegético se ha convertido en una herramienta de gran valor, ya que permite determinar la localización, el tipo y la verdadera magnitud de pérdidas, éste junto al análisis termoeconómico cuantifica en costos las pérdidas

termodinámicas de un sistema [19]. El evaluar correctamente los costos de las diferentes corrientes energéticas y sus pérdidas, es un aspecto imprescindible en el establecimiento de programas para la reducción de los costos energéticos, a la vez, permite identificar oportunidades de mejora en la eficiencia energética y optimización de los procesos [20] .

Asimismo, para la aceptabilidad de los sistemas y para la evaluación de los impactos ambientales, el análisis exergético va ganando una mayor relevancia en el plano mundial, puesto que una forma primaria de reducir los impactos de los procesos es mejorar la eficiencia de las plantas. [21]. Los resultados de esta metodología hace posible proponer acciones de mejora que aumenten la eficiencia, la productividad del proceso, y esto se vea reflejado en un mejor aprovechamiento de los recursos, reducción de costos, una minimización en la generación de residuos, y por lo tanto del impacto ambiental potencial [22].

No se han encontrado registros acerca del análisis exergético avanzado aplicado a procesos rendering, a partir de lo cual se considera que no se han aprovechado las ventajas que brinda esta herramienta, para identificar oportunidades de mejora en el proceso de producción de harina de subproductos de origen animal. En la literatura existen metodologías que han sido aplicadas a otros procesos, y pueden ser adaptadas al caso de estudio, brindando un aporte al análisis de esta actividad industrial, que se proyecta a generar un mayor impacto en la economía del país. A partir de estas consideraciones:

***Problema científico*** No se cuenta con un procedimiento dirigido a la aplicación del análisis exergético avanzado a una línea de producción de harina de vísceras de pollo, que permita identificar estrategias de uso racional de la energía, y garanticen un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos. Tampoco hay bibliografía que evidencie la aplicación de un análisis termoeconómico a este sistema de producción, lo cual proporcionaría información adicional para evaluar indicadores exergéticos y termoeconómicos en la búsqueda de oportunidades de mejora y de un aumento en la eficiencia del sistema productivo que genere un incremento en la rentabilidad económica.



**Objeto de Estudio:** El objeto de estudio de esta tesis es el proceso de producción de harina de vísceras de pollo. Este es evaluado como el conjunto de sistemas termodinámicos (volúmenes de control) cuyas fronteras son sus paredes, techos y pisos.

### ***Objetivo General***

Realizar un análisis exergético avanzado y análisis termoeconómico en una planta productora de harina de vísceras de pollo para la evaluación del uso de la energía y productividad en la misma.

### ***Objetivos Específicos***

- Caracterizar el consumo energético de la planta procesadora de harina de vísceras de pollo seleccionada para el estudio.
- Determinar los parámetros necesarios para la aplicación del análisis exergético avanzado y análisis termoeconómico en el proceso de producción de harina de vísceras de pollo.
- Modelar termoeconómicamente los principales componentes que integran el proceso de producción de harina de vísceras de pollo.
- Identificar oportunidades de mejora en el uso de la energía y productividad del proceso de harina de vísceras de pollo a partir de los resultados obtenidos del análisis exergético convencional, análisis exergético avanzado y análisis termoeconómico.



## CAPÍTULO 1

### 1. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se exponen las investigaciones desarrolladas en la industria alimentaria a nivel mundial en las cuales se han aplicado el análisis exergético convencional, termoeconómico y análisis exergético avanzado. Además, se presentan resultados de estudios que se han llevado a cabo en la industria avícola con respecto al consumo energético y productividad, así como en los procesos de elaboración de piensos y del aprovechamiento de los subproductos de origen animal.

#### 1.1. Análisis exergético convencional y termoeconómico en la industria alimentaria

El sector industrial es uno de los sectores de mayor consumo energético dentro de las actividades humanas, al cual se le atribuye que junto a su crecimiento han aumentado las emisiones de efecto invernadero. Estudios indican que las emisiones de CO<sub>2</sub>, el principal gas de efecto invernadero, para el año 2018 crecieron alrededor de un 2,7% con respecto al año 2017 hasta llegar a las 37,1 Giga toneladas, lo que marca una cifra nunca antes vista en la historia de la humanidad [23]. Entre los subsectores de la industria que han crecido, se encuentra el sector alimentario, el cual según estudios recientes de la FAO consume el 30% de la energía disponible en todo el mundo, y desde sus actividades, ha aportado al calentamiento global [24]. Actualmente, los consumidores en los países demandan productos alimenticios que se hayan producido con efectos adversos mínimos sobre el medio ambiente, puesto que en los últimos años existe una conciencia ambiental creciente, el sector industrial ha considerado esencial evaluar la utilización de recursos en los sistemas de producción, así como su impacto medioambiental [25].

La industria alimentaria ha realizado varias aplicaciones del análisis exergético convencional, obteniendo importantes resultados. Sin embargo, estudios en los cuales se evidencie la aplicación del análisis exergético avanzado y termoeconómico son pocos.

Sogut y otros (2010), emplearon el análisis exergético como una herramienta que permitiría estimar la magnitud de ineficiencias en el proceso de producción de pasta de tomate y

conducir a una mejor comprensión de los fenómenos termodinámicos que influyen en la eficiencia del proceso. El estudio fue realizado con el objetivo de evaluar el rendimiento, específicamente en la unidad de evaporación de cuádruple efecto, la cual consume aproximadamente el 60% de la entrada total de energía. Los resultados de la mayor destrucción de exergía se obtuvieron en el primer efecto con 158.2 kW, 52.7% de la entrada de exergía, a causa de las grandes diferencias de temperatura entre el vapor y el tomate, por lo cual los autores propusieron que al disminuir la temperatura del vapor debería disminuir la destrucción de la energía en el primer efecto. Desde el primer efecto hasta el último efecto, el potencial de mejora exergética obtenido fue de 128 kW, lo cual representa el 55% del total de destrucción de exergía en el sistema de cuádruple efecto. Los resultados del análisis proporcionaron información importante para el diseñador de la unidad evaporadora de efectos múltiples, permitiendo deducir que para mejorar la eficiencia de tales sistemas industriales, se debe aplicar un aislamiento en las tuberías e intercambiadores de calor. Además, se comprobó que la recolección del vapor en un tanque antes de entrar a la unidad evaporadora ocasionaba caídas de presión, las cuales deben ser eliminadas [26].

De forma similar, Fadare y otros (2010), aplicaron un análisis exergético a una planta de producción de bebidas de malta, con el propósito de identificar las oportunidades para la minimización de las pérdidas de exergía en las cuatro operaciones principales del proceso: almacenamiento en silos, preparación e infusión, filtración y envasado. Los resultados revelaron que la operación de envasado fue la de mayor consumo energético con 223,19 MJ y a la vez con la mayor ineficiencia, 92,16% de destrucción de exergía. Mientras que el proceso de pasteurización representaba más del 50% de la ineficiencia global, debido a la gran diferencia de temperatura entre las corrientes de entrada y salida. Se concluyó que las pérdidas de exergía en este proceso se podrían minimizar mediante el aumento de la capacidad de la unidad del pasteurizador, que se traduce en una reducción de la carga en la caldera, lo cual a su vez permitirá un tiempo más largo de producción y se evitaría la destrucción de exergía que se produce por las operaciones de arranque, parada, limpieza y

esterilización. Además, se sugirió la integración de calor entre el pasteurizador y otras unidades del proceso para ayudar a mejorar la eficiencia del sistema [27].

Ghewade y Sapali (2012), decidieron aplicar el análisis exergético con el propósito de aumentar la eficiencia y rentabilidad del proceso de almacenamiento de leche. El estudio fue enfocado a los tanques de enfriamiento y almacenamiento de la leche a granel, debido a la importancia de éstos en el sistema de refrigeración para mantener la calidad de la leche, y debido a que se ha verificado que son los equipos que consumen más energía y por lo tanto generan un mayor costo de procesamiento. Los resultados obtenidos permitieron comprobar que el rendimiento de este tipo de sistemas posee una eficiencia exergética de alrededor del 46%, lo que es realmente bajo. Sin embargo, se pudieron identificar los componentes que influyen a que se dé este valor; el mayor componente que contribuye a las pérdidas de exergía es el compresor con un 38%, luego el condensador y el evaporador con un porcentaje aproximado al 25%, y por último la válvula de expansión con un 10%. Estos resultados se deben a factores como el estrangulamiento, fricción, mezclas de fluidos, convección interna y externa, conducción, turbulencias por cambios en la dirección del flujo, los cuales reflejan un inadecuado diseño del proceso y de sus componentes. Al identificarse las pérdidas e irreversibilidades fue posible proponer un plan de mejora para los componentes involucrados en este proceso. Se realizó un cambio de diseño en el evaporador que se tradujo en un 10% de ahorro de energía sin requerir ningún costo adicional de inversión [28].

Adedeji y Badmus (2012), realizaron un análisis energético, exergético y económico del abastecimiento de energía a una fábrica de cerveza sobre los datos históricos de la misma en un período de 4 años (2004-2008). De los resultados del análisis se obtuvo que las eficiencias energéticas medias anuales han variado de 75,62% en 2004 a 81,71% en 2006, mientras que la media anual de las eficiencias exergéticas han variado desde 42,66% en 2004 a 57,10% en 2005, identificando que el año más eficiente energéticamente fue 2006 y 2005 exergéticamente. La diferencia de estos años con los de menor eficiencia fue debido a la proporción de diésel usado en el generador y en la caldera, ya que la exergía del sistema es más sensible al uso del diésel de la caldera, mientras que la energía del sistema es más

sensible a la utilización del diésel del generador debido a las diferentes eficiencias de estos dispositivos. Éstos equipos son los de mayor impacto sobre el uso de energía en la fábrica, dado que el generador suple la energía eléctrica la mayor parte de las horas de funcionamiento de la planta, y la caldera se utiliza para aquellos procesos en los que se requiere vapor como el lavado, esterilización, calentamiento, pasteurización entre otros, que son en su mayoría. Los costos unitarios medios anuales de energía variaron de 27.86 USD/GJ en 2006 a 32.80 USD/GJ en 2004, lo que confirma la proporción inversa de eficiencia energética y costos. Se concluyó que para conseguir una reducción de costes en el producto, y aumentar la eficiencia del proceso, se debe prestar atención al proceso de generación de vapor, dado que es inevitable su requerimiento, pero muy costoso, por lo cual se deben evitar al máximo las fugas, y los despilfarros innecesarios. Por lo anterior, se sugirió evaluar la posibilidad de implementar un diseño de proceso de mayor confiabilidad técnica y energética como es la cogeneración, que permite la generación de energía eléctrica y vapor. Además, se sugirió el cambio de combustible a uno de menor contenido de carbono, lo que permitiría un aumento en la eficiencia de la caldera, reduciendo costes y nivel de contaminación por las emisiones de gases de efecto invernadero [29].

Jafaryani y otros (2015), realizaron un análisis de exergía detallado en una planta de producción de yogurt pasteurizado, para lo cual dividieron el sistema en cuatro subsistemas, generación de vapor, refrigeración, estandarización y pasteurización. Los resultados mostraron que el subsistema generación de vapor tuvo la tasa más alta de destrucción de exergía con un valor de 12484,88kW, debido a las irreversibilidades del proceso de combustión y procesos de transferencia de calor interconectados, en los cuales se presentan grandes diferencias de temperatura. Además, la fuente de condensado tuvo la eficiencia exergética más baja (8.48%), debido a su mayor tasa de rechazo de exergía al ambiente. No obstante, debido a que este subsistema tuvo 82,62% del consumo de exergía específica con respecto a refrigeración, pasteurización y estandarización que sólo tuvieron 9,36%, 5,21% y 2,80% respectivamente, se concluyó que una mejora en el rendimiento exergético del mismo podría reducir la tasa de destrucción de exergía del proceso. Los autores resaltan el beneficio

que se genera al realizar un análisis de exergía para diagnosticar mejor los puntos de mejora y potencial ahorro de energía en una planta de procesamiento de lácteos [30].

Zisopoulos y otros (2015), con la aplicación de un análisis exergético, realizaron una comparación del rendimiento termodinámico de tres cadenas de producción de pan: una en la que se generan residuos, otra en la que se evita la generación de residuos, y otra en la que a partir de los residuos se producen nuevos panes. En la cadena de producción de pan “brown bun” (de coloración parda) y “white bread” (pan blanco) en la que existe generación de residuos, tuvo un buen rendimiento termodinámico debido a la alta eficiencia exergética (71.2%) y a que las pérdidas exergéticas específicas fueron las más bajas (5.4 MJ / kg pan) con respecto a las otras dos cadenas de producción. Sin embargo, si se evitan pérdidas de material (es decir, si se utilizan las materias primas al máximo) se mejora la eficiencia exergética de las cadenas de producción de pan. No obstante, el reciclaje de residuos de pan también es altamente eficiente cuando el residuo fermentado total es utilizable. Los resultados permitieron concluir que la mayoría de las pérdidas de exergía se produjeron en las etapas de horneado, enfriamiento y congelación. Por consiguiente, se pudo identificar que para obtener un incremento en la optimización exergética los diseños deben enfocarse en mejorar el desempeño en las etapas de horneado y enfriamiento [31].

Soufiyan y otros (2016), emplearon el análisis exergético en una planta procesadora de leche de larga duración, la cual constaba de cuatro líneas principales que incluyen la generación de vapor, un sistema de refrigeración y recepción, pasteurización y estandarización de la leche, y una unidad de procesamiento de leche de temperatura ultra alta (UHT). Los resultados indicaron que la mayor razón de destrucción de exergía con respecto a la destrucción de exergía total del sistema se produjo en el sistema de generación de vapor con un 60,70%, seguido por el sistema de refrigeración con un 15,80%, la unidad de procesamiento de leche UHT con un 14,34% y finalmente la pasteurización y estandarización con un 9,15%. Dado que la mayor contribución de destrucción de exergía específica la tiene el sistema de generación de vapor, se reconoció la necesidad de aplicar estrategias que permitieran reducir la destrucción de exergía generada en la caldera, como por ejemplo la implementación de un

sistema de producción combinada de calor y energía, lo cual se podría convertir en un escenario eficiente para generar electricidad y calor aumentando la productividad de ese tipo de procesos [32].

Soufiyan y otros (2016), desarrollaron un análisis exergético detallado en una planta de producción de pasta de tomate con un evaporador de doble efecto con el fin de distinguir los puntos de mayor oportunidad de ahorro energético, la tasa de destrucción y pérdida de exergía, y la eficiencia exergética. Los resultados mostraron que más del 82% de la exergía total destruida se presenta en la caldera, seguida del segundo efecto con 243,75 kW. Se encontró que la eficiencia exergética de las unidades evaporativas de primer y segundo efecto fueron de 65.33% y 56.60%, respectivamente, y que el indicador del consumo de exergía por unidad de producción fue de 16,83 MJ/ kg de pasta de tomate producida. Los mayores índices de mejora potencial correspondieron al condensador, al intercambiador de calor y al segundo efecto con valores de 197,41 kW, 184,29 kW y 138,29 kW respectivamente. Con este estudio se identificó la oportunidad de optimizar en diseño y funcionamiento los sistemas de intercambio y rechazo de calor, así como de la evaporación de múltiple efecto empleadas en industria de alimentos, de esta manera, se conseguiría mitigar los costos operacionales e impactos ambientales asociados [33].

La aplicación del análisis exergético ha brindado mayores beneficios desde que investigadores propusieron una nueva metodología en la que se usaría la exergía para una asignación, análisis y optimización de costos, a lo cual llamaron termoeconomía o exergoeconomía [34]. Pellegrini y Junior (2011), decidieron aplicar un análisis exergético y termoeconómico con el fin de demostrar el potencial que existe en la industria de la caña de azúcar como proveedor de electricidad sin poner en peligro la producción de azúcar y etanol. Con el estudio se identificó que el 64% de la exergía destruida se debe a las irreversibilidades en el proceso de cogeneración, por lo tanto, se evaluó el impacto de ciertas modificaciones en el mismo, como lo fueron una mejor integración térmica entre los procesos de intercambio de calor y una diferente configuración para la planta de cogeneración. Finalmente, se ratificó que una mejora en el rendimiento termodinámico de

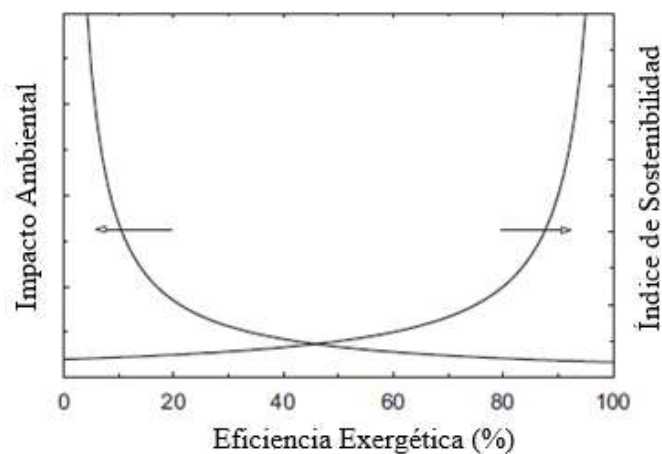
los procesos y un mejor aprovechamiento de los recursos, en específico un menor consumo de vapor, repercute en una disminución de la destrucción de exergía y se traduce a una reducción media del 6% en los costes de producto de azúcar y etanol. Se concluyó que los sistemas de cogeneración convencionales pueden generar hasta 80 kWh de electricidad / tonelada de caña, mientras que los sistemas avanzados de cogeneración permiten hasta 200 kWh / tonelada de caña, lo que representa un potencial de generación de 111 TWh / año. Ésta generación de electricidad en grandes cantidades no sólo representa un nuevo ingreso económico a la fábrica, sino una alternativa de mejora del rendimiento exergo-ambiental de la planta en su conjunto [35].

Por los excelentes resultados que se obtienen al combinar el análisis exergético con la termoeconomía, Flórez y Cifuentes (2013), diseñaron una metodología para el análisis exergético en la cadena productiva de la agroindustria de la mora de Castilla, con el propósito de disminuir pérdidas desde el productor primario (cultivador) hasta el consumo por parte del cliente final. Para lograr lo anterior, definieron el modelo de la cadena productiva, y seleccionaron la ruta de análisis, posteriormente, aplicaron el análisis exergético en todas las etapas del proceso, realizaron el cálculo del gasto exergético total para una base de cálculo del producto y desarrollaron un análisis termoeconómico para la identificación de la etapa donde se presentaban la mayor cantidad de pérdidas económicas. Analizando los resultados obtenidos, se pudo determinar que con una implementación de cadena de frío (CC) a todo el proceso productivo, se incrementarían los costos de producto de tener un valor de \$799/kg sin CC a \$871,31/kg con CC. Sumado a esto, se mantendría de manera estable la cosecha y la eficiencia estaría por encima del 50% en todas las etapas, obteniéndose un producto de mayor valor comercial, con una ganancia del 97% con respecto al costo de producción, comparado con el 37.2% de ganancia sin CC. La disminución de costos por pérdidas de material en el proceso, permite que este producto sea más económico y competitivo [36].

La medición de la exergía en los sistemas y procesos representa una medida confiable de las ineficiencias termodinámicas e indica las posibles formas de mejorar el sistema energético y proponer diseños mejores. Por lo anterior, investigaciones realizadas definen al análisis



exergético como una herramienta de vital importancia para la evaluación medioambiental y de sostenibilidad de un proceso, puesto que al medir la destrucción de exergía, éste valor ofrece la oportunidad de cuantificar el impacto ambiental y la sostenibilidad de cualquier sistema energético. La figura 1.1 muestra la relación que guarda la eficiencia exergética con el impacto ambiental y la sostenibilidad, en ella se puede observar que la sostenibilidad aumenta y el impacto ambiental generado decrece, a medida que la eficiencia exergética va en aumento [37].



**Figura 1.1** Representación cualitativa de la relación entre la eficiencia exergética, el índice de sostenibilidad y el impacto ambiental [38].

## 1.2. Análisis exergético avanzado en la industria alimentaria

La metodología de análisis exergético convencional identifica los componentes y procesos con altas irreversibilidades, sin embargo, para el avance tecnológico que experimenta la industria, ésta información carecía de mayor detalle. Por lo anterior, para superar las limitaciones de los análisis convencionales y aumentar el conocimiento sobre una planta, se ha desarrollado una metodología de análisis exergético avanzado en el cual es posible identificar un nivel mínimo de destrucción de exergía relacionada con las restricciones tecnológicas y / o económicas, que es inevitable, además, se tiene en cuenta la destrucción de la exergía por causa de las interacciones entre los componentes de un proceso (exógenas) y por las ineficiencias de los componentes (endógenas) [39].

Erbay y Hepbasli (2014), aplicaron el análisis exergoeconómico convencional y avanzado a un secador de alimentos, esto con el objetivo de evaluar las contribuciones de los componentes del sistema de secado a la efectividad de costes exergéticos del secador. Se determinó que los componentes con mayor destrucción fueron el condensador, seguido del evaporador, la válvula de expansión y el gabinete de secado con valores de 0,331 kW, 0,269 kW, 0,255 kW y 0,253 kW respectivamente. Luego, el componente del sistema con la eficiencia exergética más baja fue el condensador con un 47,95%, sin embargo, por los resultados obtenidos de análisis exergético avanzado fue posible identificar que el 92,4% de la tasa de destrucción de exergía es evitable, donde el 50.7% es evitable endógena y el 41.6% es evitable exógena. Además, el índice de mejora potencial para este equipo fue de 0,172 kW, y se considera el equipo con mayor influencia para reducir los costos totales del proceso. Con el análisis de los resultados se consideró que las interacciones de los demás componentes del proceso con el condensador, tienen un impacto significativo en las ineficiencias del mismo, es por ello que al mejorar el desempeño de los componentes restantes y / o condiciones del proceso, como la temperatura de secado, se pueden obtener una mejora global del sistema. Los autores concluyeron que para mejorar la eficiencia global, las modificaciones a los componentes del proceso se pueden determinar de manera efectiva a través de un enfoque exergético avanzado, dado que permite identificar las posibles mejoras realistas y las prioridades en el mismo [40].

