

# ANÁLISIS DE EXERGÍA EN DOS PUNTOS CRÍTICOS EN UNA INDUSTRIA PRODUCTORA DE HARINA DE PESCADO

Por

Iván Rojas Gordillo

Tesis sometida en cumplimiento parcial  
de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

En

INGENIERÍA MECÁNICA

(Ciencias Térmicas)

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO  
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ  
2005

Aprobado por:

\_\_\_\_\_  
Nellore Venkataraman, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Jaime Benítez, Ph.D.  
Miembro, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Sandra Coutín, Ph.D.  
Presidente, Comité Graduado

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Dallas Alston, Ph.D.  
Representante de Estudios Graduados

\_\_\_\_\_  
Fecha

\_\_\_\_\_  
Paul A. Sundaram, Ph.D.  
Director del Departamento

\_\_\_\_\_  
Fecha

**A mi madre, Jeanne, por sus oraciones y su infinito amor.**

**A mi padre, César, por la educación que me ha brindado.**

**Rosario un millón de gracias por todo, recuerda, las cosas buenas no se  
logran de la noche a la mañana.**

**A ti Alejandra, hija mía, lo más bello que me ha dado la vida.**

**A mi hermano, Efraín, por enseñarme que todo es posible de realizar.**

**Intente, realmente intente,  
Piense realmente piense,  
Crea realmente crea.**

# AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Doctora Sandra Coutín, mi consejera de tesis, por brindarme la oportunidad de terminar con éxito este trabajo de investigación.

Al Doctor Walter Silva por su apoyo constante y por estar conmigo en los momentos más difíciles en esta etapa de mi vida. Por su ejemplo de vida.

Agradezco el apoyo constante de mis amigos Omar y Eduardo a través de sus consejos oportunos.

Un reconocimiento muy especial a Moisés por formar parte importante en este último año en la maestría, gracias por tu lucidez intelectual amigo.

Mis especiales agradecimientos a mis amigos Eduard y Federico cuya solidaridad ha sido determinante para no desmayar en el camino.

Eternas gracias a Ignacio y Narcisa por su apoyo total.

Un agradecimiento especial a todas aquellas personas que me brindaron su aliento y energías positivas constantemente para terminar esta labor, personas especiales que llevo en mi mente y corazón.

## **ABSTRACT**

This research consists in the application of an exergy analysis method to the fishmeal production process. A mathematical expression for the enthalpy of fish as function of temperature and weight fraction of proteins, fats and water was developed and used to obtain expressions for the entropy and exergy respectively. The enthalpy, entropy and exergy expressions for fish were effectively applied in the exergy analysis. This was verified through reasonable and realistic results of this analysis.

Parameters such as: the exergy losses, destruction ratios, the exergetic efficiency, effectiveness, the irreversibility and the potential improvement of the system were included in the exergy analysis. This analysis revealed that the process of coking is highly irreversible and, the loss and destruction of exergy ratios in the drying process are high.

A parametric study was also performed. This study allowed to model the exergy performance of the cooker and dryer, when working at temperatures below the point of normal operation of the equipments. The results of this analysis in the cooking process demonstrated that at temperatures under the operation point, the irreversibilities of the process diminished. These results produced low values for the potential improvement of the system, whereas at temperatures over to the operation point, the opposite was obtained. In the drying process, low temperatures, below to the operation point, increase the irreversibility of the process. This generated a major opportunity for improvement of the process. The opposite effect occurred when the product leaving the dryer had temperatures over the normal operation point.

Therefore, the application of this parametric study to critical processes as the cooking and drying processes, allowed to identify critical parameters for optimal performance of these equipments. This provided insight of the functioning of these equipments and the possibilities of further improvement from the standpoint of the second law of thermodynamics.

## RESUMEN

Esta investigación consiste en la aplicación del método de análisis de exergía a los procesos de producción de harina de pescado. Una expresión matemática para la entalpía de pescado en función de la temperatura y de la fracción en peso de proteínas, lípidos y agua fue desarrollada y utilizada para obtener expresiones para la entropía y exergía respectivamente. La entalpía, entropía y exergía para el pescado fueron aplicados efectivamente en el análisis de exergía. Lo cual fue verificado a través de resultados razonables.

Parámetros como los ratios de destrucción y pérdida de exergía, la eficiencia exergética, la irreversibilidad y la mejora potencial del sistema fueron incluidos en el análisis de exergía. Este análisis revela que el proceso de cocción es altamente irreversible y, que las razones de pérdida y destrucción de exergía en el proceso de secado son elevadas.

Un estudio paramétrico también fue desarrollado. Este estudio permitió modelar el comportamiento exergético del cocinador y secador, cuando trabajan a temperaturas por debajo o sobre el punto de operación normal de los mismos. Los resultados de este análisis en el proceso de cocción muestran que temperaturas bajo el punto de operación ocasionan que las irreversibilidades del proceso disminuyan. Estos resultados producen bajos valores en la mejora potencial del sistema, mientras que a temperaturas mayores al punto de operación el efecto es opuesto. En el proceso de secado, temperaturas menores al punto de operación incrementan de la irreversibilidad del proceso. Esto genera una mayor posibilidad de mejorar el proceso. Lo opuesto sucede cuando el producto a la salida del secador tiene temperaturas por encima del punto normal de operación.

En consecuencia, la aplicación de este estudio paramétrico a procesos críticos como son los procesos de cocinado y secado, permiten identificar los parámetros críticos para el óptimo funcionamiento de estos equipos. Este estudio nos permitió apreciar el comportamiento de estos equipos y sus posibles mejoras desde el punto de vista de la segunda ley de la termodinámica.

## LISTA DE CONTENIDOS

<b>ABSTRACT.....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>iii</b>
<b>CAPÍTULO 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2: Trabajos previos.....</b>	<b>7</b>
2.1 Caracterización termodinámica de sustancias alimenticias.....	7
2.2 Análisis de exergía aplicado a sistemas térmicos.....	14
<b>CAPÍTULO 3: Fundamento Teórico.....</b>	<b>32</b>
3.1 Principios básicos termodinámicos en el análisis de sistemas.....	32
3.2 Procesos irreversibles.....	34
3.3 Exergía.....	35
3.4 Balance de exergía en sistemas abiertos.....	36
3.5 Criterios de eficiencia utilizados en el análisis de exergía.....	39
3.5.1 Eficiencia exergética.....	40
3.5.2 Razones de destrucción y pérdida exergética.....	40
3.6 Viabilidad de la aplicación del modelo de sustancia incompresible.....	42
<b>CAPÍTULO 4: Características Termodinámicas del Proceso de Producción de Harina de Pescado.....</b>	<b>44</b>
4.1 Secuencia del proceso productivo.....	44
4.2 Composición de la materia prima y del producto.....	48



4.3 Propiedades termodinámicas de la materia prima en el proceso de producción	
de harina de pescado.....	50
4.3.1 Calor específico y entalpía de pescado.....	53
4.3.2 Entropía del pescado.....	54
4.3.3 Exergía de los flujos físicos.....	55
4.3.4 Ecuaciones para estimar la capacidad de procesamiento de los equipos.....	55
4.4 Análisis exergético de los procesos.....	56
4.4.1 Consideraciones importantes en el análisis de los procesos.....	56
4.4.2 Análisis del proceso de cocción.....	58
4.4.3 Análisis del proceso de secado.....	62
<b>CAPÍTULO 5: Análisis de los Resultados.....</b>	<b>66</b>
5.1 Análisis del caso base.....	73
5.2 Análisis paramétrico.....	86
5.2.1 Efecto de la variación de la temperatura de salida en el equipo cocinador.....	87
5.2.2 Efecto de la variación de la temperatura de salida en el equipo secador.....	91
<b>CAPÍTULO 6: Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>100</b>
<b>APÉNDICE A: Ecuaciones Termodinámicas para Sustancias Alimenticias.....</b>	<b>107</b>
<b>APÉNDICE B: Terminología para la Aplicación del Método de Exergia.....</b>	<b>117</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Composición física, en fracción de peso de las especies de peces evaluadas por Pham, Q y otros autores [31].....	11
Tabla 2.2: Parámetros termodinámicos para peces, evaluadas por Pham, Q y otros autores [31].....	12
Tabla 2.3: Propiedades de referencia ambiental, requeridas para los diferentes SLA, propuesta por Rosen, M [39].....	17
Tabla 2.4: Trabajos realizados sobre caracterización termodinámica de sustancias alimenticias y análisis de exergía en procesos industriales (No Investigado). .....	31
Tabla 4.1: Composición física promedio de diferentes especies de pescado [4, 2].....	49
Tabla 4.2: Composición física promedio de anchoveta [2].....	49
Tabla 4.3: Composición promedio de harina de pescado [2,18].....	50
Tabla 4.4: Condiciones de operación de equipos de secado, propuesto por Peters, M y otros autores [30].....	58
Tabla 5.1: Porcentajes de desviación promedio de los valores de las propiedades termodinámicas obtenidos en los modelos propuestos experimentalmente contra el modelo de sustancia incompresible.....	69
Tabla 5.2: Composición materia prima, estado termodinámico y flujo de masa en las dos líneas en la zona de cocción [2].....	74
Tabla 5.3: Composición materia prima, estado termodinámico y flujo de masa dos líneas en la zona de secado [2].....	74

Tabla 5.4: Propiedades termodinámicas en el estado de referencia para las sustancias de trabajo [2].....	75
Tabla 5.5: Propiedades termodinámicas y exergía física de la sustancia de trabajo para las dos líneas de producción, en la zona de cocción.....	75
Tabla 5.6: Propiedades termodinámicas y exergía física de la sustancia de trabajo para las dos líneas de producción, en la zona de secado.....	76
Tabla 5.7: Propiedades termodinámicas y exergía física del medio portador de energía para las dos líneas de producción, en la zona de cocción.....	76
Tabla 5.8: Propiedades termodinámicas y exergía física del medio portador de energía para las dos líneas de producción en la zona de secado.....	77
Tabla 5.9: Exergía física total de la sustancia de trabajo para las dos líneas de cocción. .....	77
Tabla 5.10: Exergía física total de la sustancia de trabajo para las dos líneas de secado. .....	78
Tabla 5.11: Exergía física total del portador de energía térmica para las dos líneas de cocción.....	78
Tabla 5.12: Calor transferido al ambiente por los equipos de las dos líneas para los procesos de cocción y secado.....	79
Tabla 5.13: Generación de entropía y Destrucción de exergía producida por los equipos de las dos líneas de cocción y secado.....	79
Tabla 5.14: Destrucción y pérdida de exergía producida por los equipos de cocción y secado.....	81

Tabla 5.15: Eficiencia exergética y razones de destrucción y pérdida de exergía producida por los equipos de cocción y secado.....	81
---	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación esquemática de las aproximaciones utilizadas para analizar sistemas a partir de la segunda ley de la termodinámica, empezando desde el nivel más simple a más complejo, propuesto por Rosen, M [39].....	18
Figura 2.2. Modelo físico del análisis de exergía para un sistema, propuesto por Wang Y and Feng X [51].....	21
Figura 3.1. Volumen de control mostrando las transferencias de masa y energía.	33
Figura 3.2. Flujos de exergía asociados a un volumen de control.....	36
Figura 3.3. Distribución de los flujos de exergía en un volumen de control.....	38
Figura 4.1. Secuencia de producción de harina de pescado [38].....	45
Figura 4.2. Esquema de la secuencia de producción de harina de pescado [38].....	45
Figura 4.3. Comportamiento característico de la entalpía para sustancias alimenticias [31, 8, 32, 11, 36].....	52
Figura 4.4. Arreglo de los equipos en la zona de cocción.....	59
Figura 4.5. Distribución de los flujos máxicos en el equipo secador.....	63
Figura 5.1. Relación entre el cambio de entalpía y la temperatura para anchoveta (Modelos 2 al 7), comparados con el de sustancia incompresible.....	68
Figura 5.2. Relación entre el cambio de entropía y la temperatura para anchoveta (Modelos 2 al 7), comparados con el de sustancia incompresible.....	68
Figura 5.3. Relación entre el cambio de exergía y la temperatura para anchoveta (Modelos 2 al 7), comparados con el de sustancia incompresible.....	69
Figura 5.4. Comportamiento de la entalpía específica del pescado con la temperatura y con la composición porcentual en proteínas, grasas y agua.....	71

Figura 5.5. Comportamiento de la entropía específica del pescado con la temperatura y con la composición porcentual en proteínas, grasas y agua.....	71
Figura 5.6. Comportamiento de la entalpía específica del pescado con la temperatura y con la composición porcentual en proteínas, grasas y agua.....	72
Figura 5.7. Eficiencias exergéticas de los procesos de cocción y secado.....	82
Figura 5.8. Razones de destrucción y pérdida de exergía en los procesos de cocción y secado.....	82
Figura 5.9. Balances de energía y exergía para el proceso de cocción en planta de producción de harina de pescado del tipo indirecto (distribución porcentual de los flujos de energía y exergía).....	83
Figura 5.10. Balances de energía y exergía para el proceso de cocción en planta de producción de harina de pescado del tipo indirecto (distribución porcentual de los flujos de energía y exergía).....	84
Figura 5.11. Balances de energía y exergía para el proceso de secado en planta de producción de harina de pescado del tipo indirecto (distribución porcentual de los flujos de energía y exergía).....	85
Figura 5.12. Efecto de la variación porcentual de los parámetros exergéticos del equipo cocinador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=95°C).....	89
Figura 5.13. Efecto de la variación porcentual de la efectividad, mejora potencial e irreversibilidades del equipo cocinador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=95°C).....	90

Figura 5.14. Efecto de la variación eficiencia exergética y las razones de pérdida y destrucción de exergía del equipo cocinador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=95°C).....	91
Figura 5.15. Comportamiento de la variación de la eficiencia exergética, las irreversibilidades y las razones de pérdida y destrucción de exergía del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=100°C).....	92
Figura 5.16. Comportamiento de la variación de la efectividad, mejora potencial e irreversibilidades del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=100°C).....	93
Figura 5.17. Efecto de la variación eficiencia exergética y las razones de pérdida y destrucción de exergía del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=100°C).....	94
Figura 5.18. Comportamiento de la variación de la eficiencia exergética, las irreversibilidades y las razones de pérdida y destrucción de exergía del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=95°C).....	95
Figura 5.19. Comportamiento de la variación de la efectividad, mejora potencial e irreversibilidades del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=95°C).....	96

## NOMENCLATURA

$\dot{m}$	: Flujo de masa, kg/h
S	: Entropía total, kJ/K
$\dot{E}$	: Exergía total, kJ/h
$\dot{e}$	: Exergía específica, kJ/kgK
%A	: Fracción de agua presente en la sustancia, %.
%G	: Fracción de grasas presente en la sustancia, %.
%lleno	: Capacidad de operación
%S	: Fracción de sólidos presente en la sustancia, %
%desv	: Desviación porcentual de una propiedad termodinámica.
$a'_w$	: Actividad de agua modificada
$a_w$	: Actividad de agua
B	: Función de disponibilidad exergética
C	: Calor específico, kcal/kg°C
$C_{ea}$	: Calor específico promedio de la fracción agua, $c_{ea} = 1.00$ kCal/kg°C
$c_{eg}$	: Calor específico promedio de la fracción grasa, $c_{eg} = 0.40$ kCal/kg°C
$c_{es}$	: Calor específico promedio de la fracción sólida, $c_{es} = 0.52$ kCal/kg°C
$d_e$	: Diámetro del eje, m



$d_h$	: Diámetro del helicoide, m
$d_i$	: Diámetro interno, m
$e$	: Espesor del alabe, m
$f_c$	: Factor de cocimiento
$f_p$	: Factor de paso
$H$	: Entalpía, kcal/kg
$h$	: Entalpía específica, kJ/kg
$H_1$	: Entalpía correspondiente al punto inicial de congelamiento, kcal/kg
$H_f$	: Entalpía bajo el punto de congelamiento, kcal/kg
$I_{rr}$	: Irreversibilidad
$L$	: Calor latente de fusión del agua, Kcal/kg
$l$	: Longitud del cocinador, m
$M_s$	: Peso molecular efectivo de los sólidos disueltos, kg/mol
$M_w$	: Peso molecular del agua, kg/kgmol
$N$	: Número de pasos
$p$	: Longitud de paso, m
PLT	: Primera ley de la termodinámica
$P_{tm}$	: Mejora potencial
$Q$	: Transferencia de calor
$R$	: Constante de gases ideales, $R = 1.987 \text{ kCal/kmol.K}$
$s$	: Entropía específica, kJ/kgK
SLA	: Análisis de segunda ley

SLT	: Segunda ley de la termodinámica
$t$	: $T - T_0$ , temperatura, °C
$T$	: Temperatura de congelamiento de la sustancia, K
$T_0$	: Temperatura de congelamiento del agua ( $T_0 = 273.1$ K)
$t_1$	: Punto inicial de congelamiento, °C
$t_r$	: Temperatura de referencia, -40°C
VPT	: Valor de la propiedad termodinámica.
$w$	: Velocidad de rotación, rpm
$W_B$	: Agua ligada, Kg
$X_I$	: Fracción de hielo, kg/kg sustancia
$X_{so}$	: Fracción de sólidos solubles, kg/kg sustancia
$X_{wO}$	: Fracción en masa de humedad inicial, kg/kg de sustancia
$y$	: Fracción de agua en la sustancia
$Y$	: Razón exergética
$\varepsilon$	: Efectividad
$\rho_a$	: Densidad de la materia prima (anchoveta), kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{ckp}$	: Densidad “cake” de prensa, kg/m <sup>3</sup>

**Subíndices:**

$p$	: Pescado
$pc$	: Pescado cocinado
$ckp$	: “Cake” de prensa
$ckss$	: “Cake” de separadora de sólidos
$fsol$	: Fase sólida
$conc$	: Concentrado

loss	: Pérdidas
D	: Destrucción
L	: Pérdidas
ex	: Exergía
P	: Producto
F	: Fuel's
efl	: Efluente
net	: Neto
vc	: Volumen de control
o	: Medio ambiente
gen	: Generación
r	: Región del sistema
j	: Fuente de calor
i	: Ingreso
e	: Salida
v, p	: Volumen constante, presión constante
s	: Equipo secador
c	: Equipo cocinador
g	: Vapor saturado
f	: Líquido saturado
ais	: Aislamiento
shaft	: Eje
H <sub>2</sub> O <sub>e</sub>	: Agua evaporada

srt : Secador rotatubos

srp : Secador rotaplate

c.base : Caso base

c.nuevo : Caso nuevo

**Superíndices:**

PH : Física, total

Ph : Física, específica

. : Flujo

# **CAPITULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

La industria de harina de pescado es considerada una de las actividades económicas más importantes en países como Perú y Chile en Sur América, y Dinamarca y Noruega en Europa. Perú y Chile procesan el 45-50% de la harina de pescado y el 35-30% del aceite de pescado en el mundo. Perú es el líder mundial en exportaciones de harina y aceite de pescado con una participación en este mercado del 50.69%, seguido por Chile con el 30.82% [34].

La harina de pescado es un polvo fino obtenido del cocinado, prensado, secado y molido de la materia prima (anchoveta). Es una fuente de alimentación rica con un alto contenido en proteínas, que es usado como ingrediente en la elaboración de alimentos balanceados para la avicultura, la acuicultura, la ganadería y animales de compañía [17].

En el Perú se han desarrollado dos tipos de tecnología para la obtención de la harina de pescado. Una de ellas utiliza el sistema de cocción y secado directo, en la cual existe contacto entre la materia prima y el medio portador de energía térmica vapor saturado en los procesos de cocción y gases de combustión en los procesos de secado. La otra tecnología utiliza el sistema del tipo indirecto, en la que no hay contacto entre la materia prima y los portadores de energía. En ambas tecnologías, el vapor saturado es generado en una caldera piro tubular. Los procesos que utilizan el método de contacto indirecto, emplean bajas temperaturas de operación evitando la destrucción de las proteínas y, evitando afectar su digestibilidad (capacidad de asimilación del producto en

el organismo). Sin embargo, en ambos tipos de tecnología, el proceso de cocinado es realizado a altas temperaturas (90-95°C) [2, 44, 38].

En el proceso de producción se utilizan grandes flujos de calor que se adicionan a la materia prima (pescado: anchoveta, sardina o jurel) para su procesamiento y el resto es transferido al medio ambiente como flujos de calor residuales o utilizados en otros procesos. El producto final de toda esta secuencia de producción es la obtención de harina de pescado y el sub-producto aceite de pescado [17, 4, 2, 44, 38].

En el Perú, la industria de harina de pescado es la segunda en importancia después de la minería. Existen aproximadamente 130 plantas harineras que cubren la línea costera peruana. Se procesan alrededor de 10 millones de toneladas métricas ( $10^9$  Kg) de pescado en un buen año, las cuales se exportan casi en su totalidad [4].

El sector pesquero es una de las actividades industriales que ha tenido un comportamiento favorable en los últimos años, llegando a representar el 1.25% del Producto Bruto Interno (P.B.I) nacional (extracción) y el 1.84% (manufactura). Esto a pesar de las condiciones climatológicas adversas (Fenómeno EL NIÑO 1997-1998) que repercutió en una disminución del 40% en la producción entre enero de 1997 y enero del 1998 [38].

En este contexto, la región CHAVÍN, en particular los puertos de Chimbote y Coishco representan el 33.58% del desembarque de materia prima a nivel nacional, correspondiéndole el 30% del total de las plantas productoras de harina a nivel nacional [4]. Esta tasa de participación ubica a esta región como una zona importante para el estudio de la calidad de sus procesos así como de la tecnología instalada en sus plantas.

En tal sentido, los procesos de manufactura definen a las plantas productoras de harina de pescado como plantas consumidoras intensivas de energía. En el período 1985-2000 el consumo de energía en el sector pesquero creció a una tasa anual de 5.0%, siendo el petróleo industrial el de mayor demanda a través del tiempo [29]. Es importante mencionar que el sector pesquero ha sido testigo de las crisis energéticas tanto regionales como internacionales. Esta situación ha obligado a reorientar las políticas de producción, teniendo como base a los programas de ahorro y optimización de energía.

Dentro de este contexto, en la industria de harina de pescado se han definido puntos críticos en el proceso de producción que determinan la calidad de la harina de pescado. Desde el punto de vista del uso de la energía térmica en dicho proceso, son cuatro los equipos que determinan esta condición: el generador de vapor (caldera), el cocinador, el secador y la planta evaporadora (Planta de Agua de Cola) [48, 53, 2, 44, 38]. El presente estudio está orientado a aplicar un análisis de exergía<sup>1</sup> a dos de estos importantes equipos consumidores de energía: el cocinador y el secador.

Los programas de ahorro de energía tienen como objetivo lograr una alta eficiencia de proceso obteniendo un producto de buena calidad, minimizando el consumo de energía y respetando las normas de preservación del medio ambiente. Los estudios realizados en la industria de harina de pescado, están enfocados exclusivamente en balances de masa y energía, lográndose así identificar los puntos del proceso donde existen pérdidas de materia y/o un uso inadecuado de la energía térmica. Todo lo anterior

---

<sup>1</sup> En el presente trabajo se utiliza la palabra exergía con tilde, sin embargo se ha encontrado una investigación en que se fundamenta la no tildación de esta palabra, mayores detalles ver Anexo B.

permite tomar las medidas correctivas con el objeto de optimizar el proceso de producción.

Cuando se utiliza el análisis de conservación de energía, a través de la primera ley de la termodinámica, existe una limitación importante en el mismo. Dado se analizan procesos reales, este tipo de análisis no está en la capacidad de definir apropiadamente el grado de aprovechamiento de la energía suministrada a los procesos. Por consiguiente, no se tienen en cuenta las irreversibilidades generadas en los equipos durante el proceso productivo. Esta limitación ha generado la búsqueda de métodos que permitan una caracterización bastante real de lo que sucede en este tipo de procesos. Uno de los métodos que cumple con este objetivo es el denominado análisis de exergía [23, 6, 10, 3], el cual se convierte en una herramienta importante para evaluar la eficiencia de los procesos de producción y de cualquier sistema donde predomine el uso de energía térmica. Todo esto enmarcado dentro de los objetivos de un programa de ahorro de energía.

El análisis de exergía ha sido aplicado a procesos de producción en la industria petroquímica, química, del papel y acero, entre otras [21, 14, 45, 15, 49, 37]. En países como Japón y Suecia, los procesos de conversión de energía (industriales y de recursos materiales) son expresados en términos del concepto de exergía, en estos dos países los balances de exergía de sus recursos forman parte integral de sus políticas gubernamentales [15, 50, 49].

Aplicar el análisis de exergía a procesos que no están relacionados a plantas térmicas, de cogeneración, desalinización y otros sistemas con uso intensivo de energía,



en los cuales su uso ha logrado gran aceptación como una herramienta de diagnóstico energético de sus procesos, pues en este tipo de sistemas el objetivo de las mismas es la producción de energía. El análisis de exergía no ha sido validado totalmente en plantas industriales cuyo objetivo no es la producción de energía, pero donde sin embargo el uso de la energía juega un papel muy importante [20].

El presente trabajo de investigación nace de la necesidad de proveer un conocimiento más real del aprovechamiento termodinámico de la energía térmica en los procesos de producción de harina de pescado y, como ésta se degrada para producir un producto en particular. En adición este trabajo prevé el desarrollar una herramienta que permita cuantificar el impacto energético de este tipo de industrias con el medio ambiente. Esto permitirá la obtención de una metodología que permita utilizar los criterios adecuados, para caracterizar a través de la propiedad termodinámica de la exergía, a la sustancia de trabajo, que en la presente investigación es de naturaleza alimenticia (pescado).

La contribución de este trabajo de investigación es en primer lugar, el desarrollo de criterios apropiados para caracterizar termodinámicamente sustancias de trabajo cuya composición química es compleja y, de la cual sólo se conoce su composición física (sólidos, grasas y agua) como función únicamente de su fracción en peso. En otras palabras servir de referencia para la caracterización de sustancias del tipo alimenticio, como es el pescado. En segundo lugar brindar una metodología para utilizar el análisis de exergía como herramienta de diagnóstico energético de procesos con uso intensivo de energía térmica que involucran sustancias de trabajo de composición química compleja.

El presente trabajo de investigación utiliza el método del análisis de exergía como una herramienta para identificar y determinar el grado de irreversibilidad de procesos y equipos industriales, con énfasis en el proceso de producción de harina de pescado con tecnología del tipo indirecto. Con el objeto de lograr esta meta, se definen a continuación los objetivos específicos:

1. Definir los puntos críticos en el proceso de producción de harina de pescado.
2. Desarrollar una expresión matemática para caracterizar termodinámicamente a la sustancia de trabajo, en nuestro caso la anchoveta. Esta expresión matemática debe ser capaz de definir la exergía en cada punto de la secuencia de producción de harina de pescado.
3. Aplicar el método del análisis de exergía a dos puntos críticos dentro del proceso de producción de harina de pescado, de manera que se pueda cuantificar el grado de irreversibilidad de los mismos.

## CAPITULO 2

### TRABAJOS PREVIOS

Se ha realizado una investigación exhaustiva con respecto a dos puntos centrales en la elaboración de este trabajo de tesis. El primer punto se enfoca en presentar los avances logrados en la caracterización termodinámica de sustancias de origen alimenticio, todo esto debido a que la sustancia que será procesada en este tipo de industria es el pescado, específicamente la especie *anchoveta peruana*, que desde este punto y en adelante será llamada sustancia de trabajo o materia prima. En esta sección los trabajos presentados para la caracterización termodinámica de pescado, se denominarán modelos, los cuales irán precedidos por el nombre de sus autores.

Es importante señalar que la naturaleza de este trabajo de investigación es de tipo teórico, utiliza y manipula modelos obtenidos experimentalmente para caracterizar termodinámicamente sustancias de origen alimenticio (pescado). Con el objeto de definir en forma apropiada a partir de ellos, la exergía de la sustancia de trabajo.

El segundo punto esta orientado a presentar los trabajos de investigación referidos al uso del análisis de exergía y, como éste método ha sido utilizado para caracterizar el funcionamiento de sistemas con uso intensivo de energía térmica.

#### **2.1 Caracterización termodinámica de sustancias alimenticias**

Como se ha mencionado, existen dos tecnologías para el procesamiento de la harina de pescado, en ambas, son dos los tipos de flujos que interaccionan en toda la secuencia de producción, uno es la materia prima y el otro el vapor saturado como portador de la energía térmica. En esta sección nos enfocamos en las investigaciones que

se han realizado para caracterizar sustancias alimenticias, específicamente pescado, desde el punto de vista termodinámico.

Toda sustancia alimenticia posee una composición química compleja, sin embargo puede ser considerada como una mezcla de agua, sólidos disueltos y sólidos no disueltos[31], este tipo de composición hace que la determinación de las propiedades termodinámicas tales como el calor específico, entalpía y entropía se conviertan en una tarea bastante compleja de determinar y, como ambas propiedades (calor específico y entalpía) son componentes de la exergía, su caracterización, en consecuencia es también tediosa.

Trabajos que compilan las propiedades térmicas de alimentos [33], así como otros que presentan una amplia recolección de valores experimentales [42] muestran en mayor cantidad datos para productos sometidos a procesos de conservación (congelación) y, a la vez precisan que la escasez de información en datos experimentales y, en ecuaciones de predicción es debida a la naturaleza compleja de las sustancias así como de los métodos de medición de las mismas. En ambos trabajos la información respecto a pescado y, en especial de la *anchoveta* no han sido encontrados.

Información sobre las propiedades termodinámicas de la anchoveta no ha sido reportada, en lo que respecta al calor específico, entalpía y entropía. El único trabajo encontrado utiliza harina de anchoveta peruana del tipo “prime” con un contenido en humedad del 10% aproximadamente, la harina ha sido obtenida de una planta de producción en Chimbote, Perú. El objetivo en este trabajo fue estudiar el comportamiento termodinámico de la harina de pescado en procesos de adsorción, haciendo referencia al comportamiento de la entalpía y entropía molar de la harina en función del contenido de

humedad presente en la misma. Las ecuaciones para estas dos propiedades son función de la composición molar de la harina y de otras variables que hacen compleja la determinación de las mismas. Este estudio, nos da una idea de la interacción termodinámica de la harina de pescado con el ambiente [26].

Investigaciones más específicas respecto a la entalpía para sustancias alimenticias, en las que se encuentran las pertenecientes al grupo de carnes y en especial relacionados a diferentes especies de pescado se detallan a continuación.

