



# TERMODINÁMICA

## APLICADO A LA AGROINDUSTRIA

Por ti  
**UTB**



## TERMODINÁMICA APLICADO A LA AGROINDUSTRIA

**ISBN: 978-9942-606-58-7** (eBook)

ISBN: 978-9942-606-58-7



9 789942 606587

**Editado por:**

Universidad Técnica de Babahoyo  
Avenida Universitaria Km 2.5 Vía a Montalvo

**Teléfono:** 052 570 368

© Reservados todos los derechos 2025

[www.utb.edu.ec](http://www.utb.edu.ec)

**E-mail:** editorial@utb.edu.ec

Este texto ha sido sometido a un proceso de evaluación por pares externos.

**Diseño y diagramación, montaje y producción editorial**  
Universidad Técnica de Babahoyo

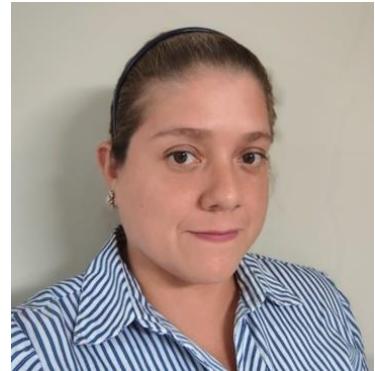
Babahoyo – Los Ríos – Ecuador

*Queda prohibida toda la reproducción de la obra o partes de la misma por cualquier medio, sin la preceptiva autorización previa.*

**Autores:**



Ph. D. Enrique José Salazar Llorente  
Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Universidad Técnica de Babahoyo  
[ejsalazar@utb.edu.ec](mailto:ejsalazar@utb.edu.ec)



Mgtr. Lidia del Rosario Nivela Vera  
Facultad de Ciencias de la Salud  
Universidad Técnica de Babahoyo  
[lnivela@utb.edu.ec](mailto:lnivela@utb.edu.ec)

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Babahoyo por hacer posible la publicación de este libro de Termodinámica. Esta obra representa el fruto de años de estudio, dedicación y compromiso con la enseñanza de las ciencias físicas, y no habría sido posible sin el apoyo institucional que la universidad brinda constantemente a sus docentes e investigadores.

Extiendo mi gratitud de manera especial a las autoridades académicas y al cuerpo editorial por la invaluable confianza, el apoyo brindado a lo largo de las etapas de revisión y difusión. Su esfuerzo ha resultado crucial para la concreción de esta iniciativa, cuyo propósito es enriquecer la formación de nuestros alumnos e impulsar la consolidación del saber científico en nuestra comunidad.

Quiero dedicar unas palabras de profundo reconocimiento a mi esposa y mi hija, quienes me han brindado su cariño, apoyo y una tolerancia que ha sido completamente incondicional.

Su apoyo constante ha sido mi mayor fuente de fortaleza e inspiración a lo largo de este camino académico.

Dedico este logro a todos los estudiantes que día a día se esfuerzan por superarse, y a quienes creen en el poder transformador de la educación.

Con gratitud,

Ph.D. Enrique Salazar Llorente  
**Docente investigador carrera de Agroindustria**

## **INTRODUCCIÓN**

Este libro se ha diseñado como una guía práctica para adentrarse en el apasionante mundo de la termodinámica aplicada a los alimentos, con un enfoque especial en la agroindustria. Nuestro objetivo es proporcionar una comprensión clara y concisa de los principios termodinámicos fundamentales que rigen los procesos de transformación de los alimentos, desde la producción hasta el consumo.

A lo largo de estas páginas, exploraremos conceptos clave como calor, temperatura, energía, entropía y sus implicaciones directas en la calidad, seguridad y conservación de los productos. Analizaremos en detalle los procesos de transferencia de calor que ocurren durante la cocción, refrigeración, congelación y otros tratamientos térmicos, así como su influencia en las propiedades texturales, sensoriales y microbiológicas.

Además, este libro abordará la aplicación de modelos termodinámicos para optimizar los procesos de producción y garantizar la calidad de los productos finales. Se presentarán ejemplos prácticos y casos de estudio que ilustrarán cómo los principios termodinámicos pueden utilizarse para diseñar equipos y procesos más eficientes y sostenibles en la agroindustria.

Esta obra está dirigida a estudiantes, profesionales y cualquier persona interesada en profundizar sus conocimientos sobre la termodinámica de los alimentos y su aplicación en la agroindustria. Nuestro propósito es proporcionar una herramienta útil para aquellos que deseen comprender mejor los fenómenos físicos que ocurren durante el procesamiento de alimentos y tomar decisiones más informadas en el ámbito de la producción y control de calidad.

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	4
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>9</b>
1.1.    Introducción a la Termodinámica y la Agroindustria .....	10
1.2.    Conceptos básicos de la termodinámica.....	10
1.3.    Estado y Transformaciones de un Sistema Termodinámico .....	11
a)    Primera ley de la termodinámica: principio de la conservación de la energía.....	12
b)    Segundo principio de la termodinámica o Ley de la Entropía: la dirección de los procesos termodinámicos.....	13
1.4.    Límites en el uso de la energía.....	14
Tercera ley de la termodinámica: Ley cero absolutos .....	14
1.5.    Aplicaciones De La Termodinámica En La Ingeniería Agroindustrial.....	15
1.6.    Propiedades Termodinámicas.....	16
1.7.    Procesos termodinámicos .....	17
1.7.1.    Procesos Isotérmicos .....	17
1.7.2.    Procesos Adiabáticos.....	17
Características de los Procesos Adiabáticos .....	18
Aplicaciones en la Agroindustria.....	18
1.8.    Procesos Isobáricos .....	19
1.8.1.    Características de los Procesos Isobáricos .....	20
Aplicaciones en la Agroindustria.....	20
Sistemas Termodinámicos .....	21
Importancia de la termodinámica en la agroindustria.....	22
Su importancia radica en los siguientes aspectos .....	22
Calderas De Vapor .....	24
Función de una caldera a vapor .....	24
Variables Termodinámicas .....	24
Ejemplo De La Termodinámica En Los Alimentos .....	26
Agua Hirviendo .....	26
Propiedades termodinámicas .....	27
Aplicaciones De La Termodinámica .....	28
1.9.    Breve historia y desarrollo de la termodinámica aplicada .....	28
Primeras Aplicaciones Industriales.....	29
Desarrollo de la Refrigeración y Conservación de Alimentos (Finales del Siglo XIX .....	29
Avances en el Procesamiento de Alimentos (Siglo XX).....	29
Energía Renovable y Sostenibilidad (Finales del Siglo XX - Presente).....	29
Innovaciones Tecnológicas Recientes.....	30
Perspectivas Futuras .....	30
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>31</b>
2.1.    Principio de la conservación de la energía .....	32
2.2.    Ley cero de la termodinámica o equilibrio térmico .....	32
2.3.    Conservación de la Energía .....	32
2.4.    Formulación Matemática .....	33
2.4.1.    Restricciones a la primera ley .....	35
2.5.    Segunda ley de la termodinámica.....	35
2.5.1.    Noción de Irreversibilidad.....	36

2.5.2. Máquinas Térmicas y la Eficiencia de Carnot .....	36
2.5.3. Eficiencia de Carnot.....	36
Ejemplo en Sistemas Agroindustriales .....	37
Ejemplo de Entropía y Flujo de Energía .....	37
2.6. Análisis del Aumento de Entropía.....	37
2.6.1 Optimización del Proceso .....	39
2.6.3 Restricciones a la segunda ley.....	40
2.7. Tercera ley de la termodinámica: Ley cero absolutos .....	41
Ejemplo 1: Cristales de hielo .....	42
Ejemplo 2: Superconductividad .....	42
Ejemplo 3: Helio líquido.....	42
Ejemplo 4: Condensados de Bose-Einstein.....	43
¿En qué áreas se aplica la termodinámica?.....	43
2.8. Entropía y su aplicación en sistemas agroindustriales.....	44
Secado de Granos.....	45
Refrigeración y Conservación .....	46
2.8.1. Conservación de Frutas en Cámaras Frigoríficas .....	48
2.8.2. Cómo Reducir la Entropía en la Agroindustria .....	49
2.8.3. Herramientas para Medir la Entropía en Sistemas Agroindustriales .....	49
Análisis del Ciclo de Vida.....	49
Ejemplo 1: Análisis del Ciclo de Vida de un Tomate.....	50
Ejemplo 2: Indicadores de Sostenibilidad en una Finca Cafetalera .....	50
Ejemplo 3: Modelos Matemáticos para Optimizar el Riego .....	51
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>52</b>
Ciclos Termodinámicos Aplicados a la Agroindustria .....	53
3.1. Ciclo de Rankine y sus variantes .....	53
3.1.1. Ciclo Rankine orgánico (ORC).....	54
Etapas del ciclo de Rankine orgánico.....	55
Ejercicio: Cálculo de la Eficiencia de un Ciclo ORC.....	56
3.1.2. Ciclo de Rankine subcrítico y supercrítico .....	58
Ciclo de Rankine Supercrítico.....	59
3.2. Ciclos de refrigeración .....	59
3.2.1. Ciclo de Carnot inverso .....	62
Compresión Adiabática (1-2) .....	62
Expansión Adiabática (3-4).....	63
Coeficiente de Rendimiento (COP) para Refrigeración: .....	63
Coeficiente de Rendimiento (COP) para Bomba de Calor.....	63
3.2.2. Ciclo de absorción y adsorción .....	64
Coeficiente de Rendimiento (COP): .....	64
Calcular el COP del ciclo .....	64
Ciclo de Refrigeración por Adsorción .....	65
Coeficiente de Rendimiento (COP): .....	65
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>66</b>
Aplicaciones Específicas en la Agroindustria.....	67
4.1. Procesos de secado.....	67
4.1.1. Secado convectivo .....	68
4.1.2. Secado por adsorción .....	69

4.1.3.	Refrigeración y congelación .....	72
4.1.4.	Conservación bajo atmósferas controladas .....	73
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>75</b>
5.1.	Energía.....	76
5.1.2.	Tipos de Energía .....	76
5.2.3.	Unidades de Medida.....	77
5.3.	Agroindustria .....	77
5.3.1.	Producción primaria .....	78
5.3.2.	Procesamiento .....	78
Cómo se utiliza la energía en la agroindustria .....		79
Producción primaria .....		79
Secado de Granos.....		81
La pasteurización.....		83
5.4.	Principios Termodinámicos.....	83
Ecuación de estado de los gases ideales .....		87
5.5.	Eficiencia energética en procesos agroindustriales .....	88
5.6.	Eficiencia Energética y Balance de Energía .....	90
Relación de rendimiento energético .....		93
5.7.	Gestión De Residuos Y Valorización Energética .....	94
5.7.1.	Tipos de Residuos Agroindustriales .....	95
Transformación de energía en la gestión de residuos y valorización energética. ....		97
Generación de energía a partir de estiércol .....		97
El pirólisis .....		99
5.8.	Digitalización y Automatización .....	101
<b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>104</b>
6.1.	Modelos termodinámicos aplicados .....	105
6.1.1.	Modelos de balance de energía .....	105
6.1.2.	Modelos de transferencia de calor.....	106
6.2.	Simulación de procesos agroindustriales .....	106
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>		<b>108</b>
7.1.	Análisis termodinámico de sistemas agroindustriales específicos .....	109
7.2.	Estudios de casos reales y sus soluciones termodinámicas .....	109
<b>CAPÍTULO 8.....</b>		<b>111</b>
8.1.	Innovaciones en tecnologías termodinámicas para la agroindustria.....	112
Conversión de biomasa mejorada.....		112
Sistemas de refrigeración avanzados La refrigeración por absorción.....		112
Principios de la Refrigeración por Absorción.....		112
Refrigeración por compresión .....		114
Sistemas de Cogeneración y Trigeneración.....		115
Trigeneración .....		116
Principios del Secado por Microondas .....		118
Hi Contenido de humedad inicial 40% .....		118
$\eta$ Eficiencia del sistema 70% .....		118
Secado por congelación.....		119
Cocina y procesamiento térmico .....		121
Sistemas de enfriamiento por evaporación .....		122
Tecnologías de generación de calor .....		124

Sistemas de almacenamiento térmico .....	125
Tecnologías de recuperación de calor.....	125
Big Data .....	128
Inteligencia artificial (IA) y análisis.....	129
8.2. Retos y oportunidades en la aplicación de la termodinámica.....	130
Retos .....	130
Oportunidades .....	131
Sostenibilidad y reducción de impacto ambiental .....	131
Integración de Cogeneración en Plantas Procesadoras.....	132
<b>CAPÍTULO 9.....</b>	<b>134</b>
Resumen de los conceptos claves.....	135
Propiedades Termodinámicas .....	135
Importancia de la Termodinámica en la Agroindustria.....	136
Gases Ideales y Calor .....	136
Aplicaciones de la termodinámica en la ingeniería agroindustrial .....	136
Importancia de la termodinámica en alimentos .....	137
Estado y Transformaciones de un Sistema Termodinámico .....	137
Breve Historia y Desarrollo de la Termodinámica Aplicada .....	138
Tercera Ley de la Termodinámica .....	139
Entropía y su relevancia en procesos termodinámicos .....	139
Irreversibilidad y producción de entropía.....	140
Estrategias para la optimización energética .....	140
Herramientas para Medir la Entropía en Sistemas Agroindustriales .....	140
Capítulo 3: Ciclos Termodinámicos Aplicados a la Agroindustria Ciclo de Rankine y sus Variantes .....	141
Ciclos de Refrigeración .....	142
Capítulo 4: Aplicaciones Específicas en la Agroindustria Procesos de Secado .....	143
Procesos de Conservación .....	143
Conservación Bajo Atmósferas Controladas .....	144
Capítulo 5: Energía en la Agroindustria .....	144
Eficiencia Energética en Procesos Agroindustriales.....	144
Gestión de Residuos y Valorización Energética .....	145
Capítulo 6: Modelado y Simulación de Procesos Modelos de Balance de Energía.....	145
Modelos de Transferencia de Calor .....	145
Simulación de Procesos Agroindustriales.....	146
Capítulo 7: Casos de Estudio y Ejemplos Prácticos .....	146
Análisis Termodinámico de Sistemas Agroindustriales Específicos .....	146
Estudios de Casos Reales y sus Soluciones Termodinámicas .....	146
Capítulo 8: Tendencias futuras y desafíos .....	147
Innovaciones en Tecnologías Termodinámicas para la Agroindustria.....	147
Retos y Oportunidades en la Aplicación de la Termodinámica .....	147
Recomendaciones para la implementación de principios termodinámicos en la agroindustria .....	148
<b>BIBLIOGRAFIAS .....</b>	<b>151</b>

# **CAPÍTULO 1**

## **La termodinámica y la Agroindustria**

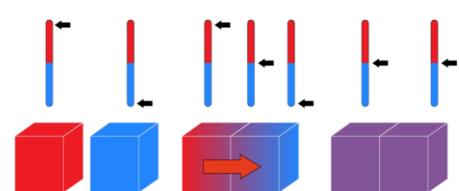
## 1.1. Introducción a la Termodinámica y la Agroindustria

Es la disciplina que dentro de la ciencia madre, la Física, se ocupa del estudio de las relaciones que se establecen entre el calor y el resto de las formas de energía. Entre otras cuestiones la termodinámica se ocupa de analizar los efectos que producen los cambios de magnitudes tales como: la temperatura, la densidad, la presión, la masa, el volumen, en los sistemas y a un nivel macroscópico. La base sobre la cual se ciernen todos los estudios de la termodinámica es la circulación de la energía y como esta es capaz de infundir movimiento es una rama fundamental de la física que se ocupa del estudio de las interacciones energéticas y los cambios en los estados de la materia que ocurren debido a estas interacciones. Se centra en el análisis de cómo el calor y el trabajo se transforman en energía y cómo estas transformaciones afectan a los sistemas físicos. La comprensión de la termodinámica es esencial para el diseño, la optimización y el control de una amplia gama de procesos industriales y tecnológicos. (Welty et al, 2018)

La agroindustria es el sector de la economía que transforma productos agrícolas en bienes de consumo final a través de diversos procesos industriales. Este sector incluye actividades como el procesamiento de alimentos, la fabricación de productos a base de materias primas agrícolas, y la gestión de recursos naturales. La agroindustria juega un papel crucial en la economía global, ya que contribuye significativamente a la seguridad alimentaria, el desarrollo económico y el bienestar social. (Wang, et al 2021).