Bühler y otros (2018), aplicaron un análisis energético, exergético convencional y avanzado para a un proceso de producción de leche en polvo. Por medio del análisis de energía pudieron mapear los flujos de energía y sugerir una integración de calor de proceso a través de un análisis Pinch; con el análisis de exergía se identificó las ubicaciones y magnitudes de las irreversibilidades termodinámicas y con el análisis exergético avanzado se determinó el potencial real de las mejoras termodinámicas, al dividir la destrucción de exergía en sus partes evitables e inevitables, que se relacionan con las limitaciones tecnológicas, y en sus partes endógenas y exógenas, que presentan las interacciones entre los diferentes subsistemas. Los resultados del análisis Pinch mostraron que el potencial de integración de

calor no era significativo. El análisis de exergía convencional reveló que el quemador de gas y el secador por aspersion causaron la destrucción de la mayor parte de la exergía con valores de 5236 kW y 2196 kW respectivamente. No obstante, los resultados del análisis exergético avanzado revelaron que la destrucción de exergía de estos equipos es mayormente inevitable, donde la evitable es sólo un 20% aproximadamente, a diferencia del calentador de aire y del secador por pulverización, que tuvieron una alta proporción de destrucción de exergía evitable, que es alrededor del 80% de la destrucción de exergía de estos equipos y la cual consideran que podría recuperarse al reducir el flujo de aire y aumentar la transferencia de calor [41].

### **1.3. Investigaciones realizadas en la industria avícola y producción de piensos**

La industria avícola a nivel mundial ha logrado avances significativos en los últimos 40 años, innovaciones que le han permitido alcanzar altos niveles de competitividad frente a otras industrias de alimentos, gracias al mayor desempeño, repunte tecnológico e intensificación de la producción. En la actualidad, a través de estrategias como: una mayor capacidad de albergue en los galpones, reducción en el tiempo de levante y engorde sin estar sujeto a períodos extensos de desarrollo, se ha logrado que en las primeras tres semanas los pollitos lleguen a quintuplicar su peso inicial [42].

En Colombia, la producción y el consumo de productos derivados del pollo han venido creciendo considerablemente, tanto que representa aproximadamente el 28% del producto interno bruto (PIB) pecuario, en el que participan también otras carnes, como la bovina y la porcina, y productos como la leche y el huevo [43]. Según un estudio divulgado por la Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), el consumo de carne de pollo y de huevos se ha convertido en una alternativa en cuanto a seguridad alimentaria y bajo costo, en 2017 el consumo registrado fue de 32,8 kg de carne de pollo y 269 huevos por persona, y en 2018 hubo un aumento hasta de 33,1 kg y 287 unidades respectivamente, por lo que se espera un mayor crecimiento, hasta llegar a cifras de consumo de países competitivos en el sector avícola como Chile y Brasil, quienes llegan a los 40kg de pollo por persona al año [44].

Por consiguiente, a pesar que los avicultores nacionales deben enfrentarse cada vez con retos más demandantes, como lo es competir con productos importados, el gremio ha crecido en número de granjas avícolas, teniendo en cuenta los factores de mercado, la oportunidad de negocio, el capital a invertir, el costo y la tasa interna de retorno, mediante estudios financieros realizados se ha evidenciado que la rentabilidad el proyecto es viable [45].

Según un estudio realizado por Camacho y Hernández (2009), el sector avícola colombiano cuenta con un centenar de empresas en su gran mayoría de origen familiar que han crecido y se han fortalecido con el tiempo, y en las que el factor más trascendental que ha contribuido para ser empresas de éxito es la práctica de gestión de la calidad, gestión de talento humano e innovación; con lo cual han logrado incrementar su competitividad para ponerse a tono con los nuevos retos que representan la globalización y el libre comercio [46]. Por su parte, Barrera y Valencia (2017), han concluido con sus estudios que la tendencia al crecimiento se prolongará en la medida que las empresas avícolas apunten a una mayor eficiencia y reducción de costos de producción. Estas empresas aún tienen como común denominador altos costos de producción, en donde el rubro más relevante es el del alimento, cuyo peso dentro del costo final, oscila entre el 65 y el 70% del valor unitario, y esto por una sencilla razón y es que las materias primas para los alimentos balanceados para animales provienen en más de un 80 % del exterior, lo cual aumenta los costos de manera importante [47] .

Estudios indican que la provisión de alimentación para la producción de pollos de engorde es la fase que contribuye aproximadamente con el 80% del consumo de energía de la cadena de suministro y el 82% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la industria avícola, por tal razón requiere de una cuidadosa gestión medioambiental para la mejora de la sostenibilidad. Un análisis de requerimiento energético que se realizó en una granja avícola determinó que para producir 1kg de carne de pollo en pie se requieren 9,2 MJ, además el índice de productividad energética calculado indicó la producción de 0,12 kg de carne de pollo en pie / MJ de energía consumido, y que se generan 0,47 kg de CO<sub>2</sub> eq/ kg de carne de pollo en pie. El autor recomendó como estrategias para la reducción del consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> eq hacer un constante mantenimiento y limpieza a los sistemas de

ventilación y extracción de aire, uso de energía solar y el aprovechamiento de la pollinaza para la producción de biogás y energía eléctrica [48] .

Por la importancia de la alimentación de los pollos de engorde, que según el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), define los alimentos completos balanceados como: “Productos balanceados o mezclas de ingredientes que se administran a un animal, destinados a suplir sus necesidades nutricionales como única fuente de alimento”, y por causa del impacto que genera en los costos de producción, las fábricas de piensos marcan la diferencia entre ellas en cuanto a calidad y precio final en función del costo de las materias primas. En los últimos años, se ha detectado una disminución en la utilización de cereales como materia prima, aumentando la participación de tortas y harinas hasta un 25% [49].

Olivares (2014) realizó un estudio con respecto al consumo energético a 35 empresas dedicadas a la elaboración de piensos a partir de cereales, éstas plantas poseían una potencia media instalada de 774 kW. Los resultados mostraron que para un consumo medio anual de 1’094.12 kW, y una producción promedio anual de 21.345 ton/año, el indicador de consumo energético obtenido fue de 51,28 kW/ ton producida. Además, se concluyó que las empresas grandes en producción, eran más eficientes energéticamente con respecto a las pequeñas, pues presentaban menor consumo energético en función de la cantidad anual procesada, esto se debe a que cuentan con tecnologías más eficientes [50].

En el caso de la industria avícola los desechos generados como plumas, huesos y sangre por ser residuos con alto contenido proteico, se han considerado un valor agregado con fines alimenticios, éstos son sometidos a un tratamiento térmico que inactiva los virus y bacterias que se desarrollan por la descomposición de las partes de los animales. No obstante, este tratamiento que reciben los subproductos aprovechados requiere de una alta cantidad de energía en el proceso para su procesamiento como alimento balanceado [51]. El alto valor proteico de estos subproductos, ha hecho que se conviertan en una de las materias primas para la elaboración de alimentos balanceados para animales domésticos y de granjas principalmente. Por tanto, estudios como el realizado por Burbano y Mora (2015), ratifican

que una empresa que se dedique a la elaboración de este tipo de harinas, posee potencial de desarrollo al enfocarse en un mercado que va en crecimiento y que tiene la premisa de contribución al medio ambiente, al ser una alternativa de solución para el manejo y aprovechamiento de residuos. En el aspecto financiero, los resultados con respecto a la producción y a la comercialización de la harina de subproductos, tiene una tasa de oportunidad del 12%, resultado positivo al igual que en la tasa interna de retorno, la cual es del 20,13%, lo que quiere decir que el proyecto ofrece más altos dividendos respecto a la inversión en el mismo [52].

Lo anterior, puede evidenciarse en las cifras mostradas como resultado de la evaluación de un proyecto de una planta de procesamiento de subproductos como vísceras, huesos, carne y sangre, la cual registra una utilidad mensual de \$154'939.639, procesando un volumen diario de 20 toneladas en una operación de 8 horas diarias, con una potencia eléctrica instalada de 440 kW y un consumo de vapor de 2500 kg de vapor/h. El indicador de consumo energético que se estimó fue de 52,8 kWh/ ton procesada [53], lo cual no posee mucha variación con los resultados obtenidos en los estudios realizados en la plantas de procesamiento de cereales para piensos citados anteriormente.

En Colombia, la industria del rendering es relativamente nueva, ya que data de hace menos de 20 años, teniendo en cuenta esta realidad, se infiere que en Colombia se desaprovecha una industria con gran potencial, ya que una gran cantidad de materia prima termina en basureros o simplemente no se le da un uso adecuado. Un ejemplo de lo anterior, es el hecho de que una de las prácticas más comunes en el sector de la carne de res es incinerar los residuos como son los huesos, por ello en algunos sectores se han realizado esfuerzos para sacar adelante los procesos rendering, brindando asesoramiento continuo para lograr obtener los mejores resultados posibles en cada proyecto que se lleve a cabo [52].

## CAPÍTULO 2

### 2. METODOLOGÍA

La investigación fue de tipo descriptiva y cuantitativa, ya que se realizó sobre un proceso real, y a partir de la medición de las variables y propiedades importantes que influyen en el mismo, para su posterior análisis, estudio y evaluación de los fenómenos involucrados en el proceso de producción de harinas a partir de subproductos de pollo (el nombre de la empresa no será mencionado en el presente estudio por motivos de confidencialidad).

#### 2.1. Descripción general del proceso

El proceso de producción en estudio está fundamentado en la estandarización de cada uno de los procesos de obtención de harinas y aceite a partir de subproductos del pollo. Los procedimientos se establecieron de acuerdo a pruebas realizadas buscando una calidad definida en el producto final. La planta de harinas hace parte de un complejo avícola, al cual está integrado una planta de producción de pollo, una planta de incubación, una planta de beneficio, una planta de carnes frías y una planta de producción de concentrados. Este complejo inicio operaciones en 2013, con el propósito de integrar todos estos procesos, obtener reducciones de costos y homogeneizar la capacidad instalada.

La planta de producción de harinas, se construye por la necesidad de aprovechar los residuos que se generaban de la planta de beneficio, dándole un valor agregado, ya que éstos representaban un impacto negativo al medio ambiente y dificultaban las operaciones de manejo y transporte. Luego, el proceso está especialmente diseñado para la recuperación de estos residuos provenientes del sacrificio de pollos tales como plumas, vísceras y sangre, para transformarlos en harina de víscera, harina de pluma-sangre y aceite de pollo, con características físico-químicas y microbiológicas que aseguran la calidad e inocuidad. Estos subproductos son comercializados y utilizados en la industria de alimentos concentrados para animales, además se utilizan para el autoabastecimiento de materias primas requeridas para la producción de alimento para aves en la planta de concentrados perteneciente al complejo

avícola, esto con el fin de garantizar la calidad del alimento y verificar la obtención de aves en óptimas condiciones.

Según la definición dada por Rodríguez y otros (2004), la harina de subproductos avícolas es “el producto molido, seco y limpio de partes tales como cabezas de pollo, patas y huevos no desarrollados, pero también lo constituyen partes como: sangre, vísceras, plumas y dependiendo del caso, aquellas aves que son rechazadas en la planta de sacrificio por traumatismos u otras causas (tamaño de los pollos que no cumplen con lo requerido)”. En general el total de subproductos obtenido por ave es de aproximadamente 28-30% del peso, el cual se calcula como un 60% vísceras, 36% plumas y 4% sangre [54].

El proceso productivo se desarrolla en dos turnos, cada uno de 12 horas laborales, los cuales están conformados por: un supervisor, cinco operarios, un asistente de calidad, un calderista y un mecánico en el turno de día, y un supervisor, cuatro operarios, un asistente de calidad, un calderista y un mecánico en el turno de noche, con el objetivo de cubrir todas las necesidades del proceso. Cada una de las actividades está fundamentada en las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), que soportan la calidad del producto final y previenen problemas de tipo sanitario.

De acuerdo a estudios realizados por la empresa, los resultados obtenidos sobre el rendimiento o conversión de la cantidad procesada de residuos, en harina resultante, fluctúa entre un 30% - 34% de acuerdo a la variación del contenido de plumas, vísceras o sangre, y de las especificaciones a tener en cuenta en la selección de la materia prima, cuidando de que se encuentre en óptimas condiciones para un subproducto final de buena calidad.

La codificación de cada uno de los procesos de elaboración de harinas y aceite de pollo, está ligada a la dependencia de cada proceso y su prioridad en la producción a escala de la planta; la numeración es arbitraria pero consecutiva como se puede observar en la tabla 2.1.

Para la presente investigación, la línea de proceso seleccionada fue la correspondiente a la elaboración de harina de vísceras de pollo, la cual en la actualidad, procesa una cantidad aproximada de 30 ton / día de subproductos provenientes de la planta de beneficio.



**Tabla 2.1** Codificación de las líneas de Proceso

Código	Proceso
101	Proceso de elaboración de harina de vísceras de pollo.
201	Proceso de elaboración de harina de pluma-sangre.
301	Proceso de obtención de aceite.
401	Proceso de transporte de vapor y condensados.
501	Proceso de condensación de gases generados durante proceso de cocción de sub-productos.

## 2.2. Presentación áreas de proceso en la línea de víscera

Dentro de la línea de víscera existen diferentes áreas de proceso las cuales se listan en la tabla 2.2:

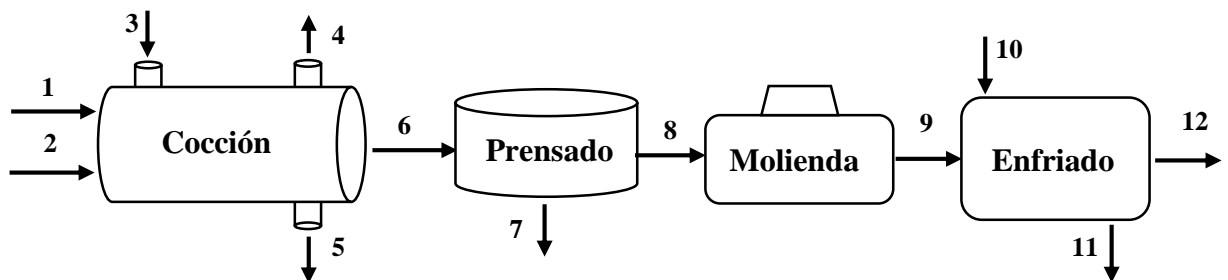
**Tabla 2.2** Áreas de proceso en la línea de víscera

Área	Descripción
Área de subproductos	Aquí se reciben los subproductos que envían de cada una de las etapas del proceso del pollo.
Área de materia prima	Se lleva a cabo la recepción completa y el almacenamiento de la materia prima.
Área de proceso	Se identifica así a toda el área donde ocurre la transformación de la materia prima.
Área de empaque	Es aquí donde se obtiene el producto terminado.
Área de Almacenamiento	Este espacio permite el almacenamiento del producto para su posterior traslado al cliente.

De acuerdo al listado anterior, el desarrollo del presente estudio dentro del proceso de producción de harina de vísceras se delimitó al área de proceso.

### 2.3 Representación gráfica del proceso en estudio

En la figura 2.1 se representa a manera de diagrama de flujo las etapas del proceso seleccionadas para el estudio, las cuales corresponden a cocción, prensado, molienda y enfriado, quedando excluidas las etapas de transporte y almacenamiento de la materia prima y empaque del producto final. En estas etapas seleccionadas, los equipos que se analizaron fueron: el digestor o cooker, la prensa, el molino, y la enfriadora, respectivamente. La codificación y descripción de todos los equipos pertenecientes a la línea de producción de harina de vísceras, producción de aceite y generación de vapor que se citarán en el presente capítulo, puede verse en el *ANEXO A*.



**Figura 2.1** Representación gráfica de las etapas seleccionadas en el proceso de estudio

Donde la descripción de los flujos es la siguiente: (1) Vísceras, (2) Aceite, (3) Vapor de agua, (4) Agua evaporada, (5) Agua condensada, (6) Vísceras cocidas, (7) Aceite de pollo, (8) Torta de vísceras, (9) Harina de vísceras, (10) Aire, (11) Aire caliente y (12) Harina de vísceras como producto final.

### 2.4 Descripción del proceso de elaboración de harina de vísceras de pollo

#### 2.4.1 Materia prima

La materia prima con la cual se realiza el proceso de elaboración de la harina de vísceras se obtiene directamente del proceso de producción de la planta de beneficio. Dicho insumo se compone de aquellas partes del ave que no son comestibles y que no hacen parte del producto a ofrecer y distribuir por la empresa. También hace parte de este insumo el producto terminado no conforme, y las aves ahogadas o maltratadas físicamente durante su transporte.

- Vísceras frescas
- Patas
- Cabezas
- Pescuezos
- Hueso molido
- Aves ahogadas
- Presas rechazadas por traumatismos
- Hollejos

### **Especificaciones**

- Tiempo máximo de almacenamiento: 6 horas
- Humedad: 68 – 70 %
- Proteína: 12 – 14 %
- Grasa: 15 – 17%

La emisión de materia prima se hace por parte del operario encargado del área en la planta de beneficio, y la recepción la hace el operario encargado del área de sub-productos en la planta de harinas, quien es el responsable de revisar y comprobar que dicha materia prima sea óptima:

#### *Criterios de aceptación:*

- Estado fresco, sin ningún olor que denote descomposición
- Sin presencia de pluma
- Sin presencia de metales y/u objetos extraños o plásticos
- Víscera y residuos cárnicos únicamente de pollo

#### *Criterios de rechazo:*

- Vísceras en descomposición

Cuando las vísceras están en estado de descomposición, se procede a aislarlas de la línea de producción y almacenarlas en la misma área pero por un corto período, mientras son retiradas por una organización ambiental experta en gestión de residuos peligrosos, la cual es contratada con el fin de que se encargue de procesar la materia prima en mal estado.

- Vísceras contaminadas por agentes tóxicos o metales

Cuando las vísceras vienen acompañadas por cuerpos extraños ya sean guantes, metales o piedras, el operario encargado de recibir la materia prima, se responsabiliza de hacer la separación de dichos agentes de la víscera.

#### **2.4.2 Características generales de la harina de víscera de pollo**

La harina de víscera de pollo es un producto para aves de engorde, la cual es obtenida de subproductos derivados de la misma ave (pollo), los cuales se someten a una serie continua de procesos de producción bajo estándares de calidad, que permiten asegurar y controlar las características físicas y químicas que esta obtiene durante el procesamiento:

- Color amarillo dorado
- Textura suave y homogénea.
- No presenta ningún tipo de olor fuerte y/o rancio.

La harina de víscera es tratada con antioxidante para conservación del producto, y a través del proceso de producción de la misma, es también obtenido el aceite de pollo.

#### **2.4.3 Área de subproductos**

El proceso inicia en el área de subproductos, aquí se reciben los subproductos que son enviados de cada una de las etapas del proceso del pollo y son trasladadas por tuberías. En esta sección se encuentra un operario que es el encargado de recibir y colocar los subproductos en una banda transportadora que conduce al llenado del blow tank (HSV0001). Luego de terminado el proceso de llenado, se acciona el cierre de la tapa de este tanque, para evitar que se salga el producto, y se traslada la materia prima hacia la tolva de recibo (HSV0002) mediante un sistema de transporte neumático, con una  $P_{\text{aire}} = 85-100$  psi.

Los pollos que mueren en condiciones de ahogamiento o maltratados físicamente durante su transporte, son trasladados por la banda transportadora que se dirige al proceso de harina pluma-sangre, pero el operario encargado de materia prima separa las partes útiles que se puedan aprovechar en el proceso de producción de harina de víscera para dirigirlo a la tolva de víscera.

#### **2.4.4 Área de materia prima**

En esta área se lleva a cabo la recepción completa y el almacenamiento de la materia prima enviada desde el área de subproductos, para este almacenamiento se encuentra una tolva de recibo con capacidad de recibir 16 toneladas.

Además, para la cocción de la materia prima se emplea aceite de pollo, el cual se produce durante el proceso de transformación de la víscera en harina, luego de prensar las vísceras cocidas. El aceite obtenido es enviado a un tanque con agitación (ACT0001) donde se separa el aceite limpio que pueda ser usado para cocción. La fracción de aceite que queda con partículas sólidas o sedimentos del proceso de prensado, es enviado a un decanter (ACT0002) y luego a una serie de tanques de sedimentación, con el propósito de limpiarlo (ACT0003 y ACT0004). El aceite limpio resultante, se almacena en dos tanques con capacidad de 3500 galones cada uno (ACT0005 y ACT0006).

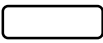

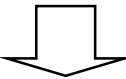



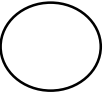


El aceite usado en el proceso posee las siguientes características: olor característico de aceite de pollo, sin olor a rancidez, color rojo cobrizo, textura homogénea y translúcida, libre de impurezas. Porcentaje de acidez: 2%., porcentaje de peróxidos: 1%, porcentaje de sólidos: 7%. Contiene antioxidante para conservar su estabilidad.

El traslado de la materia prima hacia el proceso de cocción se realiza por medio de un transportador sinfín (HSV0003). Antes de transportar las vísceras y el aceite desde los tanques de almacenamiento, los operarios encargados verifican el estado y la disponibilidad de los digestores (HSV0004 y HSV0005). Cada batch o lote de cocción se compone de: 200 kg de aceite y 2800 kg de víscera, siendo la suma total 3000 kg (3 ton) entre vísceras y aceite.

#### **2.4.5 Área de proceso**

En la tabla 2.3 se listan las convenciones para la comprensión del diagrama de flujo de proceso, el cual se puede observar en la figura 2.2, en él está representado gráficamente las operaciones del proceso que conllevan a la transformación de la materia prima, iniciando con el transporte de la misma desde el área de eviscerado (planta de beneficio), hasta el empaque y almacenamiento final del producto.