Correlaciones para determinar la entalpía de sustancias alimenticias, para un rango de temperaturas entre 230-310K y con un contenido de fracción de agua entre 0.74-0.94, todo esto para procesos de congelamiento y descongelamiento de alimentos [8]. De acuerdo a este estudio, cuando la entalpía es expresada en función de la temperatura, ésta está formada por dos partes una lineal que representa la capacidad de calor constante de la sustancia, cuando su temperatura se encuentra sobre el punto de congelamiento y otra parte curva, para temperaturas por debajo del punto de congelamiento. Los autores presentan una ecuación relativamente sencilla que es función solamente de dos parámetros de entrada: *la fracción de agua contenida en la sustancia y del tipo de grupo alimenticio al que pertenece.*

En esta investigación Chang H, y Tao L [8] hicieron la correlación para 23 sustancias alimenticias, clasificadas en tres grupos (carnes, frutas/vegetales y jugos) y el promedio de error absoluto para los valores de entalpía en el punto de congelamiento ( $H_f$ ), variable característica para determinar la entalpía en cualquier valor de temperatura, se encuentra entre el 1-2% de este valor, resultado que nos asegura aproximaciones razonables en el cálculo de la entalpía.

La expresión matemática para la entalpía presentada en este estudio será denominada *Modelo de Chang, H y Tao, L* [8] y, será expuesta en el capítulo 4.

Por otro lado se ha reportado la utilización del modelo de Schwartzberg, para calcular la entalpía de sustancias alimenticias, entre ellas peces [32]. El aporte de esta investigación es el cálculo de distintas variables que componen la función de entalpía, expresándola entonces sólo como función única de la temperatura. Las variables correspondientes para la ecuación de entalpía han sido correlacionadas para el grupo de carnes, dentro de las cuales se encuentran dos especies de peces, cuya composición es similar a la anchoveta, hemos denominado a este estudio *Modelo de Pham, Q* [32].

La derivación de expresiones para entalpía y calor específico en términos del contenido de sólidos y de temperatura para pescado, han sido correlacionadas. En este estudio, Chen C. [11] también pone de manifiesto la separación de la temperatura de la sustancia en dos regiones, temperaturas por encima y por debajo del punto de congelamiento, para caracterizar su entalpía. Para temperaturas sobre el punto de congelamiento, el calor específico y la entalpía pueden ser estimadas como una función del contenido de sólidos presentes en la sustancia, expresado como una fracción en peso y de la temperatura. En esta oportunidad los peces bajo análisis son Haddock, Cod y Perch, para los cuales se ha realizado una comparación para la función de entalpía obtenida experimentalmente contra las ecuaciones propuestas en el estudio. El autor concluye que las expresiones matemáticas encontradas son aplicables a diferentes tipos de sistemas alimenticios y que son confiables de aplicación cuando el contenido de humedad se encuentra en un rango superior al 40%, este estudio ha sido denominado *Modelo de Chen, C* [11].

Se han reportado también valores para la entalpía de sustancias alimenticias para un rango de temperaturas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$  y para 27 tipos de sustancias, el trabajo incluye peces [31]. En esta oportunidad, se define una ecuación para determinar la entalpía de sustancias alimenticias, a través del modelo utilizado por Schwartzberg (1976), donde nuevamente se puede apreciar el comportamiento de la entalpía como función de la temperatura, revelando que para cualquier tipo de sustancia alimenticia, ésta está formada por una componente de naturaleza hiperbólica, que corresponde a la zona debajo del punto de congelamiento y, a otra componente lineal correspondiente a la zona sobre el punto de congelamiento. Un aporte importante en este estudio es la descripción detallada de las relaciones entre entalpía y temperatura, para todas las sustancias evaluadas con un alto contenido en agua.

Dentro de las sustancias evaluadas se tienen dos especies de peces cuya composición química es bastante similar a la anchoveta (Tabla 2.1) y, para estos mismos peces presentamos las variables encontradas para caracterizar la entalpía sobre el punto de congelamiento (Tabla 2.2), se ha denominado a este trabajo *Modelo de Pham, Q y otros autores* [31].

Especie (Pescado)	Composición (%)			
	Agua	Proteínas	Grasas	Cenizas
Gurnard Fillets	78.4	20.4	0.6	1.3
Tarakihi Fillets	77.2	22.1	0.8	1.2

Tabla 2.1: Composición física, en fracción de peso de las especies de peces evaluadas por Pham, Q y otros autores [31].

Sustancia	A kJ/kg	$c_f$ kJ/kgK	B kJK/kg	$c_u$ kJ/kgK	$H_o$ kJ/kg	$t_1$ K
Gurnard, filetes	79.4	2.14	-186	3.77	326	-0.76
Tarakihi, filetes	78.3	2.13	-188	3.69	318	-0.79

Tabla 2.2: Parámetros termodinámicos para peces, evaluadas por Pham, Q y otros autores [31].

En los siguientes trabajos, los autores también han realizado mediciones experimentales de las propiedades termo físicas para dos especies de peces, las propiedades medidas son: calor específico, conductividad térmica, calor de fusión, entre otras. El equipo utilizado es un Calorímetro de Barrido Diferencial (Differential Scanning Calorimeter). Las dos especies de peces analizadas son Pacific whiting y Skipjack Tuna. El estudio para Pacific whiting se han realizado con pasta de surimi que es elaborado de carne de pescado cortado y lavado. En este trabajo el calor específico de esta sustancia es analizada como función de la temperatura para un proceso de cocción entre los 25 a 90°C. Para realizar esto, se utilizaron las relaciones propuestas por Choi y Okos [1], en la que el calor específico de la sustancia puede ser obtenida a partir de su composición básica, es decir, de su contenido en proteínas, grasa, humedad, carbohidratos, fibras y cenizas. Esta expresión de calor específico es la más utilizada y generalizada en la industria de producción de harina de pescado [48, 53, 2, 44, 38], pues por su formato permite determinar su valor promedio en cualquier punto específico dentro del proceso de producción.

Entonces el calor específico, en función de la fracción en peso de la composición del pescado es dada como:

$$c_e = c_{es}.\%S + c_{eg}.\%G + c_{ea}.\%A \quad (2.1)$$



El calor específico obtenido para pasta de surimi de Pacific whiting como una función de su temperatura y del contenido de humedad es dada como:

$$c_p = 2.33 + 0.006T + 0.0149M \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 para calor específico ha sido denominada *Modelo de AbuDagga, Y.*

Para la especie Skipjack Tuna que es ampliamente utilizada en la industria de conservas de pescado, se ha estudiado el comportamiento de su calor específico para un amplio rango de temperaturas (10-110°C) y a presión atmosférica [54], este comportamiento de calor específico ha sido tomado en cuenta, pues esta situación simula en forma apropiada el proceso de cocción al que es sometido la materia prima en el proceso de producción de harina de pescado. A partir de estos resultados experimentales, al que hemos llamado *Modelo de Zhang, J.*, se han obtenido los valores para el comportamiento del calor específico de la sustancia como función de la temperatura.

Por último se utilizó una referencia bibliográfica muy importante en el área de ciencias e ingeniería de alimentos que corresponde a Rao, M. y Rizvi, S. [36]. Los autores han establecido que las propiedades térmicas más caracterizadas para sustancias alimenticias son: calor específico, entalpía, conductividad térmica, difusividad térmica y coeficiente superficial de transferencia de calor, entre otras. Con respecto a la información existente para calor específico y entalpía se han encontrado datos para más de 400 estudios no todos publicados formalmente, para más de 1000 productos. En estas publicaciones se aprecia la fuerte dependencia lineal del calor específico con respecto al contenido de agua de la sustancia, sobre todo cuando el contenido de agua es alto, entre 65 a 95%. Para la entalpía, los datos más confiables son los compilados por Dickerson

(1968), basado en los estudios realizados por Reidel [36]. Ambas propiedades (calor específico y entalpía) han sido publicadas en forma sistemática en las ediciones de 1981 y 1985 del AHSRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.) Handbook of Fundamental. Los autores utilizan el criterio en el que establecen que, *para que una propiedad térmica sea potencialmente aplicable, es necesario conocer la composición y temperatura de la sustancia bajo análisis y, que ante la ausencia de datos para la entalpía de un producto en particular, se pueden utilizar los datos tabulados de la entalpía de otras sustancias siempre y cuando los productos presenten composición física y especialmente contenido de agua similares, para estimar la entalpía de una sustancia en particular.* Como la entalpía puede ser obtenida a partir del calor específico y, de acuerdo al modelo de sustancia incompresible, el mismo criterio será aplicado para caracterizar su calor específico.

## **2.2. Análisis de Exergía Aplicado a Sistemas Térmicos**

El análisis termodinámico y sus variantes han logrado aplicaciones importantes en los distintos campos de la ciencia con resultados contundentes, cuando estos métodos son utilizados como herramientas de diagnóstico y optimización de sistemas con uso intensivo de energía. Sistemas que van desde una simple tubería transportando fluidos de trabajo, equipos de transferencia de calor como calderas, intercambiadores de calor, condensadores, etc., empleados en plantas térmicas, plantas procesadoras de leche, plantas azucareras y, hasta macro sistemas como son sociedades enteras, en las cuales se estudia la interacción del uso de los recursos energéticos y su impacto con el ambiente y, por último hasta reportes de aplicaciones termodinámicas en sistemas biológicos.

Existen investigaciones donde se fundamenta el uso apropiado de los términos termodinámicos en el análisis de sistemas; aquí se analiza el rol que tienen los conceptos de energía, entropía y exergía dentro de la ingeniería termodinámica [12]. En este sentido la termodinámica es vista como la ciencia de la energía que incluye todos los aspectos de la energía y sus transformaciones y, de las relaciones entre las propiedades de la materia, mientras que la ingeniería termodinámica como la orientada a lograr el mejor uso de los recursos energéticos disponibles.

Dincer I, y Cengel Y. [12], establecieron que la ciencia termodinámica está construida sobre la base de dos leyes naturales, la primera y segunda ley de la termodinámica (PLT y SLT, respectivamente). La PLT es simplemente una expresión del principio de conservación de energía, este principio asevera que la energía es una propiedad termodinámica y que durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra, pero de forma que la cantidad total de energía siempre permanece constante.

Por otro lado la SLT, establece que la energía posee tanto calidad como cantidad, y que en procesos reales esta siempre disminuye su calidad. En otras palabras la energía térmica asociada a una alta temperatura es degradada cuando esta es transferida a un cuerpo a baja temperatura. El intento por cuantificar esta calidad de energía ha resultado en la definición de propiedades como la entropía y exergía.

El estudio pone de manifiesto las limitaciones de la PLT para analizar un sistema específico, aseverando que no provee información acerca de la dirección en la cual los procesos pueden espontáneamente ocurrir, es decir, la reversibilidad de los procesos termodinámicos. Que esta ley tampoco muestra información acerca de la capacidad de los procesos termodinámicos para convertir calor en trabajo mecánico en forma eficiente.

Para suplir estas deficiencias, se ha derivado un principio experimental denominado SLT. Principio que ha generado una nueva propiedad termodinámica, denominada entropía, que es simplemente una medida de la cantidad de desorden molecular dentro de un sistema, concluyéndose que un sistema posee un alto grado de desorden molecular cuando tiene un alto valor de entropía, propiedad que esta ligada a la temperatura como variable de medición; en este sentido la entropía se convierte en el corazón de la SLT. Que un sistema puede solamente generar entropía, mas no destruirla. Así la SLT establece que todas las transformaciones o conversiones de energía son irreversibles, que ellas suceden espontáneamente en dirección de incremento de entropía.

La SLT establece la diferencia en calidad entre diferentes formas de energía y explica como algunos procesos pueden ocurrir espontáneamente, mientras otros no. Esta tendencia de cambio es usualmente expresada como una desigualdad, la SLT ha sido confirmada a través de evidencias experimentales, así como por las leyes físicas de la naturaleza; esta ley es poderosamente útil para entender los aspectos termodinámicos de sistemas reales a través del uso de sistemas ideales. Así los autores proponen el uso de la SLT como una herramienta para ser aplicada en políticas energéticas, relacionando la entropía y el grado de utilidad de la energía, es decir, el grado de utilidad energía deberá tener bajo valor de generación de entropía [12].

El concepto de exergía se define como el máximo trabajo que puede ser hecho por los componentes de un sistema respecto a un sistema de referencia que es el ambiente, el cual es asumido para ser infinito y en equilibrio a una presión, temperatura y composición química definida. La exergía es una propiedad termodinámica que es función tanto del sistema como del ambiente. La exergía se conserva solo cuando los

procesos entre el sistema y el ambiente son reversibles, y es destruida cuando los procesos son irreversibles. Así como la energía, la exergía puede ser transferida a través de las fronteras del sistema, la transferencia de exergía asociada con la transferencia de calor depende del nivel de temperatura en la que sucede el proceso con respecto a la temperatura del ambiente.

Existen trabajos más específicos en los se presentan las más importantes aproximaciones reportadas para el análisis de la segunda ley de la termodinámica (SLA, second law analysis) [39], estas aproximaciones son cinco: exergía, exergía física, consumo de exergía, negentropía y análisis de entropía. El autor examina las implicancias que los SLA tienen en el área del impacto ambiental y en el área económica. Se presenta también un resumen (Tabla 2.3) de las propiedades intensivas del ambiente de referencia que son necesarias para aplicar con éxito cada uno de los análisis de segunda ley, para lograr esto se debe definir un ambiente de referencia con el que interactúa el sistema bajo análisis. También presenta un esquema (Figura 2.1) en función de las variables mostradas en la Tabla 2.3.

TIPO DE SLA	PROPIEDADES REQUERIDAS
Análisis de Exergía	$T_0, P_0, \mu_{j00} (j = 1, 2, \dots)$
Análisis de Exergía Física	$T_0, P_0,$
Análisis de Consumo de Exergía	$T_0$
Análisis de Negentropía	No utiliza propiedades de referencia ambiente.
Análisis de Entropía	No utiliza propiedades de referencia ambiente.

Tabla 2.3 Propiedades de referencia ambiental, requeridas para los diferentes SLA, propuesta por Rosen, M [39].

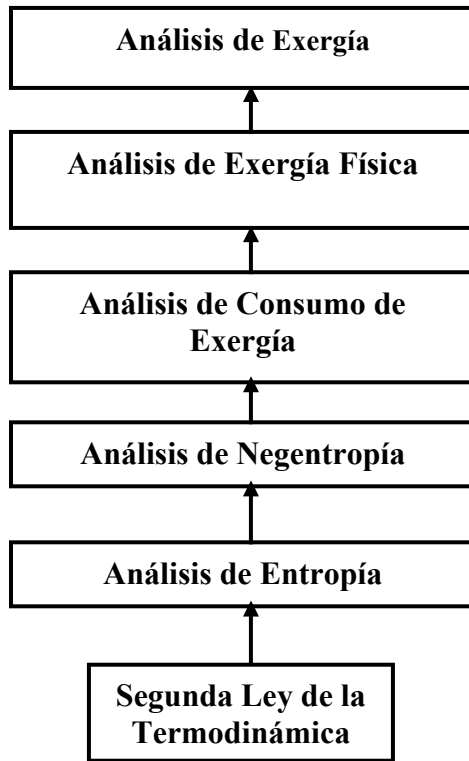


Figura 2.1 Representación esquemática de las aproximaciones utilizadas para analizar sistemas a partir de la segunda ley de la termodinámica, empezando desde el nivel mas simple a mas complejo, propuesto por Rosen, M [39].

Rosen, M [39] demuestra la utilidad de las aproximaciones de SLA para determinar el grado de irreversibilidad de procesos, a través de parámetros como las denominadas eficiencias de segunda ley, cuando estas son comparadas con las eficiencias energéticas basadas en los principios de primera ley de la termodinámica. El autor también concluyó que las aproximaciones de los SLA no sólo sirven para cuantificar las irreversibilidades sino también tienen implicancia directa en dos áreas bien específicas de las actividades humanas, como son el área ambiental así como el área económica. En el área ambiental, se han trabajado con las aproximaciones de SLA, lográndose identificar

tres relaciones entre la exergía y el ambiente, estas son la creación de caos, la degradación de los recursos y las emisiones de pérdida de exergía. En el área económica, los investigadores han relacionado las definiciones termodinámicas con las disciplinas económicas con el objeto de optimizar el diseño de sistemas energéticos, estos métodos son: el termo económico, el de costos de segunda ley y el exergoeconómico, métodos que a través de sus análisis reconocen que la exergía, no la energía, es la materia prima de valor en un sistema, entonces se le asigna costos y/o precios a las variables exergéticas.

En el afán del hombre por optimizar el funcionamiento y operación de los sistemas que utiliza, se han generado nuevas metodologías para lograr este objetivo, uno de estos métodos es el análisis de exergía, el cual ha logrado gran aceptación en plantas cuyo objetivo es la producción de energía útil, sin embargo aún se continua investigando hasta que punto este método puede ser generalizado satisfactoriamente a industrias cuyo objetivo no es la producción de energía, pero que sin embargo utilizan cantidades importantes de la misma en sus procesos productivos [20].

En una revisión crítica del método de análisis de exergía, se ha establecido que este método ha demostrado ser completamente satisfactorio desde el punto de vista termodinámico, pero que no es capaz de determinar por si solo el diseño óptimo real de un sistema, por esa razón su uso ha sido asociado generalmente con el análisis económico de costos; lo cual ha llevado al desarrollo de procedimientos basados en la combinación de los métodos económicos y termodinámicos, denominado análisis termo económico, el cual ha sido aplicado a industrias estándares [43] y a equipos de producción de energía térmica, como calderas de vapor [24, 25]. En estas aproximaciones las eficiencias son calculadas vía análisis de exergía y de gastos “no energéticos”, los cuales son

explícitamente relacionados a parámetros técnicos y termodinámicos de los procesos bajo consideración. Desde este punto de vista, la optimización consiste en determinar el punto de diseño y el plan operativo que minimice el costo total, bajo un conjunto apropiado de restricciones financieras, normativas, ambientales y técnicas.

Bajo estas condiciones, Sciubba E. [43] presenta una nueva aproximación para la evaluación de procesos de conversión de energía y sistemas, basada en una representación extendida del diagrama de flujo de sus exergías. Esta aproximación es un intento sistemático de unificar formal y coherentemente los métodos de consumo acumulativo de exergía y termo económicos, y constituir así una generalización de ambos, que sirvan de marco teórico para una comparación cuantitativa de cantidades no energéticas como “labor” e “impacto ambiental”. Denominando a este método contabilidad de exergía extendida (EEA, Extended Exergy Accounting ), donde “exergía extendida” es una nueva cantidad física que es la suma de la exergía física y la exergía agregada de un flujo que es cuantificada empleando balances de exergía.

También existen estudios en los que se han propuesto evaluar el uso de los recursos de un sistema y su influencia sobre el ambiente [51], después de hacer una revisión del tradicional análisis de exergía, análisis que ha llegado a ser la teoría fundamental y herramienta útil en el análisis de sistemas energéticos, de gran aceptación en todo el mundo. Los autores establecen que el análisis de exergía de un sistema esta basado en el método de caja negra, en el cual el sistema es la caja que interactúa con el ambiente a través de transferencias de calor, trabajo y masa, mostrando el modelo físico del análisis de exergía (Figura 2.2).



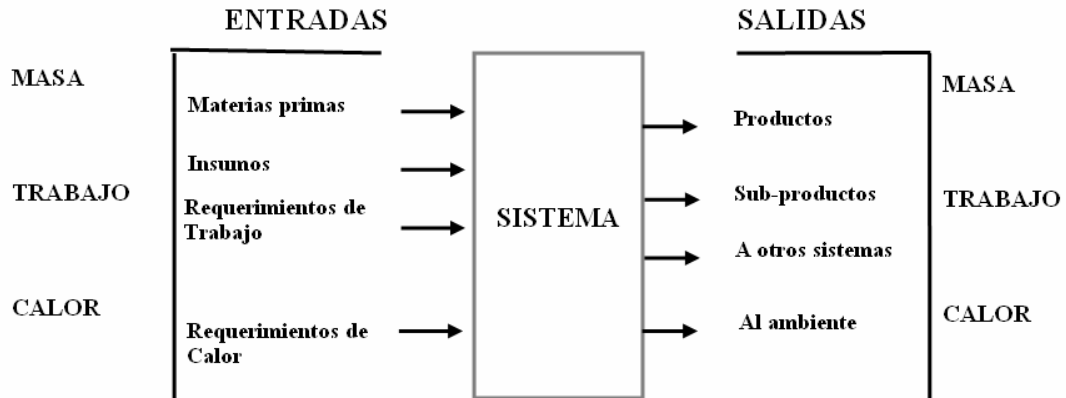


Figura 2.2. Modelo físico del análisis de exergía para un sistema, propuesto por Wang, Y and Feng, X [51].

El modelo presentado en este estudio es el que domina en todos los procesos dentro de la secuencia de producción de harina de pescado. Según Wang, Y and Feng, X [51]. El análisis de exergía puede presentar limitaciones, si este es usado directamente para evaluar la influencia de los sistemas sobre el ambiente, pues tanto la disipación de exergía, la exergía pérdida y los desechos generados por el sistema afectan de manera diferente al ambiente. Entonces proponen dos nuevos conceptos para complementar estas limitaciones, uno es el efecto negativo sobre el ambiente (ENE, environment negative effect) y el efecto negativo del sistema (SNE, system negative effect). Estos índices tecnológicos son usados para evaluar la calidad de un sistema.

El análisis de exergía ha sido aplicado a plantas de producción de energía geotérmica [35], el análisis es realizado a través del estudio de un parámetro denominado índice de exergía específica (SEI, specific exergy indice), la eficiencia basada en la segunda ley de la termodinámica y la razón de eficiencia, los cuales permiten caracterizar la eficiencia de plantas de potencia que utilizan la energía suministrada a partir de fuentes geotérmicas. El término SEI es utilizado para determinar la capacidad que tiene el recurso

geotérmico de estas plantas, para convertir la energía en trabajo útil, a través de las variables de entalpía y entropía. Los resultados obtenidos revelan que las eficiencias obtenidas a partir de las definiciones de segunda ley, es decir utilizando la exergía como variable de trabajo, son mayores que las obtenidas con el primer principio.

Existen aplicaciones del análisis de exergía en la industria petroquímica, aquí se estudian los procesos de separación para evaluar la eficiencia en los procesos químicos de una columna de destilación para la separación de propileno-propano [37]. Este estudio utiliza las definiciones de eficiencia racional junto con la exergía química definida por Kotas [23] y utilizada por Cornelissen [6].

Datos mas específicos se han encontrado en la aplicación de análisis de exergía desarrollado por Stork Comprimo [14], para una parte de una refinería [21] que corresponde a la sección del reactor y destilación, en la que se obtiene una reducción de las perdidas de exergía del 70%.

Se han presentado análisis en los que se reporta la dificultad para determinar la operación de plantas industriales cuando el número de sub-procesos o elementos de los equipos son grandes [10]. Una técnica para evaluar esta situación es la del método matricial del análisis termo económico y la otra es el costo de optimización de la planta, y por medio de un análisis de exergía se pueden determinar el grado de irreversibilidad de los procesos. El estudio muestra las potencialidades del método matricial para calcular los balances de masa y energía y en determinar el costo termo económico de la planta de potencia. Aplicando la teoría de sistemas lineales a balances termodinámicos es posible obtener en forma rápida y flexible la irreversibilidad total de los procesos, sus características exergéticas y las pérdidas de exergía en cada subsistema.

El sector de producción de acero es también objeto de estudio, en este caso a través del método de contabilidad exergética [7]. Este estudio analizaba los flujos de materia y energía en sistemas de producción de acero, los resultados obtenidos fueron comparados con los resultados por otros investigadores. En este estudio se realizaba el análisis de cada uno de los procesos que se llevan a cabo en esta industria, con el objeto de calcular y comparar las pérdidas de exergía y las eficiencias de cada uno de ellos. También se presenta en forma desagregada los valores de exergía correspondientes a los residuos de estos procesos, clasificados como emisiones al aire y efluentes en el agua, así como las limitaciones para caracterizarlos. Para llevar a cabo este trabajo los autores utilizan el balance de exergía, con esto se logra determinar las pérdidas de exergía, es decir, las irreversibilidades de cada proceso, la ecuación es la siguiente:

$$B_{losses} = B_{inputs} - B_{products} - B_{wastes} \quad (2.3)$$

En el área de procesos de combustión, específicamente en motores de combustión interna, también se han realizado análisis basados en la SLT para examinar la destrucción de disponibilidad (exergía) en estos procesos [5]. Este estudio es del tipo analítico y no involucra mediciones experimentales. La fracción de la disponibilidad del combustible que es destruida, debido a la irreversibilidad del proceso, es obtenida en función de la temperatura, presión y la razón entre la mezcla de octano y aire.

El sector de construcción también ha sido objeto de estudio a través del análisis de exergía, aquí se realiza una descripción de los métodos empleados en sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES, thermal energy storage) en edificios, con el objetivo de diseño y de optimización de estos sistemas [13]. Todo TES es caracterizado por tres periodos, un periodo de carga, otro de almacenamiento y por último uno de

descarga, para estas tres condiciones de operación, se ha realizado una extensa presentación de las ecuaciones correspondientes a los balances de energía y exergía, estas relaciones son utilizadas para mostrar, a través de un ejemplo de aplicación, la ventaja del análisis de exergía sobre el de energía.

Trabajos de investigación realizados en el sector de la industria de alimentos son escasos, las industrias que han utilizado el método del análisis de exergía como herramienta para cuantificar el grado de irreversibilidad de sus procesos son la industria azucarera, plantas productoras de leche, plantas de procesamiento de pasta de tomate, industrias de conservas de pescado, líneas de producción de paletizado de alimentos balanceados y la industria de la harina de pescado.

La industria azucarera es la que más ha sido estudiada, básicamente por que el bagazo, producto de la secuencia de producción en la obtención del azúcar esta siendo utilizado como combustible sólido en calderas, de allí la necesidad de caracterizar el potencial térmico para producir energía. Con respecto al bagazo se ha tenido en cuenta que este sufre transformaciones del tipo físico, mas no químico, entonces es considerado como un combustible sólido, para lo cual emplea las expresiones sugeridas por Szargut y otros autores [46], con lo que la exergía del bagazo es función de la fracción en masa de carbón, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno presente en él, así como de su poder calorífico inferior [19].

El azúcar también es obtenida a partir de la remolacha; las disoluciones técnicas de sacarosa se obtiene mediante la difusión en agua de las sustancias contenidas en la

remolacha. En este estudio la exergía del azúcar se obtuvo a partir de parámetros de pureza y materia seca [20].

Análisis de exergía han sido aplicados a procesos de producción de leche con la finalidad de optimizar el uso de la energía en el mismo. Se analizaron equipos como enfriadores, intercambiadores de calor y regeneradores dentro del proceso; así el análisis de exergía revela información importante como por ejemplo que en el homogenizador se debe minimizar la caída de presión, mientras que en los intercambiadores de calor aumentar los coeficientes de transferencia de calor. En este estudio el análisis de exergía es utilizada como una herramienta para administrar racionalmente el uso de la energía en los procesos y equipos. El proceso de optimización esta enfocado en minimizar el uso de los recursos energéticos, mientras que la optimización exegética esta enfocada en minimizar la irreversibilidad y las pérdidas de energía térmica de todo el sistema (planta lechera). Las ecuaciones generadas en este problema de optimización son no lineales y son trabajadas en un programa de computadora denominado GAMS/MINOS. Por ultimo se utilizan las ecuaciones de conservación de masa y energía para obtener las expresiones de exergía con lo que se esta en capacidad de determinar la irreversibilidad en un punto en especifico dentro de la secuencia de producción [16].

La industria de producción de pasta de tomate también ha sido objeto de estudio vía análisis de exergía, en este caso como herramienta de diagnostico para analizar el estado real del funcionamiento de una planta. Rostein E. [40] presenta los criterios apropiados para definir la entalpía y entropía de sustancias alimenticias. En el análisis de exergía se hace énfasis el lo flujos de energía eléctrica suministrada a cada uno de los equipos involucrados en el análisis. Se analizó la pérdida de trabajo por la producción de

entropía del sistema, con el objeto de elaborar una especie de escala en la que se identifique cual es la sección del proceso productivo que contribuye en mayor medida a la ineficiencia total del sistema [40].

Se ha reportado un trabajo sobre análisis de exergía en una industria de fabricación de conservas de pescado en Tailandia, en la que se estudió cuatro de las unidades más importantes de este proceso: la caldera, el “exhausting”, la unidad de calentamiento de salmuera y la unidad de esterilización. En la unidad de “exhausting” se analizó el ingreso y salida de materia prima (pescado), monitoreando su flujo másico y su temperatura para determinar su exergía. Sin embargo en el estudio no hizo ninguna referencia respecto a los criterios utilizados en la determinación de la exergía del pescado [47].

De forma similar Karakus A. A, Boyar S, Akdeniz R.C, Hepbasli A. [22] realizó un análisis de exergía en la industria de producción de alimentos balanceados, en la línea de peletización. Sin embargo el estudio presentó conclusiones sobre los porcentajes de pérdidas (irreversibilidades) en los equipos, sin hacer referencia a los criterios utilizados en el cálculo de la exergía.

Los trabajos de investigación sobre producción de harina de pescado se han enfocado primordialmente en resolver procesos no eficientes en la conversión de la materia prima en harina, aplicando balances de masa; situaciones de contaminación ambiental; cálculo de eficiencias en generación de vapor (utilizando balances de energía, basados en la primera ley de la termodinámica); pérdidas de energía en tuberías de

conducción de vapor aisladas; pérdidas de energía por fugas en trampas de vapor, entre otros.

Balances de masa y energía se han utilizado en el análisis de producción de harina de pescado. Esto para determinar el flujo óptimo de la evaporación del agua contenida en la materia prima generada en el secado para ser recirculado al secador con el objeto de reducir el consumo de combustible en el proceso de producción [48]. Utilizando el mismo enfoque se ha determinado el flujo de vapor saturado para diseñar el economizador y mejorar la eficiencia en la generación de vapor de la planta y reducir el consumo de combustible en la misma [53]. Estudios detallados del proceso de producción, utilizando balances de masa y energía, para optimizar el consumo de energía térmica del proceso de producción también han sido realizados [2].

También han sido reportados estudios respecto a la distribución del consumo de la energía térmica (flujos de vapor saturado) así como de energía eléctrica en este tipo de plantas. Se han reportados valores para el consumo de vapor en toda una planta de harina de pescado, en el orden de  $40.186 \times 10^3 \text{ Kg}_{\text{vapor}}/\text{hr}$ , encontrándose el mayor consumo en la planta evaporadora con 52.6%, seguida de las cocinas con el 38% [19]. La distribución de la energía térmica en plantas con tecnología de cocción y secado del tipo directo representa el 94.2% de la totalidad de la energía consumida, mientras que la energía eléctrica es del 5.8% del total [38]. Lo anterior revela que los procesos térmicos son predominantes. La energía térmica primaria está repartida en el secador, cocinador y el caldero. El gran consumidor de vapor saturado resultó ser la cocina con el 95% del consumo total [38].