## 1.2. Conceptos básicos de la termodinámica

La termodinámica es una disciplina de la física que estudia las leyes que rigen la transferencia de energía en forma de calor y su conversión en trabajo. Dentro de la



terminología esencial, encontramos la noción de gases ideales, este concepto representa una aproximación teórica del comportamiento de los gases. Siendo así que este esquema,

postula que las partículas gaseosas se desplazan sin restricciones y que sus únicas interacciones se limitan a choques perfectamente elásticos.

La temperatura es una medida de la energía cinética promedio de las partículas de un sistema y se cuantifica habitualmente en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) o, preferentemente, en Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ), dado que esta última representa la escala termodinámica absoluta. Por su parte, el calor se define como el proceso de intercambio de energía térmica que ocurre entre sistemas o cuerpos que poseen diferentes niveles de temperatura. Sus unidades de medida son el julio (J) o la caloría (cal), estableciéndose que 1 (cal) es aproximadamente equivalente a 4.184 J.

El calor latente es la energía absorbida o liberada por una sustancia durante un cambio de fase a temperatura constante, y el calor específico es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de un kilogramo de una sustancia en un grado Celsius (Toledo, 2018).

### **1.3. Estado y Transformaciones de un Sistema Termodinámico**

Un sistema termodinámico es una región del espacio seleccionada para análisis, cuyo estado se caracteriza por variables como presión, volumen y temperatura. Los sistemas se distinguen inicialmente por su constitución: se denominan homogéneos cuando están conformados por una única fase y mantienen una estructura química constante en todo su volumen, mientras que los heterogéneos presentan múltiples fases o una composición que fluctúa espacialmente.

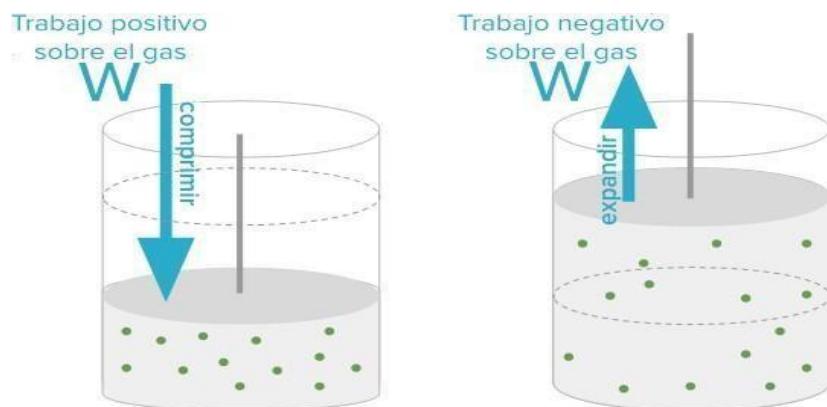
Respecto a su vínculo con el medio circundante, los sistemas se categorizan como:

- Abiertos: Aquellos que facilitan el intercambio de masa y energía.
- Cerrados: Los que solo permiten la transferencia de energía.
- Aislados: Los que no tienen interacción alguna con el exterior, ni de masa ni de energía.

Finalmente, las transiciones termodinámicas representan los cambios que desplazan a un sistema de un estado de equilibrio a otro. Dichos procesos pueden ser:

- Reversibles: Si el sistema tiene la capacidad de volver a su configuración de partida sin causar cambios permanentes en su ambiente.
- Irreversibles: Si la ejecución del proceso provoca modificaciones permanentes en el entorno, impidiendo así el retorno al punto de origen.

### a) Primera ley de la termodinámica: principio de la conservación de la energía.



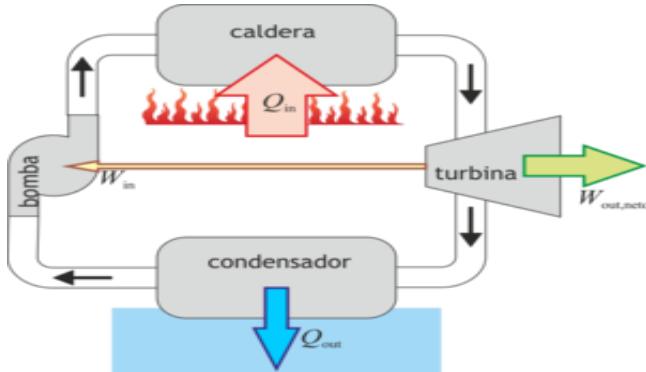
También conocida como principio de conservación de la energía para la Termodinámica, establece que, si se realiza trabajo sobre un sistema o bien éste intercambia calor con otro, la energía interna del sistema cambiará. Visto de otra forma, esta ley permite definir el calor como la energía necesaria que debe intercambiar el sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna. Fue propuesta por Nicolás Leonard Sadi Carnot en 1824, en su obra. Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia, en la que expuso los dos primeros principios de la termodinámica (Cengel & Boles, 2020).

Sí en un sistema hay aumento de energía, no es precisamente porque la creó. Así como tampoco cuando disminuye la energía, no es porque la destruye, simplemente se transformó en otro tipo de energía. Es decir que la energía se conserva. Así, la diferencia entre la energía interna del sistema y el trabajo efectuado por este será desprendida del sistema en forma de calor para cumplir con la ley de conservación de energía. La energía no puede crearse o destruirse, solo se transforma de una forma a otra y permanece constante. Así la energía puede transformarse de energía química a mecánica el combustible reacciona para producir movimiento en una aeronave.

## Ejemplos de la primera ley de la termodinámica

- **Batir un chocolate frío:** al batirlo le transferimos energía, lo cual también genera calor, por lo que su energía interna aumenta. (La energía fue transferida del batidor al chocolate. El chocolate no la creó).
- **Gas en el interior de una botella:** si dejamos una botella que contiene gas bajo el sol por un largo tiempo, es probable que explote. La energía del sol se transmite al gas aumentando su energía interna, provocando que este se expanda (realice trabajo) y provoque el estallido.
- **Con palomitas de maíz:** cuando hacemos palomitas de maíz en una olla, entra un sobre con las semillas de maíz que ganan energía por transferencia de calor. Al hincharse las palomitas, realizan un trabajo para inflar la bolsa.

### b) Segundo principio de la termodinámica o Ley de la Entropía: la dirección de los procesos termodinámicos.



La segunda ley de la termodinámica explica por qué el calor fluye de los cuerpos calientes a los cuerpos fríos y no al contrario. Una taza de café caliente se enfriá porque transfiere su energía en forma de calor al ambiente, que se encuentra a una temperatura menor. De forma espontánea en la naturaleza, la energía fluye o se transfiere desde el estado de mayor energía al de menor energía. La segunda ley pone los límites de las formas en que la energía puede transformarse y usarse. Ya que esta ley determina la irreversibilidad de los fenómenos físicos, es posible comprobarla fácilmente. Si ponemos dos cuerpos con distintas temperaturas en contacto, luego de cierto tiempo la entropía aumentará y sus

temperaturas serán iguales. Si sepáramos los cuerpos, ambos mantendrán esas temperaturas de equilibrio y no volverán naturalmente a las originales. El proceso es irreversible (Moran, M. J., et al. 2021).

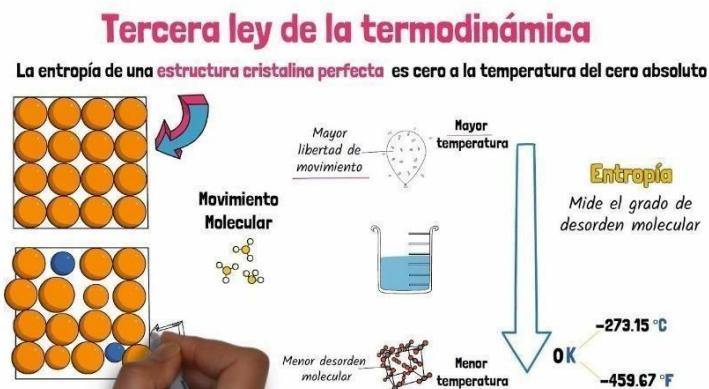
#### 1.4. Límites en el uso de la energía

La segunda ley de la termodinámica nos dice que: Es imposible que un sistema termodinámico efectúe un proceso en el que absorba todo el calor de una fuente caliente y lo convierta totalmente (100%) en trabajo mecánico, sin expulsar calor al exterior y que termine en el mismo estado en que inició. En otras palabras, no hay manera que podamos construir un motor o dispositivo que convierte toda la energía calorífica en trabajo mecánico (no podemos obtener un 100% de eficiencia, siempre habrá pérdida de energía).

#### Ejemplos de la Segundo principio de la termodinámica o Ley de la Entropía

- Con un biberón: si colocamos un biberón frío dentro de un recipiente con agua a 80°C, el calor se transfiere desde el agua caliente hasta el biberón frío.
- Con sopa caliente: tazón de sopa caliente se enfriará por transferencia de calor al entorno

#### Tercera ley de la termodinámica: Ley cero absolutos



El cero absoluto (0 K, igual a -273,15 °C) es la menor temperatura, que en teoría la materia podría existir. Experimentalmente, es imposible llegar a esta medida, así como también,

es imposible construir una máquina que sea de movimiento perpetuo. Si pudiéramos hacer que un objeto llegara al cero absoluto sus átomos se detendrían (según la física clásica), pero según la mecánica cuántica, siempre se requiere un tipo de movimiento para no violar el principio de incertidumbre de Heisenberg. (Rahman, M. S. 2020)

Al aproximarse al cero absoluto, se producen fenómenos interesantes en la materia como, por ejemplo:

- **Superfluidez:** elementos como el helio (He) se transforman en un líquido casi sin viscosidad.
- **Superconductividad:** la electricidad se conduce casi sin resistencia. Mucho mejor que en el cobre (Cu) o el oro (Au).

### 1.5. Aplicaciones De La Termodinámica En La Ingeniería Agroindustrial.

La transferencia de calor puede efectuarse por tres mecanismos: radiación, conducción y convección. La radiación consiste en la transferencia de calor mediante ondas electromagnéticas. La conducción es un tipo de transporte de calor



que tiene lugar en los sólidos y que se produce por transmisión directa de la energía molecular. La convección consiste en la transferencia de calor por grupos de moléculas que se mueven por diferencia de densidad o por agitación. Sin embargo, no hay alimentos que se calienten puramente por convección o conducción. Aquellos que presentan una consistencia mayor, se calientan por conducción y en esos casos se considera que no hay movimientos en el interior del envase durante el calentamiento o el enfriamiento. Del mismo modo, para los que presentan una consistencia menor, las curvas de calentamiento están referidas a la de productos que se calientan por convección. Durante el calentamiento y el enfriamiento se considera que están en constante movimiento debido

a las corrientes que se elevan por las diferencias de temperatura.

## Ejemplo

En los alimentos que se calientan por conducción, debido a la falta de movimiento durante el calentamiento o el enfriamiento, se origina una temperatura desde el centro geométrico hasta la pared del envase.

Durante el calentamiento el gradiente es ascendente desde el centro hacia las paredes, mientras que en el enfriamiento el gradiente es descendente desde el centro geométrico hacia las paredes; por eso, el centro geométrico es designado como el punto de más lento calentamiento o enfriamiento. Debido al movimiento del producto, en aquéllos que se calientan por convección, la temperatura en todo el envase es aproximadamente uniforme durante los procesos de calentamiento y enfriamiento.

### 1.6. Propiedades Termodinámicas

Las propiedades termodinámicas permiten caracterizar el estado de un sistema y analizar cómo cambia durante los procesos. Las propiedades más relevantes incluyen:

- **Temperatura:** Medida de la energía cinética promedio de las partículas en un sistema. Es un factor crítico en todos los procesos térmicos, ya que determina la dirección del flujo de calor entre sistemas.
- **Presión:** Fuerza ejercida por las partículas de un fluido sobre las paredes del contenedor, la aplicación de presión es un factor determinante en procedimientos agroindustriales, por ejemplo, en la pasteurización. Para ello, se emplean autoclaves, equipos que facilitan la transferencia de calor bajo condiciones de alta presión.
- **Entalpía (H):** Esta magnitud representa la energía completa inherente a un sistema, a empaquetada tanto la energía interna como el resultado de multiplicar la presión por el volumen. La entalpía se utiliza con frecuencia para cuantificar la energía calórica que se intercambia en las reacciones que suceden a una presión inalterable, como

sucede en los procesos de horneado o deshidratación de productos.

- **Entropía (s):** Se define como el indicador del grado de aleatoriedad o caos que existe en un sistema, el conocimiento de la entropía es vital para comprender por qué ciertos procesos son irreversibles y es indispensable para la determinación del rendimiento máximo alcanzable en sistemas que operan con energía térmica (Moran M. J et al, 2021).