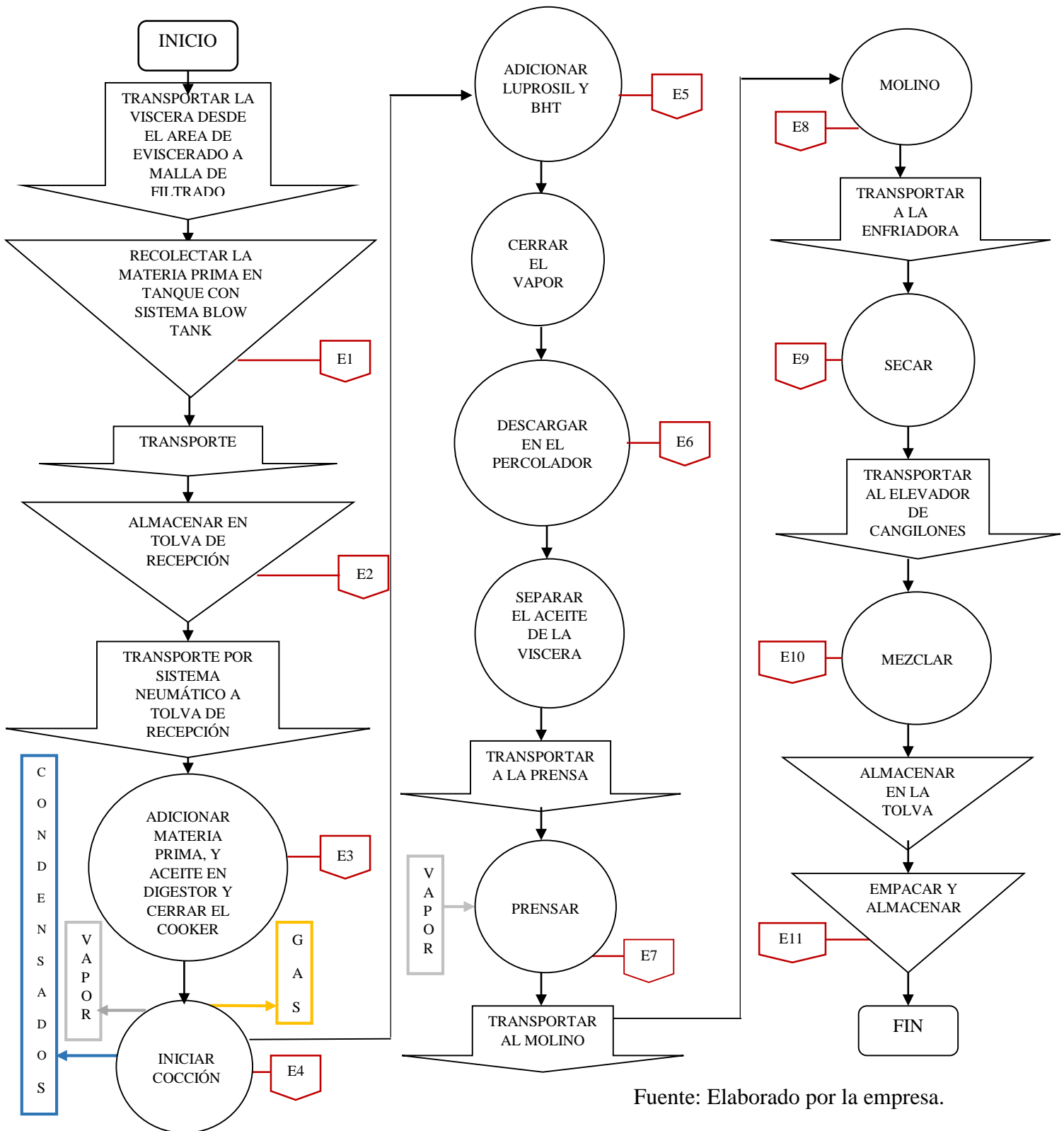
**Tabla 2.3** Convenciones para el diagrama de flujo de proceso

Figura	Significado	Figura	Significado
	Simboliza el inicio o final de un proceso.		Representa parámetros de control claves del proceso
	Indica el transporte de insumos, materias primas o producto en proceso.		Representa transporte de aire.
	Representa el almacenamiento de materiales, producto proceso o terminado.		Representa transporte de vapor.
	Representa operaciones como transformación de materias primas o producto en proceso		Representa transporte de agua.
			Representa transporte de gases.

Las variables, especificaciones y parámetros de operación se presentan en la tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Especificaciones del diagrama de flujo

Especificación	Variable	Parámetro	Especificación	Variable	Parámetro
<b>E1</b>	Presión de aire.	85 – 100 psi	<b>E5</b>	Adición de antioxidante víscera cruda	1200 g
	Capacidad del blow-tank	470 L			
<b>E2</b>	Capacidad de la tolva de recibo.	16 ton	<b>E6</b>	Temperatura de descarga en el percolador.	130°C – 140°C
<b>E3</b>	Cantidad de vísceras por lote.	2800 kg de víscera	<b>E7</b>	Temperatura de prensado (mín.)	100°C
	Cantidad de aceite por lote.	200 kg de aceite		Presión de prensado (máx.)	4 kgf / cm <sup>2</sup>
<b>E4</b>	Presión de cocción	5 kgf / cm <sup>2</sup>	<b>E8</b>	Molido	Cribas de 5mm
	Tiempo de cocción	2 h 45 min – 3h	<b>E9</b>	Temperatura de Enfriado	35°C - 40°C
	Temperatura interna de cocción	120 °C	<b>E10</b>	Mezclado	Adición de controlador biológico.
<b>E5</b>	Cantidad de Luprosil	2000 g	<b>E11</b>	Empaque	Cantidad por unidad: 40 kg
				Temperatura (máx.)	40°C
				Humedad	3 – 6 %



Fuente: Elaborado por la empresa.

**Figura 2.2** Diagrama de flujo para la elaboración de harina de víscera de pollo



#### **2.4.5.1 Proceso de cocción**

El proceso de cocción dura un tiempo entre 2 horas 45 minutos a 3 horas con vapor constante producido por la caldera del sistema (VP 0001) hasta llegar a una temperatura de 120° C, como punto ideal de cocción. Al iniciar el proceso de cocción, se adiciona al lote 2000g de Luprosil (99,5% de ácido propiónico), que es el conservante empleado, junto con 1200g de BHT (Butilhidroxitolueno), el cual es un agente antioxidante sintético utilizado en la industria de alimentos para prevenir la rancidez de los productos [55].

Finalizado el proceso de cocción, se hace el descargue del lote en el percolador (HVS 0006) sistema usado para recolectar la víscera cocida que sale del digestor y para hacer una primera separación entre la víscera cocida y el aceite. Después, se encarga de llevar la víscera cocida hasta el transportador de víscera (HVS 0007), el cual tiene como función trasladar las vísceras provenientes del percolador hasta la prensa (HVS 0008). Las vísceras cocidas tienen una composición de: humedad: 7%, proteína: 62%, grasa: 20% y cenizas: 11%.

Durante el proceso de cocción se liberan gases provenientes de los digestores, los cuales son tratados por un lavador de gases (VP 0004) encargado de neutralizar los componentes dañinos presentes en los mismos, y un aerocondensador (VP 0003) que los enfría y condensa.

#### **2.4.5.2 Proceso de prensado**

La prensa posee un mezclador que se encarga de suministrar lentamente producto suelto a la prensa, a la vez que existe una entrada de vapor proveniente de la caldera, con el fin de mantener caliente la torta de víscera y para facilitar la extracción del aceite.

Para el proceso de separación, la prensa está diseñada con unos sinfines internos que se encargan de comprimir el producto y separar el aceite enviándolo al tanque con agitación (ACT0001), mientras que la torta de vísceras prensada se traslada desde la prensa hasta el molino mediante un transportador sinfín (HVS 0009).





### **2.4.5.3 Proceso de molienda**

El proceso de molienda de la torta de víscera se lleva a cabo mediante un molino de martillos (HVS 0010), el cual en su parte posterior tiene dos cribas con orificios de 5 a 6mm cada una, que tienen como objetivo dar a la harina la granulometría deseada.

La harina cae hasta un transportador sinfín que la conduce hasta el elevador de cangilones (HVS 0011), que tiene la función de recoger la harina para después vaciarla en la enfriadora.

### **2.4.5.4 Proceso de enfriado**

En esta etapa, la enfriadora (HVS 0013) es el equipo encargado de disminuir a temperatura ambiente la harina (35°C), mediante aire extraído del ambiente. Luego, el aire caliente pasa por un ciclón (HVS 0012) equipo encargado de filtrar las partículas de harina que se encuentran suspendidas en el aire, y son succionadas y recirculadas al sistema para evitar su expulsión al ambiente.

Después, un elevador de cangilones (HVS 0014) recibe la harina que llega de la enfriadora y la transporta hasta el mezclador de harina de vísceras (HVS 0015), el cual se encarga de homogenizar la harina con la sustancia química que se adiciona para controlar el crecimiento biológico de microorganismos que puedan impedir la conservación del producto. La composición de la harina como producto final es: humedad: 4%, proteína: 65%, grasa: 18% y cenizas: 13%.

### **2.4.6 Área de empaque y almacenamiento**

Posterior al enfriado y homogeneizado de la harina, ésta se traslada a la tolva de empaque (HVS 0016) con capacidad de 4 toneladas de producto.

Se finaliza el proceso de producción con el empaque de la harina, obteniendo de esta manera el producto terminado.

#### **Especificaciones del empaque**

Material: fibra natural (yute)      Dimensiones: 92 cm x 60 cm      Capacidad: 40 Kg

El empaque esta contramarcado con:

- Nombre del producto
- Logo y nombre de la empresa
- Exclusividad de uso
- Capacidad
- Datos de fabricante del producto
- Indicaciones de manipulación, manejo y almacenamiento.

El área de almacenamiento es el único espacio donde se permite el almacenamiento del producto para su posterior traslado al cliente.

## **2.5 Definición de las condiciones del sistema**

Las condiciones especificadas como estado de referencia para este trabajo, 25°C y 1 atm, fueron seleccionados porque son los valores estándar comúnmente usados en estudios termodinámicos para el estado muerto [56]. Además, teniendo en cuenta resultados de estudios climatológicos realizados en la ciudad de Cartagena [57], la temperatura oscila entre 24°C y 31°C, para lo cual la temperatura seleccionada se encuentra dentro de este intervalo. Con respecto a la presión, puesto que el estudio es realizado en una ciudad costera, sobre el nivel del mar, la presión atmosférica considerada es 1 atm de presión [58].

Además, se adoptaron las siguientes simplificaciones para facilitar el desarrollo de un modelo termodinámico más sencillo:

- En el estudio se definió el proceso como flujo estacionario, ya que a pesar de los cambios ocasionados en las propiedades de manera periódica dentro del volumen de control (región arbitraria delimitada para su estudio), éstos no son relevantes, y por lo tanto se pueden analizar mediante valores promedios respecto al tiempo. Sumado a esto, a pesar que la etapa de cocción es por lotes, todo el proceso en estudio se consideró continuo para la realización de los cálculos, y éstos fueron desarrollados en base de cálculo de 1 batch o lote de materia prima que se procesa, el cual es 3 toneladas.



- Los cálculos de energía cinética y energía potencial se despreciaron debido a que no se consideraron cambios o efectos de velocidad en las corrientes, ni cambios de altura significativos.
- Los procesos llevados a cabo por el sistema no son reactivos, por lo que no se consideró la contribución de la exergía química en el cálculo de la exergía y en su análisis, quedando sólo la exergía física como contribuyente a la exergía del sistema.

## 2.6 Análisis exergético convencional

Para el desarrollo de éste, en primera instancia se realizaron los balances de masa y energía, y después de estos se procedió al balance de exergía.

### 2.6.1 Balance de masa

Los valores de los flujos másicos fueron datos proveídos por la empresa. Para la realización del balance de masa se tuvo en cuenta la ecuación (2.1) que hace referencia a la ley de la conservación de la masa [56]:

$$\sum \dot{m}_{i,k} = \sum \dot{m}_{e,k} \quad (2.1)$$

Donde  $\dot{m}_i$  : flujo másico de entrada en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{m}_e$  : flujo másico de salida en el volumen de control  $k$ .

### 2.6.2 Balance de energía

Luego para el análisis de la energía se usó la Primera Ley de la Termodinámica también conocida como Principio de la Conservación de Energía [56] , la cual establece que la energía mediante interacciones puede cambiar de una forma a otra pero la cantidad de energía permanece constante como esta expresado en la ecuación (2.2) :

$$\sum \dot{E}_{i,k} = \sum \dot{E}_{e,k} \quad (2.2)$$

Donde  $\dot{E}_{i,k}$  : energía total de entrada en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{e,k}$  : energía total de salida en el volumen de control  $k$ .



Al detallar las formas de energía involucradas en el balance de energía, se utilizó la ecuación (2.3):

$$\dot{Q}_k - \dot{W}_k + \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + g z_i \right) - \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) = 0 \quad (2.3)$$

Dado que las energías cinética y potencial no fueron significativas para este análisis, el balance queda simplificado como se puede ver en la ecuación (2.4):

$$\dot{Q}_k - \dot{W}_k + \sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_e h_e = 0 \quad (2.4)$$

Donde  $\dot{Q}_k$  : calor transferido o cedido por el volumen de control  $k$ ,  $\dot{W}_k$  : trabajo eléctrico suministrado al volumen de control  $k$ ,  $\dot{m}_i h_i$ : entalpía total de entrada del volumen de control  $k$ ,  $\dot{m}_e h_e$  : entalpía total de salida del volumen de control  $k$ .

A continuación se mostrará el orden de los cálculos para la realización del balance de energía.

### 2.6.2.1 Entalpía

Para el cálculo de la entalpía, se halló el valor del calor específico ( $C_p$ ) para cada corriente del proceso, teniendo en cuenta la composición de las mismas. En el caso de los flujos de vísceras y corrientes derivadas, los datos de porcentaje de agua, proteína, grasa y cenizas, fueron proveídos por la empresa y se muestran en el próximo capítulo. Primero se calcularon los calores específicos de cada componente (agua, proteína, grasa y cenizas), y luego un calor específico compuesto (kJ/ kg °C) con la fracción másica de todos estos componentes presentes en cada corriente másica [59], tal como está expresado desde la ecuación (2.5) hasta la ecuación (2.9).

$$\text{Agua: } C_{p,A} = 4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5}T + 5,4731 \times 10^{-6}T^2 \quad (2.5)$$

$$\text{Proteína: } C_{p,P} = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3}T - 1,3129 \times 10^{-6}T^2 \quad (2.6)$$

$$\text{Grasa: } C_{p,G} = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3}T - 4,8008 \times 10^{-6}T^2 \quad (2.7)$$

$$\text{Cenizas: } C_{p,C} = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3}T - 3,6817 \times 10^{-6}T^2 \quad (2.8)$$

$$C_{P,total} = w_A (C_{p,A}) + w_P (C_{p,P}) + w_G (C_{p,G}) + w_C (C_{p,C}) \quad (2.9)$$



Donde  $w_P$ ,  $w_G$  y  $w_A$  son las fracciones másicas de proteína, grasa y agua respectivamente.

Los flujos másicos de aceite de pollo se consideraron como grasa en su totalidad, por lo que su calor específico ( $C_p$ ) se calculó bajo la misma ecuación (2.7) anteriormente citada. En el caso de las corrientes de agua líquida, vapor de agua y aire, el  $C_p$  de éstas, fueron extraídos de tablas termodinámicas ubicadas en el apéndice del libro de Termodinámica de Cengel & Boles [60].

La ecuación utilizada para el cálculo de la entalpía específica fue la ecuación (2.10).

$$h_i = C_{p,i}(T_i - T_{ref}) \quad (2.10)$$

Donde  $h_i$ : entalpía específica de la corriente  $i$ ,  $C_{p,i}$ : calor específico de la corriente  $i$ ,  $T_i$ : temperatura de la corriente  $i$ ,  $T_{ref}$ : temperatura del estado de referencia.

### 2.6.2.2 Calor y trabajo

Los signos de los términos de calor ( $\dot{Q}$ ) y trabajo ( $\dot{W}$ ) definidos en el balance de energía, se determinaron por principios termodinámicos para cada uno de los volúmenes de control.

Los datos de trabajo eléctrico (energía consumida por los equipos) se usaron en unidades de kilovatios, éstos fueron datos proveídos por la empresa de acuerdo a registros de medición que han realizado del consumo de energía eléctrica de los equipos.

Por medio del balance de energía en cada equipo, se halló el calor suministrado al equipo o transferido al ambiente. En el caso de los equipos en estudio, por su naturaleza, el calor en todos ellos es transferido al ambiente, y por tanto se consideró como energía perdida.

### 2.6.2.3 Eficiencia energética

La eficiencia energética según la primera ley de la termodinámica es definida como la razón entre la energía que sale del sistema o producto “útil” y la energía entregada por el sistema. La medida de la eficiencia energética dependerá de cómo se defina el concepto “útil” y de cómo se midan los productos [61].

La eficiencia energética está expresada con la siguiente ecuación (2.11):

$$\varepsilon_{l,k} = \frac{\sum \dot{E}_{e,k}}{\sum \dot{E}_{i,k}} \quad (2.11)$$

Donde  $\varepsilon_{l,k}$  : eficiencia energética del volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{e,k}$  : energía total de salida del volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{i,k}$  : energía total de entrada del volumen de control  $k$ .

#### 2.6.2.4 Índice energético de producción

Se calcula con el fin de determinar cómo se aprovecha la energía de entrada al sistema, teniendo en cuenta el nivel de producción, tal como se expresa en la ecuación (2.12).

Entre más bajo sea el valor de éste índice, mejor será la relación de aprovechamiento de energía-productividad [62].

$$I_{prod} = \frac{\dot{E}_{e,tot}}{\dot{m}_p} \quad (2.12)$$

Donde  $I_{prod}$  : índice energético de producción,  $\dot{E}_{e,tot}$  : energía total de entrada al sistema,  $\dot{m}_p$  : flujo másico total de harina de vísceras producidas.

#### 2.6.3 Balance de exergía

La primera ley de la termodinámica no proporciona información acerca de la dirección en la que ocurren los procesos espontáneos o sobre los aspectos de reversibilidad e irreversibilidad de los procesos termodinámicos, en cambio la segunda ley impone restricciones para la dirección de las transferencias de energía, además, enuncia que así como la energía contiene cantidad también posee calidad, y que los procesos ocurren en la dirección de la disminución de la calidad de la energía. [63].

El objetivo final en el análisis de un sistema utilizando los principios de la segunda ley de la termodinámica es identificar las ineficiencias debido a irreversibilidades. Sin embargo, un balance de entropía no permite determinar de manera objetiva la eficiencia con la que se utiliza la energía en el sistema y en cada uno de sus componentes. Además, los costos no se pueden asignar a valores de entropía porque ellos no tienen en cuenta la calidad de la energía [64]. Por todo lo anterior, para cuantificar esta calidad, la cual es sinónimo de capacidad para causar un cambio, se definió la propiedad llamada *exergía*.



La exergía se define como el máximo trabajo que se puede obtener de un material, o puede ser también la cantidad mínima de trabajo que debe ser suministrado si una sustancia o forma de energía tiene que ser producida a partir de su estado inerte de referencia [63].

En contraste con la energía que siempre se conserva, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, la exergía no cumple la ley de la conservación. Para desarrollar el análisis exergético, se inició con el cálculo de la exergía específica de todos los flujos físicos, con la ecuación (2.13), la cual fue usada por Gordillo (2005), en el análisis exergético realizado en un proceso de producción de harina de pescado [65]:

$$\psi = C_p(T - T_{ref}) - T_{ref} \left[ C_p \ln \left( \frac{T}{T_{ref}} \right) \right] \quad (2.13)$$

Donde  $\psi$  : exergía específica,  $C_p$  : calor específico,  $T$  : temperatura,  $T_{ref}$  : temperatura de referencia.

A continuación, para realizar el balance de exergía se consideró la ecuación (2.14):

$$\sum_k \left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W}_k + \sum_i \dot{m}_i \psi_i - \sum_e \dot{m}_e \psi_e - \dot{E}x_{D,k} = 0 \quad (2.14)$$

Donde:  $T_{ref}$  : temperatura de referencia,  $T_k$  : temperatura del volumen de control  $k$ ,  $\dot{Q}_k$  : calor transferido o cedido por el volumen de control  $k$ ,  $\dot{W}_k$  : Trabajo suministrado al volumen de control,  $\left( 1 - \frac{T_{ref}}{T_k} \right) \dot{Q}_k$  : exergía del calor,  $\dot{m}_i \psi_i$  : exergía total de las corrientes másicas de entrada,  $\dot{m}_e \psi_e$  : exergía total de las corrientes másicas de salida,  $\dot{E}x_{D,k}$  : exergía destruida a causa de las irreversibilidades del proceso.

Las irreversibilidades en un proceso significan un aumento en la exergía destruida y un decremento en la eficiencia [63].

A partir del balance de exergía (2.14), se pueden deducir los flujos exergéticos como se puede ver en las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17):

$$\dot{E}x_{F,k} = \dot{m}_i \psi_i + \dot{W}_k \quad (2.15)$$

$$\dot{E}x_{P,k} = \dot{m}_e \psi_e - \dot{m}_i \psi_i \quad (2.16)$$

$$\dot{E}x_{L,k} = \left(1 - \frac{T_{ref}}{T_k}\right) \dot{Q}_k \quad (2.17)$$

Donde:  $\dot{E}x_{F,k}$ : exergía fuel del volumen de control  $k$ , es la exergía correspondiente a lo que ingresa a cada volumen de control (corriente de materia prima, combustible suministrado o energía eléctrica),  $\dot{E}x_{P,k}$ : exergía del producto del volumen de control  $k$  y  $\dot{E}x_{L,k}$ : exergía de pérdidas del volumen de control  $k$ .

En resumen de las ecuaciones anteriores, el balance de exergía, también se puede definir como lo muestra la ecuación (2.18):

$$\dot{E}x_{F,k} = \dot{E}x_{P,k} + \dot{E}x_{L,k} + \dot{E}x_{D,k} \quad (2.18)$$

La exergía destruida ( $\dot{E}x_D$ ) es un fenómeno interno que se debe a las irreversibilidades dentro de un sistema o componente mientras que la exergía de pérdidas se puede considerar como irreversibilidades externas (trasferencia de exergía del sistema al entorno, la cual no está siendo utilizada). En la determinación de estos flujos exergéticos hay que tener en cuenta que los valores de  $\dot{E}x_L$  y  $\dot{E}x_D$  dependen explícitamente de la elección de la frontera del sistema y estado de referencia [66].