El único trabajo que ha sido encontrado para la industria de producción de harina de pescado, realiza una optimización de los procesos térmicos mediante evaluación exergética y termo económica. Este trabajo es relevante porque presenta de manera esquemática la degradación de la energía en los procesos de producción tanto desde el punto de vista energético como exergético, con el objeto de hacer una valoración económica que permita optimizar el proceso de producción de harina de pescado. En este trabajo las expresiones para la entalpía, entropía y en consecuencia para la exergía son expresadas sólo en función de flujos de masa, valores promedios de calores específicos y temperaturas de operación de la sustancia de trabajo. Todo lo anterior bajo la presunción de que el pescado esta constituido por un elevado porcentaje de agua (75% expresado en fracción en peso), que le permite ser modelado como una sustancia liquida [28]. Este tipo de presunción no es necesariamente real, puesto que el pescado dentro de la secuencia de producción esta siendo sometido a procesos con fuerte impacto térmico y mecánico que afectan su composición física y química.

En la industria de producción de harina de pescado la materia prima es monitoreada en toda la secuencia de producción a través de su composición expresada en porcentaje en peso de las proteínas, grasas y agua que la constituyen. Es en esta dirección que se necesita definir una expresión termodinámica para la exergía del pescado que modele el comportamiento de estos componentes cuando son sometidos a procesos térmicos.

El presente trabajo de investigación está enfocado en determinar el grado de irreversibilidad de dos equipos un proceso productivo cuyo objetivo no es la producción



de energía, pero que sin embargo hace uso intensivo de la misma, para lo cual se utiliza el método del análisis de exergía como una herramienta de diagnóstico energético.

La revisión de literatura ha proporcionado abundante información de la aplicación exitosa del análisis de exergía en diferentes tipos de procesos, así como los criterios empleados en la caracterización de la sustancia de trabajo para los mismos a través de la exergía. En el sector relacionado a las industrias que trabajan con sustancias de origen alimenticio sin embargo las investigaciones han revelado una fuerte limitación en cuanto a información y criterios empleados para determinar la exergía de este tipo de sustancias.

La contribución principal de este trabajo de investigación es desarrollar criterios apropiados para caracterizar a través de la entalpía y entropía de la sustancia de trabajo (pescado) la exergía de la misma, utilizando como datos de entrada información referente a su composición química (sólidos, grasas y agua) como función únicamente de su fracción en peso. Lo anterior va a permitir observar el comportamiento de la exergía en la sustancia de trabajo cuando es sometida a procesos de tratamiento térmico. Este tipo de información ha sido escasamente reportada en trabajos de investigación similares. Para lograr este objetivo se utilizan modelos experimentales que estudian el comportamiento termodinámico de su calor específico y entalpía, las cuales permitirán obtener expresiones para entropía que junto con la entalpía y temperatura definirán la exergía de la sustancia de trabajo.

Por último la presente investigación presenta el análisis de exergía en los procesos de cocción y secado en una industria de producción de harina de pescado que permitirá cuantificar el grado de irreversibilidad de estos procesos.

La tabla 2.4 resume los trabajos más relevantes respecto a la aplicación del análisis de exergía en procesos, así como de la caracterización termodinámica de sustancias alimenticias.

<b>AUTOR</b>	<b>Análisis de Primera Ley de la Termodinámica: Energía y masa</b>	<b>Análisis de Segunda Ley de la Termodinámica: Entropía y exergía</b>
Polley S. et al.(1980)	Valores experimentales de calor específico, coeficientes conductivos, entalpías en sustancias alimenticias.	N/I
Medina M, and Mendieta O. (1998)	Ecuaciones entalpía molar para harina de pescado, función de temperatura y actividad de agua.	Entropía molar para harina de pescado, función de temperatura y actividad de agua.
Chang H. and Tao L. (1981)	Ecuaciones calor específico, entalpía y temperaturas, función del contenido de agua para peces.	N/I
Chen C. (1985)	Ecuaciones calor específico aparente y entalpía, función del contenido de sólidos, peso molecular aparente, temperatura de referencia y congelamiento, para peces.	N/I
Guallar J. y Valero A. (1988)	Balances de masa y energía para transferencia de materia, trabajo y calor.	Exergía de sustancias alimenticias función de calor específico, temperatura de disolución y actividad de agua.
Rostein E. (1983)	Balances de masa y energía para transferencia de materia, trabajo y calor. Criterios para el cálculo de entalpía de sustancias alimenticias función de calor específico, temperatura.	Criterios de entropía de sustancias alimenticias función de calor específico, temperatura y número de átomos en la macromolécula.

Fang Z., Larson D. y Fleischmen G. (1995)	Balances de masa y energía para transferencia de materia, trabajo y calor. Ecuación entalpía función calor específico, presión y temperatura.	Ecuaciones balance de exergía, función de calor específicos promedios y temperatura. Leche modelada como agua.
Taprap R. And Phutthame K. (2003)	Balances de masa y energía para transferencia de materia, trabajo y calor. No detalles sobre determinación de entalpía para pescado.	Balance de exergía para materia prima y combustible. Ningún detalle para determinar exergía de pescado.
Karakus A. A, Boyar S., Akdeniz R. C., and Hepbasli A. (2002)	Balances de masa y energía para transferencia de materia, trabajo y calor.	Ecuaciones balance de exergía, función de entalpía y entropía. Ningún detalle para determinar exergía.
Narváez W. (2003)	Balances de masa y energía para transferencia de materia, trabajo y calor. Entalpía para pescado asumida función de calor específico y temperatura.	Balance de flujos de exergía función de calor específico y temperatura. Planta harina de pescado.
Este Trabajo	Ecuaciones de entalpía entropía, función del contenido de sólidos, peso molecular aparente, temperatura de referencia y congelamiento, para peces.	Ecuaciones para exergía física para peces, amplio rango temperaturas (10-100°C). Ratios de destrucción y pérdida de exergía.

Tabla 2.4: Trabajos realizados sobre caracterización termodinámica de sustancias alimenticias y análisis de exergía en procesos industriales (No Investigado).

## CAPITULO 3

### FUNDAMENTO TEORICO

#### 3.1 Principios básicos termodinámicos en el análisis de sistemas

El análisis termodinámico nos permite determinar las características termodinámicas de un sistema bajo estudio, donde un sistema es la región o conjunto de materia en el espacio que es seleccionada para su análisis.

El análisis termodinámico de sistemas, utiliza los principios de conservación de masa y de la energía, para cuantificar la interacción del sistema con su entorno, consigo mismo o con otro sistema, cuando se analizan procesos industriales compuestos por un número específico de equipos interconectados entre si. En términos generales, el análisis termodinámico permite cuantificar las transferencias de energía, a través de interacciones de calor y trabajo, así como las transferencias de masa cruzando sus fronteras, cuando el sistema se encuentra en un estado específico para su análisis.

El análisis aplicado a un sistema abierto (figura 3.1), también denominado volumen de control, desde el punto de vista termodinámico, establece las siguientes formulaciones para los principios de conservación de masa y energía, respectivamente:

$$\sum_{in} \dot{m}_i - \sum_{out} \dot{m}_e = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad (3.1)$$

$$\dot{Q} - \dot{W}_{net} + \sum_{in} \dot{m}_i \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_i - \sum_{out} \dot{m}_e \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_e = \frac{dE_{vc}}{dt} \quad (3.2)$$

Por otro lado, la propiedad de la entropía, está relacionada a la segunda ley de la termodinámica (SLT). La entropía puede ser una cantidad positiva, negativa o cero. La limitación de positividad está relacionada a la generación de entropía, esta definición es utilizada cuando se analizan procesos irreversibles [23]. Solamente la energía y la masa están sujetas a balance, la entropía no esta sujeta a balance y su representación matemática toma la siguiente forma:

$$\dot{S}_{gen} = \frac{dS_{vc}}{dt} - \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i \geq 0 \quad (3.3)$$

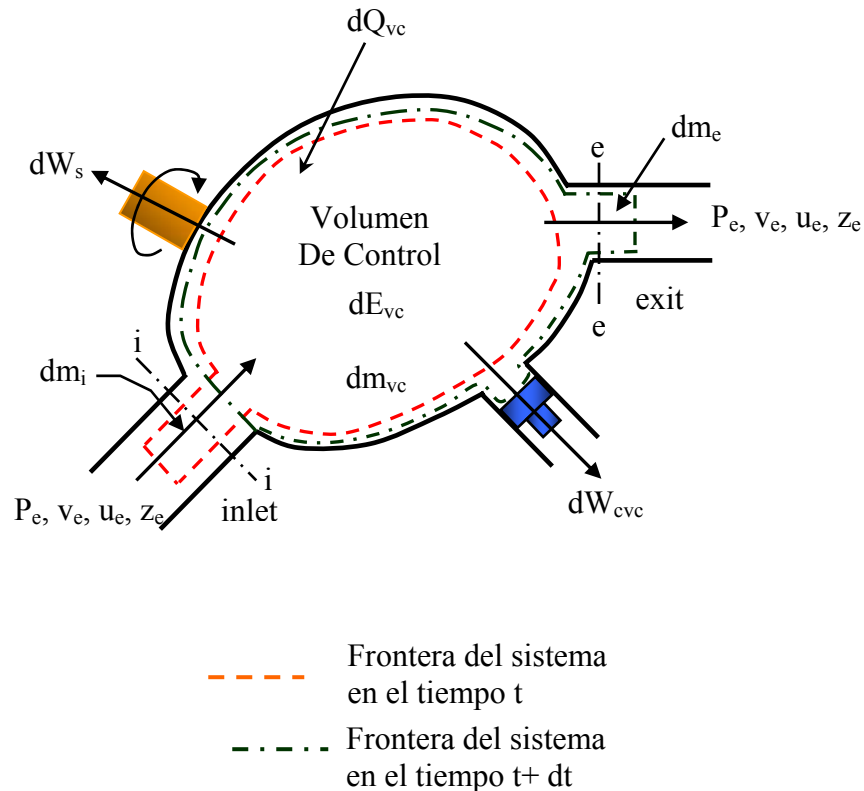


Figura 3.1 Volumen de control mostrando las transferencias de masa y energía.

Considerando un sistema abierto operando bajo condición de estado estacionario (Figura 3.1) implica que las propiedades del sistema como densidad, energía específica y entropía específica no cambian con el tiempo. Sin embargo, tales propiedades pueden variar espacialmente de un punto a otro dentro del volumen de control. En consecuencia, si el sistema opera de esta forma, los términos de la forma  $d/dt = 0$ , en las ecuaciones 3.1 a 3.3 desaparecen y, toman la forma siguiente:

$$\sum_{in} \dot{m}_i = \sum_{out} \dot{m}_e \quad (3.4)$$

$$\dot{Q} - \dot{W}_{net} = \sum_{out} \dot{m}_e \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_e - \sum_{in} \dot{m}_i \left( h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_i \quad (3.5)$$

$$\dot{S}_{gen} = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} \geq 0 \quad (3.6)$$

Las ecuaciones 3.4 y 3.5 constituyen las ecuaciones de conservación y son la herramienta principal para analizar sistemas abiertos, que son los sistemas que caracterizan a un gran número de procesos industriales.

### 3.2 Procesos Irreversibles

Las relaciones establecidas por la primera y segunda ley de la termodinámica, para el análisis un sistema en particular, han sido obtenidas en base a premisas en las cuales el sistema, para pasar desde un estado inicial a otro final, pasa por una serie de

estados de equilibrio, los cuales son idealizaciones que facilitan describir en términos matemáticos los procesos reales, es decir los procesos irreversibles.

La irreversibilidad de un proceso es establecida en la ecuación 3.6, a través de la SLT, en consecuencia un proceso irreversible está inevitablemente asociado a un incremento en la generación de entropía del sistema bajo análisis.

El objetivo final en el análisis de un sistema utilizando los principios de la segunda ley de la termodinámica es ser capaz de reconocer las irreversibilidades, evaluar su influencia y, desarrollar los medios efectivos para reducirlas. La exergía es una propiedad termodinámica que está presente cuando se analizan procesos reales, es decir de procesos irreversibles.

### **3.3 Exergía<sup>2</sup>**

El máximo trabajo útil que puede ser obtenido a partir de una forma de energía dada, usando los parámetros ambientales como estado de referencia, es la exergía; esta propiedad es también utilizada en el análisis de sistemas térmicos. La diferencia entre los balances de exergía y energía, es 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 [23].

---

<sup>2</sup> La exergía es la medida cuantitativa de la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un desequilibrio entre un sistema físico y el ambiente que lo rodea, o entorno; determina de forma cuantitativa el valor termodinámico de cualquier recurso y permite analizar rigurosamente el desperdicio de los recursos en las actividades de una sociedad, estableciendo pautas cuantitativas para su ahorro y uso eficiente. Tomado de: [www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia20/HTML/articulo08.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia20/HTML/articulo08.htm)

De la misma forma en que se analiza un sistema abierto (volumen de control), a través de un balance de energía, los mismos criterios aplican a los balances de exergía. En ambos, tres tipos de transferencia de energía atraviesan la superficie de control, estas son:

- Transferencia de trabajo.
- Transferencia de calor.
- Transferencia de energía asociada a la transferencia de masa.

### 3.4 Balance de Exergía en Sistemas Abiertos

Así como la masa, energía y entropía, la exergía también es una propiedad, entonces ésta puede ser transferida hacia dentro o hacia fuera del volumen de control (VC) cuando las corrientes de materia ingresan y salen de él (Figura 3.2).

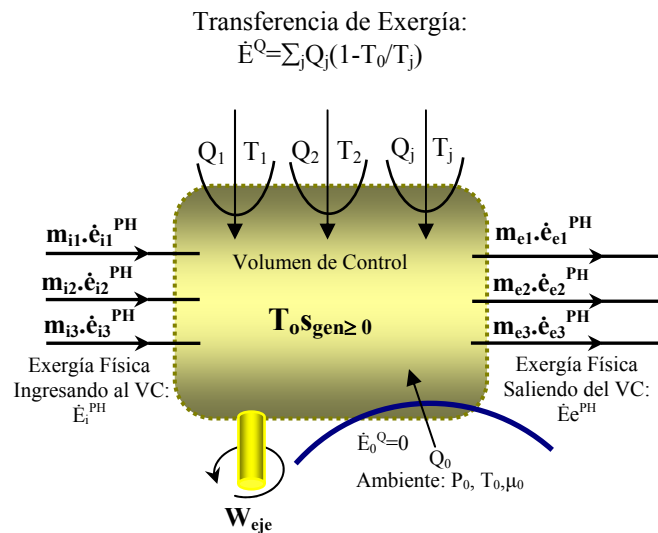


Figura 3.2. Flujos de exergía asociados a un volumen de control.



Teniendo en cuenta el volumen de control mostrada en la Figura 3.2, se desarrolla la expresión para el balance de exergía a través de la combinación de las expresiones para los balances de energía 3.2 y entropía 3.3.

$$\underbrace{\frac{dE_{vc}}{dt}}_{\substack{\text{Razon} \\ \text{de} \\ \text{cambio} \\ \text{de} \\ \text{Exergía}}} = \underbrace{\sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{vc} - p_o \frac{dV_{vc}}{dt}\right) + \sum_i \dot{m}_i e_i - \sum_e \dot{m}_e e_e}_{\substack{\text{Razon} \\ \text{de} \\ \text{Transferencia} \\ \text{de} \\ \text{Exergía}}} - \underbrace{E_D}_{\substack{\text{Razon} \\ \text{de} \\ \text{Destruccion} \\ \text{de} \\ \text{Exergía}}} \quad (3.7)$$

El término del lado izquierdo de la ecuación 3.7 representa la razón de tiempo de cambio en la exergía del volumen de control, el término  $\dot{Q}_j$  representa la razón de tiempo de la transferencia de calor ubicada sobre la frontera del volumen de control donde la temperatura instantánea es  $T_j$ . La ecuación 3.7 puede ser expresada en términos de la variable exergía.

Exergía asociada a la transferencia de calor:

$$\dot{E}_{q,j} = \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j \quad (3.8)$$

Exergía asociada a la transferencia de trabajo y trabajo de flujo:

$$\dot{E}_w = \dot{W}_{vc} - p_o \frac{dV_{vc}}{dt} \quad (3.9)$$

Exergías asociadas a las corrientes de materia ingresando y abandonando el volumen de control:

$$\dot{E}_i = \dot{m}_i e_i \quad (3.10)$$

$$\dot{E}_e = \dot{m}_e e_e \quad (3.11)$$

La razón de tiempo de la destrucción de exergía debido a las irreversibilidades dentro del volumen de control:

$$\dot{E}_D = T_o \dot{S}_{gen} \quad (3.12)$$

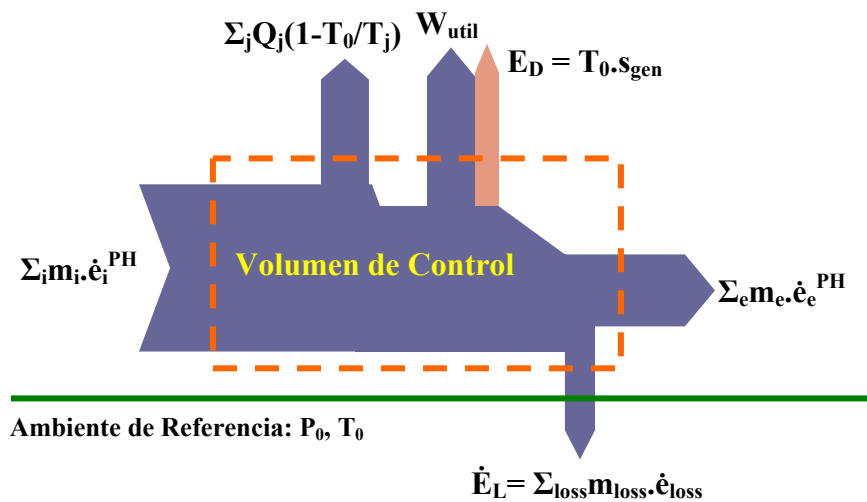
Utilizando las ecuaciones 3.7 a 3.12 para analizar el volumen de control bajo la condición de estado estable ( $dE_{vc}/dt = 0$ ), la ecuación 3.7 toma la forma:

$$0 = \sum_j \dot{E}_{q,j} - \dot{E}_w + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e - \dot{E}_D \quad (3.13)$$

La ecuación 3.13 establece que la razón a la cual la exergía es transferida hacia el volumen de control excede a la razón a la cual la exergía abandona el mismo, la diferencia entre las dos es la exergía destruida en el interior del volumen de control, debido a las irreversibilidades.

En otras palabras el balance de exergía establece la ley de degradación de la energía, una representación ilustrativa de este balance es mostrado en la figura 3.3 [3].

Figura 3.3. Distribución de los flujos de exergía en un volumen de control.



El término definido como destrucción de exergía debido a las irreversibilidades internas del sistema (ecuación 3.12) es conocido también como el Teorema de Gouy-Stodola. Este teorema establece que la razón de destrucción de irreversibilidades de un proceso es proporcional al producto de la razón de la producción de entropía de todo el sistema por la temperatura ambiente. Kotas [23] expresa el teorema de la siguiente forma:

$$\dot{I} = T_o \left[ \sum_{out} \dot{m}_e s_e - \sum_{in} \dot{m}_i s_i - \sum_r Q_r \right] \quad (3.14)$$

La ecuación 3.13 en combinación con las ecuaciones para los balances de masa, energía y entropía se convierten en las herramientas para analizar sistemas abiertos o procesos industriales, desde el punto de vista termodinámico.

### 3.5 Criterios de eficiencia utilizados en el análisis de exergía

Desde el punto de vista del análisis de exergía, todo sistema abierto interactúa con su entorno a través de flujos de exergía, los cuales se encuentran asociados de manera directa o indirecta a combustibles fósiles o a alguna otra forma de recursos energéticos. En consecuencia su uso genera destrucción y pérdida de su exergía durante la operación del sistema, que no es sino la destrucción y pérdida del recurso energético. Bejan [3], establece que el análisis de exergía involucra el cálculo de medidas de rendimiento en un sistema termodinámico, a través de los siguientes parámetros:

- i. Eficiencia exergética.
- ii. Razón de destrucción de exergía.
- iii. Razón de pérdida de exergía.

### 3.5.1. Eficiencia exergética:

La eficiencia exergética es un parámetro importante utilizado en el análisis de exergía, para su utilización es necesario identificar los flujos de materia que interactúan con el sistema, una es el denominado “*producto*” y la otra el “*fuel*”. El criterio “*producto*” debe ser consistente con la función para la que ha sido construido el sistema. Mientras que el criterio “*fuel*” debe plasmar la representación de los recursos energéticos utilizados para generar el producto en el sistema y, no necesariamente debe ser un combustible real (gas, petróleo o carbón); tanto el “*producto*” como el “*fuel*” están expresados en términos de exergía.

Si tenemos, en forma general, a un sistema operando en estado estable y, es analizado en base exergética (Figura 3.3), la razón a la cual el “*fuel*”,  $\dot{E}_f$ , es suministrado y el “*producto*”,  $\dot{E}_p$ , es generado, este sistema es definido a través del análisis de exergía como:

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_D + \dot{E}_L \quad (3.15)$$

Bajo estas definiciones, la eficiencia exergética,  $\varepsilon_{ex}$ , es la razón entre el producto y el fuel:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = 1 - \frac{\dot{E}_D + \dot{E}_L}{\dot{E}_F} \quad (3.16)$$

La eficiencia exergética muestra qué porcentaje de la exergía del “*fuel*” suministrada al sistema es encontrada en la exergía del “*producto*”.

### 3.5.2. Razones de destrucción y pérdida de exergía:

Los valores de la razón de destrucción de exergía  $E_D$  y de pérdida de exergía  $E_L$  proporcionan la medida termodinámica de las ineficiencias del sistema. A partir de este

tipo de mediciones se generan las denominadas razones de destrucción de exergía  $y_D, y_D^*$  y la razón de pérdida de exergía  $y_L$

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (3.17)$$

$$y_D^* = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{D,tot}} \quad (3.18)$$

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (3.19)$$

Como mencionamos anteriormente, el proceso o sistema a ser analizado puede ser sub-dividido en sub sistemas, con el objeto de facilitar el análisis, entonces con la ecuación 3.17 se esta realizando la comparación de la destrucción de la exergía de un componente del sistema contra la razón de exergía del combustible o recurso energético suministrado al sistema total. En la ecuación 3.18 se realiza la comparación de la destrucción de la exergía de un componente del sistema contra la destrucción total de exergía dentro del sistema, el mismo criterio es aplicado a la ecuación 3.19.

Desde el punto de vista de las razones de exergía, la reducción en la eficiencia total del sistema, causada por la destrucción y pérdida de exergía es:

$$\varepsilon_{ex} = 1 - \sum y_D - \sum y_L \quad (3.20)$$

La ecuación 3.20 es utilizada para determinar la eficiencia total de un sistema que esta formado por un número grande de equipos, de los cuales se pueden de terminar sus respectivas razones de destrucción y perdida de exergía.

Otros dos parámetro importantes utilizados en la evaluación del funcionamiento de sistemas la efectividad ( $\varepsilon$ ) y la “mejora potencial” (Ptm).

La efectividad de un sistema es definida a partir de la irreversibilidad del sistema y es una medida cuán bien el sistema es capaz de producir un incremento deseado de exergía, se expresa como:

$$\varepsilon = 1 - \frac{Irr}{Exergia\ Neta\ Suplida} \quad (3.21)$$

La denominada “mejora potencial” de un sistema es una medida de cuanto y con qué facilidad el sistema puede ser mejorado para propósitos de optimización y es obtenida a partir de irreversibilidad y la efectividad del sistema, se define como:

$$Ptm = Irr.(1 - \varepsilon) + E_{efl} \quad (3.22)$$

La ecuación (3.22) está formada por tres tipos de contribuciones. El potencial relativo  $(1 - \varepsilon)$  que es una medida de con que facilidad puede ser mejorado; si la efectividad es muy baja el potencial relativo alcanza un valor alto, entonces el sistema puede ser mejorado con bastante facilidad. El potencial absoluto ( $Irr$ ) es una medida de cuanto un sistema puede ser mejorado. Por último el potencial ambiental ( $E_{efl}$ ) es la medida de cuanto un sistema puede ser mejorado si se utilizan los flujos de exergía perdidos por el sistema en lugar de expulsar sus exergías al medio ambiente.

### **3.6 Viabilidad de la aplicación del modelo de sustancia incompresible**

En esta sección se definen las propiedades termodinámicas de entalpía y entropía, bajo el modelo de sustancia incompresible. Bajo el modelo de sustancia incompresible, que aplica a sustancias sólidas y líquidas (bajo condiciones especiales de temperatura y presión), se establece que el volumen específico (densidad) es a menudo presumido como constante y que la energía interna específica como función única de temperatura [3, 23, 27]. Para una sustancia bajo este modelo, los calores específicos a volumen y presión

constante son iguales y, la entalpía varia tanto con la temperatura y la presión, las relaciones son de la forma:

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad (3.23)$$

$$c_v = c_p = c \quad (3.24)$$

$$h(T, p) = u(T) + pv \quad (3.25)$$

Otra relación importante para este tipo de sustancias es la expresión para el cambio de entropía específica.

$$\Delta s = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c(T)}{T} dT \quad (3.26)$$

La entropía de una especie en particular, puede ser determinada considerando que el calentamiento de la sustancia se realiza a presión constante, desde su estado sólido a su estado gaseoso [52]. A presión constante el cambio de entropía de cualquier fase para la sustancia (sólido, líquido o gas) debido a una variación de temperatura y es dado por:

$$\Delta s = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dh}{T} = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} \quad (3.27)$$

## **CAPITULO 4**

### **CARACTERÍSTICAS TERMODINÁMICAS DEL PROCESO DE PRODUCCION DE HARINA DE PESCADO**

#### **4.1 Secuencia del proceso productivo**

La harina de pescado es un polvo fino obtenido del cocinado, prensado, secado y molido de la materia prima (anchoveta). Es una fuente de alimentación, con un alto contenido en proteínas, que es usado como ingrediente en la elaboración de alimentos balanceados para la avicultura, la acuicultura, la ganadería y animales de compañía.

Con el objeto de tener una idea mas clara de los principios de producción de harina y aceite de pescado, es necesario considerar la materia prima (pescado) formada por tres componentes predominantes: sólidos (materia seca libre de grasa), grasas y agua. Entonces el proceso de producción consiste en separar cada uno de estos componentes tanto como sea posible, hasta obtener un producto estable.

La materia prima puede ser reducida a harina y aceite a través de distintos métodos. El común denominador de estos métodos esta dada por la siguiente secuencia de producción, Figura 4.1.

Una idea mas clara de todo este proceso de producción la podemos apreciar en la representación esquemática dada en la Figura 4.2.



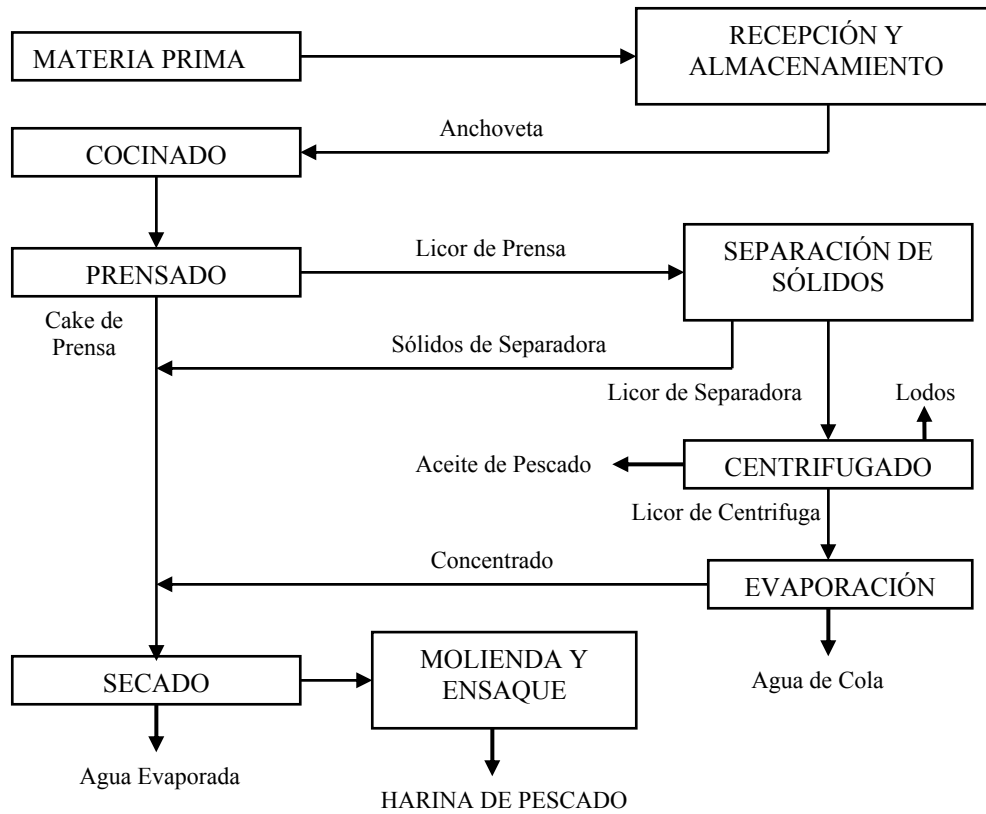


Figura 4.1 Secuencia de producción de harina de pescado [38].

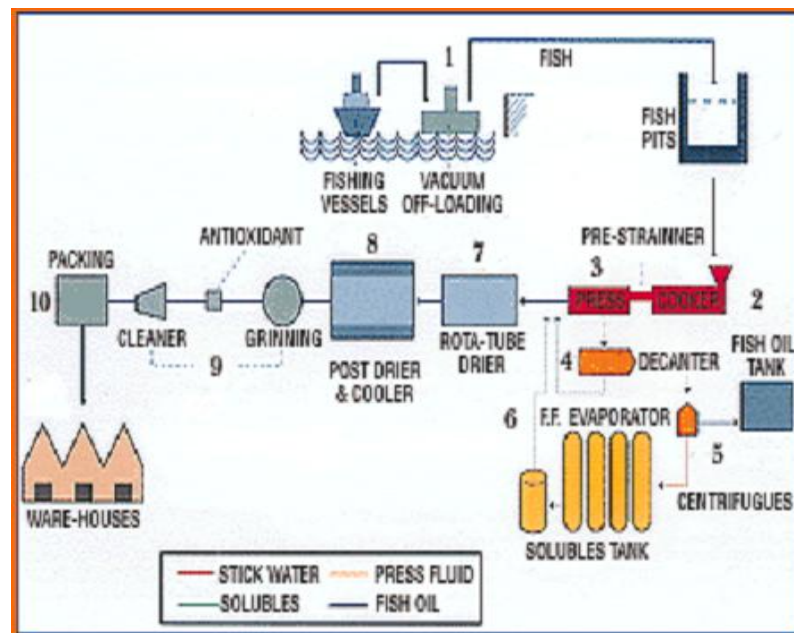


Figura 4.2 Esquema de la secuencia de producción de harina de pescado [38].