## 1.7. Procesos termodinámicos

### 1.7.1. Procesos Isotérmicos

- **Tipo de producto:** los productos líquidos en los que se establecen corrientes de convección se calientan más rápidamente que los alimentos sólidos en los que el calor se transmite por conducción.
- **Tamaño del envase:** la penetración de calor hasta el centro del envase es más rápida en los envases de menor tamaño.
- **Agitación del envase:** la velocidad de calentamiento se puede aumentar invirtiendo el envase y sometiéndose a una agitación axial.
- **Temperatura del cocedero/autoclave:** un mayor salto térmico entre el alimento y el medio calefactor hace que la penetración de calor sea más rápida.
- **Forma del envase:** los envases más altos favorecen el calentamiento de aquellos alimentos en los que la transmisión de calor se produce esencialmente por convección.
- **Tipo de envase:** la conductividad térmica de los materiales es muy distinta: la de envases metálicos es más elevada que la de envases de vidrio o plástico.

### 1.7.2. Procesos Adiabáticos

Son transformaciones que se ejecutan sin que exista un flujo de energía térmica hacia o desde el sistema en estudio. Por lo tanto, cualquier variación en la energía interna se origina únicamente por la mano de obra mecánica ejecutada por el sistema o aplicada sobre él.

## **Características de los Procesos Adiabáticos**

**Ausencia de Transferencia de Calor:** La condición definitoria de una transformación adiabática es que el sistema no intercambia calor con el medio ambiente circundante. Esta restricción puede conseguirse de dos formas: ya sea instalando un material aislante eficaz alrededor del sistema, o bien, ejecutando la operación a una velocidad tan elevada que el tiempo disponible para cualquier fuga de calor resulte insignificante.

**Cambio en la Energía Interna:** Todo el cambio en la energía interna del sistema se debe al trabajo realizado, como la compresión o la expansión del sistema. Este cambio afecta la temperatura y la presión del sistema. (Adams, R. 2022)

## **Aplicaciones en la Agroindustria**

En la agroindustria, la termodinámica se aplica para mejorar y controlar procesos clave en la producción y procesamiento de alimentos. Secado y deshidratación de productos agrícolas son procesos críticos que utilizan principios termodinámicos para eliminar la humedad y prevenir el deterioro. La eficiencia del secado se optimiza considerando el equilibrio entre la temperatura, la humedad y la transferencia de calor (Fellows, P. J. (2017).

**Procesos de Compresión en Refrigeración:** Los sistemas de refrigeración utilizados en la agroindustria a menudo involucran procesos adiabáticos. Por ejemplo, en un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el refrigerante se comprime adiabáticamente para aumentar su temperatura y presión antes de liberar calor a través del condensador.

**Compresión de Gases y Aireación:** En el sector de la fabricación de alimentos y bebidas, la técnica de compresión adiabática desempeña un papel crucial para insuflar aire u otros gases. Específicamente, este proceso se utiliza para impulsar la aireación de productos comestibles, como es el caso de la masa en la panificación, o para gestionar de manera precisa la fermentación durante la elaboración de diversas bebidas.

**Desecación y Secado de Alimentos:** Para la eliminación de la humedad de productos comestibles como hortalizas y frutas, se recurre a procedimientos adiabáticos. El aire calentado se conduce a través del material en un entorno adiabático estrictamente regulado. Esto asegura una extracción eficiente del agua, sin causar alteraciones en las características intrínsecas del producto.

**Higienización (Pasteurización y Esterilización):** La pasteurización y la esterilización son métodos esenciales empleados para erradicar microorganismos dañinos y extender la durabilidad de los alimentos. Estas operaciones exigen una regulación precisa de los parámetros de temperatura y duración. Su éxito se fundamenta en principios termodinámicos que garantizan la inocuidad del producto para el consumo, preservando al mismo tiempo su calidad.

**Refrigeración y Congelación:** Los métodos de enfriamiento y congelación de alimentos dependen directamente de la termodinámica. El proceso de congelamiento debe ser administrado minuciosamente para impedir la cristalización excesiva del hielo, lo cual podría comprometer la integridad estructural del producto. La termodinámica facilita el desarrollo de equipos de refrigeración y congelación con alta eficiencia energética, lo que reduce el consumo y asegura la calidad alimentaria.

### **Sistemas de Almacenamiento y Conservación**

En las fases de conservación, la termodinámica posibilita la concepción de sistemas que mantienen un ambiente óptimo en términos de temperatura y nivel de humedad. Esto es vital para salvar la calidad e inocuidad de los alimentos durante su almacenaje. Dicho diseño incluye la implementación de atmósferas controladas y la utilización de técnicas como el envasado al vacío, con el objetivo de prolongar la vida útil de los productos.

#### **1.8. Procesos Isobáricos**

Los procesos isobáricos son aquellos en los cuales la presión se mantiene constante mientras ocurre la transferencia de calor y cambio en la energía interna del sistema. Estos procesos juegan un papel crucial en la agroindustria, especialmente en el procesamiento térmico y la conservación de alimentos (Fellows, P. J, 2017).

### **1.8.1. Características de los Procesos Isobáricos**

**Presión Constante:** Durante un proceso isobárico, la presión del sistema se mantiene constante en todo momento. Esto se logra mediante el control preciso de las condiciones operativas del equipo.

**Transferencia de Calor:** El calor se añade o se elimina del sistema para cambiar su energía interna, lo que a su vez puede afectar su volumen y temperatura.

**Volumen Variable:** Aunque la presión se mantiene constante, el volumen del sistema puede cambiar dependiendo del calor agregado o eliminado. (Mujumdar, A. S. 2020).

### **Aplicaciones en la Agroindustria**

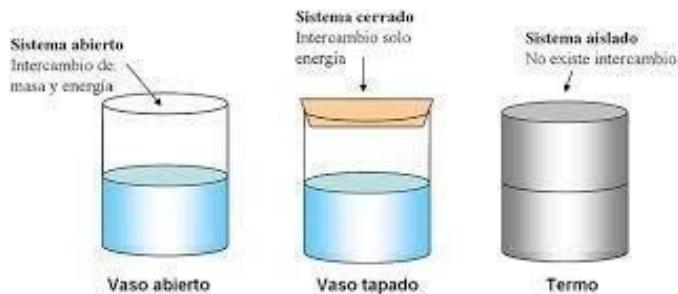
**Pasteurización de Alimentos:** La pasteurización es un proceso isobárico comúnmente utilizado en la agroindustria para eliminar microorganismos patógenos y prolongar la vida útil de los alimentos. Durante la pasteurización, el calor se aplica a temperatura y presión constantes para asegurar la eliminación efectiva de bacterias sin alterar la calidad del producto.

**Cocción Controlada:** En la producción de alimentos procesados, como sopas y salsas, se utilizan procesos isobáricos para controlar la temperatura y presión durante la cocción. Esto garantiza que los alimentos se cocinen de manera uniforme y se mantengan seguros para el consumo.

**Calentamiento en Tanques y Reactores:** En la fermentación y otros procesos

bioquímicos en la agroindustria, los tanques y reactores están diseñados para operar bajo condiciones isobáricas. Esto permite mantener condiciones estables y controladas para el crecimiento microbiano y la producción de productos biológicos.

## Sistemas Termodinámicos



Se denomina sistema termodinámico a una cierta cantidad de materia limitada o encerrada por una superficie real o ficticia. A esa superficie real o imaginaria se le denomina límite o frontera del sistema.

Los sistemas termodinámicos se clasifican según el grado de aislamiento que presentan con su entorno. Aplicando este criterio pueden darse tres clases de sistemas.

- Sistema aislado que es aquel que no intercambia ni materia ni energía con su entorno.
- Sistema cerrado (también conocido como masa de control): consiste en una cantidad fija de masa, y nada de ella puede cruzar su frontera. Esto es, ninguna masa puede entrar o abandonar un sistema cerrado.
- Sistema abierto (también conocido como volumen de control): Es una región seleccionada en el espacio. Por lo común encierra un dispositivo que comprende un flujo masivo como un compresor, una turbina o una tobera. Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control.

En Termodinámica, los sistemas elegidos para su estudio presentan, usualmente, una especial simplicidad. Los sistemas que se estudian son, generalmente, aquellos cuyo

estado queda perfectamente determinado por una terna de variables de estado. Por ejemplo, el estado de un gas puede ser descrito perfectamente con los valores de la presión que hay en el mismo, la temperatura que presenta y el volumen que ocupa. En esta clase de sistemas, las variables no son absolutamente independientes, ya que existen ligaduras entre ellas que pueden ser descritas mediante ecuaciones de estado. (Adams, R. 2022)

### **Importancia de la termodinámica en la agroindustria**

Todos los procesos para producir industrialmente los productos agrícolas involucran un complejo de equipos que funcionan a base de intercambios de energía en forma de calor, tales como: marmitas, autoclaves, calderas, hornos, calentadores, enfriadores, etc.; también, equipos que transfieren energía en forma de trabajo como turbinas, bombas y compresores. Cada uno de estos equipos puede ser analizado, en cuanto al intercambio energético, con los métodos y principios de la Termodinámica. La comprensión acerca de las formas en que se transfiere energía y poder cuantificar esas transferencias energéticas son asuntos que competen a la termodinámica; es allí donde esta ciencia cobra su mayor importancia, pues en toda industria es preciso poder cuantificar la energía requerida para un proceso cualquiera y con ello estimar el tamaño de los equipos a utilizar; esto también proporciona una base para el cálculo de los costos que con lleva el producir artículos de esta naturaleza. (Aghbashlo, M., et al, 2020)

### **Su importancia radica en los siguientes aspectos**

**Optimización de Procesos Térmicos:** La agroindustria emplea numerosos procesos térmicos, como el secado de granos, la pasteurización de productos lácteos y la esterilización de conservas. La termodinámica permite optimizar estos procesos para maximizar la eficiencia energética y minimizar el consumo de recursos.

**Sostenibilidad y Energía Renovable:** La agroindustria puede aprovechar la termodinámica para implementar tecnologías de energía renovable, como la energía solar

térmica y la biomasa. Esto no solo reduce la dependencia de combustibles fósiles, sino que también disminuye la huella de carbono de las operaciones agrícolas.

**Manejo de Residuos y Subproductos:** Los principios termodinámicos son fundamentales en el manejo de residuos agrícolas. La digestión anaeróbica, por ejemplo, convierte residuos orgánicos en biogás y fertilizantes, transformando desechos en recursos valiosos y contribuyendo a una economía circular.

**Innovación en Tecnología de Alimentos:** La termodinámica es un pilar fundamental que impulsa la creación de tecnologías de procesamiento de alimentos de vanguardia, elevando la calidad y garantizando la inocuidad de los bienes finales. Metodologías como la liofilización y la deshidratación alcanzan su máxima eficiencia gracias a una comprensión detallada de los mecanismos de transferencia de calor y de masa.

**Control de Ambiente en Invernaderos:** El control riguroso de la temperatura y la humedad dentro de las estructuras de los invernaderos resulta imprescindible para asegurar el desarrollo más favorable de la vegetación. La termodinámica ayuda a diseñar sistemas de climatización que mantienen condiciones ambientales ideales, mejorando la productividad y reduciendo costos.

**Conservación y Almacenamiento:** Los fundamentos de la termodinámica son cruciales en la refrigeración y el ultracongelado de cosechas, lo que facilita una extensión de su caducidad. Al dominar estos preceptos, es posible diseñar mecanismos de almacenaje que optimicen el rendimiento y reduzcan los costes operativos.

**Desarrollo de Productos y Procesos Innovadores:** Según la definición proporcionada en 2018, una caldera es un contenedor hermético de metal cuyo propósito es generar vapor o incrementar la temperatura del agua. Esta función se logra aplicando calor para alcanzar una temperatura que excede la ambiental, y operando a una presión superior a la atmosférica.

## **Calderas De Vapor**

La caldera se define como un equipo cuya misión fundamental es la producción masiva de vapor de agua. Su principio de operación se basa en un proceso central: se utiliza una cámara de combustión donde se genera calor mediante la acción del aire comburente (aire de apoyo a la quema). Posteriormente, este calor se traslada al fluido de trabajo a través de una superficie de intercambio térmico (ASHRAE, 2022).

### **Función de una caldera a vapor**

Una caldera es una máquina cuya principal función es la de generar grandes cantidades de vapor de agua, el principio básico del funcionamiento de una caldera es a través de una cámara donde se produce combustión con la ayuda de aire comburente y a través de una superficie se lleva a cabo la transferencia de calor. (Barbosa-Cánovas, G. V., & Ibarz, A. 2020).

### **Variables Termodinámicas**

Son parámetros esenciales en la termodinámica, la cual es considerada una rama de la física que se encarga del estudio de propiedades físicas que articulan las interacciones de energía y de materia que se manifiestan en los sistemas de escala visible (macroscópicos). Dichas variables son fundamentales tanto para definir la situación actual de un sistema como para anticipar cómo se modificará dicho estado ante la aplicación de diversas condiciones externas. diferentes condiciones.

**Temperatura:** La temperatura es una medida de la energía cinética promedio de las partículas en un sistema. Es una variable fundamental en la termodinámica porque determina el flujo de calor entre sistemas y es un indicador clave del estado térmico de un sistema. Se mide en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), Kelvin (K) o Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ).

**Presión:** La presión es la fuerza ejercida por las partículas del sistema sobre las paredes

del contenedor. Esta magnitud se cuantifica utilizando diversas unidades, entre las cuales se encuentran el Pascal (Pas), la atmósfera (atm) o el milímetro de mercurio (mmHg). La presión posee una relevancia fundamental para la correcta interpretación de la dinámica de los gases y los líquidos dentro de cualquier sistema confinado o cerrado.

**Volumen:** El volumen corresponde a la cantidad de espacio que abarca un sistema. Dentro del marco de la termodinámica, se investiga la forma en que esta magnitud se modifica al variar las condiciones de presión y temperatura a las que está sujeto el sistema. Sus unidades de medida habituales incluyen el litro (L), el metro cúbico ( $m^3$ ) o centímetros cúbicos ( $cm^3$ ).

**Energía Interna:** La energía interna es la totalidad de la energía almacenada dentro de un sistema, sin considerar el movimiento o la posición de dicho sistema en su conjunto. Esta abarca la energía potencial y la energía cinética que existe a nivel de los átomos y las moléculas. Cualquier modificación en la energía interna del sistema está directamente vinculada a las variaciones en su temperatura o los cambios de estado físico.

**Entalpía:** representa una cuantificación de la energía global inherente a un sistema. Este valor se establece mediante la suma de la energía interna ( $\text{U}$ ) del sistema y el término que resulta del producto de su presión ( $P$ ) y su volumen ( $V$ ), lo que se expresa con la fórmula: ( $H = U + PV$ )

**Entropía:** La entropía es una medida del desorden o la aleatoriedad en un sistema. En términos más técnicos, es una función que describe la cantidad de energía en un sistema que no está disponible para realizar trabajo. La segunda ley de la termodinámica establece que la entropía total de un sistema aislado siempre aumenta.