Por consiguiente, en el presente estudio no se tendrán en cuenta las pérdidas de exergía sino que todas las ineficiencias serán asumidas como exergía destruida, esto de acuerdo a lo reportado por Frangopoulos (2009), quien en su estudio concluyó que en el desarrollo del análisis exergético cuando se toman los valores de estado estándar, es decir 25°C (298,15 K) y 1 atm (1,013 bar) para la temperatura y la presión del entorno, en la mayoría de los casos las pérdidas de exergía representan un pequeño porcentaje de las ineficiencias termodinámicas totales del sistema, y es un flujo exergético poco factible de recuperar.





Por lo tanto, en estos casos las ineficiencias termodinámicas en los componentes del sistema consisten exclusivamente a destrucción de exergía [67].

### 2.6.3.1 Eficiencia exergética

La eficiencia exergética es uno de los criterios más importantes para la evaluación de un sistema o componentes desde el punto de vista termodinámico. Para el cálculo de las eficiencias exergéticas se tomó la ecuación (2.19):

$$\varepsilon_{II,k} = \frac{\dot{E}x_{P,k}}{\dot{E}x_{F,k}} = 1 - \frac{\dot{E}x_{D,k} + \dot{E}x_{L,k}}{\dot{E}x_{F,k}} \quad (2.19)$$

Donde  $\varepsilon_{II,k}$  : eficiencia exergética en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{P,k}$  : exergía de producto en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{F,k}$ : exergía fuel en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{D,k}$  : exergía destruida en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{L,k}$  : exergía de pérdidas en el volumen de control  $k$ .

La eficiencia exergética muestra qué porcentaje de la exergía fuel se puede encontrar en la exergía de producto de un sistema o componente, en otras palabras, muestra la diferencia entre el 100% y la fracción de la exergía fuel de un sistema que se ha convertido en exergía destruida o exergía pérdida [66].

Para completar el análisis exergético convencional, se calcularon los valores de la razón de destrucción de exergía para cada equipo con respecto a la exergía fuel total que entra al sistema y la exergía total destruida. Estos parámetros proporcionan la medida termodinámica de las ineficiencias del sistema, esto se realizó con las ecuaciones (2.20) y (2.21):

$$y_{D,k} = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{F,tot}} \quad (2.20) \quad y_{D,k}^* = \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{D,tot}} \quad (2.21)$$

Donde  $y_{D,k}$  : razón de destrucción de exergía del volumen de control  $k$  con respecto a la exergía fuel total del sistema,  $\dot{E}x_{D,k}$  : exergía destruida del volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{F,tot}$ : exergía fuel total del sistema,  $y_{D,k}^*$ : razón de destrucción de exergía del volumen



de control  $k$  con respecto a la exergía destruida total del sistema,  $\dot{E}x_{D,tot}$  : exergía destruida total del sistema.

Desde el punto de vista de las razones de destrucción de exergía, la eficiencia exergética global de un sistema se puede calcular a partir de la ecuación (2.22):

$$\varepsilon_{II,tot} = 1 - \sum y_{D,k} \quad (2.22)$$

Donde  $\varepsilon_{II,tot}$ : eficiencia exergética total del sistema,  $y_{D,k}$  : razón de destrucción de exergía del volumen de control  $k$  con respecto a la exergía fuel total del sistema

### 2.6.3.2 Índice de mejora potencial

Es una medida de cuánto y con qué facilidad el volumen de control o sistema puede ser mejorado con propósitos de optimización y es obtenida a partir de la eficiencia exergética y de la exergía destruida [65] :

$$I_{mp,k} = (1 - \varepsilon_{II,k}) * \dot{E}x_{D,k} \quad (2.23)$$

Donde  $I_{m,p}$  : índice de mejora potencial del volumen de control  $k$  ,  $\varepsilon_{II,k}$  : eficiencia exergética del volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{D,k}$ : exergía destruida del volumen de control  $k$ .

En la ecuación (2.23), el primer componente, el potencial relativo  $(1 - \varepsilon_{II,k})$  es una medida de con qué facilidad podría ser mejorado el volumen de control o sistema en función de la eficiencia exergética. Si la eficiencia es muy baja, entonces el potencial relativo alcanza un valor alto, luego el objeto de análisis podría tener una amplia posibilidad de ser mejorado. El segundo componente, el potencial absoluto ( $\dot{E}x_{D,k}$ ) es una medida de cuánto un volumen de control o sistema puede ser mejorado en función de las irreversibilidades que ocurren dentro de él.

### 2.6.3.3 Índice exergético de producción

Es un indicador de cómo se aprovecha la exergía fuel, con respecto al nivel de producción, como se puede observar en la ecuación (2.24).

$$I_{ex,prod} = \frac{\dot{E}x_{F,tot}}{\dot{m}_p} \quad (2.24)$$



Donde  $I_{ex,prod}$  : índice exergético de producción,  $\dot{E}x_{F,tot}$  : exergía fuel total de entrada al sistema,  $\dot{m}_p$  : flujo másico total de harina de vísceras producidas.

Entre más bajo sea el valor de éste índice, mejor será la relación de aprovechamiento de exergía-productividad [62].

#### 2.6.3.4 Índice de sostenibilidad

El análisis del consumo de energía en el sector industrial es un factor relevante, tanto para reducir el costo que ésta representa para las empresas como por razones ecológicas, pues el mal aprovechamiento de ésta puede tener un impacto negativo en el entorno a causa del agotamiento de las reservas, lo cual afecta el desarrollo energéticamente sostenible [68].

A partir de los parámetros exergéticos se determinó un nuevo índice de sostenibilidad definido en la ecuación (2.25), con el cual se puede analizar cómo la destrucción de exergía de un sistema, afecta el desarrollo sostenible [69] :

$$SI = \frac{1}{\sum y_{D,k}} \quad (2.25)$$

Donde  $SI$  : índice de sostenibilidad,  $y_{D,k}$  : razón de destrucción de exergía del volumen de control  $k$  con respecto a la exergía fuel total del sistema.

La exergía se ha revelado como una herramienta útil en el análisis de impactos ambientales principalmente en relación con la evaluación de recursos y eficiencias, los cuales son uno de los principales desafíos en el desarrollo de tecnologías ambientalmente sostenibles. Sin embargo, investigaciones más recientes demuestran que para un análisis ambiental más detallado y eficaz, la mejor opción es una combinación de la metodología del análisis exergético junto con el análisis de ciclo de vida, dado que éste último ayuda a identificar oportunidades para mejorar el desempeño ambiental de un producto en las distintas etapas de su ciclo de vida [70].

## 2.7 Análisis exerético avanzado: exergía evitable e inevitable

El análisis previo se basa en el concepto de pérdida o destrucción total de exergía, que no puede establecer si la posible mejora es práctica o económica [71].

Por tanto, cualquier pérdida o destrucción total de exergía dentro de un volumen de control, es posible descomponerla en dos partes: entre una exergía destruida evitable y otra exergía destruida inevitable como se muestra en la ecuación (2.26).

$$\dot{E}x_{D,k} = \dot{E}x_{D,k}^{UN} + \dot{E}x_{D,k}^{AV} \quad (2.26)$$

Donde  $\dot{E}x_{D,k}$ : exergía destruida del volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ : exergía destruida inevitable del volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ : exergía destruida evitable del volumen de control  $k$ .

Para determinar la exergía destruida inevitable en un volumen de control dentro de un sistema, se requiere considerar cada uno por independiente de los demás [72]. Al mismo tiempo, el análisis requiere que el cálculo de la exergía destruida específica inevitable se realice en función de la eficiencia energética máxima que ofrece la tecnología disponible en el mercado, de esta manera se considera el funcionamiento del volumen de control en condiciones inevitables, con alta eficiencia y pérdidas mínimas [39].

La ecuación (2.27) define la exergía destruida inevitable como:

$$\dot{E}x_{D,k}^{UN} = \dot{E}x_{P,k} * \left( \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \right)^{UN} \quad (2.27)$$

Donde  $(\dot{E}x_{D,k}/\dot{E}x_{P,k})^{UN}$ : exergía destruida específica inevitable del volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{P,k}$ : exergía del producto del volumen de control  $k$  en condiciones reales de funcionamiento [73].

Luego, la exergía destruida evitable ( $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ ) es la diferencia entre la destrucción exerética total y la inevitable [64]. Por consiguiente, la parte evitable de la exergía destruida es el potencial objetivo para mejorar la eficiencia de cada equipo perteneciente al sistema.



A partir del concepto de exergía destruida específica inevitable se define una eficiencia exergética modificada (ecuación (2.28)), la cual permite comparar el rendimiento de volúmenes de control que operan en condiciones similares [64].

$$\varepsilon_{II,máx}^* = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{E}x_{D,k}}{\dot{E}x_{P,k}} \right)^{UN} \right]^{-1} \quad (2.28)$$

Donde  $\eta_{II\ máx,k}^*$ : eficiencia exergética modificada del volumen de control  $k$ ,  $(\dot{E}x_{D,k}/\dot{E}x_{P,k})^{UN}$ : exergía destruida específica inevitable del volumen de control  $k$ .

Además, el índice de potencial de mejora es optimizado teniendo en cuenta el valor de la exergía destruida evitable [74], como se puede ver en la ecuación (2.29)

$$I_{mp,k}^* = (1 - \varepsilon_{II,k}) * \dot{E}x_{D,k}^{AV} \quad (2.29)$$

Donde  $I_{mp,k}^*$ : índice de potencial de mejora modificado del volumen de control  $k$ ,  $\varepsilon_{II,k}$ : eficiencia exergética del volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}x_{D,k}^{AV}$ : exergía destruida evitable del volumen de control  $k$ .

Después de un análisis exergético avanzado, en el cual se calcula la destrucción de exergía inevitable y evitable, se puede identificar más claramente qué proceso o volumen de control incurre en la mayor destrucción de exergía evitable y proponer modificaciones que permitan recuperar esta exergía.

## 2.8 Análisis termoeconómico

La termoeconomía es la rama de la ingeniería que combina el análisis de exergía y los principios económicos, para proporcionar información del sistema no disponible en un análisis de energía y evaluación económica convencional.

Según el estudio realizado por Abusoglu (2009), existen diferentes enfoques para el desarrollo de un análisis termoeconómico, sin embargo, el método SPECOS (specific exergy cost) es el más empleado, puesto que se basa en los datos de exergía específica y permite calcular los costos por unidad de exergía para los flujos que componen el sistema,



mediante el uso de ecuaciones de costos auxiliares [75]. Para la aplicación del análisis termoeconómico del presente estudio se utilizó este método con los siguientes pasos:

### 2.8.1 Balance económico

En el análisis económico los costos no exergéticos correspondientes a los costos de capital de inversión, y costos de operación y mantenimiento (O&M) son datos de entrada necesarios, sin embargo, estos componentes de costo pueden variar significativamente a lo largo del tiempo en términos económicos para el sistema. Por esta razón, todos los componentes de costo en el análisis económico deben utilizarse como valores anuales nivelados, estos valores se hallan a partir del cálculo del factor de nivelación de escalamiento constante o CELF (constant escalation levelization factor) por medio de la ecuación (2.30), el cual expresa la relación entre el monto de los gastos de inversión de los equipos ( $P_0$ ) y la anualidad equivalente o costo nivelado ( $A$ ) para cada equipo [66].

$$\frac{A}{P_0} = CELF = \frac{k(1 - k^n)}{1 - k} CRF \quad (2.30)$$

Este factor de nivelación está expresado en función de  $n$  como el número de años en el que se está haciendo la nivelación de los gastos, junto a dos parámetros  $k$  y  $CRF$  (capital recovery factor) es el factor de recuperación del capital, los cuales se calculan a través de las ecuaciones (2.31) y (2.32).

$$k = \frac{1 + r_n}{1 + i_{eff}} \quad (2.31) \quad CRF = \frac{i_{eff}(1 + i_{eff})^n}{(1 + i_{eff})^n - 1} \quad (2.32)$$

Donde  $i_{eff}$  es la tasa efectiva anual y  $r_n$  es la tasa nominal de escalamiento, ambos valores consultados para el año en vigencia de este estudio.

Luego, se calcularon las anualidades para cada equipo con los valores de costos de compra. Para calcular el valor de los costos no exergéticos asociados con el capital, O&M (operación y mantenimiento) y los gastos totales de las unidades de la planta se emplearon las ecuaciones (2.33) y (2.34), tal como se describe para la metodología empleada según el libro “*Thermal Design Optimization*” (Bejan y otros, 1996) [76].

$$\dot{Z}^{CI} = \frac{A}{\tau} \quad (2.33) \quad \dot{Z}^{OM} = \frac{OMC_L \times PEC_k}{\sum PEC_k} \quad (2.34)$$

Donde  $\dot{Z}^{CI}$ : costos no exergéticos correspondientes a los costos de capital de inversión,  $A$ : costo nivelado anteriormente,  $\tau$  es el tiempo de operación del equipo (horas/año),  $\dot{Z}^{OM}$ : costos no exergéticos correspondientes a los costos de operación y mantenimiento,  $OMC_L$ : son los costos de operación y mantenimiento,  $PEC_k$  son los costos de compra de los equipos.

La suma de estas dos variables se denota por la ecuación (2.35).

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (2.35)$$

Donde  $\dot{Z}_k$ : costo no exergético del volumen de control  $k$ .

### 2.8.2 Balance exergético contable

La razón por la que se usa la exergía para la asignación de costes en sistemas térmicos reside en que es el valor termodinámico que realmente mide las ineficiencias de cada proceso. Es por ello que se han obtenido en el análisis termodinámico las exergías específicas de cada corriente del sistema, ya sea de entrada o salida, debida a un flujo de calor o de trabajo. El coste exergético temporal de una corriente  $j$  es el producto de dos valores [66], tal como se expresa en la ecuación (2.36).

$$\dot{C}_j = c_j \dot{E}_j \quad (2.36)$$

Donde  $\dot{C}_j$ : costo exergético temporal de la corriente  $j$ ,  $c_j$ : costo exergético unitario de la corriente  $j$ ,  $\dot{E}_j$ : exergía de la corriente  $j$  obtenida mediante el análisis exergético.

Los balances exergéticos contables para cada volumen de control del sistema se realizaron en base a la ecuación (2.37), teniendo en cuenta que para el caso de estos equipos, todos reciben un trabajo eléctrico y genera un calor transferido al ambiente.

$$\sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{Q,k} = \dot{C}_{w,k} + \sum_i \dot{C}_{i,k} + \dot{Z}_k \quad (2.37)$$

A partir de las ecuaciones (2.38) hasta la (2.41) se expresa en detalle lo que representa cada término de la ecuación (2.37).

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}_i \quad (2.38)$$

$$\dot{C}_e = c_e \dot{E}_e \quad (2.39)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{E}_w \quad (2.40)$$

$$\dot{C}_Q = c_Q \dot{E}_Q \quad (2.41)$$



Donde:

$\dot{C}_i$  : costo exergético temporal asociado a las corrientes de materia que entran al sistema.

$\dot{C}_e$  : costo exergético temporal asociado a las corrientes de materia que salen del sistema.

$\dot{C}_w$  : costo exergético temporal asociado a la corriente de trabajo.

$\dot{C}_Q$  : costo exergético temporal asociado a la corriente de calor.

$c_i$  : costo exergético unitario asociado a las corrientes de materia que entran al sistema.

$c_e$  : costo exergético unitario asociado a las corrientes de materia que salen del sistema.

$c_w$  : costo exergético unitario asociado a la corriente de trabajo.

$c_Q$  : costo exergético unitario asociado a la corriente de calor.

$\dot{E}_i$  : exergía de las corrientes de materia que entran al sistema.

$\dot{E}_e$  : exergía de las corrientes de materia que salen del sistema.

$\dot{E}_w$  : exergía de la corriente de trabajo que entra al sistema.

$\dot{E}_Q$  : exergía de la corriente de calor que sale del sistema

$\dot{Z}_k$  : costo no exergético del volumen de control  $k$

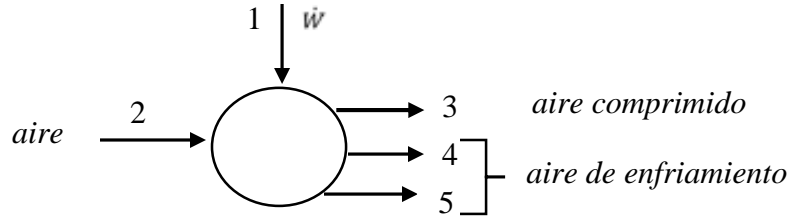
La ecuación (2.37) indica que el coste total de las corrientes exergéticas de salida es debido al coste de todas las corrientes exergéticas de entrada más los costes temporales de capital, operación y mantenimiento de un componente  $k$  de la instalación, o lo que es lo mismo, se atribuyen a las salidas todos los costes en que se incurren para producirlas.

Cuando se aplica el balance exergético contable a cada uno de los equipos del sistema, se obtiene el mismo número de ecuaciones que corresponde al número de equipos que componen la planta o a los que se está aplicando el estudio. Sin embargo el número de incógnitas del problema, que son los costes exergéticos unitarios  $c_j$ , es mayor que el número total de ecuaciones. Por este motivo, es necesario establecer una serie de ecuaciones adicionales que son las ecuaciones de costos auxiliares, las cuales permitan completar el sistema de ecuaciones y de esta forma poder resolver el problema termoeconómico [76].





Como ecuaciones adicionales se usaron las ecuaciones auxiliares de producto (un ejemplo de ellas se cita por medio de la ecuación (2.42)) aplicadas a un compresor con extracción de aire enfriado, como se ve en la Figura 2.3, esto debido a la analogía en funcionamiento con los equipos analizados como volúmenes de control en este estudio.



**Figura 0.3** Compresor con extracción de aire enfriado [66]

$$\frac{c_3 e_3 - c_2 e_2}{e_3 - e_2} = \frac{c_4 e_4 - c_2 e_2}{e_4 - e_2} = \frac{c_5 e_5 - c_2 e_2}{e_5 - e_2} \quad (2.42)$$

Donde

$c_2$ : costo exergético unitario de la corriente 2,  $c_3$ : costo exergético unitario de la corriente 3,  $c_4$ : costo exergético unitario de la corriente 4,  $c_5$ : costo exergético unitario de la corriente 5,  $e_2$ : exergía específica de la corriente 2,  $e_3$ : exergía específica de la corriente 3,  $e_4$ : exergía específica de la corriente 4,  $e_5$ : exergía específica de la corriente 5.

La ecuación (2.42) en conjunto con la ecuación general de balance de costos ecuación (2.37), se aplicó como se puede observar a continuación en la ecuación (2.43):

$$c_{P,k} \dot{E}_{P,k} = c_{F,k} \dot{E}_{P,k} + (c_{F,k} \dot{E}_{L,k} - \dot{C}_{L,k}) + \dot{Z}_k + c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (2.43)$$

Donde  $c_{P,k}$ : costo exergético unitario del producto,  $c_{F,k}$ : costo exergético unitario del fuel,  $\dot{E}_{P,k}$ : exergía del producto en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{L,k}$ : exergía de pérdidas en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{D,k}$ : exergía destruida en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{C}_{L,k}$ : costo exergético temporal de pérdidas,  $\dot{Z}_k$ : costo no exergético del volumen de control  $k$

Para el presente estudio se tomó el criterio convencional usado para la consideración de corrientes no aprovechadas, que consiste en no atribuir ningún costo a estas corrientes  $\dot{C}_{L,k} = 0$ . Este tipo de consideración se emplea en el caso de corrientes descargadas al



medio ambiente que no son costeadas debido a que no serán recuperadas posteriormente por el sistema, sin embargo este hecho penaliza al producto de ese equipo con las ineficiencias que son responsabilidad del sistema en su conjunto [66].

El sistema de ecuaciones planteado permite hallar las variables incógnitas y los valores de los costes exergéticos unitarios asociados al fuel, producto y a la exergía destruida para cada volumen de control, aplicando las ecuaciones (2.47) y (2.48).

$$\dot{C}_{p,k} = c_{p,k} \dot{E}_{p,k} \quad (2.44) \quad \dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \dot{E}_{D,k} \quad (2.45)$$

Donde  $\dot{C}_{p,k}$ : costo exergético temporal del producto en el volumen de control  $k$ ,  $c_{p,k}$ : costo exergético unitario del producto en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{p,k}$ : exergía de producto en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{C}_{D,k}$ : costo exergético temporal de destrucción en el volumen de control  $k$ ,  $c_{F,k}$ : costo exergético unitario del fuel en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{D,k}$ : exergía destruida en el volumen de control  $k$ .

Luego de calcularse los costos con las ecuaciones de costos auxiliares y desarrollarse los balances generales de costos para cada volumen de control, se procedió a determinar los valores de los parámetros termoeconómicos que permitieron evaluar el sistema.

### 2.8.3 Parámetros termoeconómicos para la evaluación del sistema

#### 2.8.3.1 Factor exergoeconómico

El factor exergoeconómico se utiliza para identificar las mayores fuentes de costo (inversión de capital o costos de destrucción de exergía). Si el valor de  $f_k$  es alto, se debe investigar si es posible reducir el capital de inversión para el componente  $k$  sin afectar la eficiencia del mismo. Si el valor de  $f_k$  es bajo, se debe buscar mejorar la eficiencia del componente incrementando el capital de inversión.

El factor exergoeconómico se define por la ecuación (2.46).

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{F,k}(\dot{E}_{D,k} + \dot{E}_{L,k})} \quad (2.46)$$

Donde  $f_k$  : factor exergoeconómico del componente  $k$ ,  $\dot{Z}_k$  : costo no exergético del volumen de control  $k$ ,  $c_{F,k}$  : costo exergético unitario del fuel en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{D,k}$  : exergía destruida en el volumen de control  $k$ ,  $\dot{E}_{L,k}$  : exergía de pérdidas en el volumen de control  $k$ .

Finalmente, este parámetro unido a los costes exergéticos unitarios promedio de fuel y producto, y el coste temporal de la exergía destruida en cada equipo, permiten obtener una serie de conclusiones que constituyen el resultado final del análisis y evaluación termoeconómica [67].