Esta secuencia de producción es dividida en los siguientes procesos:

- i. **Descarga y Almacenamiento:** Corresponde a la recepción de la materia prima (pescado anchoveta) por bombeo desde la embarcación y almacenado en una poza de recepción.
- ii. **Cocción:** Consiste en el cocinado de la materia prima con el aporte indirecto del vapor saturado generado en el caldero. En este proceso se produce la coagulación de las proteínas y el rompimiento de las células adiposas que se eliminan como agua y aceite. Con el objeto de que el cocinado sea óptimo el rango de temperatura mínima que se debe alcanzar está entre 90-95°C y el tiempo de cocción entre 10 a 20 minutos.
- iii. **Pre-Desaguado:** En esta etapa se efectúa un drenaje previo al prensado, con el objeto de que la masa directamente cocinada pueda ser tomada por la prensa sin disminuir en forma considerable su rendimiento, como el de todo el proceso.
- iv. **Prensado:** Consiste en la separación de la materia prima cocinada y predesaguada en dos fases, una denominada “cake de prensa” con una cantidad mínima de humedad y lípidos, y la otra fase compuesta por un licor pobre en sólidos definido como “licor de prensa” La temperatura de operación del prensado debe ser lo más cercana a la de la cocina.
- v. **Separación:** En esta secuencia el licor de prensa es alimentado a las denominadas “separadoras de sólidos” con el objeto de separar este licor en dos fases, una compuesta por sólidos insolubles conocidos como “sólidos de separadora”; la otra fase liviana que corresponde al “licor de separadoras”.

- vi. **Centrifugación:** El “licor de separadoras” es inyectado a la zona de centrifugación, éste licor está compuesto de lípidos, un porcentaje reducido de lodos y un componente líquido llamado “agua de cola”. Después del proceso de centrifugación los productos finales obtenidos son aceite, lodos y agua de cola.
- vii. **Evaporación:** Esta etapa está constituida por la planta de concentración o “planta de agua de cola” conformado por un conjunto de evaporadores al vacío. El propósito es concentrar el contenido de sólidos del “agua de cola” desde cerca del 7% hasta la obtención de un concentrado de gran valor proteico con un contenido de 35% de sólidos. Este concentrado es adicionado junto con la “cake de prensa” para alimentarlo en la zona de secado.
- viii. **Secado:** En este proceso la “cake de prensa” es adicionada junto con el concentrado al secador donde es deshidratado hasta obtener un producto final con contenido de humedad entre 6.5-10%. El sistema de secado es del tipo indirecto, no hay contacto entre el medio portador de energía (vapor saturado) y la materia prima a secar. El tiempo promedio de secado es de 45 minutos.
- ix. **Molienda:** El producto obtenido después de ser secado es molido, con el objeto de que el producto final: harina de pescado, satisfaga las condiciones y especificaciones sobre tamaños máximos y mínimos de sus partículas.

La harina de pescado obtenida después del proceso de molienda es transportada por medio de ventiladores centrífugos donde se enfría hasta alcanzar las temperaturas de almacenaje recomendadas. El producto final, después de pasar por los ventiladores, es

colectado en ciclones para luego adicionarle los antioxidantes para el posterior envasado y venta.

Dentro de toda esta secuencia de producción los procesos de cocción y secado son los que utilizan grandes flujos de energía térmica (vapor saturado) y por la naturaleza del tratamiento que recibe la materia prima en estos dos procesos, afectando su composición química y física, estos influyen dramáticamente en la calidad del producto final convirtiéndose en los dos puntos críticos a ser analizados en esta trabajo de investigación [48, 2, 44, 38].

## **4.2 Composición de la materia prima y del producto**

Toda industria procesadora de harina de pescado requiere el uso de grandes cantidades de materia prima, en ese sentido es necesario conocer el tipo de especie disponible para su procesamiento, dependiendo de la composición de la especie a trabajar, así como de los procesos utilizados para la obtención del producto final, se obtendrá un tipo específico de harina de pescado.

En el pescado, el contenido en proteínas es bastante constante, mientras que las proporciones de agua y grasa son mucho más variables entre especies. Los valores de estos dos parámetros están inversamente relacionados, de forma que aquellos pescados que presentan un mayor porcentaje de grasa tienen un menor contenido acuoso y viceversa, la tabla 4.1 incluye el porcentaje de cada componente que está referido a la porción comestible [18].

Valores sobre la composición promedio para la materia prima han sido presentados para la anchoveta, explicándose en forma detallada la presencia de cada uno de sus componentes y, como estos contribuyen o afectan la calidad de la harina de pescado, cuando estos son sometidos a los diferentes procesos térmicos y mecánicos en el proceso de producción, tabla 4.2 [4, 2].

Especie	Agua (%)	Proteína (%)	Grasa (%)	Minerales (%)
Anchoveta	78.0	18.0	6.0	2.5
Arenque	63.0	17.0	18.0	1.3
Sardina	74.0	19.0	5.0	1.2
Caballa	68.0	19.0	12.0	1.3
Atún	62.0	22.0	16.0	1.1

Tabla 4.1: Composición física promedio de diferentes especies de pescado [4, 2].

Especie	Agua (%)	Proteína (%)	Grasa (%)	Carbohidratos (%)	Minerales (%)
Anchoveta	70.0-85.0	10.0-21.0	1.0-11.0	0.5-1.0	1.0-2.5

Tabla 4.2: Composición física promedio de anchoveta [2].

Es de suma importancia conocer la composición física de la harina de pescado. Al respecto es de esperar que cada investigador presente una composición particular para la harina de pescado, pues como hemos visto en los párrafos anteriores, esta dependerá de la composición de la materia prima y del estado de frescura al momento de su procesamiento, así como las tecnologías empleadas en su fabricación [2, 18], en la tabla 4.3 se muestra esta composición, para harina de pescado utilizando como materia prima anchoveta.

También se han presentado valores promedios para la harina de pescado en función del tratamiento al que es sometida la materia prima, así como al de su composición química [2].

Parámetros	Valor Promedio
Humedad (% máx.)	10.0
Proteína (%min.)	65.0
Grasas (%máx.)	12.0
Sales minerales (cenizas) (%máx.)	15.0
Cloruros (%máx.)	3.0
Arena (%máx.)	2.0

Tabla 4.3: Composición promedio de harina de pescado [2,18].

#### **4.3 Propiedades Termodinámicas de la Materia Prima en el Proceso de Producción de Harina de Pescado**

Cuando los análisis termodinámicos de sistemas involucran sustancias de trabajo que poseen características de composición química compleja, es necesario encontrar expresiones matemáticas que permitan modelar de forma adecuada su comportamiento, cuando estas son sometidas a un proceso en particular. Es en esta dirección que presentamos las expresiones que nos permitirán caracterizar termodinámicamente a la sustancia de trabajo.

En primer lugar es importante señalar que la sustancia de trabajo en estudio corresponde a la *anchoveta* (*Engraulis ringens*), la cual es sometida durante toda la secuencia de producción, a tratamientos térmicos y físicos para eliminar el alto contenido de agua presente en su composición, ver Tabla 4.1, hasta la etapa final que es la

obtención de la harina de pescado, producto con elevado contenido en proteínas y bajo nivel de agua, ver Tabla 4.3. La anchoveta peruana (*Engraulis ringens*), es una de las especies hidrobiológicas más abundantes en el Océano Pacífico Sur y en el Perú se destina usualmente a la elaboración de harina y aceite [2, 3,43].

En segundo lugar hacemos notar que la información respecto a esta especie (anchoveta) ha sido poco reportada, en lo que a propiedades termodinámicas se refiere, es decir respecto a su calor específico, entalpía y entropía, y mucho menos en estudios que involucren los procesos de producción de harina de pescado [26].

En tercer lugar la estrategia utilizada para caracterizar termodinámicamente a la materia prima de forma racionalmente válida para los modelos presentados, es utilizando el criterio presentado por Rao, M y Rizvi, S [36], criterio explicado en el capítulo 2. Con la exposición de los trabajos realizados sobre la caracterización termodinámica de sustancias alimenticias realizadas en el capítulo 2, hemos podido conocer el comportamiento de propiedades como el calor específico y entalpía para sustancias alimenticias, así como también para el pescado.

Con respecto a la entalpía, ésta presenta un comportamiento bien definido cuando la sustancia es sometida a tratamiento térmico. Posee una tendencia hiperbólica cuando la sustancia se encuentra a temperaturas por debajo del punto de congelamiento del agua contenida en ella y, tendencia lineal para temperaturas sobre este punto [31, 8, 32, 11, 1, 54, 36]. En todos los casos el problema en la caracterización de la entalpía es determinar el valor de referencia. Cuando el análisis de la entalpía es realizada sobre el punto de congelamiento, la entalpía de referencia es tomada en el punto donde inicia el congelamiento del agua contenida en la sustancia y, como el valor de temperatura es

tedioso de determinar, ésta ha sido expresado en función de una arbitraria de referencia [11]. En el área de ciencia e ingeniería de alimentos, la entalpía de referencia es a menudo tomada a  $-40^{\circ}\text{C}$ . La figura 4.3 muestra el comportamiento característico de la entalpía para una sustancia alimenticia.

La caracterización del calor específico es determinante, debido a que esta propiedad es la base termodinámica para definir a la entalpía, la entropía, y en consecuencia, la exergía de la materia prima. Esto basado en las definiciones propuestas en el modelo de sustancia incompresible.

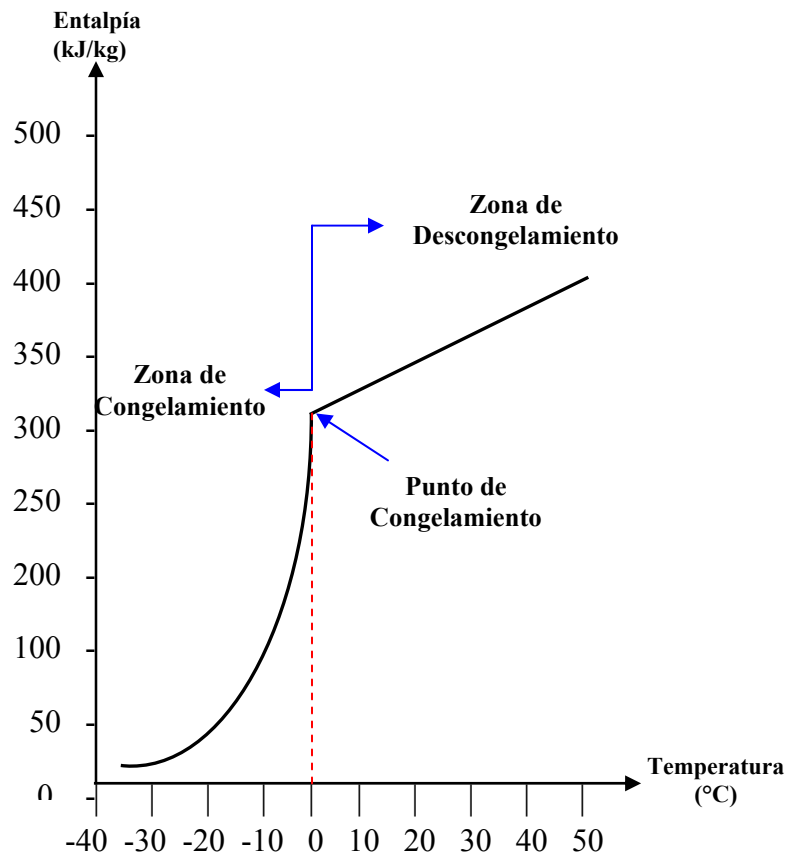


Figura 4.3 Comportamiento característico de la entalpía para sustancias alimenticias [31, 8, 32, 11, 36].



#### 4.3.1. Calor Especifico y Entalpía de Pescado

En esta sección presentamos las expresiones utilizadas para definir el calor específico y entalpía para pescado.

Las expresiones más completas derivadas para calor específico entalpía en términos del contenido de sólidos y de temperatura para pescado han sido desarrolladas en el Modelo de Chen [11], estas propiedades poseen comportamientos bien definidos cuando la sustancia es sometida a tratamientos que involucran temperaturas por encima y por debajo del punto de congelamiento.

Para temperaturas sobre el punto de congelamiento, el calor específico y la entalpía pueden ser estimadas como una función de la composición química de la sustancia y de la temperatura, respectivamente, estas relaciones son:

$$C = 1 - 0.55X_{so} - 0.15X_{so}^3 \quad (4.1)$$

$$H = H_1 + (t - t_1).C \quad (4.2)$$

En la ecuación 4.2 se utiliza como entalpía de referencia,  $H_1$ , el punto inicial de congelamiento, esta expresión para entalpía es expresada en función de la temperatura de referencia para sustancia alimenticias  $t_r$ , la fracción en peso de sólidos  $X_{so}$  y el peso molecular efectivo de la sustancia

$$H_1 = (t_1 - t_r) \cdot \left[ 0.37 + 0.3X_{so} + \frac{X_{so}}{M_s} \cdot \frac{RT_0^2}{t_1 t_r} \right] \quad (4.3)$$

Donde  $t_1$  es la temperatura en el inicio del punto de congelación y obtenida en función de la fracción de agua presente en la sustancia, expresión derivada experimentalmente en el modelo propuesto por Chang, H y Tao, L[8]:

$$t_1 = t_f = 271.18 + 1.47 y \quad (4.4)$$

De la ecuación 4.3 el peso molecular efectivo,  $M_s$ , varia con el contenido de sólidos de la sustancia, que a la vez depende de una constante característica,  $N$ , para una sustancia en particular, entonces se tiene que el valor de esta constante para el grupo de carnes, incluyendo a peces dentro de este grupo es:

$$M_s = \frac{N}{1 - X_{so}} \quad (4.5)$$

Cuando se trata de pescado, el valor de  $N$  es 404.9 kg/kmol.

#### 4.3.2. Entropía del pescado

Con respecto a la entropía, esta propiedad termodinámica, es la que menos abunda en la literatura de ciencias de alimentos.

La expresión para la entropía ha sido derivada a partir de las ecuaciones 4.2 a 4.4, utilizando el criterio de sustancia incompresible dada en la ecuación 3.25.

En este caso el valor correspondiente a la entropía de referencia es asumida para ser cero a 0°C.

$$s = s_{ref} + C.Ln\left(\frac{t + 273.15}{273.15}\right) \quad (4.6)$$

Donde el calor específico  $C$ , es dado en la ecuación 4.1 para sustancias que se encuentran sometidas a temperaturas sobre el punto de congelamiento.

#### 4.3.3. Exergía de los flujos físicos

La exergía física para la sustancia de trabajo, ha sido obtenida a partir de la combinación de las ecuaciones 4.2 y 4.6 para la entalpía y entropía respectivamente.

$$e^{PH} = C \cdot (T - T_o) - T_o \left[ C \cdot \ln \left( \frac{T}{T_o} \right) \right] \quad (4.7)$$

La ecuación 4.7 es la expresión final para la exergía física de la sustancia de trabajo, permite modelar el comportamiento termodinámico del pescado para cualquier punto dentro de la secuencia de producción, si se conoce su temperatura, fracción de sólidos y su peso molecular aparente.

#### 4.3.4. Ecuaciones para estimar la capacidad de procesamiento de los equipos

El análisis de exergía fue aplicado a dos puntos dentro del proceso de producción de harina de pescado: el proceso de cocción y de secado de la materia prima. Se han considerado para el análisis estos dos puntos dado a las características del proceso a que es sometida la anchoveta. En ambos procesos el tratamiento térmico es importante [2]. En el proceso de cocinado se separa el pescado en dos fases: una fase líquida (agua y aceite) y otra fase sólida (proteínas). En el proceso de secado se elimina la humedad existente en la masa de los “cake” de prensa, para así, convertirse en harina como producto final. Ambos procesos consumen grandes flujos de energía térmica para lograr estos objetivos [2,44, 38]. En este sentido es importante determinar la cantidad de materia prima atravesando estos equipos, las ecuaciones de capacidad de procesamiento para el cocinador y secador, respectivamente son [2]:

$$\dot{m}_c = \frac{\rho_a \cdot \left\{ \frac{\pi \cdot \left[ L \cdot (d_i^2 - d_e^2) - N \cdot f \cdot p \cdot e \cdot (d_h^2 - d_e^2) \right]}{4} \right\} \cdot w \cdot p \cdot 60 \text{ fc}}{L} \quad (4.8)$$

$$\dot{m}_s = \%lleno \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_h^2 - d_e^2) \cdot (p - e) \cdot w \cdot 60 \cdot \rho_{ckp} \quad (4.9)$$

## 4.4 Análisis Exergético de los Procesos

### 4.4.1. Consideraciones Importantes en el Análisis de los Procesos

Con el objetivo de realizar un adecuado análisis de los procesos que involucran la producción de harina de pescado, es necesario asumir consideraciones, desde el punto de vista termodinámico, para aplicar los principios de conservación de masa, conservación de energía, generación de entropía y análisis de exergía a cada uno de los procesos bajo análisis.

1. El proceso de producción de harina de pescado y, cada uno de sus sub-procesos en particular, fueron analizados bajo los criterios de sistemas abiertos [23].
2. En cada sistema abierto bajo análisis, las propiedades del sistema como densidad, energía específica y entropía específica no cambian con el tiempo. Sin embargo, tales propiedades pueden variar espacialmente de un punto a otro dentro del volumen de control.
3. En la aplicación del principio de conservación de energía, ecuación 3.5, el término que corresponde a la transferencia de energía por trabajo de eje suministrado al volumen de control, en los procesos de cocción y secado, fue despreciado. Esta consideración fue asumida en base a los criterios expuestos por

Peters, M y otros autores [30] en la que establece que como los procesos de secado generalmente involucran la remoción de grandes cantidades de líquido ocasionada por la transferencia de calor, atravesando la interfase entre el medio calefactor y el sólido, entonces estos flujos de calor y de entalpía asociadas a las corrientes de materia, son en magnitud, considerablemente mayores con respecto a los valores de energía suministrados en forma de trabajo mecánico, Tabla 4.4.

4. Los términos de energía cinética y potencial para la ecuación 3.5 de conservación de energía, así como para la ecuación 3.9 de exergía se consideran despreciables.
5. Debido a la naturaleza compleja en la composición química de la materia prima (anchoveta), la componente de la exergía química no es considerada.
6. Las propiedades termodinámicas para caracterizar a la materia prima, como son calor específico a presión constante, entalpía y entropía, para formular las expresiones de exergía, fueron comparadas con el modelo de sustancia incompresible, con el objeto de verificar las tendencias de las mismas de acuerdo a este modelo.
7. El medio portador de energía térmica, es decir el vapor saturado suministrado a cada punto específico del proceso productivo, fue definido en cada estado por su temperatura y presión en el punto bajo análisis. En ningún momento se analizó cómo éste ha sido producido en los generadores de vapor. Por consiguiente no se analizó los balances de energía ni de exergía para este equipo, abundante referencia bibliográfica nos permiten caracterizar a estos equipos, bajo los principios de primera y segunda ley de la termodinámica [24, 25].

8. El ambiente estable de referencia utilizado en la aplicación del análisis de exergía, es evaluado para encontrarse a  $P_0 = 1.00 \text{ atm. (1.013 Bar)}$  y a  $T_0 = 17^\circ\text{C}$  (290.15 K). Estos son los estados referencia para el cálculo de los términos de exergía física para cada uno de los flujos físicos presentes en el proceso productivo.

Tipo de Secador (contacto térmico)	Dimensiones Aproximadas			Velocidad Sólidos m/s	% $A_c$ Usada por Sólidos	Velocidad Gases M/s	Coeficiente Transferencia Calor Prom. J/sm <sup>2</sup> K	G kg/sm <sup>2</sup>	Eficiencia Térmica (%)	Potencia Requerida Prom. kW
	D m	L m	L/D							
Rotary Dryer (directo)	1-3	4-20	4-6	0.02-0.1	10-15	0.3-1.0	$60G^{0.67}$	0.5-5.0	55-75	8-27
Screw Conveyor (indirecto)	0.1-0.7	1-6	3-10	0.01-0.1	40-50	---	15-60	0.05-0.5	30-60	0.01-2.3

Tabla 4.4 Condiciones de operación de equipos de secado, propuesto por Peters, M y otros autores [30].

#### 4.4.2. Análisis del Proceso de Cocción

El proceso de cocción de la planta de producción de harina de pescado bajo análisis, esta constituido por dos líneas de producción [2], cada una a la vez esta conformada por un equipo cocinador del tipo de contacto indirecto, es decir el medio portador de energía térmica (vapor saturado) no tiene contacto con el flujo de materia prima (anchoveta), la transferencia de calor es dominada por la conducción; el otro equipo esta formado por el conjunto Prestrainer-Prensa, según el arreglo mostrado en la Figura 4.4.

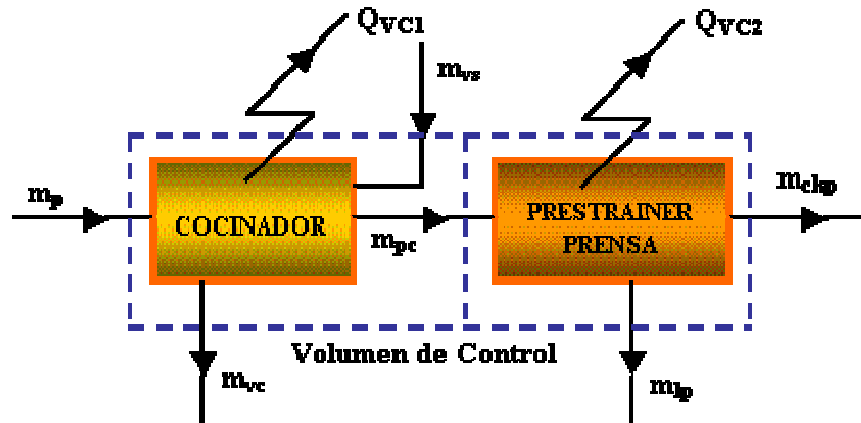


Figura 4.4 Arreglo de los equipos en la zona de cocción.

En el análisis termodinámico de este proceso se utilizan las ecuaciones para la conservación de masa, energía, generación de entropía y análisis de exergía presentadas en el capítulo de fundamentos teóricos.

Siguiendo el arreglo mostrado en la Figura 4.3, las ecuaciones finales toman la siguiente forma:

Para el equipo cocinador

El balance de masa es expresado como:

$$\dot{m}_p + \dot{m}_{vs} = \dot{m}_{vc} + \dot{m}_{pc} \quad (4.10)$$

Como el cocinador es del tipo contacto indirecto:

$$\dot{m}_{vs} = \dot{m}_{vc} = \dot{m}_v \quad (4.11)$$

Entonces:

$$\dot{m}_p = \dot{m}_{pc} \quad (4.12)$$

El balance de energía toma la forma:

$$0 = \dot{Q}_{vc1} - \dot{W}_{vc1} + \dot{m}_p \cdot h_p + \dot{m}_{vs} \cdot h_g - \dot{m}_{pc} \cdot h_{pc} - \dot{m}_{vc} \cdot h_f \quad (4.13)$$

El flujo de calor transferido por el equipo cocinador al ambiente (VC1) es expresado:

$$\dot{Q}_{vc1} = \dot{m}_p \cdot (h_{pc} - h_p) + \dot{m}_v \cdot h_{fg} \quad (4.14)$$

La generación de entropía del sistema (VC1) es:

$$0 = \frac{\dot{Q}_{vc1}}{T_{ais}} + \dot{m}_p \cdot s_p + \dot{m}_{vs} \cdot s_g - \dot{m}_{pc} \cdot s_{pc} - \dot{m}_{vc} \cdot s_f + \dot{S}_{genvc1} \quad (4.15)$$

Entonces:

$$\dot{S}_{genvc1} = \dot{m}_p \cdot (s_{pc} - s_p) + \dot{m}_v \cdot s_{fg} - \frac{\dot{Q}_{vc1}}{T_{ais}} \quad (4.16)$$

La destrucción de la exergía debido a las irreversibilidades internas del sistema, de acuerdo al Teorema de Gouy-Stodola es:

$$\dot{E}_D = T_0 \cdot \dot{S}_{genvc1} \quad (4.17)$$

El balance de exergía para el sistema es:

$$0 = \sum \dot{E}_{Q_{vc1}, j} - \dot{W}_{vc1} + \dot{E}_p + \dot{E}_{vs} - \dot{E}_{pc} - \dot{E}_{vc} - \dot{E}_D \quad (4.18)$$

Que también puede ser expresada como:

$$\dot{E}_D = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ais}}\right) \dot{Q}_{vc1} + \dot{m}_p \cdot \left(\dot{e}_p^{PH} - \dot{e}_{pc}^{PH}\right) + \dot{m}_v \cdot \dot{e}_{fg}^{PH} \quad (4.19)$$

Las expresiones para cuantificar la eficiencia exergética y las razones de destrucción y pérdida de exergía son:



$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{E}_{pc} - \dot{E}_p}{\dot{E}_{vs} - \dot{E}_{vc}} = \frac{\dot{m}_p \left( \dot{e}_{pc}^{PH} - \dot{e}_p^{PH} \right)}{\dot{m}_v \left( \dot{e}_{fg}^{PH} \right)} \quad (4.20)$$

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{E}_D}{\dot{m}_v \left( \dot{e}_{fg}^{PH} \right)} \quad (4.21)$$

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_F} = \frac{\left( 1 - \frac{T_0}{T_{ais}} \right) \dot{Q}_{vc1}}{\dot{m}_v \left( \dot{e}_{fg}^{PH} \right)} \quad (4.22)$$

La aplicación de estas ecuaciones son válidas para los equipos cocinadores de cada una de las líneas de producción.

Para el arreglo Prestrainer-Prensa

El balance de masa es:

$$\dot{m}_{pc1} = \dot{m}_{ckp1} + \dot{m}_{lp1} \quad (4.23)$$

El balance de energía es:

$$0 = \dot{Q}_{vc2} + \dot{m}_{pc} \cdot h_{pc} - \dot{m}_{ckp} \cdot h_{ckp} - \dot{m}_{lp} \cdot h_{lp} \quad (4.24)$$

Entonces el flujo de calor transferido por el arreglo prestrainer-prensa (VC2) al ambiente es:

$$\dot{Q}_{vc2} = \dot{m}_{ckp} \cdot h_{ckp} + \dot{m}_{lp} \cdot h_{lp} - \dot{m}_{pc} \cdot h_{pc} \quad (4.25)$$

La generación de entropía del sistema (VC2) es:

$$\dot{S}_{genvc2} = \dot{m}_{ckp} \cdot s_{ckp} + \dot{m}_{lp} \cdot s_{lp} - \dot{m}_{pc} \cdot s_{pc} - \frac{\dot{Q}_{vc2}}{T_{ais}} \quad (4.26)$$

Del balance de exergía, se tiene:

$$0 = \sum_j \dot{E}_{Q_{vc2},j} + \dot{E}_{pc} - \dot{E}_{ckp} - \dot{E}_{lp} - \dot{E}_D \quad (4.27)$$

Entonces la destrucción de exergía del sistema es:

$$\dot{E}_D = \left(1 - \frac{T_0}{T_{ais}}\right) \dot{Q}_{vc2} + \dot{m}_{pc} \cdot \dot{e}_{pc}^{PH} - \dot{m}_{ckp} \cdot \dot{e}_{ckp}^{PH} - \dot{m}_{lp} \cdot \dot{e}_{lp}^{PH} \quad (4.28)$$

Las expresiones para cuantificar la eficiencia exergética y los ratios de destrucción y pérdida de exergía son:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{E}_{ckp}}{\dot{E}_{pc}} = \frac{\dot{m}_{ckp} \cdot \left(\dot{e}_{ckp}^{PH}\right)}{\dot{m}_{pc} \cdot \left(\dot{e}_{pc}^{PH}\right)} \quad (4.29)$$

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{E}_D}{\dot{m}_{pc} \cdot \left(\dot{e}_{pc}^{PH}\right)} \quad (4.30)$$

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_F} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{ais}}\right) \dot{Q}_{vc1} + \dot{m}_{lp} \cdot \left(\dot{e}_{lp}^{PH}\right)}{\dot{m}_{pc} \cdot \left(\dot{e}_{pc}^{PH}\right)} \quad (4.31)$$

#### 4.4.3. Análisis del Proceso de Secado

El proceso de secado esta conformado por dos líneas de producción [8], los equipos secadores son también del tipo de contacto indirecto, es decir el medio portador de energía térmica (vapor saturado) no tiene contacto con los flujos de cake's que son alimentados a los secadores. La transferencia de calor es dominada por el fenómeno de conducción. Al igual que en el proceso de cocción se tienen dos líneas de producción, la línea No1 esta formada a su vez por dos secadores del tipo “rotaplate”, ambos de la

misma capacidad de procesamiento. Por consiguiente, se realizaron los cálculos para uno de los equipos y los resultados totales para esta línea serán multiplicados por dos. Mientras la otra línea de producción cuenta con un secador denominado “rotatubos”, Figura 4.5.

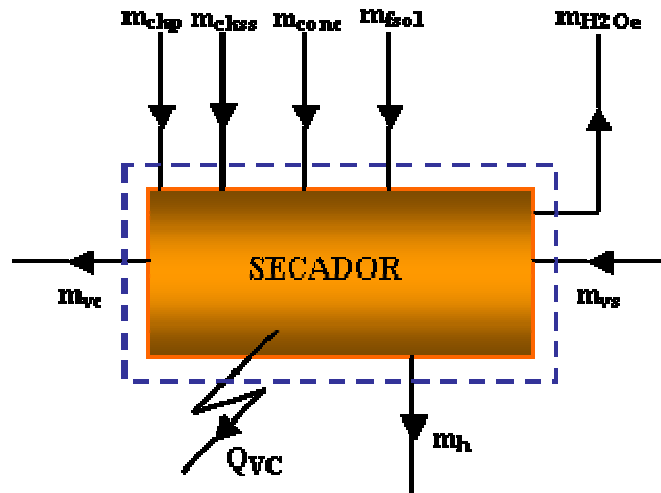


Figura 4.5 Distribución de los flujos másicos en el equipo secador.