**Energía Libre de Gibbs:** Esta es una propiedad termodinámica que integra la entalpía y la entropía de un sistema con el fin de determinar si una transformación ocurrirá de forma espontánea bajo condiciones estables de presión y temperatura. Su relación matemática

fundamental es ( $G = H - TS$ ).

**Energía Libre de Helmholtz:** La energía libre de Helmholtz es otra función termodinámica crucial que resulta particularmente útil para el estudio y el análisis de procesos que se llevan a cabo a volumen constante.

### **Importancia de la termodinámica en alimentos**

La termodinámica de los alimentos se fundamenta en diversos factores. El primero, es la función de almacenamiento fisiológico común de los más importantes componentes de las materias primas alimentarias. Segundo, es el carácter general de las interacciones intermoleculares no-específicas de las macromoléculas alimentarias. Tercero, es el mimetismo de los biopolímeros que se fundamenta en las propiedades físico-químicas son muy similares a las especies de biopolímeros. La incompatibilidad termodinámica es típica en macromoléculas alimentarias. Luego, el enfoque termodinámico es altamente promisorio para el modelamiento y análisis de alimentos. Además, el equilibrio de fases juega un papel muy importante en la tecnología de alimentos. En la presente contribución, se analiza el punto de vista termodinámico en la química de alimentos. Así, el enfoque termodinámico, es central en este análisis. Se encontró que los carbohidratos y las proteínas son las moléculas más estudiadas, seguidas por el agua. En Europa, en particular Suiza, es donde más se realiza investigación en el área y donde hay contribuciones individuales destacadas. (Bejan, A, 2019).

### **Ejemplo De La Termodinámica En Los Alimentos**

Sabemos que la termodinámica se enfoca en el estudio del comportamiento interno de los sistemas desde una perspectiva macroscópica de las propiedades de la materia cuando son afectadas por cambios de temperatura.

#### **Agua Hirviendo**

Para este ejemplo vamos a colocar agua en una olla, al hervir el agua está cumpliendo su punto de ebullición y al seguir hirviendo dentro de un momento va a pasar de su estado líquido a estado gaseoso. Vamos a ver después de 15 minutos esa agua hirviendo se va evaporar, entonces el recipiente se va a encontrar casi vacía, debido a que esa agua se evaporó gracias a la acción de fuego.

### Propiedades termodinámicas

Una propiedad es una magnitud mesurable que sirve para describir un sistema. Así, por ejemplo, son propiedades la presión, la temperatura, el volumen específico, etc. Las propiedades definen el estado de un sistema y tienen un solo valor definido para un estado dado, por eso una propiedad puede definirse como una cantidad que depende del estado del sistema y es independiente de la trayectoria por la cual el sistema llegó a ese estado.

Las propiedades de una sustancia pueden dividirse en cuatro clases generales.

- **Intensivas:** Son las propiedades que no dependen de la masa, tales como: la presión, la temperatura, la densidad.
- **Extensivas:** Varían directamente con la masa: el volumen, la masa, la energía cinética, la cantidad de movimiento, etc.
- **Específicas:** Si una propiedad extensiva se divide por la masa, se obtiene una propiedad que no depende de la cantidad de masa, y se denomina específica. Como ejemplo, el volumen específico, el cuales define como el volumen por unidad de masa.
- **Molares:** Si una propiedad extensiva se divide por el número de moles de sustancia, se obtiene una propiedad específica molar; por ejemplo, el volumen específico molar. (Bejan, A. 2019).

## **Aplicaciones De La Termodinámica**

- La termodinámica se ocupa de los intercambios energéticos entre los sistemas.
- La termodinámica establece la espontaneidad de los procesos que se dan entre los sistemas.
- La termodinámica es una rama de la física puramente empírica, por lo tanto, sus aseveraciones son en cierto sentido absolutas.
- Las utilidades, además de las ya comentadas se pueden agrupar en los siguientes campos esenciales.
- El estudio del rendimiento de reacciones energéticas.
- El estudio de la viabilidad de reacciones químicas.
- El estudio de las propiedades térmicas de los sistemas (como ya han comentado dilataciones, contracciones y cambios de fase).
- Establece rangos delimitados de los procesos posibles en función de leyes negativas.
- La termodinámica describe los sistemas con un conjunto reducido de variables, las conocidas como variables de estado, sin entrar en la estructura interna o las teorías fundamentales subyacentes (Berk, Z, 2018).

### **1.9. Breve historia y desarrollo de la termodinámica aplicada**

#### **Orígenes de la Termodinámica (Siglo XIX)**

**Sadi Carnot (1824):** Considerado el padre de la termodinámica, Carnot formuló el concepto del ciclo de Carnot y la eficiencia de las máquinas térmicas. Su trabajo sentó las bases de la segunda ley de la termodinámica En 1702 Guillaume Amontons apuntó la idea de la escala absoluta de temperaturas, basándose en que, al bajar la temperatura en un gas a volumen constante, baja la presión, y ésta no podía ser negativa. Con un barómetro de mercurio, midió que la presión del gas aumentaba en una tercera parte al pasar del punto de hielo al punto de vapor del agua, luego el límite inferior estaría tres veces por debajo

del punto de hielo (Çalışkan, H., & Dincer, I. 2021).

**Rudolf Clausius (1850):** Introdujo el concepto de entropía y formuló el segundo principio de la termodinámica, que establece que la entropía de un sistema aislado siempre tiende a aumentar.

**William Thomson y Lord Kelvin (1851):** Desarrolló la escala de temperatura absoluta Kelvin y formuló la primera y segunda leyes de la termodinámica.

### **Primeras Aplicaciones Industriales**

- **Máquinas de Vapor:** La termodinámica se aplicó inicialmente al diseño y optimización de máquinas de vapor, lo que impulsó la Revolución Industrial. Estas máquinas fueron esenciales para la industria textil, la minería y el transporte.

### **Desarrollo de la Refrigeración y Conservación de Alimentos (Finales del Siglo XIX**

#### **- Principios del Siglo XX)**

**Carl von Linde (1876):** Desarrolló la primera máquina de refrigeración práctica basada en la compresión de vapor, lo que permitió la conservación de alimentos a bajas temperaturas y la expansión del comercio internacional de productos perecederos.

### **Avances en el Procesamiento de Alimentos (Siglo XX)**

**Pasteurización:** Introducida por Louis Pasteur en 1864, esta técnica se perfeccionó con el tiempo mediante la aplicación de principios termodinámicos para eliminar patógenos en productos lácteos y otros alimentos sin afectar su calidad.

**Secado y Deshidratación:** La comprensión de la transferencia de calor y masa permitió el desarrollo de procesos eficientes de secado y deshidratación de productos agrícolas, mejorando su conservación y reduciendo pérdidas post cosecha (Çalışkan, H., & Dincer, 2021).

### **Energía Renovable y Sostenibilidad (Finales del Siglo XX - Presente)**

**Bioenergía:** La termodinámica ha facilitado la conversión de biomasa en energía a través de procesos como la digestión anaeróbica y la gasificación, promoviendo el uso sostenible de residuos agrícolas.

**Energía Solar y Eólica:** La agroindustria ha adoptado tecnologías de energía renovable para reducir su huella de carbono. Los principios termodinámicos ayudan a optimizar estos sistemas para maximizar la eficiencia energética.

### **Innovaciones Tecnológicas Recientes**

**Tecnologías de Conservación Avanzadas:** Métodos como la liofilización y la ultracongelación se han desarrollado utilizando principios termodinámicos para mejorar la calidad y vida útil de los alimentos.

**Climatización de Invernaderos:** La termodinámica permite diseñar sistemas de control ambiental en invernaderos que optimizan la temperatura y la humedad, mejorando el rendimiento de los cultivos.

### **Perspectivas Futuras**

**Integración de Tecnologías Digitales:** La combinación de la termodinámica con tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial promete optimizar aún más los procesos agrícolas, aumentando la eficiencia y sostenibilidad.

**Economía Circular:** La termodinámica seguirá siendo clave en el desarrollo de procesos que convierten residuos en recursos, promoviendo la economía circular en la agroindustria.

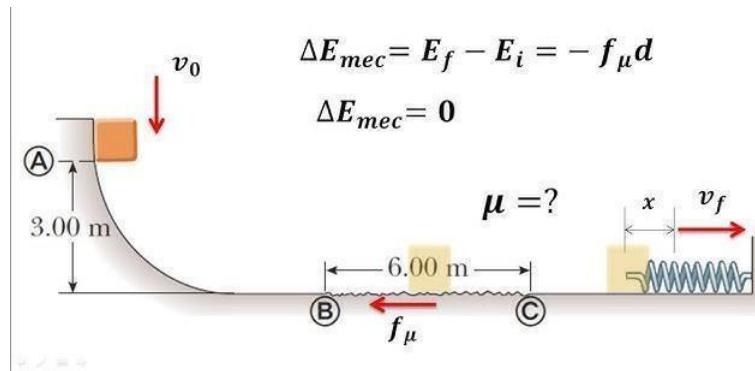
## **CAPÍTULO 2**

# **Leyes de la termodinámica**

## **principio de la conservación de**

### **la energía.**

## 2.1. Principio de la conservación de la energía.



La termodinámica es la rama de la física que estudia los fenómenos relacionados con energía, trabajo y calor. La palabra termodinámica deriva del griego *therme* que significa "calor" y *dynamis* que significa "potencia". Las leyes de la termodinámica son cuatro leyes o reglas que explican cómo se produce, transfiere y se puede aprovechar la energía a través del calor y el trabajo. Estas reglas son la base para comprender muchos de los fenómenos físicos y químicos que se presentan en la naturaleza. En termodinámica, la energía se puede transferir de un sistema a otro a través de trabajo, transferencia de calor o masa. (Chen, X., Zhang, M., & Wang, Y, 2020).

## 2.2. Ley cero de la termodinámica o equilibrio térmico

La Primera Ley de la Termodinámica, también conocida como el principio de conservación de la energía, es un pilar fundamental en el estudio de los procesos energéticos. Esta ley establece que la energía no puede crearse ni destruirse; únicamente puede transformarse de una forma a otra. En términos simples, la energía total de un sistema aislado permanece constante, aunque puede cambiar de forma. (Çengel, Y. A., & Boles, M. A., 2020).

## 2.3. Conservación de la Energía

El concepto de conservación de la energía implica que, en cualquier proceso termodinámico, la cantidad total de energía en un sistema cerrado es constante. Significa que cualquier cambio en la energía interna del sistema debe ser compensado por el

intercambio de energía con su entorno en forma de calor Q y trabajo W. Consideremos un ejemplo práctico: un gas confinado en un contenedor cilíndrico que posee un pistón desplazable. Al suministrar energía calórica a este sistema, el gas similará a dicha energía térmica, provocando un incremento en su energía interna ( $\Delta U$ ). Es probable que este proceso también genere un trabajo (W) cuando el gas se expande y ejerce fuerza sobre el pistón. Con base en la Primera Ley de la Termodinámica, la energía interna del sistema se vincula al calor que ingresa y al trabajo que se ejecuta mediante la siguiente expresión.  $\Delta U = Q - W$

### Donde

- $\Delta U$  representa el cambio en la energía interna del sistema.
- Q es el calor añadido al sistema. Si el calor es absorbido, Q es positivo; si el calor es liberado, Q es negativo.
- W es el trabajo realizado por el sistema. Si el sistema realiza trabajo sobre su entorno (por ejemplo, empujando un émbolo), W es positivo; si el trabajo es realizado sobre el sistema como comprimir un gas, W es negativo. (Cengel, Y. A., & Boles, M. A. 2020).

### 2.4. Formulación Matemática

La ecuación  $\Delta U = Q - W$  es la expresión matemática de la Primera Ley de la Termodinámica y se aplica en una amplia variedad de sistemas físicos.

**Energía Interna  $\Delta U$ :** La energía interna es una función de estado que depende de las condiciones del sistema, como la temperatura, presión y volumen. En un proceso termodinámico, cualquier cambio en estas variables resultará en un cambio de energía interna.

**Calor Q:** El calor es la forma de energía que se intercambia como resultado directo de

una disparidad en la temperatura entre el sistema y su ambiente exterior. Cuando se introduce energía calórica al sistema, su energía interna experimenta un aumento; por el contrario, la remoción de calor provoca una disminución en esta energía interna.

## Trabajo W

El trabajo en el contexto de la termodinámica alude, generalmente, a la mano de obra mecánica efectuada por el sistema. Un ejemplo común es el desplazamiento de un pistón dentro de un cilindro. Si el sistema realiza esta actividad, una fracción de su energía interna se transforma en trabajo, lo que se traduce en una reducción de la energía interna del sistema (Defraeye, T. 2019).

## Ejemplo

Suponiendo que se tiene un gas ideal en un cilindro que es comprimido, sin intercambio de calor con el entorno ( $Q=0$ ). Durante la compresión, se realiza trabajo sobre el gas, lo que aumenta su energía interna  $\Delta U$ . Según la Primera Ley, dado que  $Q=0$ , toda la energía del trabajo realizado sobre el gas se traduce en un aumento de la energía interna.

$$\Delta U = 0 - (-W) = W$$

Entonces, la energía interna del gas aumenta exactamente en la cantidad de trabajo realizado sobre él. Por otro lado, si el gas se expande, realiza trabajo sobre su entorno, lo que implica que la energía interna disminuirá, suponiendo que no haya transferencia de calor ( $Q=0$ ) la Primera Ley nos menciona que.

$$\Delta U = 0 - W = -W$$

Este planteamiento de ejemplo demuestra cómo la Primera Ley de la Termodinámica puede usarse para analizar y poder predecir el comportamiento de sistemas energéticos, lo cual permite entender cómo se da el intercambio y transformación de la energía en diversidad de aplicaciones.

#### **2.4.1. Restricciones a la primera ley**

La primera ley de la termodinámica establece la relación que guardan el trabajo, el calor y la energía interna de un sistema según la expresión  $\Delta U=Q+W$  (ó  $\Delta U=Q-W$ , según criterio de signos elegido). Como vemos, a la luz, siempre que se mantenga constante la energía interna de un sistema es posible transformar el trabajo en calor. También sería, en teoría, posible transformar todo el calor en trabajo. Sin embargo, la experiencia nos dice que no es así. La naturaleza impone una dirección en los procesos según la cual es posible transformar todo el trabajo de un sistema en calor, pero es imposible transformar todo el calor que tiene en trabajo. Es por ello que resulta necesaria una segunda ley que establezca esta restricción que observamos en la naturaleza. (Dincer, I., & Rosen, M. A, 2021).