## CAPÍTULO 3

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del análisis energético, exergético y termoeconómico de los diferentes procesos involucrados en el proceso de producción de harina a partir de vísceras de pollo. Con el análisis energético se obtuvieron los consumos de energía, eficiencia e indicadores de productividad. Por medio del análisis exergético se obtuvieron las eficiencias exergéticas y las irreversibilidades que se generan debido a la naturaleza de los procesos, además, indicadores exergéticos que permiten analizar el aprovechamiento de la energía en el sistema. Adicionalmente, se realizó un análisis exergético avanzado para determinar la exergía evitable e inevitable. Por último, el análisis termoeconómico permitió calcular los costos por unidad de exergía e indicadores termoeconómicos.

#### 3.1 Representación gráfica de los equipos y balances

La representación gráfica de los equipos y las ecuaciones que se formularon para realizar los balances de masa, energía y exergía se encuentran en la tabla 3.1.

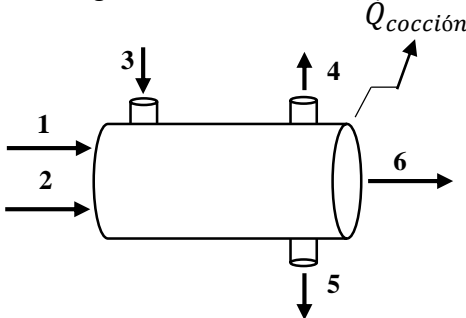
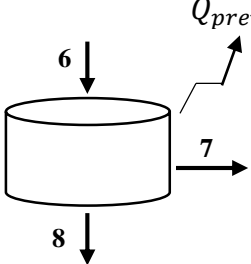
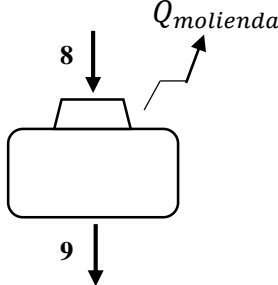
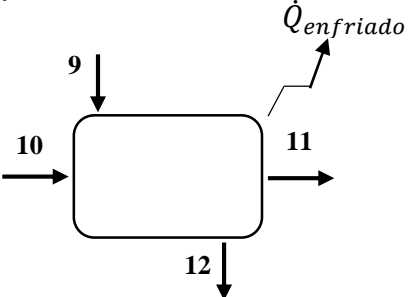
#### 3.2 Análisis exergético convencional

##### 3.2.1 Balance de masa

Con respecto al balance de masa, como se mencionó en la metodología, el análisis se hizo tomando como base de cálculo la cantidad de materia prima que se carga en 1 batch, y la simplificación adoptada para todos los cuatro procesos en estudio, fue considerar el flujo continuo. Los cálculos se hicieron en base a la ecuación 2.1. Para una compatibilidad de unidades en los posteriores cálculos del presente estudio, se manejaron las unidades del flujo másico en kg/s (esta es la unidad de tiempo tomada como base de cálculo)

Los resultados para el balance de masa para cada etapa están registrados desde la tabla 3.2 hasta la tabla 3.4.

**Tabla 3.1** Representación gráfica de los volúmenes de control y ecuaciones de los balances

Proceso / Volumen de control	Balances
<p><b>Cocción / Digestor</b></p> 	$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 + \dot{m}_6$ $\dot{Q}_{cocción} = (\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3) - (\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6) + \dot{W}_{cocción}$ $\dot{E}x_D = (\dot{m}_3 \psi_3 - \dot{m}_5 \psi_5 + \dot{W}_{cocción}) - (\dot{m}_4 \psi_4 + \dot{m}_6 \psi_6 - \dot{m}_1 \psi_1 - \dot{m}_2 \psi_2)$
<p><b>Prensado / Prensa</b></p> 	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8$ $\dot{Q}_{prensado} = \dot{m}_6 h_6 - (\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8) + \dot{W}_{prensado}$ $\dot{E}x_D = (\dot{m}_7 \psi_7 + \dot{m}_8 \psi_8) - \dot{m}_6 \psi_6 + \dot{W}_{prensado}$
<p><b>Molienda / Molino</b></p> 	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$ $\dot{Q}_{molienda} = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9 + \dot{W}_{molienda}$ $\dot{E}x_D = \dot{m}_9 \psi_9 - \dot{m}_8 \psi_8 + \dot{W}_{molienda}$
<p><b>Enfriado / Enfriadora</b></p> 	$\dot{m}_9 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{12}$ $\dot{Q}_{enfriado} = (\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{10} h_{10}) - (\dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{12} h_{12}) + \dot{W}_{enfriado}$ $\dot{E}x_D = (\dot{m}_{11} \psi_{11} + \dot{m}_{12} \psi_{12}) - (\dot{m}_9 \psi_9 + \dot{m}_{10} \psi_{10}) + \dot{W}_{enfriado}$



**Tabla 3.2.** Balance de masa del proceso de cocción

Cocción/ Digestor	Entradas	Corriente	Descripción	$\dot{m}$ (kg/s)
		1	Vísceras	0,259
		2	Aceite	0,019
	3	Vapor de agua	0,277	
	Salidas	Corriente	Descripción	$\dot{m}$ (kg/s)
		4	Agua evaporada	0,183
5		Agua condensada	0,277	
6	Vísceras cocidas	0,094		

**Tabla 3.3.2** Balance de masa del proceso de prensado.

Prensado/ Prensa	Entrada	Corriente	Descripción	$\dot{m}$ (kg/s)
		6	Vísceras cocidas	0,094
	Salida	Corriente	Descripción	$\dot{m}$ (kg/s)
		7	Aceite de pollo	0,039
8	Torta de Víscera	0,056		

**Tabla 3.4.** Balance de masa en proceso de molienda.

Molienda/ Molino	Entrada	Corriente	Descripción	$\dot{m}$ (kg/s)
		8	Torta de Víscera	0,056
	Salida	Corriente	Descripción	$\dot{m}$ (kg/s)
9		Harina de Víscera	0,056	

**Tabla 3.5.** Balance de masa del proceso de enfriado.

Enfriado/ Enfriadora	Entradas	Corriente	Descripción	$\dot{m}$ (kg/s)
		9	Harina de Víscera	0,056
	10	Aire Frío	0,139	
	Salidas	Corriente	Descripción	$\dot{m}$ (kg/s)
		11	Aire Caliente	0,139
12		Harina de Víscera	0,056	

No se tuvieron en cuenta pérdidas de materia, dado que son casi nulas a lo largo de estas cuatro etapas, es por tal razón que los valores de entrada coinciden totalmente con los valores de salida en cada proceso.

### 3.2.2 Balance de energía

En la tabla 3.6 se muestran los datos de temperatura y composición de cada flujo másico (fracción de agua, fracción de proteína y fracción de grasa) y los resultados del cálculo de los calores específicos, entalpías y exergías, usando las ecuaciones de la 2.5 a la 2.9, 2.10 y 2.13 respectivamente.

**Tabla 3.6.** Descripción, composición y propiedades específicas de las corrientes másicas.

<i>Estado</i>	<i>Descripción</i>	<i>T(°C)</i>	<i>w<sub>A</sub></i>	<i>w<sub>P</sub></i>	<i>w<sub>G</sub></i>	<i>w<sub>C</sub></i>	<i>C<sub>p</sub></i> (kJ/kg °C)	<i>h</i> (kJ/kg)	<i>ψ</i> (kJ/kg)
<b>1</b>	Vísceras	35	0,69	0,14	0,17	0,00	3,874	38,737	0,635
<b>2</b>	Aceite	35	----	----	1,00	----	1,982	19,823	0,325
<b>3</b>	Vapor de agua	120	1,00	----	----	----	1,885	179,075	23,625
<b>4</b>	Agua evaporada	110	1,00	----	----	----	1,882	159,970	19,225
<b>5</b>	Agua condensada	40	1,00	----	----	----	4,180	62,700	1,526
<b>6</b>	Vísceras cocidas	80	0,07	0,62	0,20	0,11	2,270	124,780	10,272
<b>7</b>	Aceite de pollo	90	----	----	1,00	----	1,886	122,597	11,692
<b>8</b>	Torta de vísceras	60	0,05	0,63	0,19	0,13	2,205	77,159	4,203
<b>9</b>	Harina de vísceras	70	0,04	0,64	0,18	0,14	2,173	97,777	6,711
<b>10</b>	Aire	30	----	----	----	----	1,005	5,025	0,042
<b>11</b>	Aire caliente	40	----	----	----	----	1,006	15,090	0,367
<b>12</b>	Harina de vísceras	30	0,04	0,65	0,18	0,13	2,182	10,909	0,090

En la tabla 3.7 se muestran los resultados de las entalpías totales de entrada y salida en cada equipo, así como el trabajo eléctrico que es suministrado a los mismos y el flujo de calor que es resultante de la transferencia de calor intercambiada por los procesos con los alrededores calculado en los balances de energía para cada volumen de control, de acuerdo a la ecuación 2.4. Adicionalmente, se encuentran los resultados de la eficiencia energética de cada proceso determinada por la ecuación 2.11

El flujo de calor ( $\dot{Q}_k$ ) hallado por medio de las ecuaciones planteadas para el balance energético, y registradas en la tabla 3.1, es la energía que no está siendo aprovechada y no es factible su recuperación, por lo cual se definió como energía perdida. Los equipos

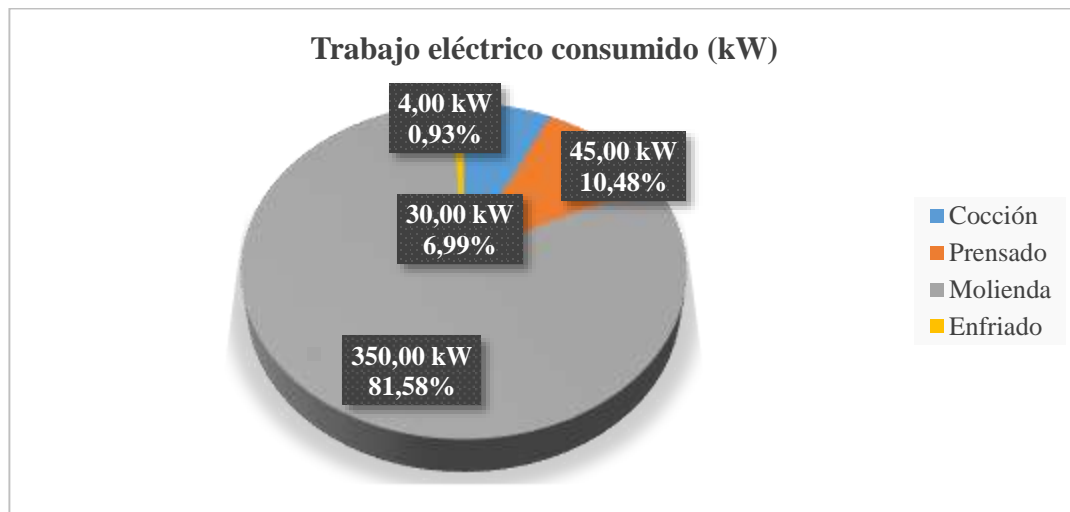
en los que hay mayores pérdidas de calor en el ambiente son el molino seguido del digestor.

**Tabla 3.7.** Resultados del Balance de Energía

<i>Etapa</i>	<i>Equipo</i>	$\dot{H}_{i,k}$ (kW)	$\dot{H}_{e,k}$ (kW)	$\dot{W}_k$ (kW)	$\dot{Q}_k$ (kW)	$\epsilon_{I,k}$ (%)
Cocción	Digestor	79,53	58,50	30,00	51,03	53,41
Prensado	Prensa	11,79	12,72	45,00	44,07	22,40
Molienda	Molino	4,29	5,43	350,00	348,85	1,53
Enfriado	Enfriadora	2,51	2,70	4,00	3,81	41,51
<b>Total</b>		<b>98,12</b>	<b>79,35</b>	<b>429,00</b>	<b>447,76</b>	<b>15,06</b>

Conforme a los resultados de la eficiencia energética, el proceso de cocción es el que posee el valor más alto con un 53,41%, seguido del enfriado con un 41,51% y prensado con un 22,40%, siendo el proceso de molienda el que genera mayores pérdidas de energía teniendo la eficiencia energética más baja, de tan solo un 1,53% .

Fajardo y otros (2015), en un estudio realizado a una planta de producción de harina de trigo identificó que los bancos de molienda fueron los equipos con menor eficiencia energética, obteniendo valores de alrededor del 15% de eficiencia y con altos valores de calor transferido al ambiente [77].



**Figura 3.2.1** Representación del consumo de trabajo eléctrico del sistema en estudio

Como se puede observar en la figura 3.1 , el proceso que consume mayor energía eléctrica es el proceso de molienda, lo cual representa el 81,58% de la energía eléctrica que entra



al sistema, seguido del prensado con un 10,48% de consumo, cocción con un 6,99% y por último del sistema de enfriado con un 0,93% . Luego, el resultado de la eficiencia energética global del proceso fue de 15,06 %.

El resultado obtenido para el *índice energético de producción* calculado por la ecuación (2.12) fue de 9488 kJ/ kg de harina de vísceras producido (9,4 MJ /kg de harina producido). Este resultados es bastante aproximado al valor obtenido por Arroyo (2014), quien realizó un estudio de consumo energético a una granja de procesamiento de pollos, y el cual fue de 9,2 MJ/ kg de pollo procesado [48].

### 3.2.3 Balance de exergía

La exergía es una propiedad termodinámica que permite analizar procesos reales, es decir procesos irreversibles. La diferencia entre los balances de exergía y energía, está basada en el hecho que el balance de energía establece la ley de conservación de energía, mientras que el de exergía establece la ley de degradación de la energía [65].

Los flujos exergéticos obtenidos para cada volumen de control fueron hallados por las ecuaciones 2.15, 2.16 y 2.18. Las eficiencias exergéticas junto a las razones de destrucción de exergía fueron calculadas por las ecuaciones 2.19, 2.20 y 2.21.

**Tabla 3.8.** Flujos exergéticos y eficiencia exergética del análisis exergético convencional

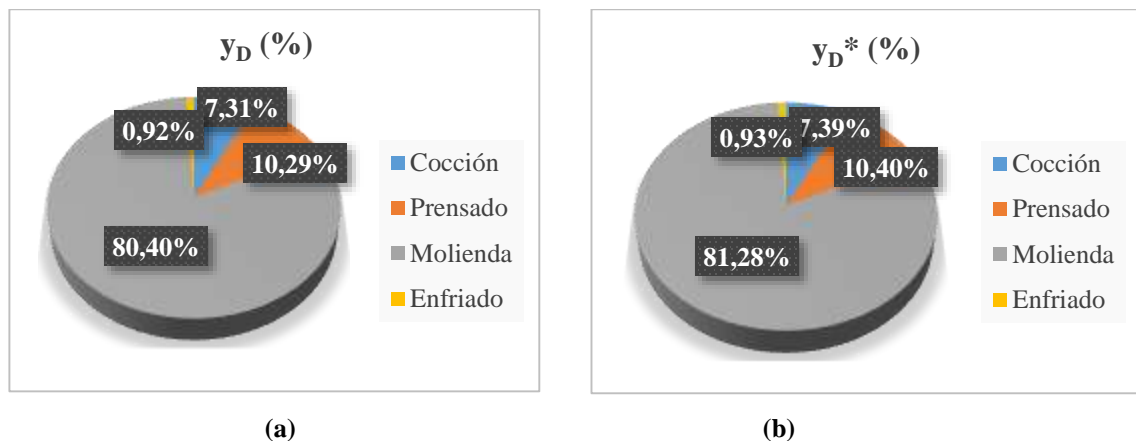
<i>Proceso</i>	<i>Equipo</i>	$\dot{E}x_{F,k}$ (kW)	$\dot{E}x_{P,k}$ (kW)	$\dot{E}x_{D,k}$ (kW)	$\epsilon_{II,k}$ (%)	$\gamma_{D,k}$ (%)	$\gamma_{D,k}^*$ (%)
Cocción	Digestor	36,13	4,32	31,80	11,97	7,31	7,39
Prensado	Prensa	45,00	0,24	44,76	0,54	10,29	10,40
Molienda	Molino	350,00	0,14	349,86	0,04	80,40	81,28
Enfriado	Enfriado	4,00	0,01	3,99	0,15	0,92	0,93
<b>Total</b>		<b>435,21</b>	<b>4,71</b>	<b>430,41</b>	-----	-----	-----

La tabla 3.8 muestra los resultados del cálculo de los flujos exergéticos y la eficiencia del análisis exergético convencional. Se puede observar que el digestor posee la mayor eficiencia exergética con un 11,97%, los demás equipos, los valores no superan el 1,0% de eficiencia. Gordillo (2005), en un análisis similar, aplicado al proceso de producción de harina de pescado en los procesos de cocción, prensado y secado, obtuvo que el

proceso con mayor valor de eficiencia exergética fue el de cocción, con un 34%, y los demás procesos con valores menores a éste [65].

La *eficiencia exergética global* del proceso calculada por la ecuación 2.22 es del 1,10%, lo cual representa, la exergía fuel que entra al sistema que es aprovechado para el producto final.

La figura 3.2 muestra los valores calculados para las razones de destrucción de exergía en porcentaje. Se puede observar que el proceso de molienda seguido del proceso de prensado, son los procesos en los cuales existe mayor destrucción de exergía con respecto a la exergía fuel total que entra al sistema y a la destrucción total del sistema.



**Figura 3.2.2.** (a) Razón de destrucción de exergía con respecto a la exergía fuel total; (b) Razón de destrucción de exergía con respecto a la exergía destruida total del sistema.

El cálculo del *índice de mejora potencial* global para todo el proceso por medio de la ecuación 2.23, dio como resultado un valor de 425,75 kW, esto permite evaluar cuánto del sistema podría ser mejorado con propósitos de optimización y es obtenida a partir de la eficiencia exergética del sistema y de la exergía destruida. Sin embargo, como se ve en la tabla 3.9 el índice de mejora potencial más alto lo posee el molino.

**Tabla 3.29** Resultados del índice de mejora potencial para cada equipo

Proceso	Equipo	$I_{mp}$ (kW)
Cocción	Digestor	28,00
Prensado	Prensa	44,52
Molienda	Molino	349,72
Enfriado	Enfriadora	3,99



Por otro lado, el resultado del *índice exergético de producción* determinado por la ecuación 2.24 fue de 7832 kJ/kg, el cual indica el valor de exergía fuel que se consume por cada kg de harina de vísceras producido.

El índice de sostenibilidad fue calculado mediante el uso de la ecuación 2.25, los valores para su cálculo fueron tomados de la tabla 3.8. El resultado fue de 1.01. Este valor de acuerdo a la figura 1.1 se relaciona con la eficiencia exergética, donde a menor eficiencia exergética, menos índice de sostenibilidad, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en este estudio para la eficiencia exergética, cuyo valor fue 1.26%.

Bilgen y Sarikaya (2015), realizaron una revisión sobre la evaluación del índice de sostenibilidad en procesos industriales con el consumo de ciertos combustibles y en procesos de obtención de productos agroindustriales, entre ellos evaluaron los procesos de producción de harinas los cuales pueden alcanzar un índice de sostenibilidad de hasta 1,75 [37].

### 3.3 Análisis exergético avanzado

Usando los datos obtenidos del análisis exergético convencional no se puede obtener una idea concreta del potencial de mejora de todo el sistema energético o de cada componente. Para definir el potencial de posible mejora de cada componente, es necesario definir las llamadas condiciones de operación inevitables que van a ser valiosas al determinar las partes inevitables de la destrucción exergética de un componente en un sistema de energía.

**Tabla 3.10.** Datos base para el análisis exergético avanzado

<i>Proceso</i>	<i>Equipo</i>	$\epsilon_{I,k}$ (%)	$\epsilon_{I,k}^{UN}$ (%)
Cocción	Digestor	53,41	80,00
Prensado	Prensado	22,40	65,00
Molienda	Molino	1,53	35,00
<b>Enfriado</b>	Enfriadora	41,51	70,00

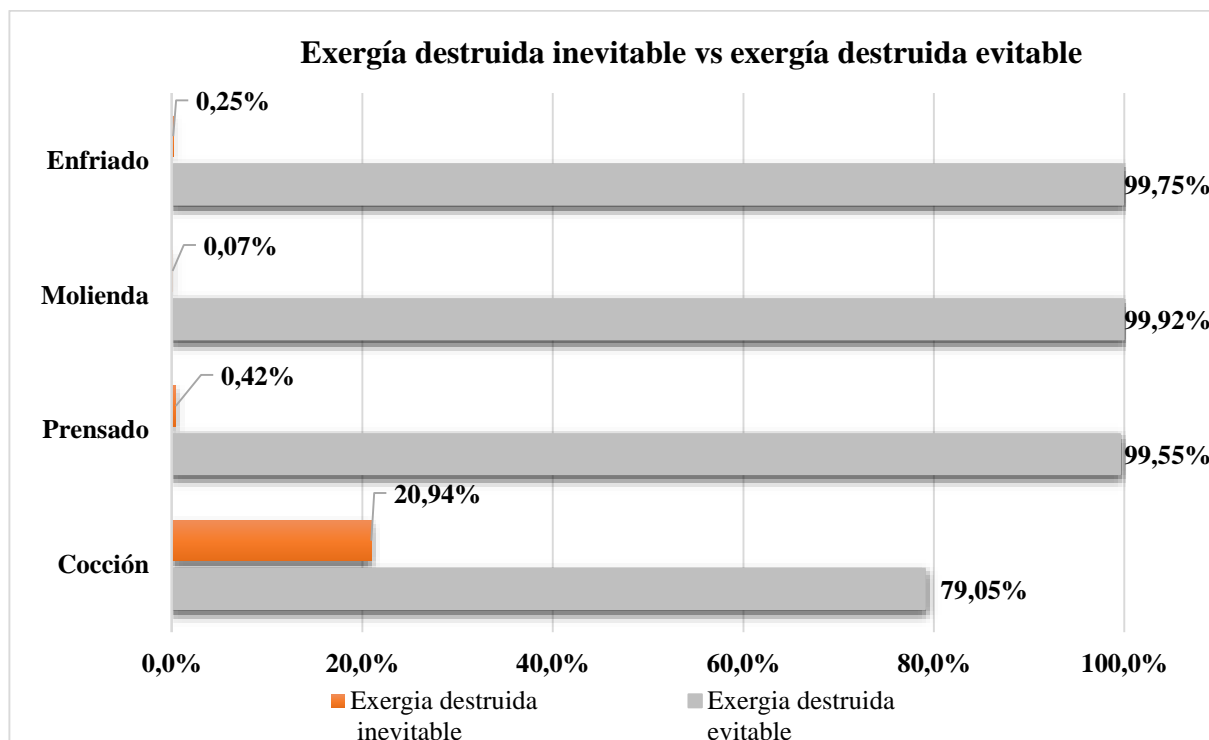
En la tabla 3.10 se muestran los datos de la eficiencia energética real ( $\epsilon_{I,k}$ ) obtenida para cada volumen de control y la eficiencia energética inevitable ( $\epsilon_{I,k}^{UN}$ ). Esta última corresponde a la eficiencia energética más alta que ofrece la tecnología de hoy en el

diseño de estos equipos. A partir de estos valores de referencia, se obtuvieron los siguientes resultados para el análisis exergético avanzado con las ecuaciones 2.26 hasta la 2.28, que se muestran en la tabla 3.11.