El análisis termodinámico de este proceso utiliza los mismos criterios que los empleados para el proceso de cocción. Siguiendo el arreglo mostrado en la Figura 4.5, las ecuaciones finales toman la siguiente forma:

Para el equipo secador

El balance de masa es expresado como:

$$\dot{m}_{ckp} + \dot{m}_{ckss} + \dot{m}_{conc} + \dot{m}_{fsol} + \dot{m}_{vs} = \dot{m}_h + \dot{m}_{H_2Oe} + \dot{m}_{vc} \quad (4.32)$$

Como el secador es del tipo contacto indirecto:

$$\dot{m}_{vs} = \dot{m}_{vc} = \dot{m}_v \quad (4.33)$$

Entonces:

$$\dot{m}_{ckp} + \dot{m}_{ckss} + \dot{m}_{conc} + \dot{m}_{fsol} - \dot{m}_h = \dot{m}_{H_2Oe} \quad (4.34)$$

El balance de energía toma la forma:

$$0 = \dot{Q}_{vc1} + \dot{m}_{ckp} \cdot h_{ckp} + \dot{m}_{ckss} \cdot h_{ckss} + \dot{m}_{conc} \cdot h_{conc} + \dot{m}_{fsol} \cdot h_{fsol} + \dot{m}_{vs} \cdot h_g - \dot{m}_h \cdot h_h - \dot{m}_{H_2Oe} \cdot h_{H_2Oe} - \dot{m}_{vc} \cdot h_f \quad (4.35)$$

La generación de entropía del sistema (VC1) es:

$$S_{genvc1} = \dot{m}_h \cdot s_h + \dot{m}_{H_2Oe} \cdot s_g + \dot{m}_{vc} \cdot s_f - \dot{m}_{ckp} \cdot s_{ckp} - \dot{m}_{ckss} \cdot s_{ckss} - \dot{m}_{conc} \cdot s_{conc} - \dot{m}_{fsol} \cdot s_{fsol} - \frac{\dot{Q}_{vc1}}{T_{ais}} \quad (4.36)$$

La destrucción de la exergía debido a las irreversibilidades internas del sistema, de acuerdo al Teorema de Gouy-Stodola es:

$$\dot{E}_D = T_0 \cdot \dot{S}_{genvc1} \quad (4.37)$$

El balance de exergía para el sistema es:

$$0 = \sum_j \dot{E}_{Q_{vd},j} + \dot{E}_{ckp} + \dot{E}_{ckss} + \dot{E}_{conc} + \dot{E}_{fsol} + \dot{E}_{vs} - \dot{E}_h - \dot{E}_{H_2Oe} - \dot{E}_{vc} - \dot{E}_D \quad (4.38)$$

Que también puede ser expresada como:

$$\begin{aligned} \dot{E}_D = & \left( 1 - \frac{T_0}{T_{ais}} \right) \cdot \dot{Q}_{vc1} + \dot{m}_{ckp} \cdot \dot{e}_{ckp}^{PH} + \dot{m}_{ckss} \cdot \dot{e}_{ckss}^{PH} \\ & + \dot{m}_{conc} \cdot \dot{e}_{conc}^{PH} + \dot{m}_{fsol} \cdot \dot{e}_{fsol}^{PH} + \dot{m}_{vs} \cdot \dot{e}_g^{PH} \\ & - \dot{m}_h \cdot \dot{e}_h^{PH} - \dot{m}_{ckp} \cdot \dot{e}_{ckp}^{PH} - \dot{m}_{H_2Oe} \cdot \dot{e}_g^{PH} \\ & - \dot{m}_{ckp} \cdot \dot{e}_{ckp}^{PH} - \dot{m}_{vc} \cdot \dot{e}_f^{PH} \end{aligned} \quad (4.39)$$

Las expresiones para cuantificar la eficiencia exergética y los ratios de destrucción y pérdida de exergía son:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{E}_h}{\dot{E}_{vs} - \dot{E}_{vc} + \dot{E}_{ckp} + \dot{E}_{ckss} + \dot{E}_{conc} + \dot{E}_{fsol}} \quad (4.40)$$

$$y_D = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_F} = \frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_{vs} - \dot{E}_{vc} + \dot{E}_{ckp} + \dot{E}_{ckss} + \dot{E}_{conc} + \dot{E}_{fsol}} \quad (4.41)$$

$$y_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_F} = \frac{\left(1 - \frac{T_0}{T_{ais}}\right) \dot{Q}_{vc1} + \dot{m}_{H_2Oe} \dot{e}_{H_2Oe}^{PH}}{\dot{E}_{vs} - \dot{E}_{vc} + \dot{E}_{ckp} + \dot{E}_{ckss} + \dot{E}_{conc} + \dot{E}_{fsol}} \quad (4.42)$$

La aplicación de estas ecuaciones son válidas para los equipos secadores de cada una de las líneas de producción.

## CAPITULO 5

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de exergía realizado en la presente investigación es aplicado a una planta de producción de harina de pescado del tipo indirecto, ubicada en la costa de Perú, cuya capacidad de procesamiento de materia prima es de 100000 kg/h de pescado, para una producción estimada de 23000 kg/h de harina de pescado [2].

Los procesos analizados son los de cocción y secado, ambos procesos están formados a la vez por dos líneas de producción; cada una divide los flujos de materia prima aproximadamente a la mitad. En consecuencia se analizarán los resultados para una sola línea de producción. El proceso de cocción está formado a la vez por el arreglo en serie de cocinador y prestrainer-prensa (Figura 4.3).

En los equipos de cocción y secado el aporte de energía térmica es dado por los flujos de vapor saturado y se presume que la transferencia de calor es dominada por la conducción. Estos flujos de energía están asociados a valores específicos de temperatura que son cuantificados a través de la entalpía, entropía y exergía de los flujos de materia de cada sustancia de trabajo.

Durante la producción de harina de pescado la materia prima es sometida a procesos térmicos en toda la secuencia de producción. Bajo este criterio se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento termodinámico de la entalpía, entropía y exergía de los modelos considerados en el capítulo 2. El rango de temperaturas considerada para el análisis está entre 10°C – 120°C.

En este punto el objetivo es verificar la tendencia generada por cada modelo encontrado en la literatura cuando la materia prima es sometida a variaciones en

temperatura. Para determinar el cambio en el comportamiento de la exergía, se han considerado las propiedades del estado ambiente de referencia, es decir a  $P_0$  y  $T_0$ .

Se ha utilizado la definición de sustancia incompresible como referencia para visualizar el comportamiento termodinámico de los otros modelos. Lo anterior se ha realizado calculando el porcentaje de la desviación de los valores para cada propiedad termodinámica del modelo de sustancia incompresible contra cada uno de los valores de los modelos propuestos y dividido con respecto al valor del modelo propuesto, valor al que se ha denominado porcentaje de desviación de los datos ,es decir:

$$\%_{desv} = \frac{VPT_{c.base} - VPT_{c.nuevo}}{VPT_{c.base}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Estos resultados se aprecian en las Figura 5.1, 5.2 y 5.3. Todos los modelos siguen la tendencia generada por el modelo de sustancia incompresible. La desviación porcentual promedio de cada modelo comparado con el de sustancia incompresible es presentada en la tabla 5.1. El Modelo de Chen, C (M4) es el que mejor resultados presenta para caracterizar el comportamiento de la entalpía, entropía y exergía de la anchoveta.

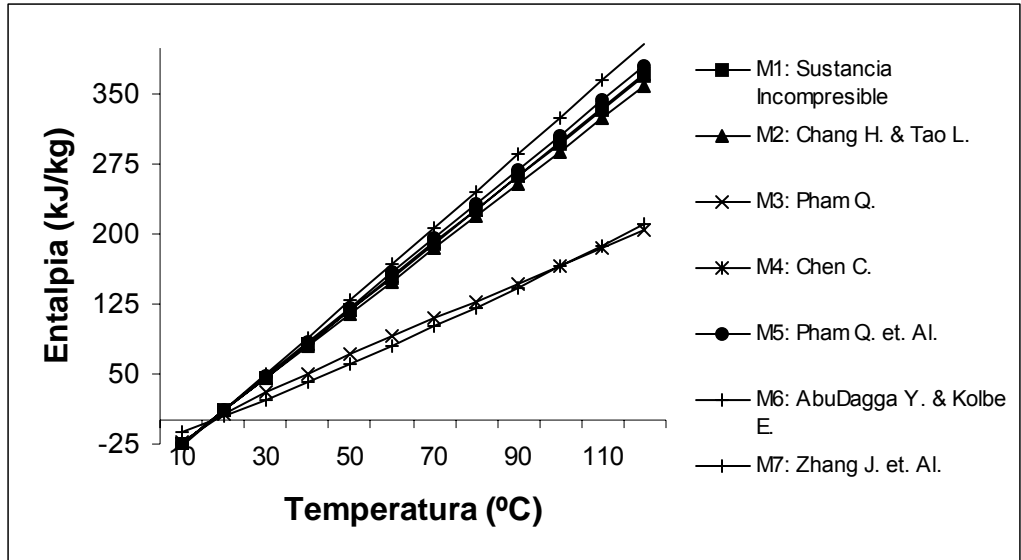


Figura 5.1: Relación entre el cambio de entalpía y la temperatura para anchoveta (Modelos 2 al 7), comparados con el de sustancia incompresible.

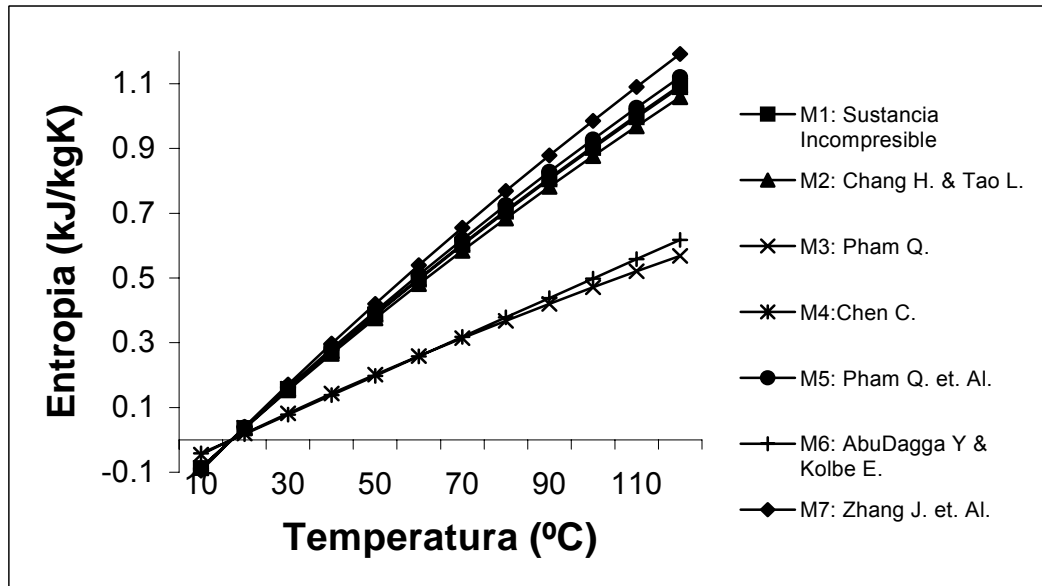


Figura 5.2: Relación entre el cambio de entropía y la temperatura para anchoveta (Modelos 2 al 7), comparados con el de sustancia incompresible.



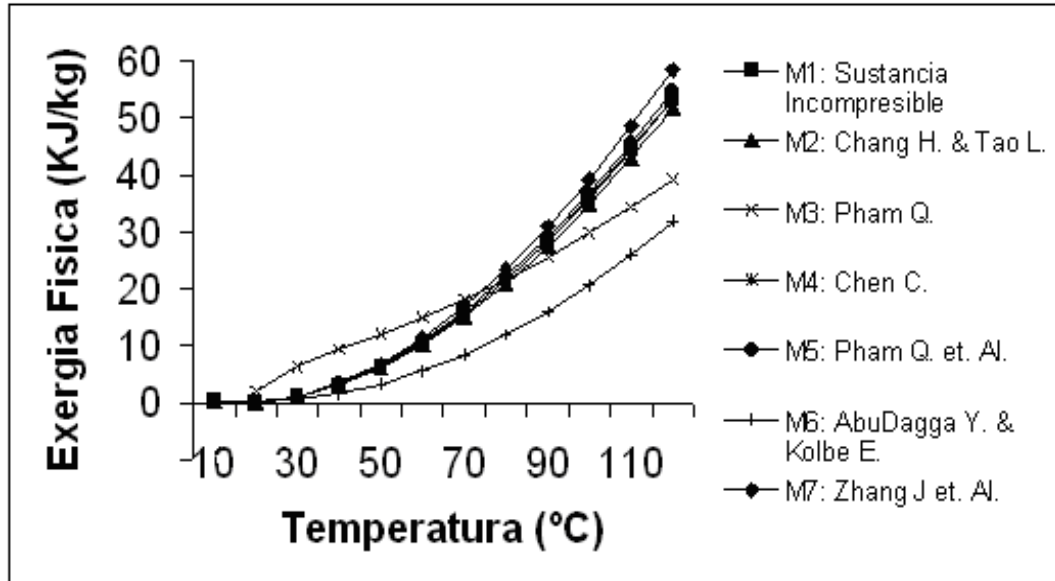


Figura 5.3: Relación entre el cambio de exergía y la temperatura para anchoveta (Modelos 2 al 7), comparados con el de sustancia incompresible.

Modelos Termodinámicos	%desv (Entalpía) (%)	%desv (Entropía) (%)	%desv (Exergía) (%)
Modelo de Sustancia incompresible (M1)	---	---	---
Modelo de Chang, H y Tao, L (M2)	2.92	2.92	2.92
Modelo de Pham, Q (M3)	64.56	91.46	45.17
Modelo de Chen, C (M4)	0.54	0.54	0.54
Modelo de Pham, Q y otros autores (M5)	2.85	2.85	2.85
Modelo de AbuDagga, Y y otros autores (M6)	90.76	91.25	86.72
Modelo de Zhang, J y otros autores (M7)	8.24	8.23	8.37

Tabla 5.1: Porcentajes de desviación promedio de los valores de las propiedades termodinámicas obtenidos en los modelos propuestos experimentalmente contra el modelo de sustancia incompresible.

El comportamiento termodinámico de la anchoveta es analizada a través de las propiedades de entalpía, entropía y exergía.

Para el análisis de la entalpía se han utilizado las ecuaciones 4.1, a 4.5, estas ecuaciones involucran variables tanto de la composición en sólidos, peso molecular efectivo y del valor de temperatura que la anchoveta posee en algún punto específico del proceso. En este caso la composición de la anchoveta es del 20.78% para sólidos (proteínas), 7.34% para grasas y 71.88% para agua, porcentajes expresados como fracción del peso de la misma. Por último se han realizado unas variaciones en los contenidos porcentuales de agua y grasa con el objeto de observar el comportamiento generado, los valores de estas variaciones se observan en la figura 5.4.

Los resultados obtenidos para la entalpía específica de pescado a diferentes composiciones porcentuales de su contenido en proteínas, grasas y agua se presentan en la figura 5.4. Su comportamiento con respecto a la temperatura es lineal y se incrementa con incrementos en la temperatura y disminuye cuando el contenido del agua en el pescado decrece. Los valores obtenidos para entalpía están dentro de los rangos reportados en la literatura, tanto para pescado, como para sustancias con un contenido de agua sobre el 40% de su composición en fracción de peso.

Para la entropía específica se ha utilizado las mismas composiciones porcentuales empleadas en el análisis de la entalpía, en este caso se ha utilizado la ecuación 4.6.

El comportamiento para la entropía específica presenta la misma tendencia lineal que en la entalpía. En la Figura 5.5 se aprecia un aumento con la temperatura pero una disminución a bajos contenidos en agua. No se han reportados datos para esta propiedad que permitan contrastar los valores obtenidos en este trabajo de investigación

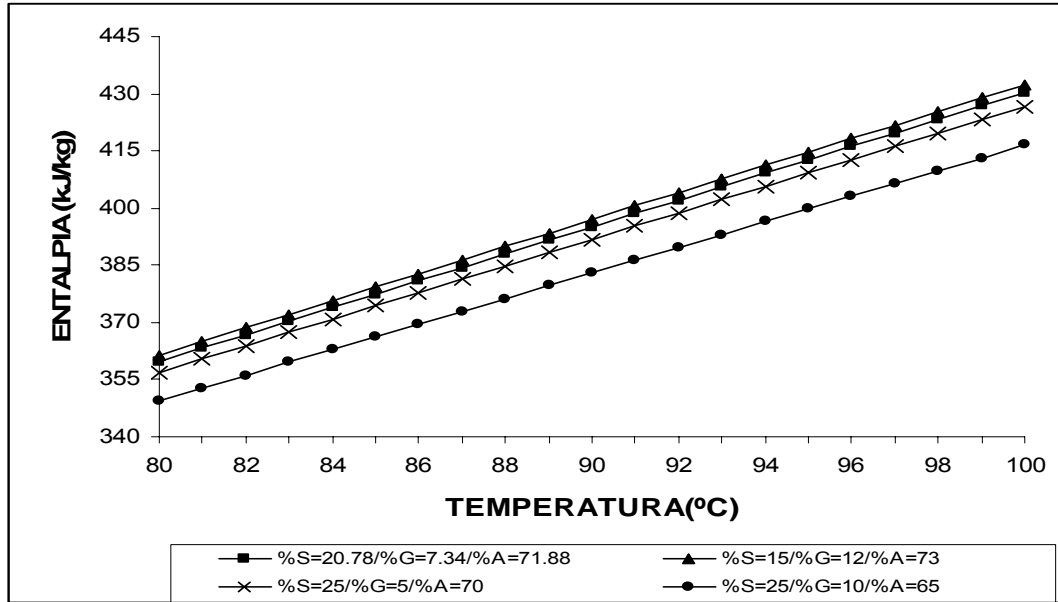


Figura 5.4: Comportamiento de la entalpía específica del pescado con la temperatura y con la composición porcentual en proteínas, grasas y agua.

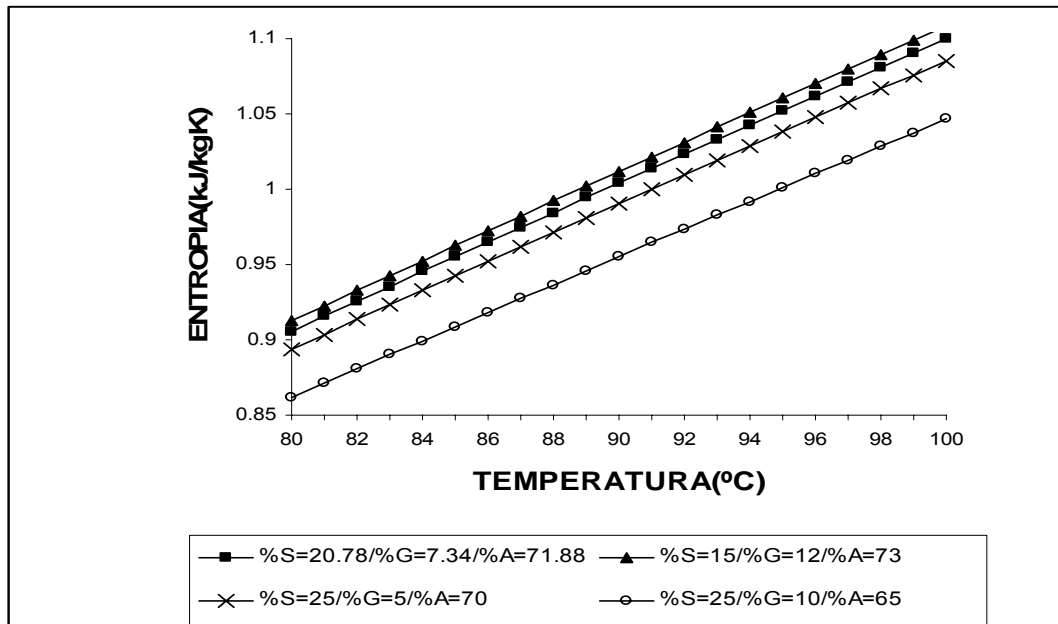


Figura 5.5: Comportamiento de la entropía específica del pescado con la temperatura y con la composición porcentual en proteínas, grasas y agua.

El análisis de la exergía física para la anchoveta se ha realizado empleando la ecuación 4.7 que es el resultado de la manipulación de las ecuaciones 4.1 a 4.6. Con respecto a la composición de la anchoveta es la misma utilizada para la entalpía y entropía.

El resultado obtenido para la exergía física específica de pescado se muestra en la Figura 5.6 donde se aprecia que cuando el contenido de agua en el pescado disminuye los valores para la exergía aumentan, además la misma tendencia de incremento en los valores de exergía se mantienen con el incremento de la temperatura. Al igual que la entropía no se cuentan con datos que permitan contrastar estos resultados para pescado.

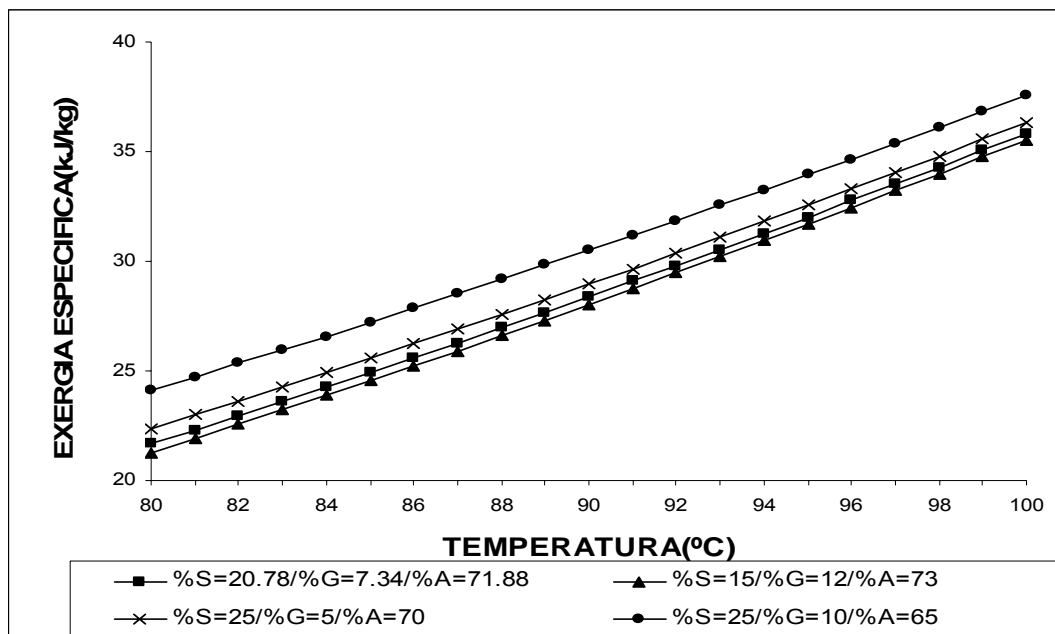


Figura 5.6: Comportamiento de la exergía específica del pescado con la temperatura y con la composición porcentual en proteínas, grasas y agua.

## 5.1 Análisis del Caso Base

Con el objeto de realizar un análisis exergético apropiado, se aplicará el método del análisis de exergía en los procesos de cocción y secado, operando a condiciones normales de procesamiento.

Los datos utilizados para la elaboración del análisis exergético del caso base tales como: flujos de masa, valores de presión, temperatura de operación de los equipos, calores específicos promedios para la anchoveta y la composición de la materia prima han sido tomadas del estudio realizado por Ángeles [2]. La misma fuente de referencia es utilizada para las dimensiones de cada equipo.

En las tablas 5.2 y 5.3 se presentan la composición física, estado termodinámico y flujo de masa de las dos líneas de operación que constituyen los procesos de cocción y secado, respectivamente.

Las ecuaciones para caracterizar las propiedades termodinámicas de entalpía, entropía y exergía para la sustancia de trabajo son las ecuaciones 4.1 a 4.7 que utilizan los criterios correspondientes al *modelo de Chen* (M3) por ser el modelo que mejor caracteriza el comportamiento de la materia prima. Este modelo posee variables de temperatura y de composición expresada como fracción en peso de sólidos y agua, así como de peso molecular para la materia prima.

El proceso de producción de harina de pescado es un proceso netamente térmico, en este sentido se cuenta con información de valores de temperatura en cada equipo, así como la composición de la anchoveta.

Descripción	Composición Materia Prima			Estado Termodinámico		Flujo Másico (Kg/h)	
	%S	%G	%A	P(Bar)	T(° C)	Línea No 1	Línea No 2
Equipo Cocinador							
Anchoveta	21.00	7.48	71.52	1.013	15	49000.00	46000.00
Pescado Cocinado	20.78	7.34	71.88	1.013	95	49000.00	46000.00
Prestrainer-Prensa							
Cake Prensa	50.00	2.30	47.10	1.013	86	15400.00	14500.00
Líquido Prensa	7.35	9.65	83.00	1.013	86	33600.00	31500.00
Vapor Saturado	---	---	---	3.00	---	6424.07	6046.43

Tabla 5.2: Composición materia prima, estado termodinámico y flujo de masa en las dos líneas en la zona de cocción [2].

Descripción	Composición Materia Prima			Estado Termodinámico		Flujo Másico (Kg/h)	
	%S	%G	%A	P(Bar)	T(° C)	Línea No 1	Línea No 2
Cake Prensa	50.00	2.30	47.70	1.013	86	9727.14	10647.52
Cake Separadora	35.00	1.30	63.70	1.013	90	1986.22	2137.40
Concentrado	38.00	0.38	61.62	1.013	64	2262.59	2434.74
Fase Sólida	31.44	5.00	63.56	1.013	80	490.35	527.74
Harina SRP	88.88	3.82	7.30	1.013	100 80	7265.00	---
Harina SRT	88.21	3.79	8.00	1.013	100 80	---	8280.00
Vapor Saturado	---	---	---	1.013	100	7201.30	7287.40

Tabla 5.3: Composición materia prima, estado termodinámico y flujo de masa dos líneas en la zona de secado [2].

Las propiedades termodinámicas para el vapor saturado y la anchoveta ( $h_0$  y  $s_0$ ) en las condiciones del estado de referencia ( $P_0$  y  $T_0$ ), para los procesos de cocción y secado se presentan en la tabla 5.4. Debemos tener en cuenta que el vapor saturado es obtenido a partir de agua a condiciones ambiente.

Sustancia	P <sub>0</sub> (Bar)	T <sub>0</sub> (°C)	h <sub>0</sub> (kJ/kg)	s <sub>0</sub> (kJ/kgK)	b <sub>0</sub> (kJ/kg)
Anchoveta	1.013	17.0	137.60	0.21	75.37
Agua	1.013	17.0	71.38	0.25	-2.17

Tabla 5.4: Propiedades termodinámicas en el estado de referencia para las sustancias de trabajo [2].

Una vez definidas las propiedades termodinámicas en el estado de referencia de las sustancias de trabajo, los flujos de masa, presiones y temperaturas de operación de los equipos y la composición de la materia prima, el siguiente paso es determinar las propiedades térmicas de entalpía, entropía y exergía física en cada punto del proceso. Las tablas 5.5 y 5.6 muestran los resultados para el proceso de cocción y secado, respectivamente.

Descripción	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	b (kJ/kg)	e <sup>PH</sup> (kJ/kg)
Equipo Cocinador				
Anchoveta	130.65	0.19	75.96	0.60
Pescado Cocinado	412.67	1.05	107.38	32.01
Prestrainer-Prensa				
Cake Prensa	338.11	0.79	108.38	33.01
Liquido Prensa	398.29	1.04	97.12	21.75

Tabla 5.5: Propiedades termodinámicas y exergía física de la sustancia de trabajo para las dos líneas de producción, en la zona de cocción.

Descripción	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	b (kJ/kg)	e <sup>PH</sup> (kJ/kg)
Cake Prensa	338.11	0.792	108.38	33.01
Cake Separadora	380.66	0.95	106.24	30.88
Concentrado	291.91	0.69	92.33	16.96
Fase Sólida	347.23	0.85	99.99	24.62
Harina SRP				
@ T = 80°C	230.59	0.40	114.92	39.56
@T = 100°C	261.63	0.48	121.16	45.80
Harina SRT				
@ T = 80°C	232.51	0.41	114.81	39.44
@T = 100°C	264.10	0.49	121.15	45.78
Agua Evaporada	2676.10	7.35	542.08	544.25

Tabla 5.6: Propiedades termodinámicas y exergía física de la sustancia de trabajo para las dos líneas de producción, en la zona de secado.

Los resultados obtenidos para las propiedades termodinámicas del vapor saturado atravesando cada equipo en los procesos de cocción y secado, son mostrados en las tablas 5.7 y 5.8.

Descripción	P (Bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	B (kJ/kg)	e <sup>PH</sup> (kJ/kg)	m <sub>v</sub> (kg/h)	
						Línea No 1	Línea No 2
<b>Vapor</b>		---	---	---	---	---	---
Saturado	3.00	2725.30	6.99	696.60	698.77	6424.07	6046.43
Condensado	3.00	561.47	1.67	76.40	78.57	---	---

Tabla 5.7: Propiedades termodinámicas y exergía física del vapor saturado para las dos líneas de producción, en la zona de cocción.



Descripción	P (Bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	b (kJ/kg)	e <sup>PH</sup> (kJ/kg)	m <sub>v</sub> (kg/h)	
						Línea No 1	Línea No 2
Vapor:							
<i>Saturado</i>						<b>8593.11</b>	<b>8246.75</b>
Línea No 1	11.01	2780.95	6.56	878.23	880.40	---	---
Línea No 2	4.81	2746.88	6.83	763.81	765.98	---	---
<i>Condensado</i>							
Línea No 1	11.01	779.380	2.17	148.50	150.68	---	---
Línea No 2	4.81	633.78	1.85	98.31	100.48	---	---

Tabla 5.8: Propiedades termodinámicas y exergía física del vapor saturado para las dos líneas de producción en la zona de secado.

Hasta este punto se han logrado definir los valores para la exergía física específica en los dos procesos bajo análisis, tanto para la materia prima como para el medio portador de energía térmica. El siguiente paso es determinar los valores de la exergía física total asociada a los flujos de materia en cada uno de los procesos. La tablas 5.9 y 5.10 presentan los resultados para la materia prima en el proceso de cocción y secado respectivamente, mientras que en la tabla 5.11 se presentan los flujos totales de exergía para el medio portador de energía en ambos procesos.

Descripción	Exergía Física Total: E <sup>PH</sup> (kJ/h)*	
	Línea No 1	Línea No 2
<i>Equipo Cocinador</i>		
Anchoveta	29151.08	27424.37
Pescado Cocinado	1566782.39	1473973.68
<i>Prestrainer-Prensa</i>		
Cake Prensa	508956.87	478808.69
Líquido Prensa	729301.54	686101.20

Tabla 5.9: Exergía física total de la sustancia de trabajo para las dos líneas de cocción (\* Ecuación 3.10 o 3.11).

Descripción	Exergía Física Total $E^{PH}$ (kJ/h)*	
	Línea No 1	Línea No 2
Cake Prensa	321124.74	345567.24
Cake Separadora	61328.36	65996.38
Concentrado	38382.85	41303.28
Fase Sólida	12073.95	12993.80
<i>Harina</i>		
@ T = 80 C	287381.02	326557.57
@T = 100 C	332662.86	379075.86
Agua Evaporada	3919297.67	3966160.92

Tabla 5.10: Exergía física total de la sustancia de trabajo para las dos líneas de secado (\* Ecuación 3.10 o 3.11).

Descripción	Exergía Física Total $E^{PH}$ (kJ/h)*	
	Línea No 1	Línea No 2
<i>Vapor en Cocinador</i>	<b>3984228.98</b>	<b>3750015.81</b>
Saturado	4488970.01	4225085.60
Condensado	504741.02	475069.78
<i>Vapor en Secador</i>	<b>6270592.15</b>	<b>5488249.77</b>
Saturado	7565369.91	6316872.77
Condensado	1294777.76	828623.00

Tabla 5.11: Exergía física total del vapor saturado para las dos líneas de cocción (\* Ecuación 3.10 o 3.11).