#### **2.5. Segunda ley de la termodinámica**

Se basa respecto al calor que fluye de un objeto frío a un objeto caliente, la cual establece la irreversibilidad de los fenómenos físicos, se sabe que no es posible la creación de una máquina que sea capaz de convertir de manera continua la eficiencia y la energía térmica. En otros términos, también establece que, si todo el trabajo mecánico puede transformarse en calor, no todo el calor puede transformarse en trabajo mecánico. El objetivo de reconocer la relevancia de la segunda ley de la termodinámica en nuestro propio contexto, es principalmente adaptar su utilidad en diversos puntos de vista, además de que con los resultados que podamos obtener, nosotros determinemos los estados de equilibrio a los que eventualmente arribe un sistema compuesto cerrado cuando se eliminan ciertos vínculos internos que pueda poseer un sistema. (Dincer, I., & Rosen, M. A, 2021).

La Segunda Ley establece que los procesos naturales tienden a moverse hacia un estado de mayor desorden o entropía. Esto significa que, en un sistema aislado, cualquier proceso que ocurra espontáneamente lo hará de manera que la entropía aumente o permanezca constante. La entropía, una medida del desorden o la dispersión de la energía en un

sistema, nunca disminuye en un proceso natural. (Dincer, I., & Rosen, M. A, 2021).

### **2.5.1. Noción de Irreversibilidad**

La irreversibilidad es una característica clave de los procesos naturales descritos por la Segunda Ley. Un proceso irreversible es aquel que no puede revertirse sin dejar cambios en el sistema o en el entorno. cuando un gas se expande libremente en un contenedor vacío, no puede volver espontáneamente a su estado original sin una intervención externa. La irreversibilidad está asociada con la producción de entropía La producción de entropía en cualquier transformación conlleva la imposibilidad de revertir el proceso a su estado original de manera total. Una consecuencia directa es la disipación de una porción de la energía en forma de calor que no puede ser reutilizada, resultando en una sirena de eficiencia global del sistema.

### **2.5.2. Máquinas Térmicas y la Eficiencia de Carnot**

Las máquinas térmicas son dispositivos que convierten energía térmica en trabajo mecánico. Funcionan extrayendo calor de una fuente caliente, convirtiendo parte de este calor en trabajo, y expulsando el calor sobrante a una fuente fría. La Segunda Ley de la Termodinámica impone limitaciones fundamentales a la eficiencia de estas máquinas. Fellows, P. J, 2017).

### **2.5.3. Eficiencia de Carnot**

El ciclo de Carnot, formulado por el físico francés Sadi Carnot, es un ciclo teórico que representa el límite máximo de eficiencia que una máquina térmica puede alcanzar. Este ciclo opera entre dos reservorios de temperatura: uno caliente y otro frío. La eficiencia de una máquina térmica de Carnot está dada por:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{frío}}{T_{caliente}}$$

Donde **T** caliente y **T** frío son las temperaturas absolutas de las fuentes caliente y fría,

respectivamente. La eficiencia de Carnot nos dice que ninguna máquina térmica real puede ser más eficiente que una máquina que opere según el ciclo de Carnot entre las mismas dos temperaturas. Además, cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre las fuentes, mayor será la eficiencia. (Fellows, P. J, 2017).

### **Ejemplo en Sistemas Agroindustriales**

La eficiencia energética es vital en instalaciones agroindustriales, como las plantas de procesamiento. En sistemas como el secado de cereales, que emplean energía térmica para extraer la humedad, la eficiencia ideal se compara con el ciclo de Carnot. No obstante, en la realidad, la eficiencia efectiva se ve mermada por irreversibilidades (como la fricción y la transferencia de calor imperfecta).

Para optimizar estos procesos, es imperativo reducir las pérdidas de energía minimizando las irreversibilidades. Esto se consigue implementando un mejor aislamiento térmico, usando intercambiadores de calor superiores o ajustando las temperaturas operativas para maximizar el rendimiento. El secado, si bien esencial, conlleva un incremento de la entropía, lo que inevitablemente genera pérdidas energéticas.

### **Ejemplo de Entropía y Flujo de Energía**

El secado de granos es un proceso esencial en la agroindustria, donde se elimina la humedad del grano para evitar su deterioro. Este proceso, aunque necesario, está asociado con un aumento de la entropía y, por tanto, con pérdidas de eficiencia energética.

#### **2.6. Análisis del Aumento de Entropía**

Durante el secado, el calor se transfiere desde una fuente caliente al aire que se utiliza para secar los granos. Este aire caliente, al entrar en contacto con los granos, transfiere energía térmica que evapora el agua presente en ellos. A medida que el aire se enfria y el agua se evapora, la entropía del sistema aumenta, ya que el calor se dispersa y el orden molecular en los granos se altera. Una vez que los granos han sido secados, no pueden

absorber de manera espontánea el agua evaporada para volver a su estado original, y el calor disipado no puede recuperarse para realizar trabajo útil. La irreversibilidad del proceso se manifiesta en la producción de entropía y en la ineficiencia energética, ya que una parte significativa del calor se pierde al ambiente. (Gómez, P. A., & Silva, M. A, 2023).

Un concepto importante en los sistemas físicos es el de orden y desorden también conocido como aleatoriedad. Cuanta más energía pierde un sistema a su entorno, menos ordenado y más aleatorio es el sistema. Los científicos se refieren a la medida de aleatoriedad o trastorno dentro de un sistema como entropía. Alta entropía significa trastorno alto y baja energía. Para entender mejor la entropía, piensa en el dormitorio de un estudiante. Si no se le pusiera energía o trabajo, la habitación rápidamente se volvería desordenada. Existiría en un estado muy desordenado, uno de alta entropía.

La energía debe ser puesta en el sistema, en la forma de que el alumno haga el trabajo y guardando todo, para que la habitación vuelva a un estado de limpieza y orden. Este estado es uno de baja entropía. De igual manera, un automóvil o casa debe mantenerse constantemente con trabajo para mantenerlo en un estado ordenado. Dejada sola, la entropía de la casa o automóvil aumenta gradualmente a través del óxido y la degradación. Las moléculas y las reacciones químicas también tienen cantidades variables de entropía. A medida que las reacciones químicas alcanzan un estado de equilibrio, la entropía aumenta, y a medida que las moléculas a alta concentración en un lugar se difunden y se extienden, la entropía también aumenta.

Todos los sistemas físicos pueden pensarse de esta manera: Los seres vivos están altamente ordenados, requiriendo una entrada de energía constante para mantenerse en un estado de baja entropía. A medida que los sistemas vivos toman moléculas que almacenan energía y las transforman a través de reacciones químicas, pierden cierta cantidad de

energía utilizable en el proceso, porque ninguna reacción es completamente eficiente. También producen residuos y subproductos que no son fuentes de energía útiles. (Gómez, P. A., & Silva, M. A, 2023).

Este proceso aumenta la entropía del entorno del sistema. Dado que todas las transferencias de energía resultan en la pérdida de alguna energía utilizable, la segunda ley de la termodinámica establece que cada transferencia o transformación de energía aumenta la entropía del universo. A pesar de que los seres vivos están altamente ordenados y mantienen un estado de baja entropía, la entropía del universo en total aumenta constantemente debido a la pérdida de energía utilizable con cada transferencia de energía que se produce. Esencialmente, los seres vivos están en una continua batalla cuesta arriba contra este aumento constante de la entropía universal.

### **2.6.1 Optimización del Proceso**

Para mejorar la eficiencia energética y minimizar el aumento de entropía, se pueden implementar varias estrategias.

- **Recuperación de Calor:** Utilizar intercambiadores de calor para recuperar parte del calor del aire caliente antes de expulsarlo al ambiente.
- **Control de Temperatura:** Consiste en ajustar el calor del aire utilizado para la deshidratación. La temperatura debe ser la óptima para lograr una eliminación de humedad eficaz, pero debe evitarse un nivel excesivo que provoque el desperdicio de energía térmica.
- **Mejora del aislamiento:** Es esencial garantizar que la estructura del sistema de secado posea un aislamiento adecuado para prevenir la fuga de calor hacia el ambiente circundante.
- **Optimización del Flujo de Aire:** Se debe emplear un caudal de aire que promueva el contacto máximo con los cereales. Esto debe lograrse sin generar turbulencias

excesivas, dado que estas podrían incrementar las pérdidas energéticas.

### **2.6.3 Restricciones a la segunda ley**

Sistemas no Aislados: La Segunda Ley rige primordialmente el comportamiento de los sistemas aislados, que no permiten el flujo de masa ni de energía con su exterior. En contraste, en los sistemas abiertos (donde sí hay intercambio), la entropía puede reducirse en un punto específico. Un ejemplo claro son los seres vivos: estos reducen su desorden interno al asimilar nutrientes energéticos y liberan residuos, lo cual, a su vez, incrementa la entropía global de su entorno. Esto enfatiza la necesidad de definir correctamente los límites del sistema al aplicar la Segunda Ley.

Equilibrio vs Estado Estacionario: La ley predice una tendencia al equilibrio, el punto donde cesan los cambios a nivel macroscópico. No obstante, ciertos sistemas pueden sostener un estado estacionario (o de flujo), donde los procesos activos parecen desafiar la ley. Los sistemas biológicos ilustran esto al consumir energía de manera constante para contrarrestar el aumento entrópico natural. Esta divergencia se resuelve al reconocer que son sistemas abiertos con un flujo continuo de energía.

Escalas temporales y fluctuaciones: La Segunda Ley es inherentemente estadística y se valida en intervalos de tiempo prolongados. A nivel microscópico o en períodos muy breves, es posible observar fluctuaciones donde la entropía localmente aparente una disminución.

El papel de la información: Existe una fuerte evaluación entre la entropía y el concepto de información un mayor desorden se asocia habitualmente con una pérdida de datos. No obstante, la formulación clásica de la Segunda Ley no aborda la creación ni la destrucción de información.

Se trata de un área de investigación en curso, en particular en el contexto de la mecánica

cuántica y sus implicaciones para la segunda ley.

## 2.7. Tercera ley de la termodinámica: Ley cero absolutos

El cero absoluto 0 K, igual a -273,15 °C es la menor temperatura, que en teoría la materia podría existir. Experimentalmente, es imposible llegar a esta medida, así como también, es imposible construir una máquina que sea de movimiento perpetuo. Si pudiéramos hacer que un objeto llegara al cero absoluto sus átomos se detendrían según la física clásica, pero según la mecánica cuántica, siempre se requiere un tipo de movimiento para no violar el principio de incertidumbre de Heisenberg. (Heldman, D. R et al, 2022).

Al aproximarse al cero absoluto, se producen fenómenos interesantes en la materia como, por ejemplo.

- **Superfluidos:** elementos como el helio (He) se transforman en un líquido casi sin viscosidad.
- **Superconductividad:** la electricidad se conduce casi sin resistencia. Mucho mejor que en el cobre (Cu) o el oro (Au).

La tercera ley de la termodinámica postula que es imposible alcanzar una temperatura igual al cero absoluto mediante un número finito de procesos físicos. El cero absoluto se sitúa en 0 kelvin, equivalente a -273 grados Celsius, y esta ley, fundamentalmente propuesta por Walther Nernst, establece limitaciones fundamentales en la aproximación a estas condiciones extremas. La entropía de todo sistema se aproxima a cero, lo cual se traduce en un ordenamiento estructural máximo y una agitación molecular insignificante. Dicho de otra manera, el desorden interno del sistema se reduce a su nivel más bajo posible al aproximarse al umbral térmico más bajo alcanzable.

Este postulado puede ser articulado de la siguiente forma: conforme un sistema particular se acerca a la temperatura del cero absoluto, su entropía finaliza en un valor constante y determinado. Esta característica de la Tercera Ley de la Termodinámica subraya la regularidad propia que se observa en la organización de los sistemas cuando son

sometidos a temperaturas extremadamente bajas.

### **Ejemplo 1: Cristales de hielo**

La Tercera Ley de la Termodinámica se centra en el concepto del cero absoluto, que representa la temperatura más baja que la teoría permite alcanzar. Este principio afirma que, conforme un sistema se aproxima al cero absoluto, su entropía tiende a un valor constante predefinido. Aunque alcanzar la perfección del cero absoluto es inviable de forma práctica, los investigadores dedican esfuerzos constantes para lograr temperaturas que estén cada vez más cerca de este punto. Esta legislación física tiene relevancia en múltiples disciplinas, incluida la criogenia, que es el campo dedicado al análisis y la generación de condiciones de temperatura extremadamente bajas.

### **Ejemplo 2: Superconductividad**

La superconductividad es un fenómeno físico que se manifiesta en ciertos materiales al ser enfriados por debajo de un umbral térmico específico y característico, conocido como temperatura crítica. En este punto, los materiales adquieren una singularidad: la resistencia eléctrica se anula totalmente, permitiendo que la corriente fluya sin que se produzca ninguna disipación de energía. La Tercera Ley de la Termodinámica ayuda a dilucidar la conexión entre este fenómeno y el descenso de la entropía que ocurre a temperaturas extremadamente bajas. Bajo circunstancias ordinarias, cuando se induce un flujo eléctrico en un conductor estándar, como el cobre, los electrones portadores de carga chocan y se encuentran con impedimentos generados por los iones del material. Estas interacciones son la causa de la resistencia al movimiento electrónico, lo cual resulta en una pérdida de energía en forma de calor y restringe la eficiencia operativa de los aparatos eléctricos.

### **Ejemplo 3: Helio líquido**

El helio, un gas en condiciones ambientales habituales, pasa al estado líquido a temperaturas extremadamente frías, muy próximas al cero absoluto. Cuando el helio se enfriá y experimenta esta licuefacción, sus átomos pierden energía de forma drástica y reducen su movimiento o agitación. Este proceso se traduce en una reducción considerable de la entropía del sistema.

#### **Ejemplo 4: Condensados de Bose-Einstein**

A temperaturas muy cercanas al cero absoluto, ciertos átomos se congregan en una fase singular de la materia conocida como condensado de Bose-Einstein. En este estado cuántico, las partículas fundamentales pierden su distinción y comienzan a operar como una sola entidad mecánica cuántica. Este fenómeno es factible debido al postulado de la Tercera Ley de la Termodinámica, que determina que la entropía del sistema decrece progresivamente a medida que se logran temperaturas ultra bajas.

Este comportamiento cuántico fue predicho en la década de 1920 por el físico indio Satyendra Nath Bose y Albert Einstein. Su fundamento reside en la estadística cuántica de Bose-Einstein, un marco teórico que describe la dinámica de partículas idénticas e indiscernibles, como es el caso de los fotones de luz o los átomos que constituyen ciertos elementos.

#### **¿En qué áreas se aplica la termodinámica?**

La termodinámica se puede aplicar a una amplia variedad de temas de ciencia e ingeniería, tales como motores, transiciones de fase, reacciones químicas, fenómenos de transporte, e incluso agujeros negros. A continuación, enumeramos algunos ejemplos de algunas de sus aplicaciones.