**Tabla 3.11.** Resultados del análisis exergético avanzado

Proceso	Equipo	$(\dot{E}x_{D,k}/\dot{E}x_{P,k})^{UN}$	$\dot{E}x_{D,k}$ (kW)	$\dot{E}x_{D,k}^{UN}$	$\dot{E}x_{D,k}^{AV}$	$\epsilon_{II,m\acute{a}x}^*$ (%)
Cocción	Digestor	1,54	31,80	6,66	25,14	39,36
Prensado	Prensa	0,79	44,76	0,19	44,56	55,83
Molienda	Molino	1,92	349,86	0,27	349,59	34,20
Enfriado	Enfriadora	0,95	3,99	0,01	3,98	51,18

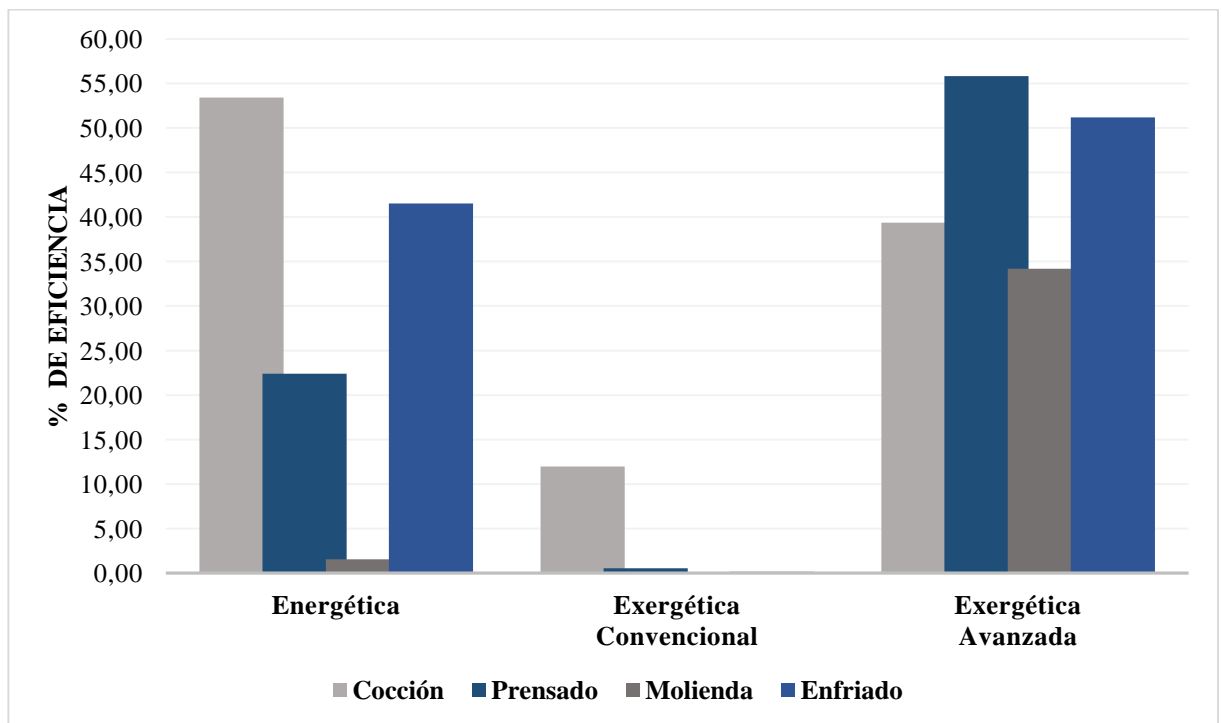
De los valores registrados en la tabla 3.11 se puede ver la diferencia entre la exergía inevitable y la exergía evitable, siendo ésta última la de mayor valor en todos los procesos, lo cual representa una oportunidad de mejora en el aprovechamiento de la energía, si se opta por utilizar equipos de mejor tecnología.



**Figura 3.2.3.** Exergía destruida evitable e inevitable en cada proceso.

En la figura 3.3 están representados los porcentajes correspondientes a las exergías destruidas inevitables y evitables en proporción a la exergía destruida total de cada proceso.

La exergía destruida inevitable ( $\dot{E}x_{D,k}^{UN}$ ) es esa parte de la exergía destruida dentro de un componente que no puede eliminarse, incluso si se aplicara la mejor tecnología disponible, es decir esa destrucción exergética es inevitable técnica y económicamente. Realizando una comparación entre los valores de la eficiencia energética, eficiencia exergética y la eficiencia exergética máxima hallada mediante el análisis exergético avanzado, se puede observar la diferencia de estos dos últimos valores a través de la figura 3.4, y se evidencia el potencial de mejora para este sistema.



**Figura 3.2.4.** Comparación entre eficiencia energética y eficiencia exergética de cada proceso

### 3.4 Análisis termoeconómico

La termoeconomía evalúa el costo de los recursos consumidos, y las irreversibilidades del sistema en términos de costo para el proceso de producción en general, lo cual permite identificar cómo se utilizan los recursos para aprovecharlos de manera más eficaz. Los



costos unitarios expresan el efecto económico de las ineficiencias y se utilizan como indicadores para mejorar la rentabilidad de los procesos de producción, además la evaluación del costo de los flujos de proceso ayuda a comprender el proceso de formación de costos desde los recursos de entrada hasta los productos finales [78].

### 3.4.1 Balance económico

En el análisis económico se calcularon los costos no exergéticos correspondientes a los costos de capital de inversión, y costos de operación y mantenimiento (O&M) son datos de entrada necesarios para el desarrollo del análisis termoeconómico.

Para estos cálculos previamente se determinó que  $k = 0,7652$  mediante la ecuación 2.31 que es el parámetro usado para hallar la anualidad equivalente, y está en función de la tasa efectiva anual ( $i_{\text{eff}}$ ) y tasa nominal de escalamiento ( $r_n$ ), ambos valores usados de acuerdo en vigencia de este estudio. La tasa efectiva anual usada fue de 33,51% [79] y la tasa nominal de escalamiento fue de 1,8% [80]

Los anteriores valores también se usaron para determinar el parámetro  $CRF$  con la ecuación 2.32 (factor de recuperación del capital) que dio un valor de 0,0216. Luego se calcularon las anualidades para cada equipo con los valores de costos de compra obtenidos de una página web de una empresa distribuidora de equipos para procesos rendering, debido a que los costos reales a los que fueron adquiridos no fueron provistos por la empresa debido a ser carácter confidencial.

Para los costos de operación y mantenimiento se tomó en cuenta el salario del personal que opera la planta (1 jefe de planta, 1 supervisor de producción, 1 auxiliar de calidad, 1 calderista y 5 operarios) y el personal encargado del mantenimiento de la misma (1 ingeniero mecánico). El tiempo de operación de todos los equipos se consideró que era 24 horas al día, 30 días al mes y 12 meses en el año para un total de 8640 horas/año.

Del balance económico se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 3.2.** Costos no exergéticos asociados a costos de capital de inversión y costos de operación y mantenimiento en los componentes del sistema.

<i>Proceso</i>	<i>Equipo</i>	<i>A (\$/año)</i>	<i><math>\dot{Z}^{CI}</math> (\$/h)</i>	<i><math>\dot{Z}^{OM}</math> (\$/h)</i>	<i><math>\dot{Z}</math> (\$/h)</i>
Cocción	Digestor	129'883.248	5,11	1.593,73	1.598,84
Prensado	Prensa	48'706.218	1,92	597,65	599,57
Molienda	Molino	97'412.436	3,83	1.195,13	1.199,13
Enfriado	Enfriador	70'353.426	2,77	863,27	866,04
<b>Total</b>		346'355.329	13,63	4.249,96	4.263,59

De los resultados obtenidos registrados en la tabla 3.12, los cuales se calcularon por medio de las ecuaciones 2.33, 2.34 y 2.35, se pudo determinar que los costos totales asociados a costos indirectos y a costos de operación y mantenimiento fueron de \$13,63/h y \$4.249,96/h respectivamente.

### 3.4.2 Balance exergético contable

Para realizar el balance exergético contable se partió de los costos de los recursos a partir de los que se inicia el proceso de producción de harina de vísceras, como lo son las vísceras, el aceite, el vapor de agua y la energía eléctrica, estos valores se convirtieron a las unidades del costo exergético unitario (\$/kJ).

Para iniciar se solicitó a la empresa el costo de la electricidad (\$/kWh), que para el presente estudio correspondería al costo del trabajo eléctrico suministrado a los equipos ( $c_w$ ) o también llamado costo fuel ( $c_F$ ). Otro dato necesario para el balance exergético contable fue el costo de las materias primas (vísceras y aceite), las cuales son las corrientes de entrada al primer equipo analizado en el sistema en estudio y hacen parte del costo fuel ( $c_F$ ), este valor también se llevó a las unidades del costo exergético unitario.

En la tabla 3.13 están listados los balances de costos exergéticos y ecuaciones auxiliares empleadas para cada operación en el proceso de estudio se plantearon por medio de las ecuaciones 2.42 y 2.43. Luego, se utilizaron las ecuaciones del balance exergético contable de la 2.37 hasta la ecuación 2.41.

**Tabla 3.13** Balances de costos exeréticos y ecuaciones auxiliares

<i>Proceso</i>	<i>Equipo</i>	<i>Ecuación de balance de costos exeréticos</i>	<i>Ecuación auxiliar</i>
Cocción	Digestor	$\dot{C}_4 + \dot{C}_5 + \dot{C}_6 = \dot{C}_w + \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_3 + \dot{Z}_{digestor}$	$c_4 = c_6$ $c_3 = c_5$
Prensado	Prensa	$\dot{C}_7 + \dot{C}_8 = \dot{C}_w + \dot{C}_6 + \dot{Z}_{prensa}$	$c_7 = c_8$
Molienda	Molienda	$\dot{C}_9 = \dot{C}_w + \dot{C}_8 + \dot{Z}_{molino}$	-----
Enfriado	Enfriadora	$\dot{C}_{11} + \dot{C}_{12} = \dot{C}_w + \dot{C}_9 + \dot{C}_{10} + \dot{Z}_{enfriadora}$	$c_{10} = c_{11}$

El balance exerético contable en una planta ayuda a entender el proceso de formación de costos, desde los recursos de entrada hasta los productos finales, como se puede observar en la tabla 3.14, donde se encuentran los resultados de los costos exeréticos unitarios y la exería total de cada corriente de proceso. Los resultados son una forma de aplicar costos a la exería consumida y la destrucción de exería y de esta manera obtener un costo por unidad de exería en cada uno de los flujos de la planta [75]. Descrito de otra forma los costos exeréticos permiten conocer la exería consumida para la obtención de una unidad de exería de cada corriente. Los resultados obtenidos son mayores que la unidad, y entre mayores son los costos exeréticos menor es la eficiencia termodinámica del proceso [76].

**Tabla 3.24.** Flujos de exería, costos totales y costos unitarios de exería asociados con cada flujo másico del proceso.

<i>Estado</i>	<i>Ex (kW)</i>	<i>Ċ (\$/h)</i>	<i>c (\$/kJ)</i>
1	0,165	2.240.000	3.777
2	0,006	100.000	4.613
3	6,549	28.292.718	12.000
4	3,525	21.388.626	16.587
5	0,423	18.277.651	12.000
6	0,970	58.871.769	16.587
7	0,455	22.881.081	13.978
8	0,233	11.750.039	13.978
9	0,373	16.220.556	12.084
10	0,006	0,000	0,000
11	0,051	0,000	0,000
12	0,005	5.037.010	278.399
$\dot{W}_{digestor}$	30,00	3,668	0,122
$\dot{W}_{prensa}$	45,00	5,502	0,122
$\dot{W}_{molino}$	350,00	42,792	0,122
$\dot{W}_{enfriador}$	4,00	0,489	0,122





Los resultados obtenidos para los costos unitarios reflejan lo mucho que vale el consumo de una unidad de exergía para la obtención de una unidad de exergía en el producto, se puede interpretar que el costo muy elevado está reflejando el poco aprovechamiento de la energía y la poca exergía disponible para la transformación de las sustancias debido a las irreversibilidades que causan destrucción de exergía.

El costo unitario más alto fue obtenido en la corriente del producto final harina de vísceras con \$278.399/kJ, podría considerarse que es por la eficiencia exergética tan baja que posee el enfriador y el costo temporal más alto fue \$58.871.769 /h correspondiente a las vísceras cocidas, que también podría pensarse afecta las irreversibilidades del proceso de cocción y del sistema de generación de vapor que alimenta al digestor.

Además, dentro de los resultados se calculó un costo promedio por unidad de exergía del fuel, costo promedio por unidad de exergía de producto y un costo por unidad de exergía destruida, este enfoque considera la importancia de la destrucción de exergía, tanto desde el punto de vista termodinámico como económico

En la tabla 3.15 se registran los resultados del flujo de exergía destruida, costos exergéticos unitarios, costo total de inversión y el factor exergoeconómico de cada componente analizado en el proceso seleccionado para estudio. Para estos cálculos se utilizaron las ecuaciones 2.44 hasta la 2.46.

**Tabla 3.215.** Flujo de exergía destruida, costos exergéticos unitarios asociados con cada componente del sistema, costo total de destrucción de exergía, costo total de inversión y factor exergoeconómico.

<i>Equipo</i>	$\dot{E}_{D,k}$ (kW)	$c_{F,k}$ (\$/kJ)	$c_{P,k}$ (\$/kJ)	$\dot{C}_{D,k}$ (\$/h)	$\dot{Z}$ (\$/h)	$f$ (%)
<b>Digestor</b>	31,80	11,999	16.587	381.620	1.598,69	0,42
<b>Prensa</b>	44,76	0,12	13.978	5,47	599,51	0,10
<b>Molino</b>	349,86	0,12	12.084	42,78	1.199,02	0,03
<b>Enfriador</b>	3,99	0,12	278.399	0,49	865,96	0,08

El factor exergoeconómico es un costo no exergético que está relacionado con el costo de inversión y su influencia en al aumento del costo total del sistema. Un valor alto de este factor indica que el valor del costo del componente debe reducirse incluso si la eficiencia



de la energía del componente disminuye. Un valor bajo del factor indica que un aumento del costo del componente sería aceptable si redujera la destrucción de exergía de éste.

En consecuencia con lo anterior, para todos los cuatro equipos, podría hacerse una mayor inversión en el mismo, con el objetivo de reducir la exergía destruida en el mismo.

El proceso con el costo exergético unitario fue promedio más alto fue en la cocción que es donde inicia el proceso, y a su vez posee el costo total de destrucción de exergía, pues a pesar que no es el equipo donde se da la mayor tasa de destrucción de exergía, las irreversibilidades que se generan por la cocción, la transferencia de calor y el sistema de generación repercuten sobre el mismo.

Se realizó por segunda vez el balance termoeconómico teniendo en cuenta la máxima eficiencia energética que se tomó como referencia para el análisis exergético avanzado, esto con el fin de observar el impacto en los costos exergéticos si se mejorara la eficiencia de los equipos presentes en el proceso. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.16.

**Tabla 3.16** Flujo de exergía destruida, costos exergéticos unitarios asociados con cada componente del sistema y costo total de destrucción de exergía con la máxima eficiencia

<i>Equipo</i>	$\dot{E}x_{D,k}$ (kW)	$c_{F,k}$ (\$/kJ)	$c_{P,k}$ (\$/kJ)	$\dot{C}_{D,k}$ (\$/h)
<b>Digestor</b>	21,90	120,12	17.580	2.631
<b>Prensa</b>	19,87	0,12	14.556	2,43
<b>Molino</b>	119,71	0,12	12.446	28,15
<b>Enfriador</b>	2,04	0,12	281.594	0,23

Si se comparan los resultados de la tabla 3.16 con los presentados en la tabla 3.15 se puede notar una reducción en los costos exergéticos asociados al producto. En los que más se puede notar la disminución es en los costos totales de destrucción de exergía.

La tabla 3.17 muestra los indicadores de mejora potencial calculados para cada componente en lo análisis exergéticos convencional ( $I_{m,p}$ ) y exergético avanzado ( $I_{m,p}^*$ ).

Los indicadores de mejora potencial obtenidos del análisis exergético convencional son más bajos que los obtenidos por el análisis exergético convencional, debido a que este no considera la exergía destruida evitable e inevitables, siendo estas consideradas en el

análisis exergético avanzado, con esta comparación se puede resaltar la utilidad e importancia de poder identificar la cantidad de exergía destruida que se puede reducir y aprovechar.

**Tabla 3.217** Comparación de los resultados para el índice de mejora potencial

Equipo	$I_{m,p}$ (kW)	$I_{m,p}^*$ (kW)
Digestor	28,00	21,45
Prensa	45,75	44,32
Molino	349,72	349,45
Enfriador	3,99	3,98

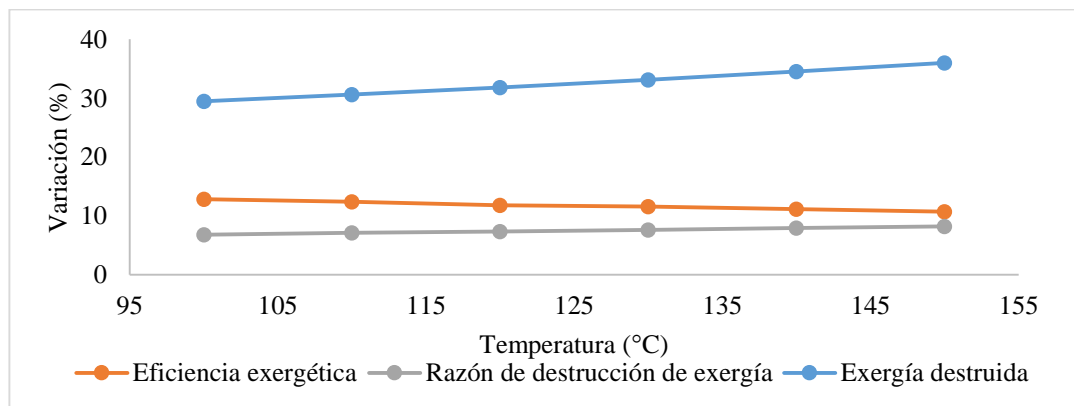
### 3.5 Análisis de oportunidades de mejora

#### 3.5.1 Efecto de la temperatura en los equipos de proceso

##### 3.5.1.1 Variación de la temperatura de entrada del vapor al digestor

Se analizó la variación de la temperatura del vapor a la entrada del digestor, en relación con las variables: eficiencia energética, mejora potencial, destrucción de exergía, razón de destrucción de exergía y eficiencia exergética.

La figura 3.5 muestra los resultados de la variación de la temperatura con respecto a destrucción de exergía, razón de destrucción de exergía y eficiencia exergética.



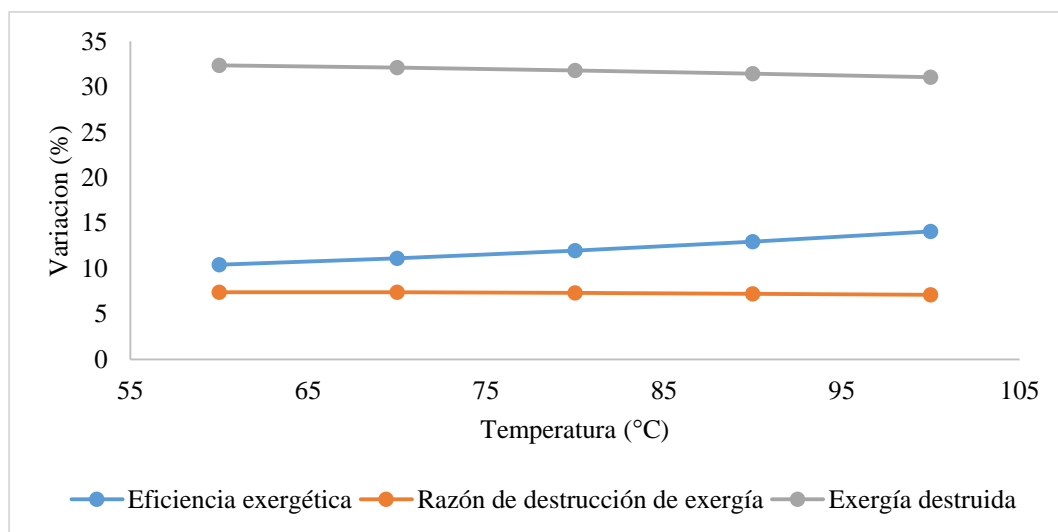
**Figura 3.5** Variación porcentual de la eficiencia exergética, razón de destrucción de exergía y exergía destruida con respecto a la temperatura del vapor a la entrada del digestor.

Se observa que a medida que aumenta la temperatura de entrada del vapor al digestor aumenta la destrucción de exergía y la razón de destrucción de exergía, y disminuye la eficiencia exergética. Esto puede ser explicado debido a que la temperatura de salida de las vísceras se mantuvo constante, lo cual aumenta la cantidad de calor residual.