La transferencia de calor intercambiada con los alrededores, para los equipos en los procesos de cocción y secado en cada una de las líneas de producción, fueron obtenidas del balance de energía (Tabla 5.12).

EQUIPOS	Calor Transferido al Ambiente, $Q_{VC}$ (kJ/h)	Calor Transferido al Ambiente, $Q_{VC}$ (kJ/h)
	Línea No 1	Línea No 2
Equipo Cocinado	-95569.11	-96165.49
Prestrainer-Prensa	-1631480.21	-1534839.11
Equipo Secador	-903247.62	-984426.43

Tabla 5.12: Calor transferido al ambiente por los equipos de las dos líneas para los procesos de cocción y secado.

Con estos valores se determinaron las respectivas generaciones de entropía y la destrucción de exergía. Esto último como producto de las irreversibilidades internas de cada sistema, como se puede apreciar en la Tabla 5.13.

EQUIPOS	Generación de Entropía del Sistema, $S_{gen}$ (kJ/hK)	Generación de Entropía del Sistema, $S_{gen}$ (kJ/hK)	Destrucción de Exergía, $E_D$ (kJ/h)	Destrucción de Exergía, $E_D$ (kJ/h)
	Línea No 1	Línea No 2	Línea No 1	Línea No 2
Equipo Cocinador	8387.96	7894.38	2433765.64	2290554.33
Prestrainer-Prensa	1.95	1.84	566.51	532.96
Equipo Secador	10000.69	7179.41	2901700.83	2083105.82

Tabla 5.13: Generación de entropía y Destrucción de exergía producida por los equipos de las dos líneas de cocción y secado.

La destrucción de exergía o irreversibilidad es ligeramente superior en el equipo secador, siendo el arreglo prestrainer-prensa el que menor generación de entropía produce (Tabla 5.13).

Por último, a través del análisis de exergía se obtiene de manera más directa la destrucción de exergía producida en los sistemas, además permite determinar, conociendo los flujos de exergía de las sustancias de trabajo, la eficiencia exergética de los sistemas así como las razones de pérdida y de destrucción de exergía. Lo anterior permite obtener una idea más real del grado de aprovechamiento termodinámico de la energía dentro de un proceso en particular.

La destrucción y pérdida de exergía generadas en el proceso de cocción y de secado se muestra en la tabla 5.14, mientras que los valores para la eficiencia exergética y las razones de pérdida y destrucción de exergía se presenta en la tabla 5.15.

Como se puede apreciar en la Tabla 5.14 existe una relación inversa entre la destrucción de exergía y la pérdida de exergía. En este caso en el arreglo prestrainer-prensa la pérdida de exergía representa alrededor del 25% de la exergía pérdida en el secador, mientras que en cocinador es de 0.32%.

Cuando la transferencia de exergía por calor al ambiente es reducida drásticamente, la destrucción de exergía debido a las irreversibilidades internas del proceso se incrementa.

La eficiencia exergética en el cocinador y en el arreglo prestrainer-prensa está sobre el 30%, en el secador sólo alcanza el 5%.

EQUIPOS	Destrucción de Exergía, $E_D$ (kJ/h)	Destrucción de Exergía, $E_D$ (kJ/h)	Exergía Perdida, $E_L$ (kJ/h)	Exergía Perdida, $E_L$ (kJ/h)
	Línea No 1	Línea No 2	Línea No 1	Línea No 2
<b>1. Equipo Cocinador</b>	2433765.78	2290554.46	<b>12831.90</b>	<b>12911.97</b>
1.1 Calor al Ambiente	---	---	12831.90	12911.97
<b>2. Prestrainer-Prensa</b>	565.69	532.18	<b>1057259.84</b>	<b>994632.81</b>
2.1 Calor al Ambiente	---	---	327958.30	308531.61
2.2 Liquido Prensa	---	---	729301.54	686101.20
<b>Equipo Secador</b>	2343310.73	1518022.51	<b>4027528.47</b>	<b>4057012.10</b>
1. Calor al Ambiente	---	---	108230.80	90851.18
2. Agua Evaporada	---	---	3919297.67	3966160.92

Tabla 5.14: Destrucción y pérdida de exergía producida por los equipos de cocción y secado.

EQUIPOS	Eficiencia exergética, $\varepsilon = E_P/E_F$ (%)		Razón Destrucción Exergía, $y_D = E_D/E_F$ (%)		Razón Pérdida Exergía, $y_L = E_L/E_F$ (%)	
	Línea No 1	Línea No 2	Línea No 1	Línea No 2	Línea No 1	Línea No 2
Equipo Cocinador	38.59	38.57	61.09	61.08	0.32	0.34
Prestrainer-Prensa	32.48	32.48	0.04	0.04	67.48	67.48
Equipo Secador	4.96	6.37	34.96	25.50	60.08	68.14

Tabla 5.15: Eficiencia exergética y ratios de destrucción y pérdida de exergía producida por los equipos de cocción y secado.

La baja eficiencia en el secador está asociada a valores grandes en las razones de destrucción y pérdida de exergía. El 95% de la exergía suministrada por el vapor saturado es pérdida o destruida en el proceso de secado.

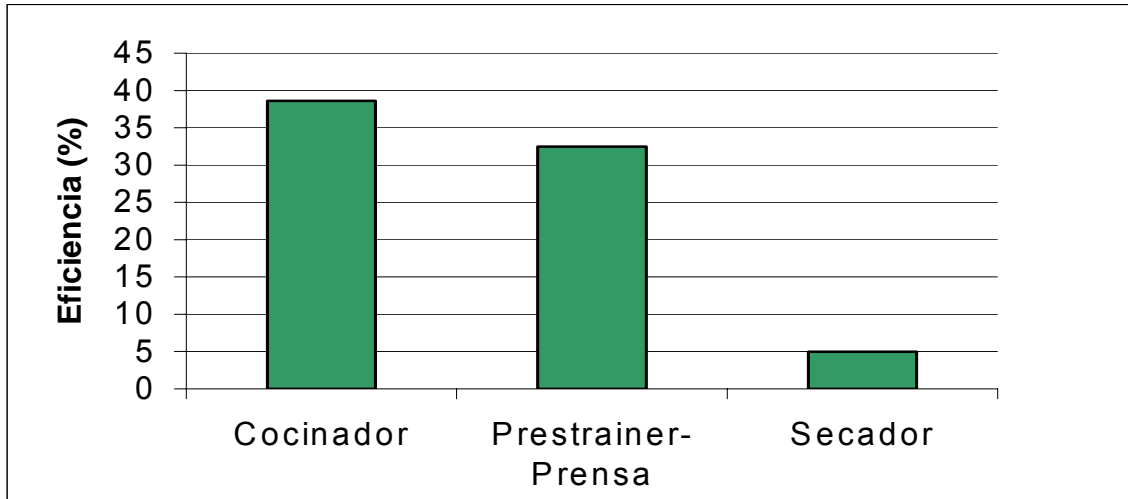


Figura 5.7: Eficiencias exergeticas de los procesos de cocción y secado.

El proceso de cocción en esta industria es del tipo indirecto, entonces el cocinador actúa como un intercambiador de calor en contra corriente. De los resultados obtenidos, según la Tabla 5.15 y de las figuras 5.7 y 5.8, no toda la exergía aportada por el vapor saturado es ganada por el pescado, pues el 61% de la exergía es destruida por las irreversibilidades internas del proceso.

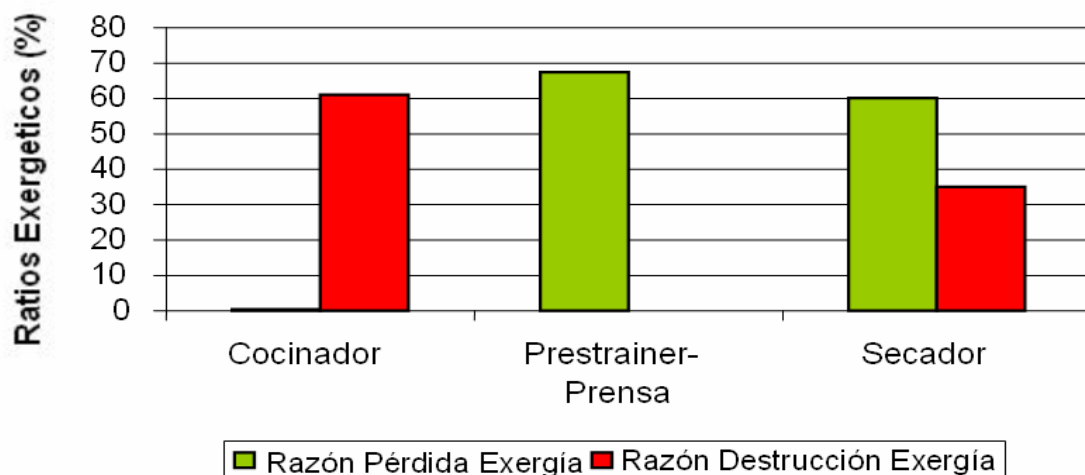


Figura 5.8: Razones de destrucción y pérdida de exergía en los procesos de cocción y secado.

Una representación gráfica de los balances de energía y exergía en función del reparto porcentual de los flujos que interactúan en cada uno de los equipos nos da una idea más clara de su estado actual de funcionamiento.

El balance de energía para el proceso de cocción (figura 5.9) nos indica que el 84.5% de la energía aportada por el vapor saturado es ganada por el pescado, lo cual puede hacer pensar que existe una gran eficiencia en el proceso. Sin embargo cuando se realiza el análisis de exergía éste nos revela que sólo el 34% de la energía es almacenada en el pescado y que más del 50% son irreversibilidades. Ambos balances muestran que la participación porcentual de los flujos de transferencia de calor al ambiente es casi nula cuando es comparada con respecto a los flujos totales que ingresan a este proceso.

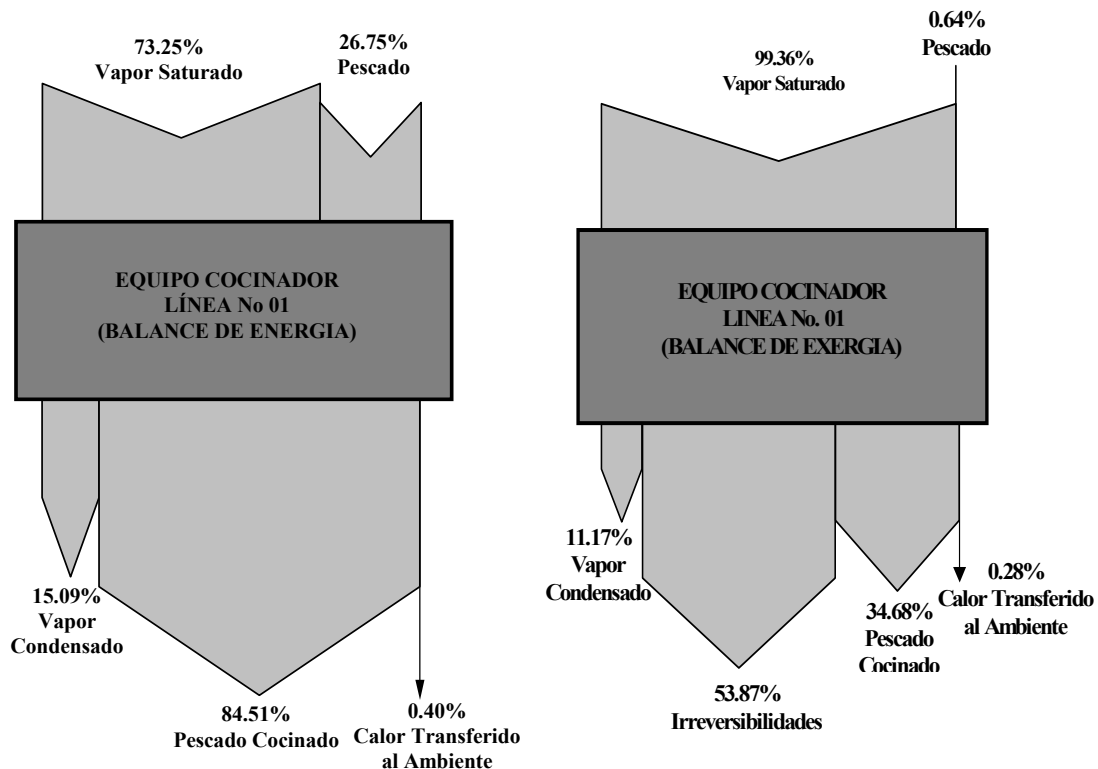


Figura 5.9: Balances de energía y exergía para el proceso de cocción en planta de producción de harina de pescado del tipo indirecto (distribución porcentual de los flujos de energía y exergía).

El mismo análisis es aplicado al arreglo prestrainer-prensa (Figura 5.10), en este proceso de separación el cake de prensa sólo conserva el 25% de la energía contenida en el pescado cocinado y, la mayor parte de la energía (66%) es llevada fuera del equipo por el líquido de prensa. Sin embargo, el análisis de exergía revela que sólo el 46% está contenido en el líquido de prensa y la otra parte significativa (21%) es transferida al ambiente. La destrucción interna de exergía es despreciable (0.04%).

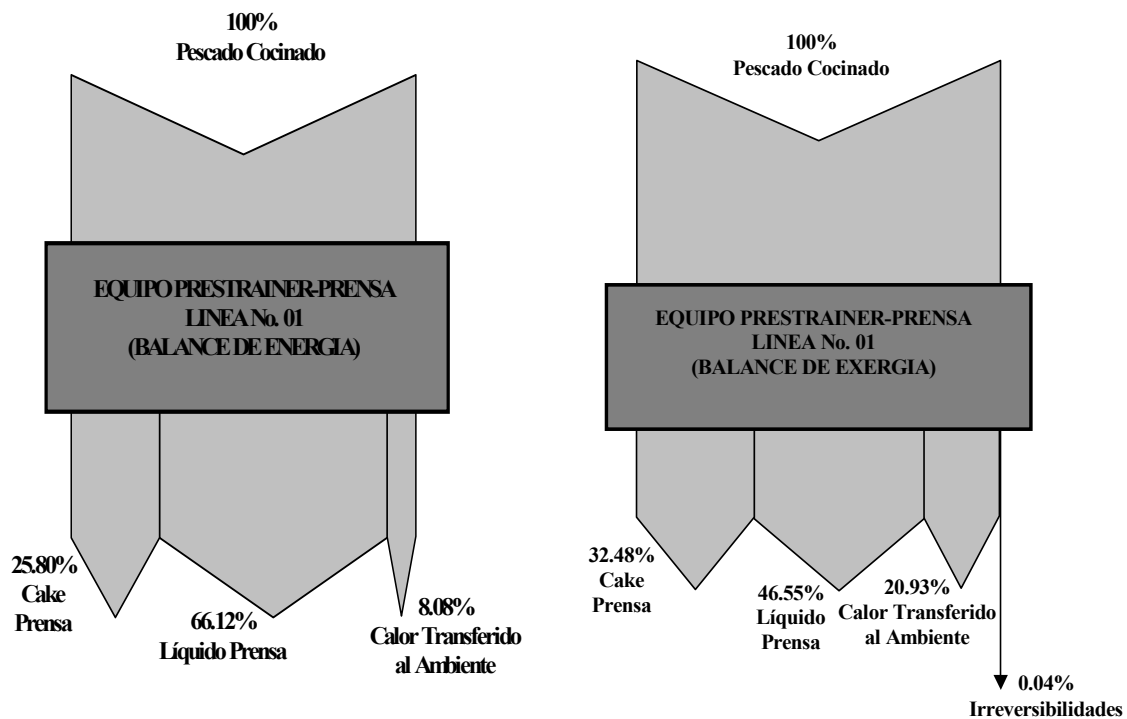


Figura 5.10: Balances de energía y exergía para el proceso de cocción en planta de producción de harina de pescado del tipo indirecto (distribución porcentual de los flujos de energía y exergía).

En el proceso de secado (figura 5.11), también del tipo indirecto, el análisis de energía muestra grandes flujos de energía abandonando el sistema como agua evaporada



(67%), pero el análisis de exergía revela que sólo el 49% de los flujos de exergía están en el agua evaporada, siendo la irreversibilidad del orden del 29%.

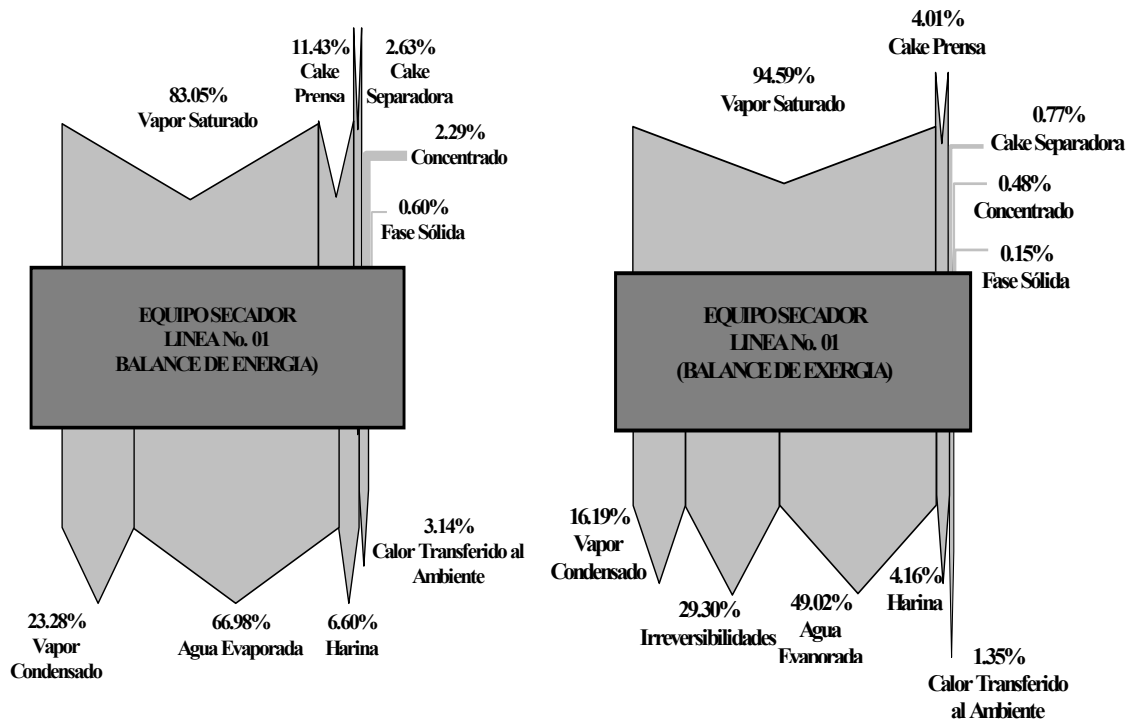


Figura 5.11: Balances de energía y exergía para el proceso de secado en planta de producción de harina de pescado del tipo indirecto (distribución porcentual de los flujos de energía y exergía).

En los dos procesos analizados ocurren tres fenómenos físicos diferentes. El primero ocurre en el equipo cocinador, donde se incrementa la exergía de la materia prima para lograr una mejor separación de la fase sólida y líquida del pescado en los procesos posteriores, este incremento de exergía produce gran irreversibilidad (54%), el fenómeno es netamente térmico.

El segundo fenómeno es de separación mecánica inicialmente por rotación y, luego por extrusión, esto ocurre en el arreglo prestrainer-prensa. Aquí tiene lugar una

disminución de la exergía contenida en el pescado cocinado. Por la naturaleza del equipo, en este, no existe aporte de energía térmica y no posee aislamiento en sus fronteras, la irreversibilidad es prácticamente nula. Este fenómeno de separación es dominada por la pérdida de exergía tanto al ambiente como la transportada en los fluidos secundarios (líquido de prensa).

El tercer fenómeno ocurre en el secador y es la separación del agua contenida en los “cakes” por evaporación, realizado con el aporte de energía térmica. La exergía en la harina de pescado es menor que la contenida en los “cakes”, al igual que en el arreglo prestrainer-prensa, ha ocurrido una disminución de exergía. Sin embargo las pérdidas y destrucción de exergía son significativamente mayores que en el arreglo prestrainer-prensa. En el secador, debido fundamentalmente a la utilización de grandes flujos de vapor, las fronteras del sistema son aisladas del medio ambiente, esta contribución incrementa la irreversibilidad del sistema de secado.

## **5.2 Análisis Paramétrico**

Este análisis tiene el objetivo de evaluar el comportamiento termodinámico del equipo cocinador y secador de la planta productora de harina de pescado. La variable sujeta a modificación es la temperatura. En este sentido la estrategia utilizada es tomar como caso base las condiciones normales de operación de estos dos equipos.

Para el proceso cocción, el ingreso de materia prima es 15°C y abandona el mismo como pescado cocinado a 95°C.

En el proceso de secado se mantienen constantes los valores de temperatura y composición de los cakes de proceso, mientras que la harina de pescado abandona el sistema a 100°C.

Las nuevas condiciones de operación consisten en hacer variar la temperatura a la cual el pescado abandona el cocinador y la harina el secador. En ambos casos estas temperaturas van desde 80°C a 100°C.

Los parámetros a estudiar son: las razones de destrucción ( $Y_D$ ) y pérdida de exergía ( $Y_L$ ), la eficiencia exergética ( $\epsilon_{ex}$ ), las irreversibilidades ( $E_D$  o  $Irr$ ), la efectividad ( $\epsilon$ ) y la mejora potencial del equipo ( $P_{tm}$ ).

Los resultados de este análisis paramétrico son expresados como una variación porcentual de las nuevas condiciones con respecto al caso base, de acuerdo a la ecuación 5.1.

#### 5.2.1. Efecto de la variación de la Temperatura de salida en el Cocinador

En la Figura 5.12 se mantiene la temperatura del pescado cocinado fija en 95°C, para esta condición se empieza a disminuir la temperatura bajo este valor.

Al analizar el comportamiento de la irreversibilidad del sistema ( $Irr$ ), la desviación porcentual (%desv) con respecto al caso base aumenta a medida que la temperatura de salida del pescado cocinado disminuye, generando también una disminución en la irreversibilidad del sistema. Cuando la desviación porcentual es del 3% ( $T = 90^\circ\text{C}$ ) la irreversibilidad a este nuevo valor de temperatura es aproximadamente el 97% del valor de la irreversibilidad a 95°C; cuando la variación porcentual es del 10% ( $T = 80^\circ\text{C}$ ) la irreversibilidad es el 90% de la del caso base.

La eficiencia exergética ( $\epsilon_{ex}$ ) presenta este mismo comportamiento, cayendo a un ritmo dos veces mayor que la irreversibilidad.

Con respecto a la razón de pérdida de exergía ( $Y_L$ ), la variación porcentual con respecto al caso base toma valores negativos cada vez más altos, lo anterior genera un incremento en la razón de pérdidas de exergía a valores de temperatura cada vez menores. Para la razón de destrucción de exergía ( $Y_D$ ) sucede el mismo efecto con una caída dos veces más rápida que la razón de pérdida de exergía.

Una consecuencia de los incrementos en la razón de pérdida de exergía es que los flujos de exergía vertidos al ambiente son menores. Cuando la razón de destrucción de exergía aumenta en el sistema, la irreversibilidad del mismo disminuye, todo esto en concordancia con el efecto de irreversibilidad generado para bajas temperaturas.

En el análisis de los procesos de cocción y secado mostrados en las Figuras 5.12-5.13 y 5.15, 5.16, 5.18 y 5.19 respectivamente, se estudia la tendencia en el comportamiento de las desviaciones porcentuales de una propiedad termodinámica específica con respecto a una del caso base. En todos los casos la variable de temperatura, en el eje de las abscisas es utilizada como referencia entre un punto por encima o por debajo del punto normal de operación al que se ha definido como caso base.

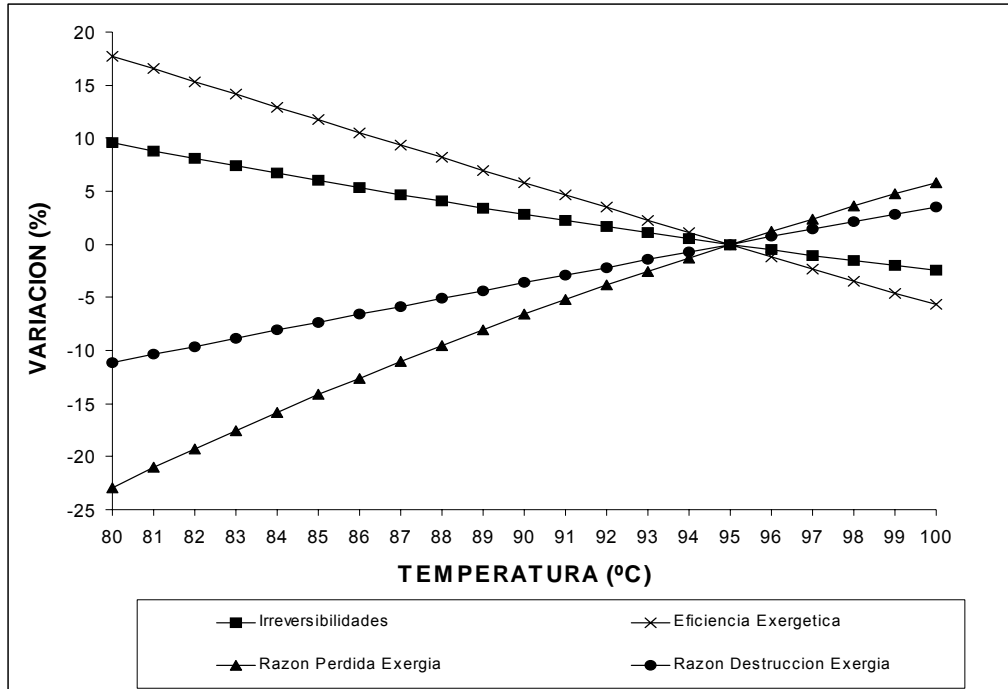


Figura 5.12: Efecto de la variación porcentual de los parámetros exergéticos del equipo cocinador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=95°C).

Si la materia prima abandona el sistema con temperaturas superiores a la del caso base, ocurre el efecto totalmente opuesto a los casos anteriores. La eficiencia exergética aumenta al igual que la irreversibilidad del sistema, en esta ocasión la eficiencia crece dos veces más rápido que la irreversibilidad.

En la figura 5.13 se aprecia el comportamiento porcentual que sufre la efectividad cuando el pescado sale a temperaturas inferiores a 95°C, los valores porcentuales son positivos y se incrementa cuando la temperatura va disminuyendo, el resultado de esto es una disminución en la efectividad del sistema, generado por una disminución en la irreversibilidad del sistema.

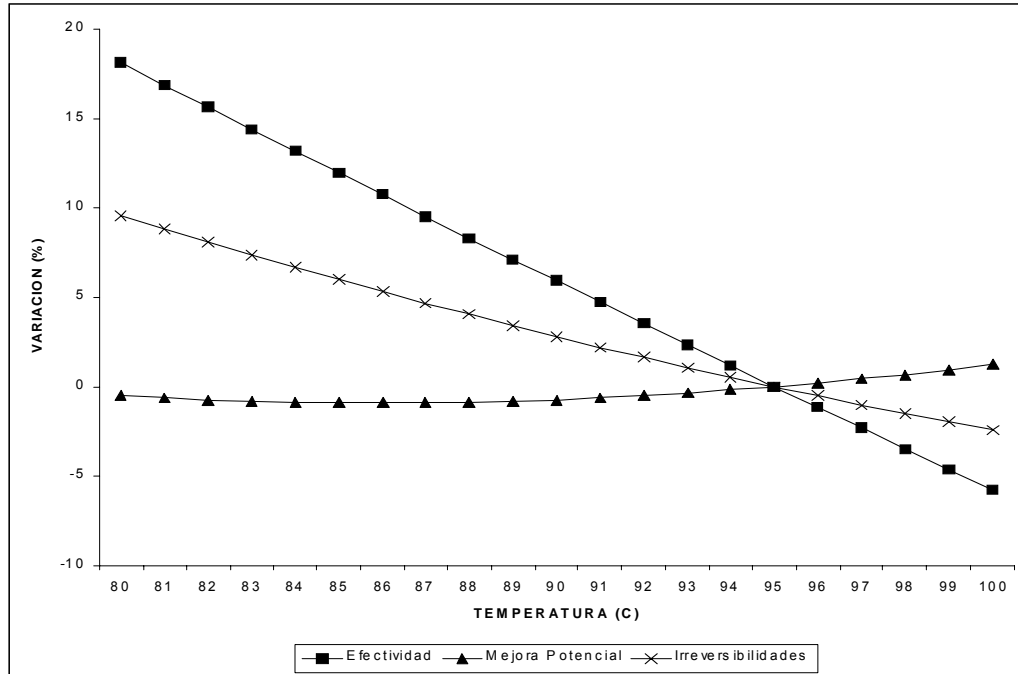


Figura 5.13: Efecto de la variación porcentual de la efectividad, mejora potencial e irreversibilidades del equipo cocinador con respecto a la temperatura de salida como caso base ( $T=95^{\circ}\text{C}$ ).

Para el caso de la mejora potencial del sistema los porcentajes de variación disminuyen tomando valores negativos, esta condición hace aumentar la capacidad de mejora del sistema, sin embargo este aumento se alcanza como máximo hasta los  $87^{\circ}\text{C}$ . Desde este punto en adelante y hasta alcanzar la temperatura de  $95^{\circ}\text{C}$ , la mejora potencial empieza a disminuir. Los resultados muestran que estos cambios porcentuales son insignificativos, pequeños valores cercanos a cero.

La figura 5.14 presenta una idea mas clara del comportamiento de estos parámetros exergéticos con la temperatura.