- **Alimentación.** La cocina el caliente es un constante ejemplo de transformaciones químicas a través de procesos termodinámicos.

- **Ciencia de los materiales.** En este caso se utilizan procesos térmicos para obtener nuevos tipos de materiales que posean propiedades químicas y físicas bien definidas.
- **Aplicaciones industriales.** En el mundo industrial existen muchos procesos que transforman materias primas en productos acabados utilizando maquinaria y energía. Un ejemplo es la industria cerámica donde unos largos hornos túnel cuecen ladrillos a temperaturas superiores a los 800 grados Celsius.
- **Arquitectura.** En el campo de la construcción es muy importante tener en cuenta las transferencias térmicas entre el exterior y el interior de la vivienda. En la arquitectura bioclimática la termodinámica juega un papel fundamental, por lo que se estudian en detalle todos los aspectos de la energía solar pasiva.
- **Generación de electricidad.** En todas las centrales térmicas combustibles fósiles, energía nuclear o centrales solares se utilizan estos conceptos para conseguir accionar turbinas de vapor y generadores eléctricos. (Heldman, D. R et al, 2022).

## **2.8. Entropía y su aplicación en sistemas agroindustriales**

El concepto de entropía también se usa para medir la probabilidad de recepción de un conjunto de mensajes en un entorno de información. En los últimos años todos estamos familiarizados con el Big Data, que como su propio nombre indica es el gran cúmulo de información que manejamos y que tenemos a nuestra disposición, también conocido como macrodatos, datos masivos, inteligencia de datos o datos a gran escala, lo que requiere aplicaciones informáticas de procesamiento entre los mismos para hacer un tratamiento adecuado. Sabemos que es más importante lo que hacemos con los datos y cómo los analizamos, que tan solo el volumen de datos en sí. (Holman, J. P, 2019).

Fórmula: En términos matemáticos, la entropía puede calcularse como:

**Donde**

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

- $\Delta S$  es el cambio en la entropía.
- Q es la cantidad de calor transferido.
- T es la temperatura absoluta del sistema en Kelvin.

Un incremento en la entropía de un sistema es indicativo de que ha habido una absorción de calor , y que la transformación que tuvo lugar es irreversible . De hecho, en toda transformación que ocurre de manera espontánea, la entropía combinada del sistema más su entorno siempre experimenta una subida.

### **Implicaciones Termodinámicas**

La entropía sirve como un indicador cuantitativo del nivel de irreversibilidad de un proceso. Si un sistema atraviesa una modificación que resulta en un aumento entró pico , una porción de la energía asociada se disipa en formas que no pueden ser recuperadas. Esto impone una restricción sobre la cantidad máxima de energía que podría ser transformada en trabajo útil. Esta limitación resulta de crucial importancia en contextos industriales donde la eficiencia en el uso de la energía es un parámetro fundamental.

### **Entropía en Procesos Agroindustriales**

En la agroindustria, los procesos que involucran la transferencia de calor, la mezcla de materiales, y la transformación de productos están estrechamente relacionados con cambios en la entropía. En este proceso se incluye el secado de granos, la fermentación de productos alimenticios, la pasteurización, y la conservación mediante refrigeración.

### **Secado de Granos**

El secado de granos es un proceso común en la agroindustria, donde se elimina la humedad de los granos para evitar el deterioro y facilitar el almacenamiento. Este proceso es inherentemente dependiente de la transmisión de energía térmica, lo que inevitablemente genera un incremento entrópico.

**Proceso Termodinámico:** Al aplicar calor al aire que fluye sobre los cereales, la energía térmica pasa al agua que contienen, induciendo su evaporación. Esta acción eleva la entropía, puesto que la energía se dispersa y se transforma en una forma no reutilizable.

**Potenciación:** La efectividad del secado puede optimizarse recuperando el calor residual, afinando la circulación del aire y regulando la temperatura con precisión. Al disminuir las pérdidas de energía y limitar el aumento de la entropía, se consigue un proceso que es más eficiente y sustentable.

## Fermentación

La fermentación es una operación agroindustrial donde la entropía desempeña un papel significativo. Durante esta transformación, diversos microorganismos catabolizan los azúcares, dando como resultado alcohol, gases y otros componentes. Dado que este es un proceso exotérmico, se libera calor, lo que resulta en un aumento neto de la entropía del sistema. En la fermentación, la energía que está contenida originalmente en los azúcares se libera y se dispersa en forma de calor y de productos químicos, elevando la entropía. El calor liberado, si no se gestiona adecuadamente, puede reducir la eficiencia del proceso y afectar la calidad del producto final.

Para controlar la entropía y mantener la calidad del producto, es crucial monitorear la temperatura y la presión durante la fermentación. Sistemas de enfriamiento y ventilación pueden utilizarse para disipar el calor y mantener las condiciones óptimas, limitando el aumento de entropía. (Incropera, F. P et al, 2020)

## Refrigeración y Conservación

La conservación de las cosechas a través de la refrigeración es fundamental para alargar su vida comercial y preservar su calidad. El enfriamiento disminuye la actividad molecular dentro de los alimentos, lo que ralentiza las reacciones de deterioro y los procesos químicos. Sin embargo, esta operación exige una gestión meticulosa de la entropía.

En estos sistemas, el calor es extraído de los productos almacenados, lo que se traduce en una reducción de la entropía local (dentro de los alimentos). No obstante, este calor debe ser expulsado al entorno, lo que irremediablemente causa un aumento en la entropía total (global). El objetivo principal es limitar al máximo dicho aumento entrópico para maximizar el rendimiento energético. Por ello, el diseño de equipos de refrigeración eficientes se basa en ciclos termodinámicos (como el de compresión). La meta es minimizar el trabajo requerido para la extracción de calor, optimizando el enfriamiento con la menor alza posible en la entropía del sistema global.

### **Impacto de la Entropía en la Eficiencia Energética**

La entropía constituye un determinante crucial en la eficiencia de cualquier operación agroindustrial. Un incremento evitable en la entropía generalmente implica una mayor dissipación de energía bajo formas inservibles, como el calor residual, lo que impacta negativamente en la eficiencia global. El desarrollo de sistemas agroindustriales sostenibles debe incluir estrategias orientadas a minimizar el aumento entrópico, tales como la recuperación de calor, el empleo de fuentes de energía renovables y la optimización de los procesos térmicos. Esto no solo eleva la eficiencia energética, sino que también reduce los costos de operación y el impacto ambiental.

La implementación de tecnologías punteras (como los mecanismos de recuperación de energía o el uso de materiales con características térmicas específicas) puede ser clave para controlar la entropía y mejorar el rendimiento de los procesos. Por ejemplo, la

utilización de sistemas de cogeneración o intercambiadores de calor posibilita la reutilización del calor sobrante, lo que limita la subida de la entropía y potencia la eficiencia integral.

### **Impacto de la Entropía en la Eficiencia Energética**

La entropía es un factor clave en la eficiencia de cualquier proceso agroindustrial. Un aumento innecesario en la entropía generalmente implica una mayor disipación de energía en formas no útiles, como calor residual, lo que reduce la eficiencia global del proceso. El diseño de sistemas agroindustriales sostenibles debe considerar estrategias para minimizar el aumento de entropía, como el reciclaje de calor, la utilización de energías renovables, y la optimización de los procesos térmicos. Esto no solo mejora la eficiencia energética, sino que también reduce los costos operativos y el impacto ambiental.

La adopción de nuevas tecnologías avanzadas, como la recuperación de energía y el uso de materiales con propiedades térmicas específicas, puede ayudar a controlar la entropía y mejorar la eficiencia de los procesos agroindustriales. Por ejemplo, los intercambiadores de calor y los sistemas de cogeneración permiten reutilizar el calor residual, disminuyendo el aumento de entropía y mejorando la eficiencia global. (Kalina, C., & Zamfirescu, C, 2020)

### **Ejemplo: Secado de Café**

El secado de café es un proceso crítico en la agroindustria que involucra la transferencia de calor para eliminar la humedad de los granos. Un sistema de secado bien diseñado minimizará las pérdidas de calor y controlará el aumento de entropía, optimizando el uso de energía. El uso de tecnologías de secado con recuperación de calor y el ajuste preciso de la temperatura y el flujo de aire permiten reducir el aumento de entropía, mejorando la calidad del café y la eficiencia del proceso.

#### **2.8.1. Conservación de Frutas en Cámaras Frigoríficas**

La práctica de conservar frutas en almacenes refrigerados ilustra directamente la influencia de la entropía en el rendimiento de los sistemas de enfriamiento. Al utilizar un sistema que posee un aislamiento superior y un ciclo de refrigeración perfeccionado, se logra reducir al mínimo el esfuerzo (trabajo) requerido para mantener las bajas temperaturas. Esto, a su vez, disminuye el aumento entrópico, lo que se traduce en una extensión de la durabilidad de las frutas y la preservación de su frescura.

Además, la integración de controles automatizados para regular la temperatura y la humedad dentro de las cámaras es fundamental. Esta tecnología permite sostener las condiciones ideales y evitar el consumo excesivo de energía, limitando así las consecuencias negativas del incremento de la entropía (Kalina, C., & Zamfirescu, C. 2020).

### **2.8.2. Cómo Reducir la Entropía en la Agroindustria**

- Rotación de cultivos, uso de abonos orgánicos y sistemas de riego eficientes ayudan a mantener la salud del suelo y reducir la erosión.
- El uso de materiales biodegradables y embalajes optimizados reduce el desperdicio y el impacto ambiental.
- Invertir en infraestructuras de frío y optimizar las rutas de distribución minimiza las pérdidas postcosecha.
- Implementar estrategias para reducir el desperdicio en todas las etapas de la cadena alimentaria, desde la producción hasta el consumo.

### **2.8.3. Herramientas para Medir la Entropía en Sistemas Agroindustriales**

La medición precisa de la entropía en sistemas agroindustriales es un desafío debido a la complejidad y la dinámica de estos sistemas. Sin embargo, existen diversas herramientas y enfoques que pueden ayudarnos a cuantificar y comparar diferentes escenarios.

#### **Análisis del Ciclo de Vida**

El análisis del ciclo de vida es una metodología que evalúa los impactos ambientales asociados a un producto o proceso a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. El ciclo de vida puede utilizar indicadores como la huella de carbono, la huella hídrica y la eutrofización para estimar la contribución del sistema a la generación de entropía. Las Limitaciones requieren de una gran cantidad de datos y puede ser costoso de realizar. (Kim, S., Lee, J., & Park, H, 2022).

### **Ejemplo 1: Análisis del Ciclo de Vida de un Tomate**

- Calcular la huella de carbono: Desde la producción de fertilizantes y pesticidas, hasta el transporte del tomate y su empaque, se calcula la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos.
- Cuantificar del Uso Hídrico: Implica la medición del volumen total de agua consumida en las etapas de irrigación, procesamiento y empaquetado del tomate.
- Detectar de Componentes Químicos: Se procede a examinar la existencia de plaguicidas y otros compuestos químicos tanto en el fruto como en los sistemas hídricos y terrestres, con el fin de determinar su repercusión ambiental.
- Analizar Comparativo de Alternativas: Es posible establecer una comparación entre el tomate analizado y aquellos cultivados bajo métodos orgánicos o provenientes de distintas regiones geográficas. Esto permite determinar la opción que presenta la huella ambiental más reducida.

### **Ejemplo 2: Indicadores de Sostenibilidad en una Finca Cafetalera**

- Medición de la Biodiversidad: Se establece un recuento de las distintas especies de fauna (aves e insectos) y flora presente en la propiedad con el fin de evaluar la vitalidad del ecosistema local.
- Cálculo de la Huella Hídrica: Se determina el volumen exacto de agua empleado en la elaboración de cada kilogramo de café, a cubrir desde la fase de riego hasta

el beneficio del grano.

- Evaluación del Dosal Forestal: Se cuantifica el nivel de sombra proporcionado por los árboles a las plantas de café. Esto es crucial para la protección del suelo y la preservación de la diversidad biológica.
- Reconocimientos y Certificaciones: La finca puede acceder a avales como Fairtrade o Rainforest Alliance, los cuales sirven para garantizar que sus métodos de cultivo cumplen con los estándares de sostenibilidad.

### **Ejemplo 3: Modelos Matemáticos para Optimizar el Riego**

- Predicción climática: Se emplean modelos preferidos de simulación climática con el propósito de anticipar los niveles de precipitación y la evapotranspiración (la pérdida de agua combinada por evaporación desde el suelo y por transpiración vegetal).
- Modelado Climático: Se emplean simulaciones del clima para anticipar tanto las precipitaciones como la evapotranspiración (que es la pérdida de agua combinada por la evaporación desde la tierra y la transpiración de la vegetación).
- Modelado Edafológico (del Suelo): Se crean modelos de las características del suelo, como su capacidad de retención hídrica, con el fin de calcular el volumen exacto de agua que requiere cada tipo de cultivo.
- Ajuste Fino del Riego: Se implementan algoritmos de optimización para determinar la cantidad precisa y la periodicidad del riego que no solo maximice la producción de la cosecha, sino que también minimice el gasto de agua.

# **CAPÍTULO 3**

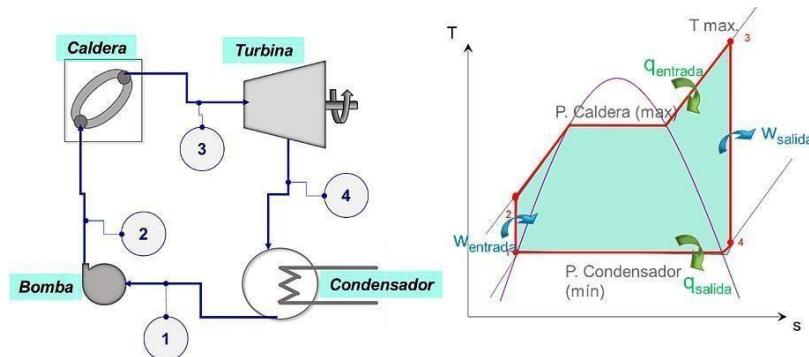
## **Ciclos Termodinámicos**

### **Aplicados a la Agroindustria**

## Ciclos Termodinámicos Aplicados a la Agroindustria

En la agroindustria, la termodinámica es fundamental, una rama de la física que estudia cómo funcionan el calor, la energía y el trabajo. Muchas operaciones en este campo se basan en ciclos termodinámicos, que son secuencias de procesos termodinámicos que devuelven un sistema a su estado original.

### 3.1. Ciclo de Rankine y sus variantes



El ciclo de Rankine es un proceso termodinámico fundamental diseñado para la conversión de energía térmica en energía mecánica (trabajo). Su aplicación más extendida se encuentra en las centrales de generación eléctrica. La versión básica del ciclo de Rankine está compuesta por cuatro fases esenciales:

**Bombeo:** El fluido de trabajo, que es considerable agua, es llevado del estado líquido y de baja presión a un estado de alta presión mediante una bomba.