### 3.5.1.2 Variación de la temperatura de las vísceras a la salida del digestor

Se analizó la variación de la temperatura de las vísceras a la salida del digestor, en relación con las variables: eficiencia energética, mejora potencial, destrucción de exergía, razón de destrucción de exergía y eficiencia exergética.

La figura 3.6 muestra los resultados de la variación de la temperatura con respecto a destrucción de exergía, razón de destrucción de exergía y eficiencia exergética.



**Figura 3.6** Variación porcentual de la eficiencia exergética, razón de destrucción de exergía y exergía destruida con respecto a la temperatura de las vísceras a la salida del digestor.

### 3.5.2 Tecnología de molienda húmeda

Los procesos rendering tienen muchos retos, entre ellos la disminución de costos de producción, dado que el proceso de molienda es el que mayor consumo energético tiene, se ha venido estudiando la tecnología de molienda en húmedo porque el coste es más bajo, brinda calidad al producto y se considera que tiene buenos resultados en el procesamiento de pollo y pescado [81].



## CAPÍTULO 4.

### 4. CONCLUSIONES

Los resultados revelaron que el principal consumo energético ocurre en el proceso de molienda, es en el molino donde se lleva a cabo la trituración de la torta de vísceras cocidas, y este equipo consume el 67,21% de la energía total que entra al proceso.

El indicador de consumo energético obtenido de 9,4 MJ/ kg de harina de vísceras producido no dista mucho del valor referenciado en el estado del arte con respecto al procesamiento de pollos, el cual fue de 9,2 MJ/ kg de pollo procesado.

Los resultados del análisis exergético convencional mostraron que la molienda es el proceso donde se presenta la mayor tasa de destrucción de exergía, con un 80,40% de destrucción con respecto a la exergía fuel que entra al proceso, y un 81,30% con respecto a la exergía destruida total, lo cual se debe a las irreversibilidades asociadas del proceso.

El análisis exergético avanzado permitió identificar que el sistema si posee oportunidades de mejora dado que los resultados obtenidos para la parte de exergía destruida evitable, fueron mayores en todos los procesos con respecto a los resultados de la parte de exergía destruida inevitable en los mismos.

El análisis exergético avanzado permitió identificar que el sistema si posee oportunidades de mejora dado que los resultados obtenidos para la parte de exergía destruida evitable, fueron mayores en todos los procesos con respecto a los resultados de la parte de exergía destruida inevitable en los mismos. No obstante, el proceso de con el valor más alto de índice de mejora fue la molienda con un 349,45 kW, seguida del prensado con 44,32 kW y la cocción con 21,45 kW.

El valor obtenido del factor exergoeconómico para todos los cuatro equipos fue bajo, no superó el 1,0%, luego estos resultados indican que un aumento en inversión sería aceptable con el objetivo de reducir la exergía destruida en ellos.

Los resultados del análisis termoeconómico fueron congruentes con los resultados del análisis exergético, los costos exergéticos unitarios dieron valores elevados, lo cual demuestra que los costos de las corrientes másicas con respecto a la unidad de exergía aumentan en las diferentes etapas del proceso a causa de las ineficiencias del mismo.

Los resultados de evaluar la variación de la temperatura de entrada del vapor y la temperatura de salida de las vísceras cocidas, fueron positivos con respecto a la influencia en los valores de las variables eficiencia exergética, razón de destrucción de exergía y exergía destruida, no obstante, se sugiere hacer un análisis con mayor detalle en lo que refiere a control y variación de los demás parámetros involucrados en el proceso.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda la realización de un muestreo de datos en los procesos en estudio, con el fin de ampliar la información recolectada, tener rangos de variación y más precisión a la hora de los cálculos y resultados.
- Caracterizar fisicoquímicamente muestras de vísceras, harinas y aceites en estudio con el fin de validar los datos obtenidos.
- Realizar un análisis energético, exergético en el sistema de generación de vapor de la empresa.
- Aplicar junto con el análisis exergético un análisis de ciclo de vida con el propósito de evaluar los posibles impactos ambientales que generen las diferentes etapas del proceso.
- Consultar costos de equipos modernos de alta eficiencia, relacionados con el estudio, para hacer una evaluación económica de posible inversión como una oportunidad de mejora.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Jiménez y C. Paredes, «Factores que intervienen en el nivel de productividad de la empresa Dypers,» 10 Diciembre 2010. [En línea]. Available: [http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/5365/1/factores\\_intervienen\\_productividad.pdf](http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/5365/1/factores_intervienen_productividad.pdf). [Último acceso: 25 Noviembre 2015].
- [2] E. y. Negocios, «Productividad de las empresas, afectada por la ineficiencia,» *El Tiempo*, 03 Julio 2018.
- [3] J. Giacomozzi, «2014: Año positivo para la industria avícola mundial,» El Sitio Avícola, 28 Abril 2015. [En línea]. Available: <http://www.elsitioavicola.com/articulos/2705/2014-ao-positivo-para-la-industria-avicola-mundial/>. [Último acceso: 17 Mayo 2017].
- [4] B. Ruiz, «Nutrido crecimiento avícola en Latinoamérica en 2017,» Industria Avícola, 02 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.industriaavicola.net/procesamiento-y-sacrificio/nutrido-crecimiento-avicola-en-latinoamerica-en-2017/>. [Último acceso: 01 Septiembre 2018].
- [5] A. Valencia, «Consumo Histórico de Huevo y Pollo,» Federación Nacional de Avicultores de Colombia FENAVI, 06 Junio 2018. [En línea]. Available: <http://fenavi.org/comunicados-de-prensa/el-sector-avicola-logro-crecimiento-del-64-en-el-2017/>. [Último acceso: 14 Septiembre 2018].
- [6] Portafolio, «Este año aumentará producción de pollo y huevos,» 6 Marzo 2017. [En línea]. Available: <http://www.portafolio.co/economia/el-sector-avicola-crecera-503863>. [Último acceso: 24 Mayo 2017].
- [7] J. Domínguez, «Los Colombianos se comieron 438 huevos por segundo en el 2017,» *El Tiempo*, p. 4, 04 Enero 2018.
- [8] J. Rojas, «Sector Avícola tendrá año récord en 2017: Fenavi,» *El Colombiano*, p. 5, 12 Enero 2017.
- [9] B. Ruiz, «Los 5 temas de la avicultura colombiana en 2016,» Wattagnet.com, 14 Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://www.wattagnet.com/articulos/26252-los-5-temas-de-la-avicultura-colombiana-en-2016>. [Último acceso: 15 Mayo 2017].
- [10] C. y. C. L. GPG & Asociados, «El mercado de la carne de pollo en el Huila,» Gobernación del Huila, 9 Abril 2010. [En línea]. Available:



- [http://www.huila.gov.co/documentos/E/estudio\\_mercado\\_pollo.pdf](http://www.huila.gov.co/documentos/E/estudio_mercado_pollo.pdf). [Último acceso: 11 Mayo 2017].
- [11] E. País, «La producción avícola creció 6% en el primer semestre,» 17 Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://www.elpais.com.co/economia/la-produccion-avicola-crecio-6-en-el-primer-semester.html>. [Último acceso: 15 Mayo 2017].
- [12] CESLA, «Federación Nacional de Avicultores (Fenavi): "El sector avícola tendrá año récord en el 2017",» Centro de Estudios Latinoamericanos, 12 Enero 2017. [En línea]. Available: <http://www.cesla.com/detalle-noticias-de-colombia.php?Id=27416>. [Último acceso: 21 Mayo 2017].
- [13] V. Bohórquez, «Perspectiva de la producción avícola en Colombia,» Universidad Militar Nueva Granada, 1 Abril 2014. [En línea]. Available: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12149/1/AVICULTURA.pdf>. [Último acceso: 1 Mayo 2017].
- [14] G. Alcedo, «Los retos y oportunidades de la industria avícola en América Latina,» Alltech, 10 Enero 2015. [En línea]. Available: <http://es.alltech.com/blog/posts/los-retos-y-oportunidades-de-la-industria-avicola-en-america-latina>. [Último acceso: 11 Mayo 2017].
- [15] A. Celis, «Subproductos de origen animal y su uso en la nutrición avícola,» Engormix, 29 Septiembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.engormix.com/avicultura/articulos/subproductos-origen-animal-uso-t31451.htm>. [Último acceso: 26 Mayo 2017].
- [16] Avicultura, «Subproductos de la actividad avícola,» Revista Avícola, 14 Febrero 2012. [En línea]. Available: [http://www.agrobit.com.ar/Info\\_tecnica/alternativos/avicultura/AL\\_000007av.htm](http://www.agrobit.com.ar/Info_tecnica/alternativos/avicultura/AL_000007av.htm). [Último acceso: 27 Mayo 2017].
- [17] O. d. l. N. U. p. l. A. y. l. A. FAO, «Tratamiento y utilización de residuos de origen animal, pesquero y alimenticio en la alimentación animal,» 8 Septiembre 1994. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/docrep/018/w4132s/w4132s.pdf>. [Último acceso: 17 Mayo 2017].
- [18] Unimedios, «En Colombia la industria alimenticia para animales esta bien desarrollada,» Universidad Nacional de Colombia, 10 Julio 2015. [En línea]. Available: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/en-colombia-la-industria-alimenticia-para-animales-esta-bien-desarrollada.html>. [Último acceso: 10 Mayo 2017].

- [19] Y. Casas y M. Morales, «Análisis Termodinámico y Exergético del proceso de producción de hidrógeno mediante la reformación con vapor de etanol subproducto de la caña de azúcar,» *Centro Azúcar*, n° 1, pp. 16-23, 2009.
- [20] A. Gungor, Z. Erbay y A. Hepbasli, «Exergoeconomic analyses of a gas engine driven heat pump drier and food drying process,» *Applied Energy*, n° 88, pp. 2677-2684, 2011.
- [21] A. Hepbasli, N. Colak, E. Hancioglu, F. Icier y Z. Erbay, «Exergoeconomic Analysis of Plum Drying in a Heat Pump Conveyor Dryer,» *Drying Technology*, n° 28, pp. 1385-1395, 2010.
- [22] G. Casseti y E. Colombo, «Minimization of local impact of energy systems through exergy analysis,» *Elsevier: Energy Conversion and Management*, n° 76, pp. 874-882, 2013.
- [23] C. Henao, «Análisis energético, exergético y ambiental del uso de aceite crudo de *Jatropha Curcas* en motores diésel,» Universidad Nacional de Colombia, 2013. [En línea]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/10489/1/1053768764.2013.pdf><http://www.bdigital.unal.edu.co/10489/1/1053768764.2013.pdf>. [Último acceso: 12 Diciembre 2016].
- [24] E. Abdelaziz, R. Saidur y S. Mekhilef, «A review on energy saving strategies in industrial sector,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 15, pp. 150-168, 2011.
- [25] G. BoroumandJazi, B. Rismanchi y R. Saidur, «A review on exergy analysis of industrial sector,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 27, pp. 198-203, 2013.
- [26] E. Cortés y W. Rivera, «Exergetic and exergoeconomic optimization of a cogeneration pulp and paper mill plant including the use of a heat transformer,» *Energy*, n° 35, pp. 1289-1299, 2010.
- [27] O. Jorquera, R. Kalid, A. Kiperstok, E. Braga y E. Sales, «Effluent stream treatment in a nitrogenous fertilizer factory: An exergy analysis for process integration,» *Process Safety and Environmental Protection*, 2013.
- [28] A. Atmaca y R. Yumrutas, «Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a cement plant: Part I - Methodology,» *Energy Conversion and Management*, 2013.
- [29] A. Atmaca y R. Yumrutas, «Thermodynamic and exergoeconomic analysis of a cement plant: Part II - Application,» *Energy Conversion and Management*, n° 79, pp. 799-808, 2014.

- [30] M. Hader, T. Darabseh y H. Alothman, «Exergy Analysis of Ceramic Production in Jordan,» *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* , vol. 5, n° 6, pp. 483-488, 2011.
- [31] G. Vuckovic, M. Stojiljkovic, M. Vukic, G. Stefanovic y E. Dedeic, «Advanced exergy analysis and exergoeconomic performance evaluation of thermal processes in an existing industrial plant,» *Energy Conversion and Management* , 2014.
- [32] S. Sert y F. Balkan, «Determination of avoidable & unavoidable exergy destructions of furnace-air preheater coupled system in a petrochemical plant,» *Journal of Thermal Engineering*, vol. II, n° 2, pp. 794-800, 2016.
- [33] S. Gong y K. Boulama, «Parametric study of an absorption refrigeration machine using advanced exergy analysis,» *Energy*, pp. 1-15, 2014.
- [34] F. Petrakopoulou, G. Tsatsaronis y T. Morosuk, «Advanced exergoeconomic analysis of a power plant with CO<sub>2</sub> capture,» *Energy Procedia*, n° 75, pp. 2253-2260, 2015.
- [35] J. Chen, H. Havtun y B. Palm, «Conventional and advanced exergy analysis of an ejector refrigeration system,» *Applied Energy*, vol. 144, pp. 139-151, 2015.
- [36] G. Vuckovic, M. Stojiljkovic y M. Vukic, «First and second level of exergy destruction splitting in advanced exergy analysis for an existing boiler,» *Energy Conversion and Management* , 2015.
- [37] P. Roy, D. Nei, T. Orikasa, Q. Xu, H. Okadome, N. Nakamura y T. Shiina, «A review of life cycle assessment (LCA) on some food products,» *Journal of Food Engineering*, n° 90, pp. 1-10, 2009.
- [38] D. Ghewade y S. Sapali, «Exergy Flow Analysis in Semielliptical Rectangular Bulk Milk Cooler,» *International Review of Mechanical Engineering* , vol. 6, n° 7, pp. 1688-1694, 2012.
- [39] M. Soufiyan, M. Aghbashlo y H. Mobli, «Exergetic performance assessment of a long - life milk processing plant : a comprehensive survey,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-18, 2016.
- [40] M. Jokandan, M. Aghbashlo y S. Mohtasebi, «Comprehensive exergy analysis of an industrial -scale yogurt production plant,» *Energy*, pp. 1832-1851, 2015.
- [41] D. Fadare, D. Nkpubre, A. Oni, A. Falana, M. Waheed y O. Bamir, «Energy and exergy analyses of malt drink production in Nigeria,» *Energy* , pp. 5336-5346, 2010.

- [42] W. Adedeji y I. Badmus, «Energy, Exergy and Economic Analyses of Energy Sourcing Pattern in a Nigerian Brewery,» *Energy and Power Engineering* , pp. 404-414, 2012.
- [43] S. Rocha y J. Vesga, «Evaluación Exergética del Proceso de Extracción de Aceite de Palma Africana,» Universidad Industrial de Santander , 2 Mayo 2011. [En línea]. Available: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6735/2/139076.pdf>. [Último acceso: 23 Septiembre 2015].
- [44] Z. Sogut, N. Ilten y Z. Oktay, «Energetic and exergetic performance evaluation of the quadruple-effect evaporator unit in tomato paste production,» *Energy*, pp. 3821-3826, 2010.
- [45] M. Soufiyan, A. Dadak, S. Hosseini, F. Nasiri, M. Dowlati, M. Tahmasebi y M. Aghbashlo, «Comprehensive exergy analysis of a commercial tomato paste plant with a double-effect evaporator,» *Energy* , pp. 910-922, 2016.
- [46] B. Degerli, S. Nazir, E. Sorguven, B. Hitzmann y M. Ozilgen, «Assessment of the energy and exergy efficiencies of farm to fork grain cultivation and bread making processes in Turkey and Germany,» *Energy* , pp. 421-434, 2015.
- [47] F. Zisopoulos, S. Moejes, F. Rossier-Miranda, A. Van der Goot y R. Boom, «Exergetic comparison of food waste valorization in industrial bread production,» *Energy*, pp. 1-10, 2015.
- [48] D. Flórez y H. Cifuentes, «An Exergetic Cold Chain Methodological Analysis On Horticultural Productive Chains to Evaluate Productivity and Competitiveness: Study Case Andean Blackberry,» *International Journal of Agriculture and Forestry* , pp. 16-28, 2013.
- [49] L. Pellegrini y S. Junior, «Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermoeconomic and environmental analysis and optimization,» *Energy*, n° 36, pp. 3704- 3715, 2011.
- [50] Z. Erbay y A. Hepbasli, «Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying,» *Energy Conversion and Management*, n° 78, pp. 499-507, 2014.
- [51] L. Llaque, «Innovación en la industria avícola peruana de broilers para mejorar los niveles de competitividad 1986-2006,» 2009. [En línea]. Available: [http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/3339/1/Llaque\\_rl.pdf](http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/3339/1/Llaque_rl.pdf). [Último acceso: 15 Octubre 2017].

- [52] N. Martínez, R. Chacón, A. Muñoz, J. Pérez y J. Galvis, «Estudio de viabilidad de la creación de una granja de producción de pollo de engorde en pie en Suarez Tolima,» Corporación Universitaria Minuto de Dios, 2016. [En línea]. Available: <http://repository.uniminuto.edu:8080/xmlui/handle/10656/4684>. [Último acceso: 01 Noviembre 2017].
- [53] X. Mora, «Evaluación financiera de la empresa avícola Bacatá & Cía. S.A.,» 26 Marzo 2008. [En línea]. Available: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/4608/T17.08%20M79e.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 30 Octubre 2017].
- [54] D. Camacho y H. Hernández, «Estudio de casos sobre prácticas de gestión que han contribuido al éxito en empresas de familia del sector avícola colombiano,» 2009. [En línea]. Available: <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj2wfLejqnYAhWMQyYKHciaADMQFggnMAA&url=http%3A%2F%2Frepository.lasalle.edu.co%2Fbitstream%2F10185%2F4327%2F1%2FT11.09%2520C14e.pdf&usg=AOvVaw18YqAxac0mbUsWEu3QGpmq>. [Último acceso: 01 Octubre 2017].
- [55] H. Rivera, J. Malaver, K. Peña y M. Malaver, «Perdurabilidad empresarial: el caso del sector avícola en Colombia,» 2011. [En línea]. Available: [http://www.urosario.edu.co/Escuela-administracion/Documentos/investigacion/publicaciones/DI119\\_Admon\\_finalb.pdf](http://www.urosario.edu.co/Escuela-administracion/Documentos/investigacion/publicaciones/DI119_Admon_finalb.pdf). [Último acceso: 13 Septiembre 2017].
- [56] V. Bohórquez, «Perspectiva de la producción avícola en Colombia,» Abril 2014. [En línea]. Available: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/12149/1/AVICULTURA.pdf>. [Último acceso: 14 Mayo 2017].
- [57] J. García, «Análisis de factibilidad de una planta de balanceados para la prestación del servicio de maquila en el municipio de Funza,» 2008. [En línea]. Available: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/1182/T87.08%20G165a.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 14 Julio 2017].
- [58] S. d. I. d. P. y. A. d. S. A. (SIPSA), «Alimentos completos balanceados en la nutrición de las aves de corral,» Boletín mensual Insumos y Factores asociados a la Producción agropecuaria, Enero 2013. [En línea]. Available: [http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4666/1/insumos\\_factores\\_de\\_prduccion\\_enero\\_2013.pdf](http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4666/1/insumos_factores_de_prduccion_enero_2013.pdf). [Último acceso: 14 Octubre 2017].

- [59] E. Delgado, Y. Orozco y P. Uribe, «Comportamiento productivo de pollos alimentados a base de harina de plátano considerando la relación beneficio costo,» *Zootecnia Tropical*, vol. 31, n° 4, pp. 279-290, 2013.
- [60] I. N. d. T. Industrial, «El valor de los residuos Distintos modos de Reducir, Reutilizar, Reciclar y Revalorizar residuos industriales,» 2016. [En línea]. Available: [https://www.inti.gob.ar/ambientesg/pdf/El\\_valor\\_de\\_los\\_residuos.pdf](https://www.inti.gob.ar/ambientesg/pdf/El_valor_de_los_residuos.pdf). [Último acceso: 02 Junio 2017].
- [61] C. Duque, «Industria Avícola: Impacto ambiental y aprovechamiento de los residuos,» 9 Noviembre 1999. [En línea]. Available: <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lang=p&nextAction=lnk&exprSearch=90381&indexSearch=ID>. [Último acceso: 10 Julio 2017].
- [62] R. Quemba, L. Moreno, D. Puentes, F. Avella y W. Alza, «Elaboración de un concentrado de uso avícola a partir de residuos revalorizados de la industria alimentaria,» *Revista Luna Azul*, n° 28, pp. 40-45, 2009.
- [63] W. Burbano y E. Mora, «Plan de negocios para la producción y comercialización de harina de subproducto para alimentos balanceados en animales en la ciudad de San Juan de Pasto,» 2015. [En línea]. Available: <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblioteca/90739.pdf>. [Último acceso: 14 Marzo 2017].
- [64] V. Avalos, «Obtencion de aceite y harina proteica de alta calidad a partir de pollos de dscarte y visceras,» 30 Diciembre 2012. [En línea]. Available: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/1411/1/PROCEDIMIENTOS%2520PARA%2520EL%2520MANEJO%2520ODE%2520RESIDUOS%255B1%255D.pdf>. [Último acceso: 17 Octubre 2017].
- [65] M. Yauri, «Evaluacion de tres niveles de harina de visceras de ave como fuente de proteina en la alimentación de pollos parrilleros,» 2013. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5104/1/UPS-CT002698.pdf>. [Último acceso: 10 Noviembre 2017].
- [66] A. Piñeros, M. Gutiérrez y S. Castro, «Sustitución total de la harina de pescado por subproductos avícolas suplementados con aminoácidos en dietas para juveniles de *Piaractus brachypomus*, Cuvier 1818,» 13 Agosto 2014. [En línea]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0121-37092014000200002&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0121-37092014000200002&lng=es&nrm=iso). [Último acceso: 10 Julio 2017].