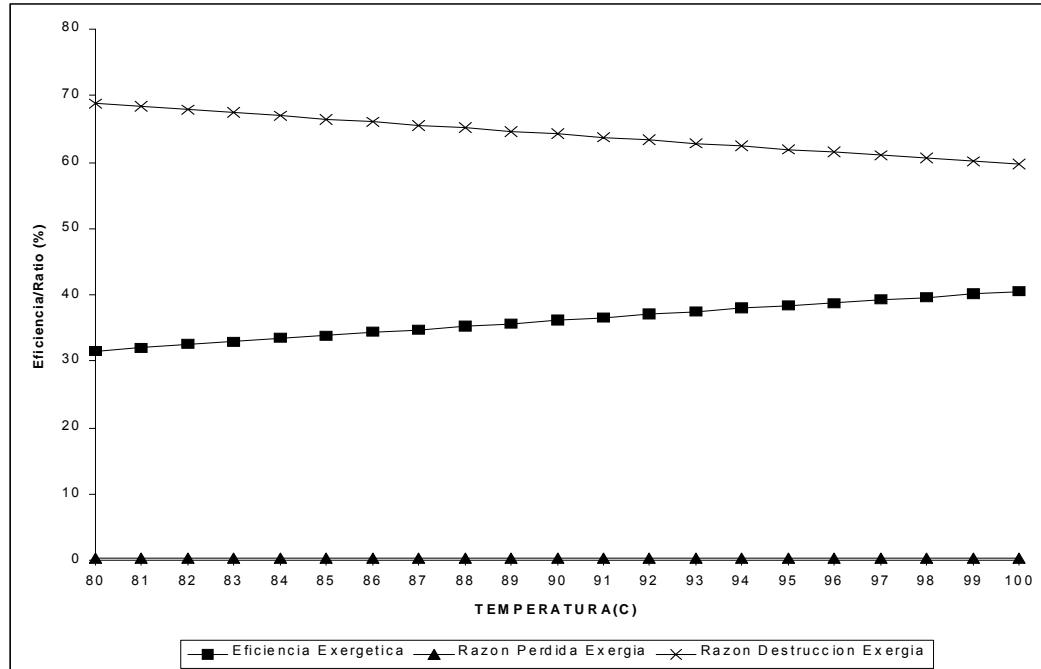


Figura 5.14: Efecto de la variación eficiencia exergetica y las razones de pérdida y destrucción de exergía del equipo cocinador con respecto a la temperatura de salida como caso base (T=95°C).

### 5.2.2. Efecto de la variación de la Temperatura de salida en el equipo Secador

Cuando la harina abandona el secador con temperaturas menores a la temperatura normal de operación (100°C), la irreversibilidad sufre variaciones porcentuales negativas y de mayor valor mientras la temperatura disminuye gradualmente, esto provoca un aumento en la irreversibilidad del sistema. La máxima variación negativa es alcanzada en 80°C y es igual a -40%, lo que indica que en este punto la irreversibilidad es superior en un 40% al valor del caso base.

El mismo ritmo de incremento es experimentado para la razón de destrucción de exergía, el incremento de esta razón esta afectado por la disminución en la irreversibilidad del sistema (Figura 5.15).

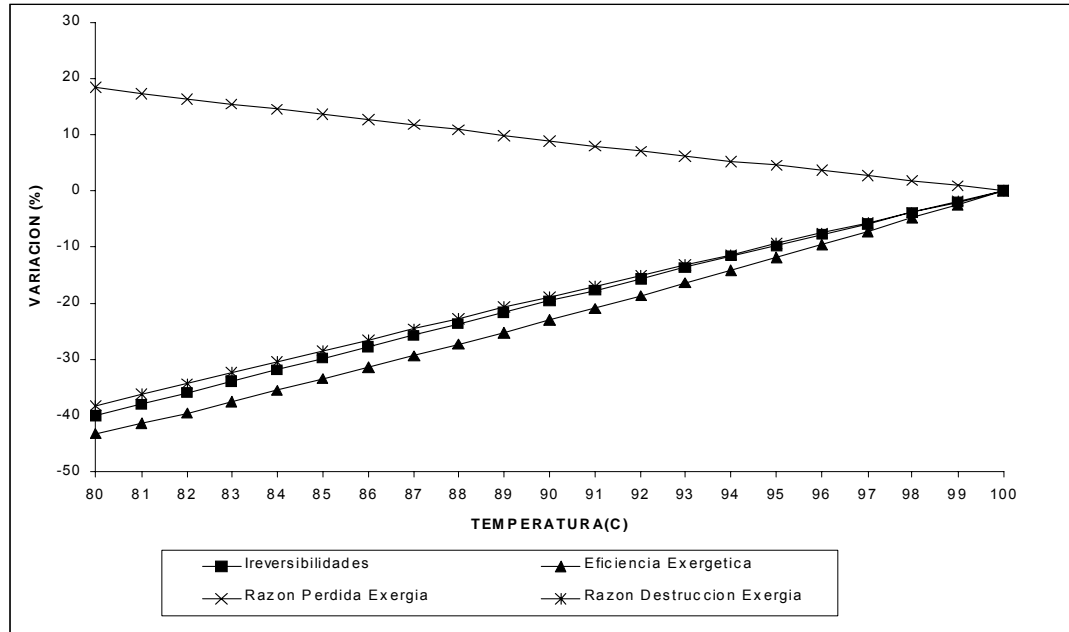


Figura 5.15: Comportamiento de la variación de la eficiencia exergética, las irreversibilidades y las razones de pérdida y destrucción de exergía del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base ( $T=100^{\circ}\text{C}$ ).

Para disminuciones de temperatura la eficiencia exergética en este caso incrementa su valor. Por otro lado para la razón de pérdida de exergía, las variaciones porcentuales son positivas y aumentan con la caída en temperatura generando una disminución en este parámetro, esta disminución esta asociada a la reducción de perdidas de exergía al ambiente (Figura 5.15).



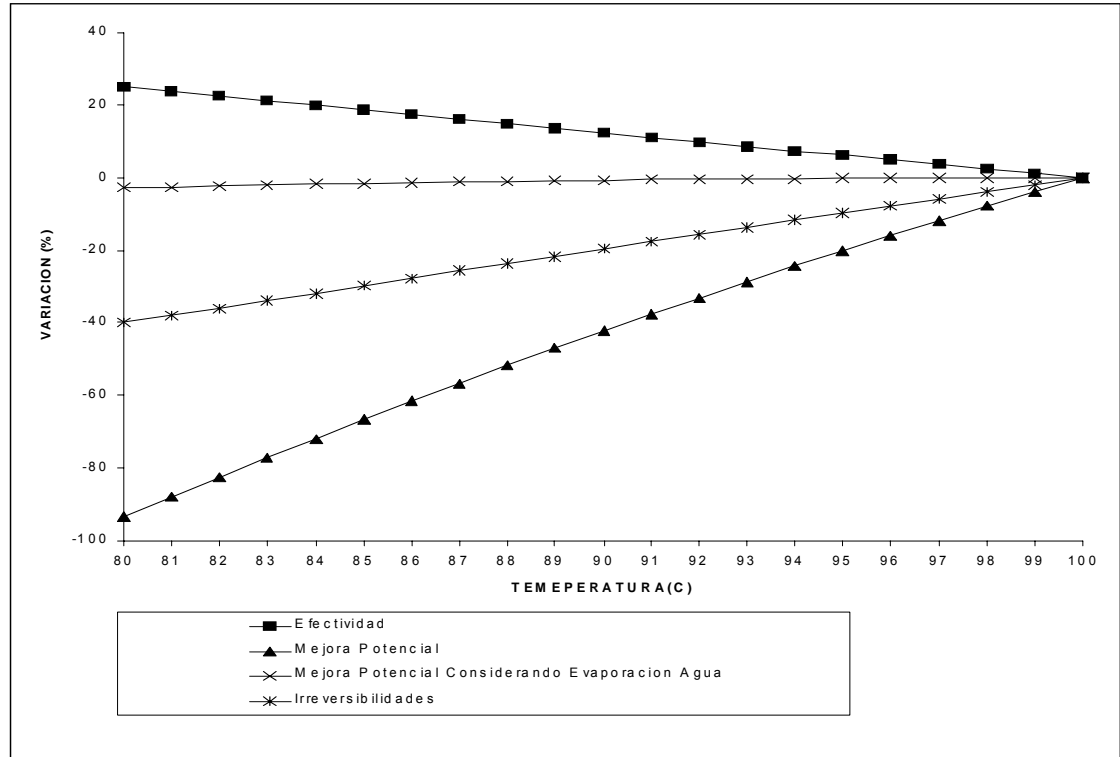


Figura 5.16: Comportamiento de la variación de la efectividad, mejora potencial e irreversibilidades del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base ( $T=100^{\circ}\text{C}$ ).

En la figura 5.16 se aprecia que la variación porcentual para la efectividad se incrementa cuando la temperatura de salida en el secador disminuye, esto está asociado al incremento producido en la irreversibilidad del sistema.

La variación porcentual para la mejora potencial del sistema sin considerar el aprovechamiento de los flujos de exergía descargados fuera del sistema en el agua evaporada se incrementan negativamente en forma significativa (Figura 5.16), generando un incremento en la mejora potencial del sistema que también se encuentra asociada al incremento en la irreversibilidad.

Cuando en la mejora potencial se consideran los flujos de exergía que abandona el sistema se mantienen prácticamente constantes, no hay cambios significativos. La figura 5.17 resume el comportamiento general de estos parámetros exergéticos en el proceso de secado.

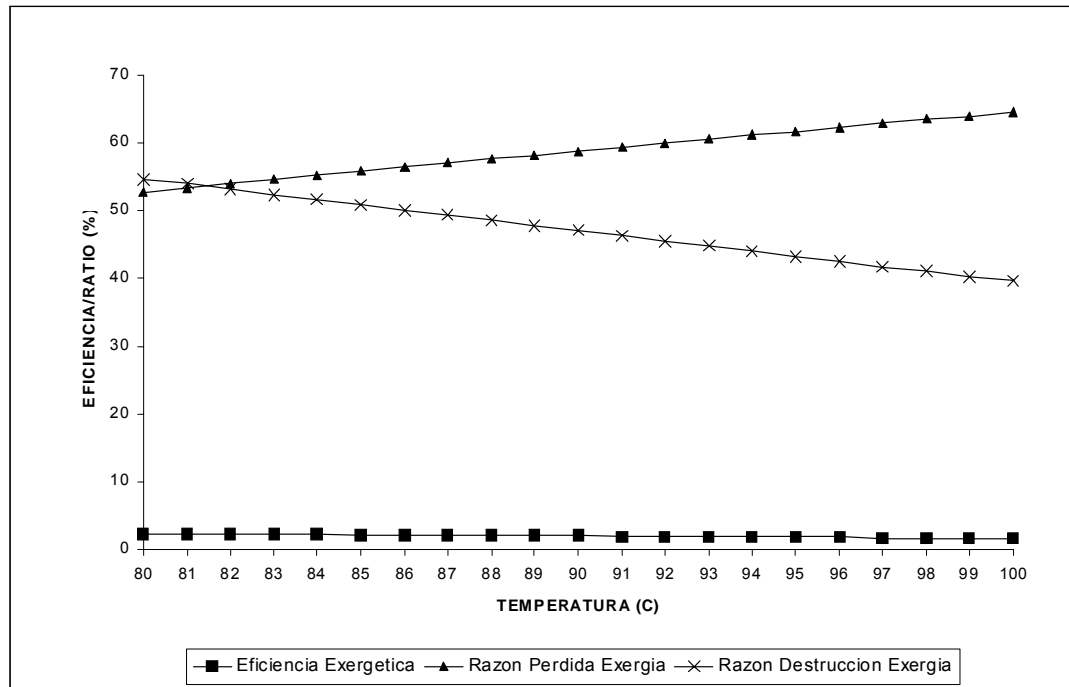


Figura 5.17: Efecto de la variación eficiencia exergética y las razones de pérdida y destrucción de exergía del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base ( $T=100^{\circ}\text{C}$ ).

Por último se ha fijado la temperatura de la salida en el secador en  $95^{\circ}\text{C}$  con el objeto de analizar el comportamiento de los parámetros exergéticos cuando la harina abandona el secador a temperaturas sobre su punto de operación, los resultados se muestran en las graficas 5.18 y 5.19.

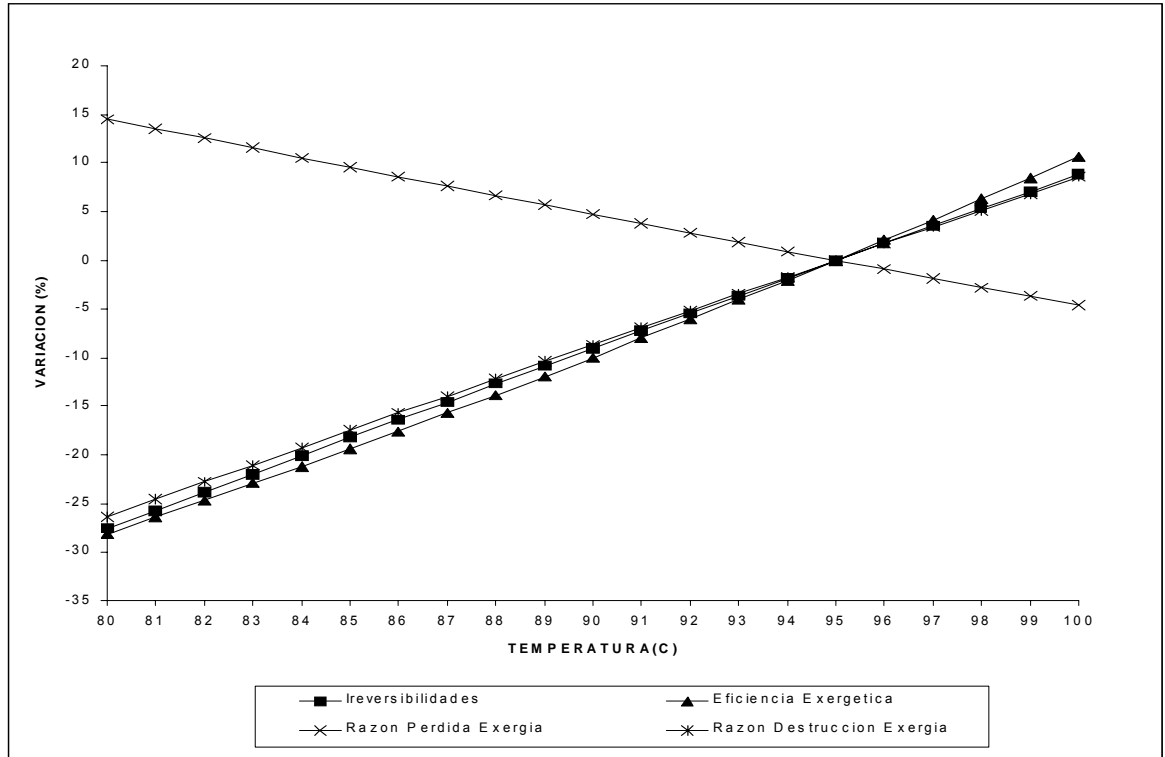


Figura 5.18: Comportamiento de la variación de la eficiencia exergética, las irreversibilidades y las razones de pérdida y destrucción de exergía del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base ( $T=95^{\circ}\text{C}$ ).

En la figura 5.18 la irreversibilidad y la razón de destrucción de exergía siguen el mismo patrón de crecimiento en variaciones porcentuales positivas. En consecuencia ambos parámetros disminuyen con el incremento de temperatura.

La eficiencia exergética en este proceso también disminuye, mientras que la razón de pérdida de exergía se incrementa con el aumento en temperatura.

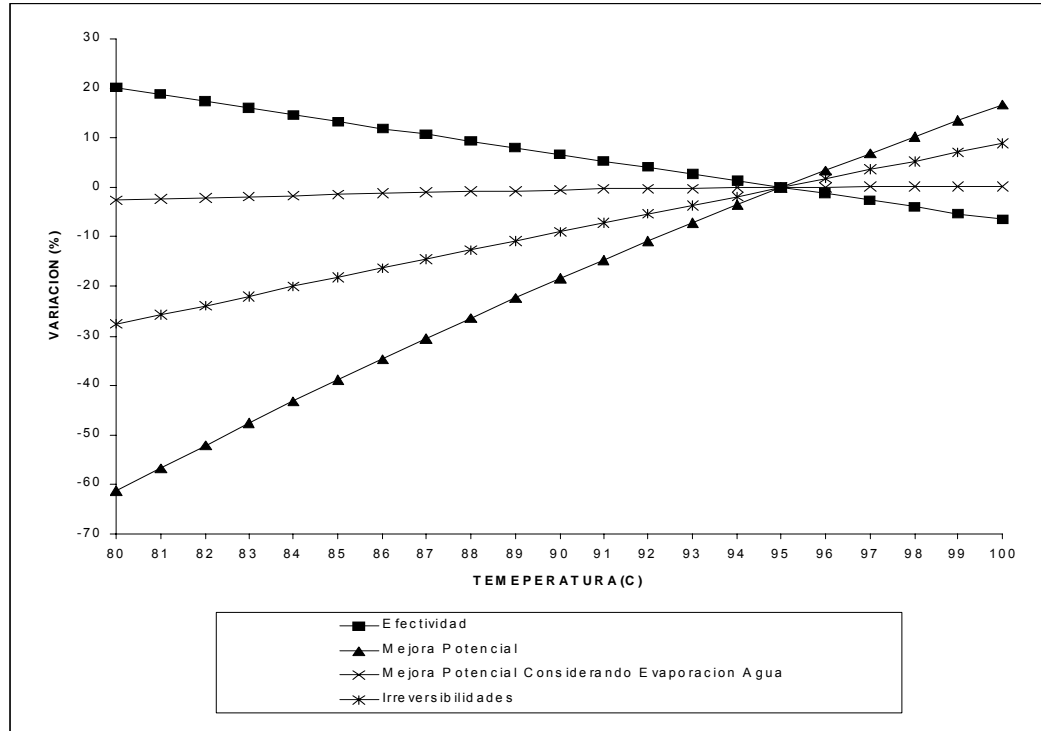


Figura 5.19: Comportamiento de la variación de la efectividad, mejora potencial e irreversibilidades del equipo secador con respecto a la temperatura de salida como caso base ( $T=95^{\circ}\text{C}$ ).

La mejora potencial en el sistema disminuye con el incremento de temperatura mientras que la mejora que considera el flujo de exergía del agua evaporada se mantiene casi constante. La efectividad del sistema también experimenta un aumento sostenido.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos de la aplicación del análisis de exergía a una industria de producción de harina de pescado con tecnología del tipo indirecto en sus procesos de cocción y secado nos permiten concluir lo siguiente:

- Una expresión matemática para la entalpía ha sido encontrada para caracterizar la entropía y la exergía del pescado en cualquier punto del proceso de producción. Esta expresión es función de la temperatura y de la composición del pescado, expresados como una fracción en peso de su contenido en proteínas, grasas y agua. Lo anterior utilizando los criterios desarrollados por Chen [11], para caracterizar de forma relativamente sencilla sustancias alimenticias de composición química compleja.
- La presunción del comportamiento de los flujos de pescado en la secuencia de producción como sustancia incompresible ha sido útil para derivar las expresiones de entropía y exergía, ante la ausencia de información teórica y experimental de estas propiedades para el pescado y en general para sustancias de origen alimenticio.
- Los resultados muestran que los valores de la entalpía y entropía para el pescado se incrementan cuando la temperatura en el pescado aumenta, lo mismo sucede cuando el contenido del agua en el pescado aumenta. Por otro lado se ha observado que incrementos en el contenido de agua disminuyen los valores de la

exergía específica del pescado. Para la temperatura incrementos en sus valores producen incrementos en los valores de exergía.

- Las expresiones de entalpía, entropía y exergía obtenidas para el pescado, han sido introducidas con eficacia en el análisis de exergía, los resultados obtenidos muestran la versatilidad de estas expresiones.
- Los resultados obtenidos, demuestran la ventaja del análisis de exergía como herramienta de diagnóstico sobre el de energía, porque permite determinar en mayor detalle la degradación de la energía en procesos netamente térmicos.
- El análisis de exergía revela que el proceso de cocción es altamente irreversible y que las razones de pérdida y destrucción de exergía en el proceso de secado son elevadas.

El análisis paramétrico proporciona un mejor entendimiento del funcionamiento de los dos procesos. De este análisis podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos para el proceso de cocción demuestran que a temperaturas bajo el punto de operación establecido la irreversibilidad del proceso disminuye, en consecuencia nos es posible una mejora potencial significativa en el sistema, el efecto contrario sucede para temperaturas superiores al punto de operación.
- En el proceso de secado el análisis paramétrico revela que para temperaturas por debajo del punto de operación hay un incremento de la irreversibilidad del proceso, generando en consecuencia una mayor posibilidad de mejorar

potencialmente el proceso. El fenómeno opuesto sucede cuando la harina abandona el secador a temperaturas por encima del punto normal de operación.

El presente trabajo de investigación permite caracterizar termodinámicamente la anchoveta cuando es sometida a procesos netamente térmicos, con el objeto de optimizar este análisis sugerimos las siguientes recomendaciones y trabajos futuros.

- La naturaleza teórica del presente trabajo de investigación obliga a una contratación a nivel de laboratorio para determinar la constante característica,  $N$ , de la anchoveta que se relaciona con el peso molecular efectivo de la anchoveta según la ecuación 4.5. Lo anterior permitirá obtener expresiones más exactas para la entalpía, entropía y exergía.
- Una mejor idea del grado de irreversibilidad dentro del proceso de producción de la harina de pescado se logrará si el análisis de exergía es aplicado a la totalidad de los equipos involucrados en este proceso de fabricación. Esto permitirá identificar que equipo o proceso es el más irreversible y como este afecta la eficiencia del sistema en su totalidad.
- Una combinación del análisis de exergía en el proceso de producción de harina de pescado con los principios termo-económicos se convierten en una herramienta valiosa para optimizar este proceso productivo desde el punto de vista termodinámico y económico, una vez identificado el grado de irreversibilidad de los mismos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AbuDagga Y. and Kolbe E., 1997. *Thermo physical Properties of surimi paste at cooking temperature*. Journal of Food Engineering. (32): pp. 325-337.
- [2] Ángeles M., 2000. *Balance de energía y masa en la Pesquera Diamante S.A.- Chancay*. Reporte final, Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú.
- [3] Bejan A., Tsatsaronis G. and Moran M., 1996. *Thermal design & optimization*. John Wiley & Sons, Inc., USA. pp. 113-163.
- [4] Bimbo A., 1998. *Prácticas recomendadas para mejoras la eficiencia de los procesos en la industria de harina de pescado: guía técnica*. Consejo Nacional del Ambiente. Perú. pp.3-5.
- [5] Caton J., 2000. *On the destruction of availability (exergy) due to combustion processes-with specific application to internal-combustion engines*. Energy. 25 (2000): pp. 1907-1117.
- [6] Cornelissen R., 1997. *Thermodynamics and sustainable development: the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility*. Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands.
- [7] Costa M., Schaeffer R. and Worrell E., 2001. *Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems*. Energy. 26(2001): pp. 363-384.
- [8] Chang H., and Tao L., 1981. *Correlations of enthalpies of food systems*. Journal of Food Science, (46): pp. 1493-1497.



- [9] Cheftel J. 1989. *Proteínas alimentarias, bioquímica, propiedades funcionales, valor nutritivo, modificaciones químicas*. Editorial Acribia. Zaragoza España.
- [10] Chejne F., Florez W., Ordonez J., and Botero E., 2001. *Exergoeconomic analysis of systems*. Journal of Thermal Engineering. 48 (1): pp. 80-85.
- [11] Chen C., 1985. *Thermodynamic Analysis of the Freezing and Thawing of Foods: Enthalpy and Apparent Specific Heat*. Journal of Food Science 50: pps.1158-1162.
- [12] Dincer I. and Cengel Y., 2001. *Energy, entropy concepts and their roles in thermal engineering*. Entropy (3): pp. 116-149.
- [13] Dincer I., 2002. *On thermal energy storage systems and applications in buildings*. Energy and Buildings. 34: pp. 377-388.
- [14] Doldersum A., 1997. *Exergy analysis proves viability of process modifications*. Journal of Energy Conversion & Management. 39(16-18): pp. 1781-1789.
- [15] El-Sayed Y., 2002. *Application of exergy to design*. Journal of Energy Conversion & Management. 43: 1165-1185.
- [16] Fang Z., Larson D.L., Fleischman G, 1995. *Exergy analysis of a milk processing System*. American Society of Agricultural Engineers. 38 (6): pp. 1825-1832.
- [17] FAO, 1986 *Fisheries Technical*. Paper: pp.142. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- [18] FAO, Fishery Industries Division, 1986. *The production of fish meal and oil*. FAO Fish. Technical Paper.142: pp. 1-63.

- [19] Fernández-Parra M.I., Nebra S. A., 2004. *The Exergy of Sugar Cane Juice and Bagasse: Proposal of Calculation Method*. Publicación en Internet. [http://ecos2004.imp.mx/ecos2004/accepted\\_pap.asp?key=country](http://ecos2004.imp.mx/ecos2004/accepted_pap.asp?key=country).
- [20] Guallar J. y Valero A., 1988. *Termodinámica y costes en una industria azucarera: análisis termodinámico*. Revista Alimentación, Equipos y Tecnología. (septiembre-octubre): pp. 199-210.
- [21] Hinderink A.P., Kerkhof F.P.J., Lie A.B.K., De Swaan Arons J. and Van Der Kooi H.J., 1996. *Exergy analysis with a flow sheeting simulator-I. Theory calculating exergies of material streams*. Journal of Chemical Engineering Science. 51(20): pp. 4963-4700.
- [22] Karakus A.A., Boyar S., Akdeniz R.C. and Hepbasli A., 2002. *An exergy analysis in a mixed feed industry: evaluation of an extruder pellet line*. EE & AE'2002. International Scientific Conference. 04-06.04. Rouse, Bulgaria.
- [23] Kotas T. J., 1995. *The exergy method of thermal plants*. Krieger Publishing Company, USA.
- [24] Lozano M. y Valero A., 1982. *Análisis energético y exergético de calderas de vapor*. Conferencia Nacional de Ahorro Energético y Alternativas Energética. Zaragoza, España. pp.183-198.
- [25] Lozano M. y Valero A., 1986. *Evaluación de los rendimientos energético y exergético de calderas de vapor por pérdidas separadas*. Energía. (enero-febrero):pp.109-124.

- [26] Medina M., y Mendieta O., 1998. *Thermodynamic behavior of fishmeal during adsorption*. *Drying Technology* 16(9, 10): pp.1827 – 1842.
- [27] Moran M. and Shapiro H., 2000. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.4th Edition. New York, USA.
- [28] Narváez W. C., 2003. *Optimización de los procesos térmicos en una unidad de producción de harina de pescado mediante evaluación exegética y termo económica*. Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú.
- [29] Oficina técnica de energía, 2000. *Balance nacional de energía 2000*. Ministerio de Energía y Minas. Perú, p. 25.
- [30] Peters M., and Timmerhaus K., 2003. *Plant design and economics for chemical engineers*. Fifth Edition McGraw Hill. New York, USA.
- [31] Pham Q., Wee H., Kemp R. and Hepbasli A., 1994. *Determination of enthalpy of foods by an adiabatic calorimeter*. *Journal of Food Engineering*. (21): pp. 137-156
- [32] Pham Q., 1987, *Calculation of Bound Water in Frozen Food*. *Journal of Food Science*.52 (1): pp. 210-212.
- [33] Polley S., Snider O., and Kotnour P., 1980. *A compilation of thermal properties of foods*. *Food Technology*: pp. 76- 94
- [34] Publicación en Internet. *Globefish Highlights*, 2001. Vol4: pp.18-20. Diciembre 15, 2001.<http://www.globefish.org>.

- [35] Quijano J., 2000. *Exergy analysis for the Ahuacachapan and Berlin Geothermal Fields, El Salvador*. Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku. Japan. May 28 – June 10. pp. 861-866.
- [36] Rao M., and Rizvi S., 1995. *Engineering properties of foods*, Second Edition, Revised and Expanded. Marcel Dekker, Inc. New York. USA.
- [37] Rivero R., y Anaya A., 1990. *Exergy analysis of a distillation tower for crude oil fractionation*. Computer Aided Energy Systems Analysis. AES 21: pp. 55-62.
- [38] Rojas I. y Guevara R., 1999. *Estructura del consumo de energía en la empresa productora de harina y aceite de pescado*. Challwa Ancash S.A. Reporte Técnico. Chimbote, Perú.
- [39] Rosen M., 1999. *Second law analysis: approaches and implications*. International Journal of Energy Research. (23): pp. 415-429.
- [40] Rostein E., 1983. *The exergy balance: a diagnostic tool for energy optimization*. Journal of Food Science.48: pp. 945-950.
- [41] Salamon P., 1999. *Various approaches to thermodynamics. Paper*. Department of Mathematical and Computer Sciences. San Diego State University, San Diego California, USA.
- [42] Sanz P. D., Alonso M. D., and Mascheroni R. H., 1987. *Thermo physical properties of meat products: general bibliography and experimental values*. American Society of Agricultural Engineers. 30(1): pp. 283-296.

- [43] Sciubba E., 2001. *Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems*. Exergy, An International Journal. 1(2): pp. 68-84.
- [44] Sosa J., 1996. *Optimización del uso de los recursos energéticos en la elaboración de harina y aceite de pescado de la fábrica International Fish Protein S.A.* Reporte final, Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú.
- [45] Stork Comprimo, 1994. *Calculating exergies in Aspen Plus (PC-version)*. User manual. Report 61285-0037-302-01.
- [46] Szargut J., Morris D.R. and Steward F. R., 1988. *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical process*. Hemisphere Publishing. USA.
- [47] Taprap R. and Phutthame K., 2003. *Energy and exergy analysis of canned food plant in Thailand*. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Bangkok 10520. Thailand.
- [48] Vera C., 1998, *Diseño del sistema para la recuperación del calor de los gases húmedos en el secador rotativo por recirculación de vahos en la Envasadora Chimbote Export*. Tesis de ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú.
- [49] Wall G., 1983. *Exergy flows in industrial processes. Report. Physical resource theory group*. Chalmers University of Technology and University of Goteborg, Sweden.

- [50] Wall G., 1990. *Exergy conversion in the Japanese society*. Journal of Energy 15(5): pp. 435-444.
- [51] Wang Y. and Feng X., 2000. *Exergy analysis involving resource utilization and environmental influence*. Computers and Chemical Engineering. (24): pp. 1243-1246.
- [52] Wark K., 1995. *Advanced thermodynamics for engineers*. McGraw-Hill. New York, USA.
- [53] Zanelly J., 2000. *Diseño de economizador de energía térmica en Corporación Pesquera San Antonio Samanco S.A.* Tesis de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú.
- [54] Zhang J. et al., 2001. *Thermal properties of skipjack tuna*. International Journal of Food Properties. 4(1): pp. 81-90.

**APÉNDICE A**

**DERIVACIÓN DE LAS ECUACIONES**

**TERMODINÁMICAS PARA SUSTANCIAS**

**ALIMENTICIAS**

En esta sección se presenta la derivación de las expresiones termodinámicas para sustancias alimenticias aplicando los criterios utilizados por Chen [11], estas expresiones corresponden a la razón o variación de la temperatura en la formación de hielo, calor específico aparente, entalpía, determinación del peso molecular efectivo y del punto inicial de congelación.

El objetivo es entender el comportamiento de las propiedades termodinámicas de una sustancia alimenticia cuando es sometida a procesos térmicos.

Considere un alimento conteniendo  $W_{wo}$  Kg de agua en total,  $W_{so}$  Kg de sustancias solubles (ácidos, sales, azúcares en solución) y  $W_u$  Kg de sustancias insolubles (celulosa, grasas y almidón) para ser enfriadas bajo el punto inicial de congelamiento.