**Calentamiento:** El agua ya presurizada es dirigida a un generador de vapor (caldera), donde se le incorpora calor a presión constante. Este aporte energético la transforma en vapor sobrecalentado (a alta presión y alta temperatura).

**Expansión:** El vapor de alta presión se expande en una turbina, lo que resulta en la producción de trabajo mecánico aprovechable. Durante esta etapa, la temperatura y la presión del vapor experimentan una reducción.

**Condensación:** Finalmente, el vapor que ha trabajado, ahora a baja presión, es enfriado en un condensador, volviendo a su estado líquido de baja presión antes de reiniciar el

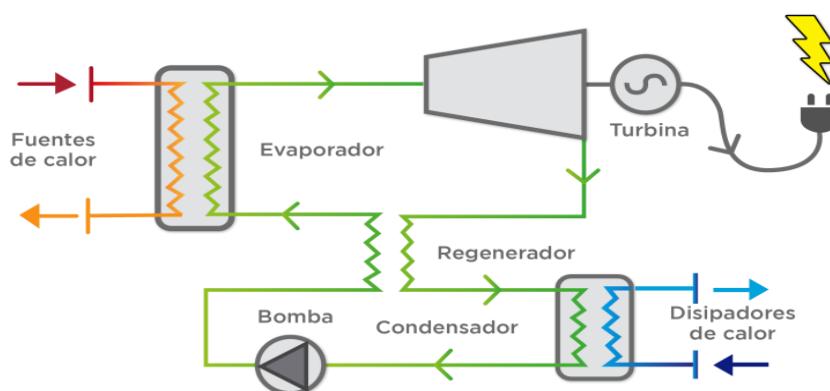
ciclo.

El ciclo de Rankine y sus variaciones se emplean en una variedad de aplicaciones tales como las centrales eléctricas, Plantas de energía geotérmica, Plantas de biomasa, Sistemas de recuperación de calor residual. Aun que se utilice generalmente en centrales eléctricas el ciclo de Rankine también se puede aplicar en la agroindustria debido a que el vapor producido por un ciclo de Rankine puede usarse para limpiar equipos, pasteurizar productos y producir calor para procesos de secado.

Así también un ciclo de Rankine puede generar calor para calentar invernaderos, secar granos o calentar instalaciones. Además, en un ciclo de Rankine, la biomasa, como los desechos agrícolas, puede utilizarse como combustible en una caldera para producir vapor y electricidad. Esto promueve la energía renovable. (Kutz, M, 2021)

### 3.1.1. Ciclo Rankine orgánico (ORC)

El Ciclo Rankine Orgánico (ORC) es una modificación del ciclo Rankine tradicional, un proceso termodinámico que transforma el calor en trabajo mecánico, principalmente electricidad. El fluido de trabajo es la principal innovación del ORC. El ORC utiliza fluidos orgánicos con puntos de ebullición más bajos en lugar de agua, como en las plantas de energía convencionales. (Kutz, M, 2021).



Los mismos principios que el ciclo Rankine convencional termodinámicos sustentan el ciclo Rankine orgánico. Sin embargo, usar un fluido orgánico, como hidrocarburos, siloxanos o refrigerantes, permite que el ciclo se adapte a una amplia gama de temperaturas de operación. Este fluido se evapora en el evaporador a una temperatura más baja y se expande en una turbina o un expander, produciendo energía mecánica que luego se transforma en energía eléctrica en un generador.

### **Etapas del ciclo de Rankine orgánico**

#### **Evaporación**

El fluido orgánico (que reemplaza al agua) es calentado hasta su punto de ebullición, momento en que se convierte en vapor. Las fuentes de calor externas utilizadas suelen ser los gases residuales de un motor, la energía solar concentrada, el calor desechado en la industria o la energía geotérmica.

#### **Expansión**

El vapor generado se expande a través de un expensor o una turbina, lo que se traduce en la producción de energía mecánica (trabajo). La efectividad de esta expansión es un factor determinante en el rendimiento general del ciclo.

#### **Condensación**

Tras la etapa de expansión, el vapor es dirigido a un condensador para ser enfriado, regresando a su estado líquido. El calor liberado en esta fase puede ser reaprovechado en sistemas de calefacción o, alternativamente, disipado por medio de un sistema de refrigeración.

**Condensación:** Después de la expansión, el vapor en un condensador se enfriá y regresa a su fase líquida. En esta etapa, el calor que se pierde puede aprovecharse para aplicaciones de calefacción o se puede eliminar mediante un sistema de refrigeración.

$$\begin{aligned}m_2 &= m_3 = m_{\text{fluido}} \\m_{\text{refrigerante}} \cdot (h_8 - h_7) &= m_{\text{fluido}} \cdot (h_2 - h_3)\end{aligned}$$

**Bombeo:** El ciclo se completa cuando una bomba presuriza el fluido condensado nuevamente y lo recircula al evaporador.

$$m_3 = m_4 = m_{\text{fluido}}$$
$$W_{\text{bomba}} = m_{\text{fluido}} \cdot (h_4 - h_3)$$
$$\eta_s = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$

## Aplicaciones

El ORC es particularmente adecuado para la generación de energía a partir de fuentes de calor que no tienen la temperatura adecuada para los ciclos de vapor de agua.

**Generación de energía geotérmica:** El ORC es ideal para plantas geotérmicas porque aprovecha el calor del subsuelo, especialmente en lugares donde la temperatura del fluido geotérmico es baja.

**Recuperación de calor residual:** Industrias como las plantas siderúrgicas, cementeras o de procesamiento químico pueden utilizar ORC para convertir este calor en electricidad, mejorando la eficiencia energética y reduciendo las emisiones.

**Energía Solar Concentrada:** En sistemas de energía solar concentrada (CSP), el ORC permite la conversión de energía térmica en electricidad, incluso cuando la radiación solar no es lo suficientemente intensa para generar vapor de agua.

## Ejercicio: Cálculo de la Eficiencia de un Ciclo ORC

Se utiliza un Ciclo Rankine Orgánico para generar energía eléctrica a partir de una fuente de calor geotérmica. El fluido de trabajo se evapora a 150°C y se condensa a 40°C. La presión en el evaporador es de 10 bar, y en el condensador es de 1 bar. El fluido orgánico utilizado es R-134a (Kutz, M, 2021).

- Calcula el trabajo neto producido por la turbina si el flujo másico del fluido es de

1 kg/s.

- Determina la eficiencia térmica del ciclo.

**Datos:**

- Entalpía en la entrada de la turbina (a 150°C y 10 bar):  $h_1 = 430 \text{ kJ/kg}$
- Entalpía en la salida de la turbina (a 40°C y 1 bar):  $h_2 = 300 \text{ kJ/kg}$
- Entalpía en la entrada de la bomba  $h_3 = 250 \text{ kJ/kg}$
- Entalpía en la salida de la bomba  $h_4 = 255 \text{ kJ/kg}$

**Trabajo de la turbina:**

$$W_t = \dot{m} \times (h_1 - h_2)$$

$$W_t = 1 \text{ kg/s} \times (430 \text{ kJ/kg} - 300 \text{ kJ/kg}) = 130 \text{ kW}$$

**Trabajo de la bomba:**

$$W_b = \dot{m} \times (h_4 - h_3)$$

$$W_b = 1 \text{ kg/s} \times (255 \text{ kJ/kg} - 250 \text{ kJ/kg}) = 5 \text{ kW}$$

**Trabajo neto del ciclo:**

$$W_{neto} = W_t - W_b = 130 \text{ kW} - 5 \text{ kW} = 125 \text{ kW}$$

**Eficiencia térmica:**

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{in}}$$

Donde  $Q_{in}$  es el calor añadido al fluido en el evaporador:

$$Q_{in} = \dot{m} \times (h_1 - h_4) = 1 \text{ kg/s} \times (430 \text{ kJ/kg} - 255 \text{ kJ/kg}) = 175 \text{ kW}$$

Finalmente, la eficiencia térmica es:

$$\eta = \frac{125 \text{ kW}}{175 \text{ kW}} = 0.714 = 71.4\%$$

### 3.1.2. Ciclo de Rankine subcrítico y supercrítico

- **Ciclo de Rankine Subcrítico**

El vapor de agua ingresa a la turbina en un ciclo de Rankine subcrítico a una presión inferior al punto crítico del agua, que es de alrededor de 22.1 MPa (221 bar), y a una temperatura de alrededor de 374 °C. El vapor en la turbina es una mezcla de líquido y vapor porque el agua en este régimen cambia de fase de líquido a vapor a lo largo de la curva de saturación.

- **Caldera:** Donde el agua es calentada hasta alcanzar el estado de vapor.
- **Turbina:** El vapor se expande, generando trabajo mecánico.

$$W_{turbina} = \dot{m} \times (h_1 - h_2)$$

M es el flujo másico del vapor.

h1 y h2 son las entalpías del vapor a la entrada y salida de la turbina, respectivamente.

- **Condensador:** El vapor se condensa de nuevo a agua.
- **Bomba:** El agua condensada es comprimida y enviada nuevamente a la caldera.

$$W_{bomba} = \dot{m} \times (h_4 - h_3)$$

h4 y h3 son las entalpías del agua a la entrada y salida de la bomba, respectivamente.

#### Ejercicio:

Dado un ciclo de Rankine subcrítico con una presión de entrada a la turbina de 15 MPa y una temperatura de 350 °C, calcule la eficiencia térmica del ciclo si la presión en el condensador es de 10 kPa.

- Calcula el trabajo de la turbina  $W_{turbina} = \dot{m} \times (h_1 - h_2)$ .
- Calcula el trabajo de la bomba  $W_{bomba} = \dot{m} \times (h_4 - h_3)$ .
- Calcula el calor añadido  $Q_{entrada} = \dot{m} \times (h_1 - h_4)$ .
- Finalmente, calcula la eficiencia térmica  $\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}}$ .

## **Ciclo de Rankine Supercrítico**

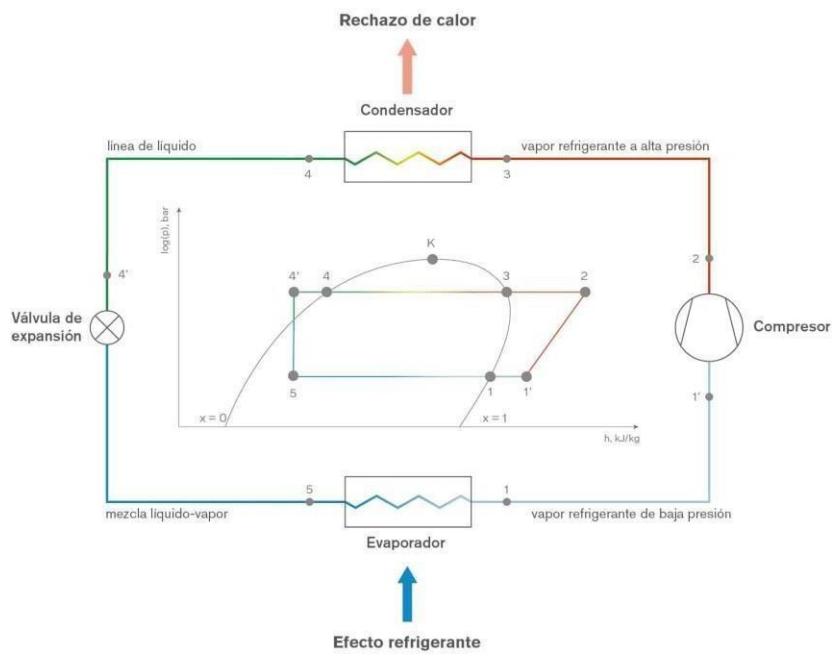
El vapor de agua ingresa a la turbina en un ciclo de Rankine supercrítico a una presión y temperatura superiores al punto crítico del agua. En estas condiciones, el agua simplemente se convierte en vapor cuando se calienta por encima de su punto crítico; no hay cambio de fase durante el calentamiento. Esto aumenta la eficiencia térmica al operar.

- **Caldera Supercrítica:** Donde el agua es calentada a temperaturas y presiones superiores a las críticas.
- **Turbina:** Similar al ciclo subcrítico, pero diseñada para manejar vapor a condiciones supercríticas.
- **Condensador y Bomba:** Funciones similares a las del ciclo subcrítico, pero con ajustes para las condiciones supercríticas.

El ciclo de Rankine supercrítico tiene una mayor eficiencia térmica que el ciclo subcrítico, lo que resulta en un uso más eficiente del combustible y emisiones más bajas de CO<sub>2</sub>. Los equipos necesarios para trabajar en condiciones extremadamente críticas, por otro lado, son más costosos y requieren materiales que puedan soportar altas presiones y temperaturas (Martínez-Silíceo, M. F, 2022).

### **3.2. Ciclos de refrigeración**

Los ciclos de refrigeración consisten en procesos de naturaleza termodinámica diseñados para el traslado de calor de una ubicación específica a otra. Su función principal es lograr y sostener una temperatura inferior en un espacio determinado en comparación con su medio ambiente. Estos ciclos resultan indispensables en áreas como las bombas de calor, los sistemas de aire acondicionado y las diversas técnicas de refrigeración.



Rámila (2023).

El ciclo de refrigeración se divide en 4 etapas que son:

- **Compresión**

En el condensador, el refrigerante, ahora a alta temperatura, se enfriá, lo que provoca su cambio de fase de vapor a líquido.

- **Expansión**

El refrigerante en estado líquido atraviesa un dispositivo de expansión, lo que genera una disminución brusca tanto en su temperatura como en su presión.

- **Evaporación**

El fluido refrigerante, que se encuentra ahora a baja temperatura, se evapora dentro del evaporador. Este proceso es el que absorbe la energía térmica del espacio que se desea enfriar.

- Estas cuatro fases— compresión, condensación, expansión y evaporación —constituyen el ciclo y pueden ser representadas visualmente en un diagrama de temperatura-entropía (T-s).

## Formulas:

Eficiencia del ciclo de refrigeración	$\eta = Qc / W$
Calor absorbido	$Qc = m * Cp * (Tc - Te)$
Trabajo realizado	$W = m * Cp * (Th - Tc)$
Calor rechazado	$Qh = m * Cp * (Th - Tc)$

## Donde:

Q es el calor absorbido en el evaporador.

W es el trabajo del compresor.

M es el flujo masico del refrigerante

$h_1$  y  $h_2$  son las entalpías del refrigerante a la entrada y salida del compresor, respectivamente.

## Ejercicio

Un ciclo de refrigeración utiliza 100 g de refrigerante R-134a. La temperatura de evaporación es de -20°C y la temperatura de condensación es de 40°C. La eficiencia del ciclo es del 30%. ¿Cuánto calor se absorbe en la etapa de evaporación?