- [67] D. Bernal, «Utilización de la viscera de pollo como suplemento alimenticio en ganado de ceba comercial,» 2010. [En línea]. Available: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/6780/T13.09%20B456u.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 13 Septiembre 2017].
- [68] C. Rodríguez, B. Rojas y S. Santafe, «Estudio de factibilidad para el montaje de una empresa procesadora de subproductos para la industria de alimentos concentrados para animales,» 2004. [En línea]. Available: <http://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/9458/100066334.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. [Último acceso: 15 Agosto 2017].
- [69] R. Toledo, «Energy Balances,» de *Fundamentals of Food Process Engineering*, Athens, Georgia, Board, 1991, p. 145.
- [70] Y. Cengel y M. Boles, «Appendix 1,» de *Thermodynamics An Engineering Approach*, New York, Mc Graw Hill, 2015, p. 901.
- [71] C. Míguez, «La Eficiencia Energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: Optimización Energética y Exergética,» 18 Enero 2013. [En línea]. Available: <http://eprints.ucm.es/17794/>. [Último acceso: 18 Septiembre 2017].
- [72] O. Noah, A. Obonor y M. Audu, «Energy Audit of a Brewery - A case study of Vitamalt Nig. Plc, Agbara,» *Energy and Power Engineering*, n° 4, pp. 137-143, 2012.
- [73] B. Ramírez, «Uso Eficiente de Energía, Desarrollo Sustentable y Conservación de Recursos Naturales no Renovables. El Caso de las Bolsas de Polietileno versus la utilización de otros materiales,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.puma.unam.mx/pdf/tesis/maestria2011.pdf>. [Último acceso: 13 Enero 2018].
- [74] G. Tsatsaronis y F. Czesla, «Exergy and Thermodynamic Analysis,» ResearchGate, 16 Noviembre 2014. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/267966983\\_EXERGY\\_AND\\_THERMODYNAMIC\\_ANALYSIS](https://www.researchgate.net/publication/267966983_EXERGY_AND_THERMODYNAMIC_ANALYSIS). [Último acceso: 18 Enero 2018].
- [75] I. Gordillo, «Análisis de Exergía en Dos Puntos Críticos en una Industria Productora de Harina de Pescado,» 2005. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/283440335/rojasgordillo-pdf>.
- [76] A. Bejan, G. Tsatsaronis y M. Moran, *Thermal Design and Optimization*, New York : John Wiley & Sons , 1996.

- [77] C. Frangopoulos, *Exergy, Energy System Analysis and Optimization*, Grecia: EOLSS Publications, 2009.
- [78] B. Ramírez, «Uso Eficiente de Energía, desarrollo sustentable y conservación de recursos naturales no renovables. El caso de las bolsas de polietileno versus la utilización de otros materiales.» Universidad Nacional Autónoma de México, 13 Septiembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.puma.unam.mx/pdf/tesis/maestria2011.pdf>. [Último acceso: 16 Enero 2017].
- [79] M. Rosen, I. Dincer y M. Kanoglu, «Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact,» *Energy Policy*, n° 36, pp. 128-137, 2008.
- [80] M. Kanoglu, I. Dincer y Y. Cengel, «Exergy for better environment and sustainability,» *Environmental Development Sustainable*, n° 11, pp. 971-988, 2009.
- [81] X. Feng y X. Zhu, «Combining Pinch and Exergy Analysis for Process Modifications,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 17, n° 3, pp. 249-261, 1997.
- [82] F. Czesla, G. Tsatsaronis y Z. Gao, «Avoidable Thermodynamic Inefficiencies and Costs in an Externally Fired Combined Cycle Power Plant,» *Energy*, n° 31, pp. 1472-1489, 2006.
- [83] F. Petrakopoulou, G. Tsatsaronis, T. Morosuk y A. Carassai, «Conventional and Advanced Exergetic Analyses Applied to a Combined Cycle,» *Energy*, n° 41, pp. 146-152, 2012.
- [84] G. Vuckovic, M. Vukic, M. Stojiljkovic y D. Vuckovic, «Avoidable and unavoidable exergy destruction and exergoeconomic evaluation of thermal processes in a real industrial plant,» *Thermal Science*, vol. 16, pp. S433-S446, 2012.
- [85] A. Abusoglu y M. Kanoglu, «Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 2 - Application,» *Applied Thermal Engineering*, n° 29, pp. 242-249, 2009.
- [86] A. Abusoglu y M. Kanoglu, «Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 1 – Formulations,» *Applied Thermal Engineering*, n° 29, p. 234–241, 2009.
- [87] A. -. A. N. d. E. d. Colombia, «ANDI - Asociación Nacional de Empresarios de Colombia,» 26 Julio 2015. [En línea]. Available:





- <http://www.andi.com.co/cfed/Paginas/default.aspx>. [Último acceso: 27 Noviembre 2015].
- [88] X. S. E.S.P, «XM Filial de ISA,» Microsoft Silverlight, 27 Enero 2015. [En línea]. Available: <http://www.xm.com.co/Pages/DemandaEnergia-2014.aspx>. [Último acceso: 26 Noviembre 2015 ].
- [89] P. Ngamnikom y S. Songsermpong, «The effects of freeze, dry, and wet grinding processes on rice flour properties and their energy consumption,» *Journal of Food Engineering*, n° 104, pp. 632-638, 2011.
- [90] J. Portha, S. Louret, M. Pons y J. Jaubert, «Estimation of the environmental impact of a petrochemical process using coupled LCA and exergy analysis,» *Resources, Conservation and Recycling* , n° 54, pp. 291-298, 2010.
- [91] G. Vuckovic, M. Vukic, M. Stojiljkovic y M. Simonovic, «Splitting the total exergy destruction into endogenous and exogenous parts of the thermal processes in a real industrial plant,» *Mechanical Engineering* , vol. 14, n° 2, pp. 199-208, 2016.
- [92] T. Morosuk y G. Tsatsaronis, «Comparative evaluation of LNG - based cogeneration systems using advanced exergetic analysis,» *Energy*, n° 36, pp. 3771-3778, 2011.
- [93] I. Esfahani, S. Lee y C. Yoo, «Evaluation and optimization of a multi-effect evaporation-absorption heat pump desalination based conventional and advanced exergy and exergoeconomic analyses,» *Desalination* , n° 359, pp. 92-107, 2015.
- [94] F. Boyaghchi y H. Molaie, «Advanced exergy and environmental analyses and multi objective optimization of a real combined cycle power plant with supplementary firing using evolutionary algorithm,» *Energy* , n° 93, pp. 2267-2279, 2015.
- [95] R. Apaiah, A. Linnemann y H. Van der Kooi, «Exergy analysis: A tool to study the sustainability of food supply chains,» *Food Research International* , n° 39, pp. 1-11, 2006.
- [96] Y. Guerra y B. Ramos, «Análisis energético y exergético de una planta de leche,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos56/planta-de-leche/planta-de-leche.shtml>. [Último acceso: 15 Enero 2015].
- [97] M. Waheed, S. Jekayinfa, J. Ojedirán y O. Imeokparia, «Energetic Analysis of fruit juice processing operations in Nigeria,» *Energy*, pp. 35-45, 2008.
- [98] H. Velasquez, F. Janna y A. Agudelo, «Diagnóstico Exergético de los procesos productivos de la panela en Colombia,» *Revista Energética*, pp. 15-22, 2006.

- [99] J. Ivanovic, I. Zizovic, S. Petrovic y D. Skala, «The Analysis of Different Processes of extraction: Yield of extracts obtained from Aloe Vera (*Aloe barbadensis* Miller) and sweet bay (*Laurus nobilis* L.) and the Exergy Analysis of applied processes,» *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*, vol. 15, n° 4, pp. 271-278, 2009.
- [100] A. Midilli y H. Kucuk, «Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio,» *Energy*, pp. 539-556, 2003.
- [101] E. Akpinar, E. Midilli, A. y Y. Bicer, «Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer,» *Energy Conversion and Management*, pp. 2530-2552, 2005.
- [102] L. Ozgener y O. Ozgener, «Exergy Analysis of Industrial Pasta Drying Process,» *International Journal of Energy Research*, pp. 1323-1335, 2006.
- [103] A. Akbulut y A. Durmus, «Energy and exergy analyses of thin layer drying of mulberry in a forced solar dryer,» *Energy*, pp. 1754-1763, 2010.
- [104] P. Therkelsen, E. Masanet y E. Worrell, «Energy efficiency opportunities in the U.S. commercial baking industry,» *Journal of Food Engineering*, pp. 14-22, 2014.
- [105] T. Tribess, J. Hernandez, M. Mendez, E. Meneses, L. Bello y C. Tadini, «Thermal properties and resistant starch content of green banana flour (*Musa Cavendishii*) produced at different drying conditions,» *LWT- Food Science and Technology*, pp. 1022-1025, 2009.
- [106] J. Xue y M. Ngadi, «Thermal properties of batter systems formulated by combinations of different flours,» *LWT- Food Science and Technology*, pp. 1459-1465, 2007.
- [107] M. Ahmad, M. Nache, S. Waffenschmidt y B. Hitzmann, «A fluorescence spectroscopic approach to predict analytical, rheological and baking parameters of wheat flours using chemometrics,» *Journal of Food Engineering*, pp. 65-71, 2016.
- [108] A. Doblado, «New Technologies for whole wheat processing: Adressing milling and storage issues,» University of Nebraska, 29 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1031&context=foodscidiss>. [Último acceso: 2 Noviembre 2015].
- [109] S. Protonotariou, C. Batzaki, S. Yanniotis y I. Mandala, «Effect of jet milled whole wheat flour in biscuits properties,» *LWT - Food Science and Technology*, pp. 106-113, 2016.

- [110] E. El-Porai, A. Salama, A. Sharaf, A. Hegazy y M. Gadallah, «Effect of different milling processes on Egyptian wheat flour properties and pan bread quality,» *Annals of Agricultural Science*, vol. 58, n° 1, pp. 51-59, 2013.
- [111] S. Hemdane, S. Leys, P. Jacobs, E. Domez, J. Delcour y C. Courtin, «Wheat milling by-products and their impact on bread making,» *Food Chemistry*, n° 187, pp. 280-289, 2015.
- [112] J. Ahamed, R. Saidur, H. Masjuki, S. Mekhilef, M. Ali y M. Furqon, «An Application of Energy and Exergy Analysis in Agricultural Sector of Malaysia,» *Energy Policy*, pp. 7922-7929, 2011.
- [113] I. Dincer, M. Hussain y I. Al-zaharnah, «Energy and exergy utilization in agricultural sector of Saudi Arabia,» *Energy Policy*, pp. 1461-1467, 2005.
- [114] Z. Utlu y A. Hepbasli, «Assessment of the energy and exergy utilization efficiencies in the Turkish agricultural sector,» *International Journal of Energy Research*, pp. 659-670, 2006.
- [115] A. Valencia, «El Sector Avícola en cifras,» Federación Nacional de Avicultura (Fenavi) de Colombia, 26 Septiembre 2016. [En línea]. Available: [http://www.fenavi.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3436:colombianos-consumen-en-promedio-252-huevos-y-30-kg-de-pollo-al-ano&catid=293:centro-de-noticias&Itemid=1363](http://www.fenavi.org/index.php?option=com_content&view=article&id=3436:colombianos-consumen-en-promedio-252-huevos-y-30-kg-de-pollo-al-ano&catid=293:centro-de-noticias&Itemid=1363). [Último acceso: 20 Mayo 2017].
- [116] I. Niembro y M. Benitez, «Energía y Exergía: Enfoques hacia la Sostenibilidad mediante el Análisis de Ciclo de Vida,» Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2 Septiembre 2009. [En línea]. Available: <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/7695>. [Último acceso: 2 Diciembre 2016].
- [117] T. Jiménez, «Evaluación ambiental de alternativas tecnológicas de aprovechamiento energético de residuos forestales mediante análisis de ciclo de vida,» Repositorio académico de la Universidad de Chile, 12 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139908>. [Último acceso: 25 Enero 2017].
- [118] A. Ozbilen, I. Dincer y M. Rosen, «Exergetic life cycle assessment of a hydrogen production process,» *International Journal of Hydrogen Energy*, n° 37, pp. 5665-5675, 2012.
- [119] L. Talens, L. Lombardi, G. Villalba y X. Gabarrell, «Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of the production of biodiesel from used cooking oil (UCO),» *Energy*, n° 35, pp. 889-893, 2010.



- [120] M. Beccali, M. Cellura, M. Iudicello y M. Mistretta, «Life cycle assessment of Italian citrus-based products. Sensitivity analysis and improvement scenarios,» *Journal of Environmental Management*, n° 91, pp. 1415-1428, 2010.
- [121] M. Yan, J. Humphreys y N. Holden, «An evaluation of life cycle assessment of European milk production,» *Journal of Environmental Management*, n° 92, pp. 372-379, 2011.
- [122] M. Kumar, V. Sachin y S. Suneel, «Life cycle assessment of sugar industry: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 15, pp. 3445-3453, 2011 .
- [123] M. Pérez, A. Contreras y E. Domínguez, «Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry,» *Journal of Cleaner Production*, n° 41, pp. 222-231, 2013.
- [124] I. De Marco, S. Riemma y R. Iannone, «Environmental Analysis of a Mashed Tomato Production: an Italian Case Study,» *Chemical Engineering Transactions*, vol. 57, 2017.
- [125] Y. Meneses, E. Dominguez y B. Guerra, «Análisis de Ciclo de Vida y análisis de peligros y puntos de control críticos al producto pastas alimenticias,» *Revista Centro Azúcar*, vol. 43, pp. 16-26, 2016.
- [126] C. Bojacá, K. Wyckhuys y E. Schrevens, «Life cycle assessment of Colombian greenhouse tomato production based on farmer-level survey data,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 69, pp. 26-33, 2014.
- [127] X. Sui, Y. Zhang, S. Shao y S. Zhang, «Exergetic life cycle assessment of cement production process with waste heat power generation,» *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 684-692, 2014.
- [128] A. Ozbilen, I. Dincer y M. Rosen, «Exergetic life cycle assessment of a hydrogen production process,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, pp. 5665-5675, 2012.
- [129] I. Ehtiwesh, M. Coelho y A. Sousa, «Exergetic and environmental life cycle assessment analysis of concentrated solar power plants,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 145-155, 2016.
- [130] C. Moya, R. Domínguez, H. Van Langenhove, S. Herrero, P. Gil, C. Ledón y J. Dewulf, «Exergetic analysis in cane sugar production in combination with Life Cycle Assessment,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 59, pp. 43-50, 2013.

- [131] M. Hossain, C. Poon, I. Lo y J. Cheng, «Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. xxx, pp. xxx-xxx, 2016.
- [132] O. Sánchez, «Estudio de impacto ambiental Ex-Post y plan de manejo ambiental para las actividades realizadas en la granja avícola "María Lucila",» Enero 2015. [En línea]. Available: <https://maesantaelena.files.wordpress.com/2015/04/eia-granja-avicola.pdf>. [Último acceso: 14 Junio 2017].
- [133] M. Rosen y I. Dincer, «Exergy Analysis of waste emissions,» *International Journal of Energy Research*, n° 23, pp. 1153-1163, 1999.



Universidad  
Tecnológica  
de Bolívar  
CARTAGENA DE INDIAS



# ANEXOS

## ANEXO 1. LISTADO Y DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

**Tabla 1.** Listado y codificación de equipos proceso de producción harina de vísceras

CÓDIGO	EQUIPO
HVS0001	Blow Tank
HVS0002	Tolva de recibo
HVS0003	Transportador de materia prima HV
HVS0004	Digestor No. 1
HVS0005	Digestor No. 2
HVS0006	Percolador sin fin HV
HVS0007	Transportador No.1 de Harina Vísceras
HVS0008	Prensa
HVS0009	Transportador No.2 de Harina Vísceras
HVS0010	Molino
HVS0011	Elevador
HVS0012	Ciclón
HVS0013	Enfriadora
HVS0014	Elevador de cangilones
HVS0015	Mezclador de Harina Vísceras
HVS0016	Tolva de empaque

El código de los equipos está especificado de la siguiente manera:

Línea de producción + número de inventario

HVS0005

HVS	Línea de producción de harina de víscera.
0005	Numero de inventario



**Tabla 2.** Listado y codificación de equipos proceso de producción de aceite de pollo

<b>CODIGO</b>	<b>EQUIPO</b>
ACT0001	Tanque de recolección de aceite
ACT0002	Decanter
ACT0003	Tanque de decantación No. 1
ACT0004	Tanque de decantación No. 2
ACT0005	Tanque de almacenamiento No. 1
ACT0006	Tanque de almacenamiento No. 2

#### Listado y descripción de equipos línea de producción de harina de vísceras

##### **BLOW TANK**

<b>Código</b>	HVS 0001
<b>Descripción</b>	Consta de un sistema neumático y 2 cilindros, los cuales son encargados de enviar las vísceras de BLOW TANK a la tolva de recibo. Cuenta con una capacidad de 500 litros. Todo el sistema se encuentra conectado a través de la manguera flexible de poliuretano No 08

##### **TOLVA DE RECIBO**

<b>Código</b>	HVS 0002
<b>Descripción</b>	Sistema usado para almacenamiento de víscera . Dimensiones moto reductora de 3 kw a 97 rpm el cual tiene un muelle y un sin-fin que lleva la víscera de la tolva al transportador de materia prima.





## TRANSPORTADOR DE MATERIA PRIMA

<b>Código</b>	HVS 0003
<b>Descripción</b>	Sistema encargado de cargar el digestor de vísceras. Posee un motor reductor de 3 kw a 97 rpm el cual esta acoplado a un sinfín que es el que transporta la viscera hasta el digestor.

## DIGESTORES

<b>Código</b>	HVS 0004 – HVS0005
<b>Descripción</b>	<p>Equipo donde se realiza la cocción de la víscera, por efecto del vapor de agua.</p> <p>Marca Thor; Capacidad máxima de 5000 litros pero se carga normalmente hasta 3000 litros pesa aproximadamente 8500 Kg y consume 950 kg/h de vapor del agua. La presión de vapor en la camisa puede llegar hasta 5.5 kg f/cm<sup>2</sup>.</p> <p>Además contiene un motor de 30 HP rpm acoplado a un reductor marca Cestari a (30 rpm) a través de una transmisión de correas y poleas ( 4 correas 5 v 1450) y este a su vez esta acoplado al eje del digestor. En el interior del digestor el eje tiene acopladas unas paletas las cuales están encargadas de agitar o revolver la materia prima durante la cocción ( parte de vapor)</p>



## PERCOLADOR

<b>Código</b>	HVS 0006
<b>Descripción</b>	Sistema usado para recolectar la viscera cocida que sale del digestor y para hacer una primera separación entre la víscera cocida y el aceite, después se encarga de llevar la viscera cocida hasta el transportador de viscera. Tiene un motoreductor Marca Seweurodrive de 1.1 kw a 11rpm el cual va acoplado al sinfín del percolador a través de un sistema de transmisión piñón-cadena paso 80. Este sin-fin del percolador hace que la viscera cocida sea llevada hasta el transportador de viscera.

## TRANSPORTADOR No.1 DE HARINA VÍSCERA

<b>Código</b>	HVS 0007
<b>Descripción</b>	Sistema usado para llevar la viscera cocida desde el percolador de viscera hasta la prensa . Tiene un motoreductor Marca Sew Eurodrive de 1.1 Kw, 11 rpm el cual esta acoplado directamente al sin-fin el cual lleva la viscera cocida al prensa.

## PRENSA

<b>Código</b>	HVS 0008
<b>Descripción</b>	Sistema usado para prensar la víscera cocida y de esta manera extraer el aceite que ella contiene. Marca Thor, tiene una capacidad de 1000 kg/h, posee un motor de 4 HP ,1770 r p m y un reductor Cestari 83 r p m estos van acoplados directamente entre sí y además con el eje del



	<p>mezclador cuya función es mezclar la víscera cocida con agua (si es necesario).</p> <p>También contiene un motor de 3 HP 1730 rpm el cual está acoplado mediante un sistema de transmisión por polea y correa a un reductor Cestari, el cual mueve un sin fin que es el alimentador cuya función es llevar la víscera cocida del mezclador a la cámara de prensado. Además tiene un motor de 40 HP 1770 rpm acoplado a través de poleas y correas a un reductor Cestari 40,6 rpm el cual acciona el eje (de la cámara de prensado) que tiene camisas con hélices los cuales obligan a la víscera cocida a pasar a través de la cámara y de esta manera realizar el prensado. Tiene una barra tornillo para la extracción del aceite y un circuito de vapor el cual se encarga de calentar la víscera cocida.</p>
--	---

#### TRANSPORTADOR No.2 DE HARINA VISCERA

<b>Código</b>	HVS 0009
<b>Descripción</b>	<p>Sistema encargado de llevar la harina de víscera de la prensa hasta el molino.</p> <p>Tiene 1 moto reductor marca SEWEURODRIVE de 2,2 Kw, 97rpm el cual esta acoplado al sin-fin del transportador.</p>

#### MOLINO

<b>Código</b>	HVS 00010
<b>Descripción</b>	Sistema utilizado para moler la harina de víscera después del proceso de prensado



	<p>Tiene una capacidad de 5 Ton/hora. Cuenta con un sistema de 28 martillos con una distribución especial (de acuerdo y planos) y van montados sobre platos los cuales conmovidos por un motor de 358 HP a 3540 rpm, además tiene 2 pares de Cribas ubicadas en la parte inferior del molino con perforaciones de 5-6mm para dar a la harina la granulometría deseada.</p>
--	--

### ENFRIADORA

<b>Código</b>	HVS 0013
<b>Descripción</b>	<p>Equipo utilizado para disminuir la temperatura de la harina de víscera después del proceso de molida.</p> <p>Tiene una capacidad de procesamiento de 5 Ton/hora. Cuenta con un ventilador extractor de aire caliente el cual es la unidad enfriadora a cilindro enfriador es movido por un motor de le cual transmite la potencia a través del sistema piñón –cadena pasa 80, además de4 esto tiene un ciclón para recolección de partículas finas.</p>

### TOLVA DE EMPAQUE

<b>Código</b>	HVS 0016
<b>Descripción</b>	<p>Tolva utilizada para almacenamiento y empaque.</p> <p>Tolva hecha en lámina de calibre 12 con capacidad de 4 Toneladas de producto. En la parte inferior tiene una lámina la cual funciona como tapa facilitando así el cargue para el empaque del producto.</p>