En este punto el sistema ahora contiene  $W_I$  Kg de hielo, y  $W_w$  Kg de agua no congelada. Para cualquier cambio en temperatura bajo el punto de congelamiento hay un cambio correspondiente en las cantidades de  $W_I$  y  $W_w$  debido a la cristalización de hielo.

Entonces la relación entre hielo y agua puede ser expresada como:

$$W_I = W_{wo} - W_w \quad (\text{A.1})$$

$$W_{wo} = W_I + W_w \quad (\text{A.1.a})$$

Para realizar el análisis termodinámico se realizaron las siguientes consideraciones (Bartlett 1944) [46].

1. La sustancia (alimenticia) es un sistema heterogéneo en un estado de equilibrio a presión constante.



2. El sistema esta en todo el tiempo sobre la temperatura eutéctica.
3. Es aplicable la ley de Raoult's.
4. La capacidad termal de la fase de solución es una función lineal de la concentración y es independiente de la temperatura.
5. Las capacidades térmicas de las fases sólidas son constantes.

Debido a que la ley de Raoult's es valida solo para una solución ideal, esto es aplicable y, las limitaciones para alimentos necesitan ser establecidas experimentalmente.

Sobre la base de estas consideraciones, se ha derivado una ecuación para el punto de congelamiento y, expresada en forma lineal como:

$$\frac{d \ln(a_w)}{dT} = \frac{M_w L}{RT^2} \quad (\text{A.2})$$

La forma integral es:

$$\ln(a_w) = \frac{M_w L}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (\text{A.3})$$

La ecuación de depresión para el punto de congelamiento, provee la base termodinámica para el estudio de procesos de alimentos bajo congelación.

El agua no congelada es expresada en forma de fracción molar, a través de la Ley de Raoult's en función de la actividad de agua:

$$a_w = \frac{W_w / M_w}{\frac{W_w}{M_w} + \frac{W_{SO}}{M_s}} = \frac{W_w}{W_w + EW_{SO}} \quad (\text{A.4})$$

Donde:  $E = M_w / M_s$

De (A.4):

$$a_w \cdot W_w + a_w \cdot E \cdot W_{SO} = W_w = E \cdot W_{SO} \cdot \frac{a_w}{1 - a_w} \quad (\text{A.4.a})$$

De (A.4.a) en (A.1):

$$W_I = W_{WO} - E \cdot W_{SO} \cdot \frac{a_w}{1 - a_w} \quad (\text{A.5})$$

Ahora dividimos la relación de hielo y agua por el peso total de la sustancia para expresarla en función de una fracción en masa:

$$X_I = \frac{W_{WO}}{W_{WO} + W_{SO} + W_U} - E \cdot \frac{W_{SO}}{W_{WO} + W_{SO} + W_U} \cdot \frac{a_w}{1 - a_w}$$

Entonces:

$$X_I = X_{WO} - E \cdot X_{SO} \cdot \frac{a_w}{1 - a_w} \quad (\text{A.6})$$

Toda sustancia alimenticia contiene una cantidad de agua ligada en su composición, entonces la ecuación (A.4) ha sido modificada por Schawartzberg (1976) para considerar esta condición:

$$a'_w = \frac{W_w - W_B}{W_w - W_B + E \cdot W_{SO}} \quad (\text{A.7})$$

Entonces, también se tiene:

$$X_I = X_{WO} - E \cdot X_{SO} \cdot \frac{a'_w}{1 - a'_w} \quad (\text{A.8})$$

Las ecuaciones (A.6) y (A.8) son similares, a partir de esta similitud, las siguientes deducciones aplicaran a ambos casos:

### 1. La razón de temperatura de formación de hielo

Sea “s” los kilogramos en masa de hielo formado por la caída de temperatura en grados por kilogramos de la sustancia:

$$s = -\frac{\partial X_I}{\partial T} \quad (\text{A.9})$$

Asumiendo  $M_S$  constante y diferenciando la ecuación (A.6) con respecto a  $a_w$ , entonces:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_I}{\partial a_w} &= \frac{\partial X_{wo}}{\partial a_w} - E.X_{so} \cdot \frac{\partial}{\partial a_w} \left( \frac{a_w}{1-a_w} \right) \\ \frac{\partial X_I}{\partial a_w} &= -E.X_{so} \cdot \frac{1}{(1-a_w)^2} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

De ecuación (A.2):

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{M_w L}{RT^2}$$

Entonces:

$$\frac{\partial a_w}{\partial T} = a_w \cdot \frac{M_w L}{RT^2} \quad (\text{A.11})$$

Entonces la ecuación (A.9) puede ser expresada a partir de las ecuaciones (A.10) y (A.11) como:

$$s = -\frac{\partial X_I}{\partial T} = \frac{\partial X_I}{\partial a_w} \cdot \frac{\partial a_w}{\partial T} = -E.X_{so} \cdot \frac{1}{(1-a_w)^2} \cdot a_w \cdot \frac{M_w L}{RT^2}$$

Así:

$$s = \frac{X_{SO} \cdot a_w \cdot M_w^2 \cdot L}{M_s (1 - a_w)^2 \cdot R \cdot T^2} \quad (\text{A.12})$$

El valor de  $a_w$ , varia entre cero y uno ( $0 \leq a_w \leq 1$ ), entonces la siguiente aproximación es valida:  $\text{Ln}(a_w) \cong a_w - 1$ , en consecuencia tendremos:

$$\text{Ln}(a_w) \cong a_w - 1 \cong \frac{M_w \cdot L}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)$$

Es decir:

$$1 - a_w = \frac{M_w L}{R \cdot T \cdot T_0} (T_0 - T) \quad (\text{A.13})$$

Haciendo el siguiente cambio de variable  $t = T - T_0$ , luego reemplazando la ecuación (A.13) en la ecuación (A.12):

$$s = \frac{X_{SO} \cdot a_w \cdot M_w^2 \cdot L}{M_s \cdot \left[ \frac{L \cdot M_w}{R \cdot T \cdot T_0} (T_0 - T) \right]^2 \cdot R \cdot T^2} = \frac{X_{SO} \cdot R \cdot T_0^2}{M_s \cdot L} \left[ \frac{a_w}{(T_0 - T)^2} \right]$$

Entonces:

$$s = \frac{X_{SO}}{M_s} \cdot \frac{R \cdot T_0^2}{L} \cdot \left[ \frac{1}{t^2} + \frac{1}{(t + T_0) \cdot t} \cdot \frac{L \cdot M_w}{R \cdot T_0} \right] \quad (\text{A.14})$$

Se ha encontrado que  $\frac{1}{(t+T_0)t} \cdot \frac{L.M_w}{RT_0} \approx 0.02 \left( \frac{1}{t^2} \right)$ , es decir

$$\frac{1}{(t+T_0)t} \cdot \frac{L.M_w}{RT_0} \lllll \frac{1}{t^2}$$

Entonces, la expresión final para s, es:

$$s = \frac{X_{SO}}{M_s} \cdot \frac{R.T_0^2}{L} \cdot \left[ \frac{1}{t^2} \right] \quad (\text{A.15})$$

## 2. Ecuación de calor específico aparente

El calor específico depende tanto de la composición química como de la temperatura de la sustancia. Las temperaturas para sustancias alimenticias pueden ser divididas en dos regiones: una sobre el punto de congelamiento y la otra debajo de este punto.

Para temperaturas sobre el Punto de Congelamiento la ecuación más generalizada es:

$$C = 1 - 0.55X_{SO} - 0.15X_{SO}^3 \quad (\text{A.16})$$

Donde C, es el calor específico expresado en Kcal/Kg°C, esta ecuación aplica cuando no se conoce con exactitud la composición química de la sustancia.

Cuando se trabajan sustancias con temperaturas bajo el punto de congelamiento se utiliza la ecuación modificada de Siebel's [ASHRAE, 1981]:

$$C_f = C_0 + 0.3X_{SO} \quad (\text{A.17})$$

Donde  $C_0$  constante expresada en Kcal/Kg°C, varia entre 0.2 a 0.5, dependiendo del tipo de sustancia.

Se ha asumido un valor de 0.37 para  $C_0$ , para sustancias alimenticias conteniendo menos del 60% de sólidos.

La ecuación (A.17) asume que el calor específico del material congelado es una función lineal de la concentración ( $X_{SO}$ ) y no incluye los efectos de la entalpía de congelamiento/licuefacción.

Entonces la definición para el calor específico tiene que incluir tanto los cambios en los calores sensibles y latentes:

$$C_e = C_f + s.L \quad (\text{A.18})$$

El producto  $s.L$  puede ser obtenido de la ecuación (A.15), con lo cual la expresión resultante es:

$$C_e = 0.37 + 0.3X_{SO} + \frac{X_{SO}}{M_S} \cdot \frac{R.T^2}{t^2} \quad (\text{A.19})$$

La expresión del calor específico dada en la ecuación (A.19) es valida para sustancias con contenido de humedad superior al 40% y la diferencia con las ecuaciones de Bartlett (1944) y Schwartzberg (1976) es insignificante.

### 3. Ecuación de entalpía

Por definición termodinámica, el calor específico aparente es:

$$C_e = \left( \frac{\partial H_f}{\partial T} \right)_p \quad (\text{A.20})$$

La entalpía es medida con respecto a una temperatura de referencia,  $t_r$ , a menudo se escoge el valor de  $-40^\circ\text{C}$ , para propósitos prácticos.

Reemplazando la ecuación (A.19) en la ecuación (A.20), para integrar entre  $t_r$  y  $t$ , se obtiene:

$$\int_{t_r}^t \left( 0.37 + 0.3X_{SO} + \frac{X_{SO} \cdot R \cdot T_0^2}{M_S} \cdot \frac{1}{t^2} \right) dT = \int_{H_{ref}}^{H_f} dH_f$$

Entonces:

$$H_f - H_{ref} = (t - t_r) \left[ 0.37 + 0.3X_{SO} + \frac{X_{SO} \cdot R \cdot T_0^2}{M_S \cdot t \cdot t_r} \right] \quad (\text{A.21})$$

Se asume que  $H_{ref}$ , evaluada a  $t_r = -40^\circ\text{C}$  es cero, en este punto los niveles de energía son mínimos.

Ahora la entalpía para la zona sobre el punto de congelamiento será:

$$C = 1 - 0.55X_{SO} - 0.15X_{SO}^3 = \left( \frac{dH}{dT} \right)_p \quad (\text{A.22})$$

La integración de la ecuación (A.22), será integrada desde el punto de inicio del congelamiento ( $t_1$ ) hasta un valor cualquiera de temperatura,  $t$ :

$$\int_{t_1}^t (1 - 0.55X_{SO} - 0.15X_{SO}^3) dT = \int_{H_1}^H dH$$

Entonces la entalpía para cualquier valor de temperatura sobre el punto de congelación de la sustancia es:

$$H = H_1 + (t - t_1) (1 - 0.55X_{SO} - 0.15X_{SO}^3) \quad (\text{A.23})$$

#### 4. Peso molecular efectivo

La ecuación (A.21) es utilizada para determinar el peso molecular efectivo  $M_S$ :

$$M_S = \frac{X_{SO} \cdot R \cdot T_0^2}{t \cdot t_r \cdot \left( \frac{H_f}{t - t_r} - 0.37 - 0.3 X_{SO} \right)} \quad (\text{A.24})$$

Se utilizan métodos calorimétricos para determinar  $M_S$  (expresada en Kg/Kgmol), donde se emplean valores de entalpía en un rango de 10°C bajo el punto de congelación de la sustancia.

Los valores experimentales obtenidos para  $M_S$  muestran una dependencia con el contenido de sólidos en la sustancia; el autor ha encontrado una relación experimental para pescado:

$$M_S = \frac{N}{1 - X_{SO}} \quad (\text{A.25})$$

En la ecuación (A.25), N es la constante característica, la cual depende del tipo de sustancia y es invariante al cambio en contenido de sólidos. Para músculo de pescado (Cod Fish), se tiene  $N = 404,9$  Kg/Kgmol.

#### 5. Determinación del punto inicial de congelamiento

La temperatura donde empieza el punto de congelamiento de la sustancia es difícil de determinar con precisión. La ecuación (A.21), es nuevamente utilizada para determinar en forma aproximada el punto inicial de congelamiento:

$$H_1 = (t_1 - t_r) \left( 0.37 + 0.3 X_{SO} + \frac{X_{SO}}{M_S} \cdot \frac{R \cdot T_0^2}{t_1 \cdot t_r} \right) \quad (\text{A.26})$$



**APÉNDICE B**

**TERMINOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DEL  
MÉTODO DE EXERGA**

## **Terminología para la aplicación del método de Exergía**

Artículo original de: Ricardo Rivero R, Gisela Montero A. Ricardo Pulido

El método de exergía fue desarrollado inicialmente en Europa, y posteriormente, en Estados Unidos, generando con su desarrollo histórico una heterogeneidad considerable en cuanto a terminología. En este escrito se propone el término empleado por Rant, Exergía, como el único aceptable mundialmente para el concepto de "trabajo que puede ser extraído de un fluido o de un sistema como resultado de condición de no equilibrio relativo a alguna condición de referencia", en virtud de tener el mismo significado etimológico en la mayoría de las lenguas vivas. Se establece además la manera de utilizar dicho término en el idioma español y se definen los términos, anergia, Entrogía y Exergoeconómico, estableciendo el sistema de unidades que debe emplearse para aplicar el método de Exergía.

### **INTRODUCCIÓN**

A pesar de la abundancia de términos para su identificación, se sabe que la exergía es una función de estado termodinámica que proporciona una medida de trabajo disponible de un fluido o masa, como resultado de su condición de no equilibrio relativo a alguna condición de referencia<sup>1</sup>. Además es una propiedad explícita a condiciones de régimen permanente, cuyo valor puede ser calculado en cualquier punto del sistema a partir de otras propiedades conocidas determinadas mediante un balance de energía convencional. La ecuación básica que se utiliza para calcular la exergía es la siguiente:

$$Ex=(H-H_0)-T_0(S-S_0)$$

El método de Exergía es una manera sistemática de aplicar los principios de la primera y segunda leyes de la termodinámica, a procesos y equipos industriales. Sus fundamentos están inmersos en los principios de la producción entrópica dados por la segunda ley de la termodinámica<sup>1</sup>.

Debido a la importancia que ha adquirido el método de Exergía, en este escrito se propone la terminología que debe emplearse en español para mejorarlo adecuadamente. Se presentan los diferentes términos que se utilizan para expresar el concepto de exergía, y se muestra la forma en que se estructuró la palabra, las razones por las cuales debe emplearse y la manera de aplicarla en español. Posteriormente se definen una serie de términos que se utilizan en la aplicación del Método de Exergía. Finalmente se presentan las conclusiones.

### **Exergía, muchos términos para un solo concepto**

Los fundamentos teóricos del concepto de exergía fueron expuestos por Gibbs en 1875<sup>2</sup> en un Trabajo titulado "On the equilibrium of Heterogeneous Substances", en donde le llama "Available Energy of The Body and Medium" (energía disponible del cuerpo y del medio).

En 1889 el francés Gouy<sup>3</sup> propuso, con el nombre de "Energie Utilisable" (energía utilizable), el empleo de una nueva función termodinámica para generalizar el

hecho conocido de que solamente una fracción de energía térmica puede ser convertida en energía mecánica.

En 1935, en Alemania se publicó un trabajo de termodinámica del Yugoslavo E Bosnjakovic,<sup>4</sup> donde propone la aplicación práctica del concepto de exergía y en el que maneja a ésta como la "Technische Arbeitsfähigkeit" (Capacidad de trabajo técnico).

En 1951 el norteamericano Joseph H Keenan<sup>5</sup> publicó un artículo cuyo propósito era el de desarrollar el concepto de Gibbs en forma más general de lo que había hecho hasta la fecha. Propone entonces una nueva función de estado equivalente a la exergía, a la que llamó "Availability" (disponibilidad).

Posteriormente, en 1953, el alemán E. Schmidt<sup>6</sup> se refiere a la exergía como "Technische Maximale Arbeit" (trabajo técnico máximo).

En 1955, el francés Gibert<sup>7</sup> nombra a la exergía como "Energie non Dégradée en Chaleur" (Energía no degradada en calor) y propone su empleo para estudios del ahorro de energía en procesos industriales.

Es hasta mediados de la década de los cincuenta en que los especialistas en el tema empiezan a proponer un término de aceptación mundial; así que en 1945 el alemán U. Grigull propone la palabra "Ekthalpie" (Ectalpia = rendimiento calórico), que en 1956 es rebatida por el yugoslavo Z. Rant<sup>8</sup>, que considera que la capacidad de trabajo no es "Thalpie" (calor) ni "Ekthalpie", sino la obtención auténtica de trabajo. Rant establece la palabra "Exergie" (Exergía = trabajo que puede ser extraído) como el término que debe emplearse, fundamentando su estructuración con base a su significado etimológico.

A principios de la década de los sesentas fueron establecidos los fundamentos del Método de Exergia, entendiéndolo como un desarrollo integrado de los principios de la termodinámica a sistemas industriales reales<sup>9</sup>. Los primeros en este desarrollo - aunque utilizando diferentes términos para la exergia - fueron: Bosnjakovic,<sup>10</sup> Trepp,<sup>11</sup> Bachr,<sup>12</sup> Brodyanskii<sup>13</sup>, Tribus<sup>14</sup>.

En 1963, Tribus sugirió a Evans<sup>15</sup> que el término "Exergy" (exergia) era más adecuado que "Available Energy" (energía disponible) debido a que la exergia no puede ser considerada como una clase de energía, tal como lo implican los términos "Available Energy" y "Availability", sino como una medida del alejamiento de un sistema del equilibrio.

Finalmente, en 1970 El-Sayed y Evans<sup>16</sup> proponen el nombre de "Esergy" (esergia) para referirse al término exergia, que ya había sido y sigue siendo hasta la fecha aceptado mundialmente.

### **Estructuración de la palabra Exergia**

En 1956, Z.Rant<sup>8</sup> publicó un artículo en el que propone el uso de la palabra exergia, presentando sus fundamentos y la manera como la estructuró.

Como Rant propone, una palabra, para ser usada con aceptación mundial, debe formarse por lenguas clásicas, el latín y el griego, con base a los lineamientos siguientes:

1. La palabra debe ser corta para poder generar fácilmente palabras derivadas. Esto es básico para las lenguas románticas, y eslavas, en las que, en forma contraria a las lenguas germánicas (en particular el alemán), la posibilidad de generar nuevas expresiones uniendo varias palabras, es restringida. En la mayoría de los casos las palabras se modelan con las sílabas al principio o al final de una palabra raíz, según el caso. Es por esto que no es conveniente generar palabras con más de una raíz.
2. La palabra debe ser comprensible por sí misma y dar una idea clara del concepto al que pretende representar, y que pueda usarse para explicar algo. Para lograr esto, la palabra requiere al menos de tres fragmentos: el "genus proximum" (género próximo), la "differentia specifica" (diferencia específica) y la terminación. El "genus proximum" debe ser la palabra raíz que más se acerque al concepto. La "differentia specifica" debe marcar la diferencia entre palabras que contengan la misma raíz. Por último, la terminación es requerida por las lenguas vivas como un elemento a través del cual la palabra puede ser ordenada en el vocabulario en forma adecuada.
3. La palabra debe formar parte de un grupo de palabras existentes y que estén estrictamente relacionadas entre sí. En este caso serían las magnitudes termodinámicas "Entropía", "Entalpía", "Anergía", etcétera.
4. Las palabras deben de estar relacionadas etimológicamente con otras que sean lo suficientemente distintas entre sí para no confundirse.
5. La palabra debe ser agradable al oído.

Siguiendo estos lineamientos, la raíz como "genus proximum" debe ser la palabra griega "erg", ya que la palabra debe contener el concepto de "trabajo". La "differentia specifica" debe mostrar el hecho de que se trata de un trabajo disponible en un sistema, que puede ser liberado hacia el exterior. Esto se logra con la partícula griega "ek" al estar antes de una consonante, o "ex" al estar antes de una vocal, significando en cualquier caso hacia fuera. Finalmente, la terminación adecuada en el español es "ia" para que la palabra forme parte del grupo al que pertenece: entalpia, entropia, anergia.

Consecuentemente la palabra que se obtiene es "exergia" que es corta, comprensible por si misma y agradable al oído; constituida por los tres fragmentos requeridos y que al mismo tiempo que forma parte del grupo de palabras con las que está más relacionada, es lo suficientemente distinta para no confundirse con ellas.

La palabra puede ser usada en las lenguas románticas, germánicas y eslavas, como se muestra en la siguiente tabla:

IDIOMA	Palabra
Español	Exergia
Francés	Exergie
Italiano	Essergia
Alemán	Exergie
Inglés	Exergy
Eslavo	Eksergija
Ruso	Eksergiva
Polaco	Egzergia

### **Exergia en español y palabras derivadas**

En el idioma español se plantea la disyuntiva de si la palabra "exergia" debe llevar acento prosódico en la segunda e u ortográfico en la "i" y por ende de descompondrá en tres o cuatro sílabas. El hecho de que no existan antecedentes de una utilización previa a su creación en 1956, obliga a tomar como referencia las palabras más conectadas con exergia desde el punto de vista de significado, Género Próximo, Diferencia Específica - Palabras Derivadas, y Terminación.



El concepto exergia guarda una estrecha relación con otras tres magnitudes termodinámicas que son: Anergia, Entalpia y Entropia, las cuales tienen una estructura trisilábica en la mayoría de las lenguas vivas, la cual las hace lo más compactas posibles. Siguiendo el mismo patrón la palabra exergia debe entonces acentuarse prosódicamente en la segunda "e".

En español existen cuatro palabras que contienen la misma raíz "erg". Alergia, anergia, sinergia, y energía. De estos cuatro términos sólo energía se acentúa ortográficamente. Sin embargo, como se verá mas adelante, desde un punto de vista termodinámico, la palabra con la cual exergia está más íntimamente relacionada es anergia, de la cual si existen antecedentes en español de una utilización previa con acentuación prosódica.

Existe la falsa impresión de que la palabra exergia es derivada de la palabra energía, lo cual es incorrecto puesto que para que pudiera considerarse como tal, debería contener la misma raíz "erg" y la misma diferencia específica "en". Las palabras derivadas de energía son por ejemplo los adjetivos "enérgico" (tener energía) y "energético" (de energía); este último se obtiene justamente en virtud de la acentuación ortográfica en la "i": ener-gé-tico, diferenciación de adjetivos que no es necesaria para la palabra exergia.

Por el contrario, el utilizar la acentuación prosódica para los términos como exergia, anergia, entropia y entalpia, permite generar adjetivos derivados de cuatro

sílabas y no de cinco: exérgico, anérgico, entrópico y entálpico y no "exergético", "anergético", "entropético" o "entalpético". Además la formación de términos combinados es más complicada si se emplea "exergía" en lugar de "exergia"; ejemplo de esto sería el nombre que recibe un tipo de análisis en el que se consideran costos y exergia y que de emplearse la acentuación ortográfica sería " exergético-económico, en lugar de exergoeconómico, que es mucho más compacto.

Por lo que respecta a la terminación, puede decirse que la terminación acentuada "ía" es utilizada en español para formas verbales tales como el copretérito, estando reservada la terminación no acentuada "ia" exclusivamente a sustantivos. Consecuentemente, con el fin de evitar la confusión con formas verbales tales como ejercía, exprimía, extendía, etc., resulta más conveniente utilizar la acentuación prosódica.

Finalmente, cabe señalar, a reserva de mejor opinión por parte de los académicos de la lengua, que es posible utilizar cualquiera de las dos acentuaciones puesto que no existen antecedentes de una utilización previa, y es necesariamente el uso cotidiano y las preferencias de las personas que aplican este concepto, él que determinará en última instancia su acentuación.

## **Terminología y Conceptos relacionados con el método de exergia.**

### **Anergia**

Para comprender el significado de este término, el Francés Pierre Le Goff<sup>17</sup> recomienda descomponer a la energía total en dos términos:

$$\mathbf{E = Ex+Ag}$$

La exergia es la parte de la energía que puede ser utilizada como trabajo. Es obvio entonces que la anergia constituye aquella porción de la energía total, de la cual no es posible la obtención de ningún trabajo.

$$\mathbf{Ag=E-Ex}$$

Estos dos componentes de la energía son tales que todas y cada una de las transformaciones que ocurren en un proceso, se efectúan únicamente en el sentido  $Ex \rightarrow Ag$ , y nunca en sentido inverso.

### **Entropía**

John Soma<sup>18</sup> define a la entropía como la energía asociada con un cambio de entropía que se produce en un proceso cualquiera, con respecto a una condición de referencia:

$$\mathbf{Eg = T_0 S}$$

La entropía es entonces la energía que se pierde como consecuencia de la producción entrópica ocasionada por las diferentes irreversibilidades de los procesos. Por lo tanto, la exergía es la diferencia entre la entalpía y la entropía:

$$Ex = (H - H_0) - (Eg - E_{g0})$$

De manera conceptual puede decirse entonces que la entropía es a la energía lo que la entalpía es a la energía total de un sistema.

### **Exergoeconómico**

Muchos autores<sup>15,16</sup> han utilizado la expresión análisis Termo-Económico para describir la combinación de análisis exérgicos y económicos. Tsarsaronis<sup>19</sup> propuso el término exergoeconómico para caracterizar de manera más precisa esta combinación. Este término es una combinación de las palabras griegas ex, ergo = (potencial para) extracción de trabajo, y económico, es adaptable en la mayoría de las lenguas vivas. La expresión Termo-económico debe usarse en un sentido más general puesto que puede referirse también a un análisis termodinámico basado sólo en la primera ley, con una evaluación económica convencional.

### **Sistema de unidades exérgicas**

En general, existe la práctica común de expresar a la entalpía y a la entropía en términos de calor, de manera que la exergía resultante queda igualmente expresada en unidades de calor. Esto es físicamente inconsistente puesto que la exergía es una función de trabajo y no de calor. Más aún, al expresar la exergía en términos de unidades de calor

de la primera ley de la termodinámica, el hecho de que se está tomando en cuenta a la segunda ley, no se encuentra explícitamente mostrado, lo cual puede producir confusión, sobretodo a las personas no familiarizadas con la exergía.

Para hacer más explícita la segunda ley, resulta conveniente utilizar unidades exérgicas: de esta manera, cuando la entalpia y la entropía se expresan en unidades de calor o trabajo, la exergía resultante queda expresada en unidades exérgicas, que por definición son unidades de trabajo disponible. De esta manera queda manifiesto el hecho de que está empleado el Metodo de Exergía.

La primera ley de la termodinámica evalúa una unidad energética como tal simplemente, mientras que la segunda ley la evalúa en función de su contenido en unidades exérgicas. De acuerdo con la primera ley, una unidad exérgica tendrá el mismo valor a cualquier temperatura; la segunda ley por su parte evaluará la unidad, en relación a su contenido exérgico, el cual varía con la temperatura.

Las unidades energéticas son indestructibles; de manera contraria, las unidades exérgicas pueden destruirse o consumirse en un proceso. El valor termodinámico está condicionado por el hecho de que una unidad exérgica puede hacer todo lo que una unidad energética es capaz de realizar, pero esta última no siempre hará todo lo que una unidad exérgica realice.

En 1983, John Soma<sup>18</sup> propuso la creación de una unidad exérgica específica, que denominó "Aeu" (American Exergy Unit). Si la entalpia y la entropía se expresan en

BTU's, la exergia resultante quedará expresada en Aeu's. Consecuentemente, un Aeu, tal como lo define Soma, es un Btu de energía pura.

Además del Aeu, Soma definió una serie de unidades correspondientes a otras tantas unidades energéticas que se utilizan en la práctica. Esta idea es en principio muy buena, pero la nomenclatura utilizada por Soma podría parecer pretenciosa, además de ser algo complicada.

Para lograr aceptación mundial, debe idearse un sistema de unidades que resuelva los problemas antes planteados, que sea sencilla y aceptable para todos los países. La manera más sencilla de lograrlo es simplemente agregar una letra "e" minúscula a los símbolos de unidades energéticas usadas desde hace muchos años para convertirlas en unidades exérgicas, de acuerdo a la siguiente tabla:

Unidad Energética	Unidad Exérgica
Btu	Btue
Kcal	Kcale
J	Je
Erg	Erge
kWh	kWhe

Con esto se evita la generación de más unidades de las necesarias y ya existentes. Suponiendo estrictamente los lineamientos planteados por el Sistema Internacional de Unidades , en la que la unidad aceptada, tanto para calor como para trabajo, como para cualquier forma de energía, es el joule, la única unidad exérgica que debe emplearse es el joule exérgico, designado como Je.

### **Conclusiones**

En suma es importante contar con una terminología congruente y homogénea en cualquier área del conocimiento. En el caso del Método de Exergia, en el que se emplea un concepto relativamente nuevo que no contaba con un término en ninguna lengua viva, debe utilizarse una terminología de aceptación mundial y que no provoque confusión con la comunicación. Esto sólo puede lograrse basándose en lenguas clásicas y en la metodología de generación de nuevos términos utilizada en algunas áreas científicas.

Rant logró generar un término de fácil identificación en cualquier idioma, haciendo notar el hecho de que al existir muchos términos para un mismo concepto, existe la posibilidad de deformarlo o de inventar diferencias entre los diferentes términos que en realidad no existen de manera conceptual.

En español, parece razonable el conservar la estructura trisilábica impuesta en la construcción de la palabra exergia, que ofrece ventajas en la formación de palabras derivadas y en otros aspectos. Es por eso que la palabra exergia, entrogia, entropia, y entalpia deben acentuarse prosódicamente en la segunda sílaba.

En cuanto al sistema de unidades exérgicas, debe mantenerse la congruencia con el sistema internacional de unidades, o cual se logra con la definición del joule exérgico, designado como "Je".

### **Nomenclatura**

Ag Anergia

E Energía total

Eg Entrofia

Ego Entrofia de referencia

Ex Eergia

H Entalpia

Ho Entalpia de referencia

S Entropia

So Entropia de referencia

T Temperatura

To Temperatura de referencia



## Referencias citadas

Anaya, A. and Rivero. "Application of the concept Exergy to the Optimum Utilization of Energy In: Industrial Process and Equipment" Proceedings of World Congress III of Chem.Eng; vol1, pp 407-410. Tokyo (1986)

Gibbs, J.W. "On the Equilibrium of Heterogeneous Substances". Proc. Conn. Acad, october 1875 - May 1876

Goudy M.J. Physique 2léme série, vol 8. P 501 (1889)

Hosnjakovie, F. "Technisque Thermodynamik", vol 1, Dresden und Leipzing (1935)

Keenan J. "Availability and Irreversibility in Thermodynamics", Britisj Journal of Applied Physics; vol 2 pp 183-192 (July 1951)

Wschmidt E "Thermodynamic".

(\* ) Para las demás referencias consulte "Terminología para la aplicación del método de Exergia" Tecnoquímica... Ricardo Rivero R, Gisela Montero A. Ricardo Pulido. Subdirección de Ingeniería de Proyectos de Plantas Industriales I.M.P. Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. A.C. Septiembre-Octubre de 1990.