## Solución

Calor absorbido

$$Qc = m * Cp * (Tc - Te)$$

$$100 \text{ g} * 0.85 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} * (40^{\circ}\text{C} - (-20^{\circ}\text{C})) = 4200 \text{ kJ}$$

Trabajo realizado

$$W = Qc / \eta$$

$$4200 \text{ kJ} / 0.30 = 14000 \text{ Kj}$$

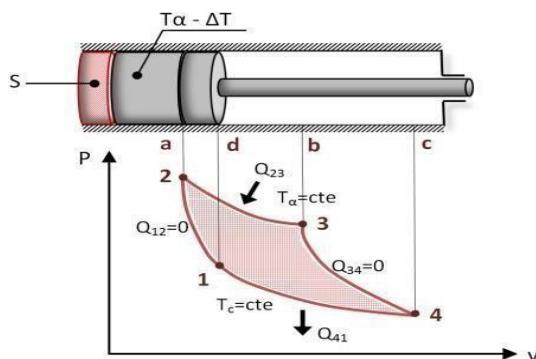
Calor rechazado

$$Q_h = W + Q_c$$

$$14000 \text{ kJ} + 4200 \text{ kJ} = 18200 \text{ kJ}$$

En este ejercicio, el ciclo de refrigeración absorbe 4200 kJ de calor en la etapa de evaporación y rechaza 18200 kJ de calor en la etapa de condensación. (Moran, M. J et al, 2021).

### 3.2.1. Ciclo de Carnot inverso



El ciclo de Carnot inverso es un ciclo termodinámico idealizado que es el límite máximo de eficiencia para cualquier ciclo de refrigeración o bomba de calor. El ciclo de Carnot inverso requiere trabajo externo para realizar esta tarea, a diferencia del ciclo de Carnot tradicional, que se utiliza para convertir calor en trabajo.

El ciclo de Carnot inverso consta de cuatro procesos termodinámicos reversibles que ocurren en dos isotermas y dos adiabáticas:

#### Compresión Adiabática (1-2)

El gas refrigerante aumenta su temperatura y presión cuando se comprime de manera adiabática (sin transferencia de calor). El gas se utiliza para aumentar la energía interna.

#### Calentamiento Isotérmico (2-3)

El gas se calienta a una temperatura constante mientras se mantiene en contacto con una fuente caliente  $T_{caliente}$ . El gas libera calor  $Q_C$  al

ambiente frío a  $T_{fría}$ .

### Expansión Adiabática (3-4)

El gas se expande adiabáticamente, lo que reduce su temperatura y presión. La energía interna del gas disminuye, realizando trabajo sobre el entorno.

### Fórmulas

#### Coeficiente de Rendimiento (COP) para Refrigeración:

$$COP_{Refrigeración} = \frac{Q_C}{W} = \frac{T_{fría}}{T_{caliente} - T_{fría}}$$

Donde:

$Q_C$  es el calor extraído del ambiente frío.

W es el trabajo realizado sobre el sistema.

$T_{fría}$  y  $T_{caliente}$  son las temperaturas absolutas (en Kelvin) del ambiente frío y caliente, respectivamente.

#### Coeficiente de Rendimiento (COP) para Bomba de Calor

$$COP_{Calefacción} = \frac{Q_H}{W} = \frac{T_{caliente}}{T_{caliente} - T_{fría}}$$

Donde:

$Q_H$  es el calor suministrado al ambiente caliente.

### Ejercicio

Calcule el COP para refrigeración de un ciclo de Carnot inverso que opera entre una temperatura de evaporación de -15 °C y una temperatura de condensación de 40 °C.

### Solución:

Convertir las temperaturas a Kelvin

$$T_{fría} = -15 + 273.15 = 258.15 \text{ K}$$

$$T_{caliente} = 40 + 273.15 = 313.15 \text{ K}$$

Aplicar la fórmula del COP para refrigeración:

$$COP_{Refrigeración} = \frac{T_{fría}}{T_{caliente} - T_{fría}} = \frac{258.15}{313.15 - 258.15} \approx 4.69$$

### 3.2.2. Ciclo de absorción y adsorción

El ciclo de refrigeración por absorción es una alternativa al ciclo de compresión de vapor y se usa principalmente en situaciones en las que hay energía térmica disponible en lugar de energía eléctrica para mover el refrigerante. Este ciclo se utiliza con frecuencia en aplicaciones donde hay calor residual o en lugares donde la electricidad es cara o limitada.

Las etapas clave del ciclo de absorción, como la evaporación, la absorción, la desorción y la condensación, se trazan en relación con las propiedades termodinámicas del sistema y se pueden representar en un diagrama de temperatura versus entropía.

**Coeficiente de Rendimiento (COP):**

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{gen}}$$

#### Ejercicio

Determine el COP de un ciclo de absorción que utiliza agua-amoníaco como mezcla, donde el calor suministrado al generador es de 400 kJ y el calor absorbido en el evaporador es de 300 kJ.

**Calcular el COP del ciclo**

$$COP = \frac{300 \text{ kJ}}{400 \text{ kJ}} = 0.75$$

## Ciclo de Refrigeración por Adsorción

El ciclo de refrigeración por adsorción es una técnica similar al ciclo de absorción, pero el refrigerante se adsorbe en la superficie de un material sólido en lugar de disolverse en un absorbente líquido. Este ciclo es ventajoso para aplicaciones que buscan un sistema sin componentes móviles, ya que reduce la necesidad de mantenimiento y mejora la durabilidad. (Mujumdar, A. S, 2020).

El ciclo de adsorción se puede representar en un diagrama de presión versus temperatura (P-T), mostrando las etapas de adsorción, desorción, condensación y evaporación.

### Coeficiente de Rendimiento (COP):

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{des}}$$

#### Donde:

$Q_{evap}$  es el calor absorbido en el evaporador.

$Q_{des}$  es el calor suministrado para la desorción.

### Ejercicio

Calcule el COP de un ciclo de adsorción que utiliza zeolita-agua como par de adsorción, donde el calor suministrado para la desorción es de 500 kJ y el calor absorbido en el evaporador es de 350 kJ.

#### Solución:

#### Calcular el COP del ciclo

$$COP = \frac{350 \text{ kJ}}{500 \text{ kJ}} = 0.7$$

## **CAPÍTULO 4**

### **Aplicaciones específicas en la Agroindustria**

## **Aplicaciones Específicas en la Agroindustria**

### **4.1. Procesos de secado**

El secado es una técnica fundamental en la agroindustria para la conservación de productos agrícolas y la prolongación de su vida útil. Existen varios métodos de secado, cada uno con aplicaciones específicas. El secado al aire utiliza la circulación de aire para evaporar el agua contenida en los productos.



Es un método económico y adecuado para pequeños volúmenes de productos, aunque puede ser lento y dependiente de las condiciones climáticas (Niranjan, K., & Datta, A. K., 2020).

#### **Secado por Convección**

Este proceso utiliza la circulación de aire caliente a través del material para facilitar la deshidratación. Es un método eficiente y de uso generalizado en el sector alimentario para deshidratar frutas, hortalizas y cereales (Rahman, M. S., & Perera, C. O, 2021).

#### **Secado por Conducción**

Consiste en la transferencia de calor que se produce por contacto directo desde una superficie calentada hacia el producto. Esta técnica se aplica habitualmente en el secado de aquellos alimentos que exigen un control estricto de la temperatura para prevenir su deterioro o descomposición (Riechmann, J, 2024).

#### **Secado por Radiación**

Este método emplea la radiación infrarroja para calentar internamente el producto y facilitar la evaporación del agua. Destaca por su rapidez y se implementa en el secado de materiales sensibles al calor, como ciertos tipos de especias y hierbas aromáticas (Riechmann, J, 2024).

## **Secado por Liofilización**

Este proceso implica la congelación total del producto, seguida de la remoción del hielo por medio de sublimación (paso directo de sólido a vapor). Este método ofrece una mejor retención de nutrientes y es el ideal para artículos que requieren una calidad superior, como los alimentos destinados a astronautas o ciertos productos farmacéuticos (Santos, A., & Oliveira, J, 2020).

### **4.1.1. Secado convectivo**

El secado convectivo es una técnica de deshidratación ampliamente utilizada en la agroindustria para reducir el contenido de agua en productos agrícolas. Este proceso implica la transferencia de calor y masa entre un gas caliente, generalmente aire, y el producto húmedo. La eficiencia del secado convectivo depende de varios factores, como la temperatura del aire, la velocidad del flujo de aire, la humedad relativa y la superficie del producto.

El procedimiento inicia con la colocación del material a deshidratar en un equipo de secado convectivo, donde se le somete a una corriente de aire calentado. Este flujo de aire recorre la superficie del producto, facilitando la evaporación del contenido hídrico. Esta técnica es notable efectivo para artículos como cereales, hortalizas y frutas, ya que posibilita una deshidratación uniforme y ágil (Santos, A., & Oliveira, J, 2020). No obstante, es imprescindible ejercer un control riguroso sobre la velocidad y la temperatura del aire para prevenir cualquier daño al producto.

## **Desafíos y Optimización de Calidad**

Uno de los mayores retos inherentes al secado convectivo es el mantenimiento de la calidad del material durante todo el proceso. Tanto una deshidratación excesiva como una insuficiente pueden provocar la pérdida de valor nutricional y la afectación de las propiedades sensoriales. Por consiguiente, resulta vital ajustar las condiciones operativas

para asegurar la máxima preservación de las características nutricionales y organolépticas del producto.

### **Variedades de Equipos y Aplicación Industrial**

Además, el secado por convección se lleva a cabo utilizando diversos diseños de equipos, incluyendo los secadores de bandejas, de túnel o de tambor. Cada modelo presenta beneficios y limitaciones específicas, dependiendo directamente de la naturaleza del producto y de las condiciones de proceso deseadas.

Un factor relevante es la amplia aplicación de este método en la industria alimentaria.

Por ejemplo, la deshidratación de frutas y vegetales permite su almacenamiento por períodos prolongados sin requerir necesariamente refrigeración. Esto representa una ventaja significativa, especialmente en áreas donde el acceso a la cadena de frío es limitado.

Además, el secado de granos y semillas reduce el riesgo de deterioro por moho y bacterias, mejorando la vida útil y la seguridad alimentaria (Kim,2022).

Otro ejemplo adicional se encuentra en la deshidratación de productos cárnicos, como la carne seca. En este caso, el secado convectivo es fundamental para la remoción del contenido de agua, lo cual tiene el efecto de reducir la actividad microbiana y, por ende, alarga significativamente la vida útil del alimento. Es indispensable mantener una regulación estricta de las condiciones de secado para asegurar la inocuidad y la calidad del producto final.

#### **4.1.2. Secado por adsorción**

El método de secado por adsorción es una técnica que se emplea para extraer la humedad presente en el aire circundante, utilizando para ello materiales con propiedades adsorbentes. Este proceso es especialmente útil en condiciones donde el secado por calor podría dañar la calidad del producto. Los materiales adsorbentes, como la sílica gel, el

cloruro de calcio y las zeolitas, son comúnmente utilizados debido a su alta capacidad de adsorción y estabilidad térmica (Santos et al., 2020).

El proceso de secado por adsorción implica la colocación del producto en un ambiente controlado, donde el aire húmedo es pasado a través de un lecho de material adsorbente. El material adsorbente tiene la función de capturar la humedad que se encuentra en el aire, provocando así una disminución de la humedad relativa del entorno. Este procedimiento resulta especialmente ventajoso para deshidratar productos sensibles al calor, como ciertas semillas, hierbas y compuestos de índole farmacéutico.

Una de las grandes fortalezas de la adsorción es su capacidad para operar a temperaturas reducidas. Esto contribuye a la conservación integral de las propiedades nutricionales y organolépticas de los alimentos. Además, esta técnica ofrece una alta eficacia en la remoción de humedad residual, un factor crítico para asegurar la preservación a largo plazo de materiales delicados.

El secado por adsorción también se utiliza en combinación con otros métodos de secado, como el secado convectivo y el secado al vacío, para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de secado. Por ejemplo, en la industria de alimentos, el secado por adsorción se puede utilizar para deshidratar productos como frutas y verduras después de un secado inicial por convectivo, eliminando la humedad residual y asegurando una conservación óptima. Un uso relevante del secado por adsorción se encuentra en el sector de las semillas. Aquí es indispensable mantener un control exacto de la humedad para asegurar tanto la viabilidad como la capacidad de germinación del material. La adsorción crea una atmósfera regulada que mantiene la humedad en los niveles más adecuados, lo que permite preservar la calidad y la viabilidad de las semillas durante el almacenamiento (Gómez, 2023).

### **Valoración como Técnica Agroindustrial**

El secado por adsorción constituye una metodología de gran valor dentro de la

agroindustria, especialmente para el tratamiento de productos que son sensibles a las altas temperaturas. Su doble capacidad de trabajar a baja temperatura y su alta eficacia en la extracción de humedad lo convierten en la técnica ideal para la conservación a largo plazo de alimentos y otros productos agrícolas.

### **Procesos de conservación**

La preservación de productos agroindustriales es crucial para mantener su calidad y extender su período de consumo. Entre las metodologías de conservación más importantes se incluyen:

**Envasado al Vacío:** Este sistema consiste en extraer el aire de los recipientes, lo que logra disminuir la oxidación y frenar el desarrollo microbiano. Es una técnica de uso generalizada para la conservación de carnes, pescados y alimentos deshidratados (Holdman, 2019).

**Conservación en Latas o Frascos (Enlatado):** Este método implica introducir los alimentos en contenedores (latas o frascos) y someterlos a un tratamiento térmico intensivo para eliminar los microorganismos dañinos. Es habitual su uso en la preservación de vegetales, frutas y comidas ya preparadas (Martínez-Siliceo, 2022).

**Refrigeración y Congelación:** Estas técnicas se basan en la reducción de la temperatura para disminuir la velocidad del crecimiento microbiano. Específicamente, la congelación es capaz de detener casi por completa la proliferación de microorganismos y la actividad enzimática.

Se usa para una amplia gama de productos, desde carnes hasta frutas y verduras (Adams, 2022).

**La fermentación** es un proceso controlado de descomposición de azúcares por microorganismos, utilizado para productos como el yogur, el queso y el chucrut. Además de conservar, puede mejorar el sabor y la digestibilidad (Kalina et al., 2020).

El uso de conservantes químicos incluye la adición de sustancias químicas para prevenir el deterioro. Uso de Aditivos Químicos: Se emplean sustancias conservantes, tales como los sulfitos y nitratos, en el procesamiento de carnes curadas y en la elaboración de alimentos enlatados (Rahman, M. S, 2020).

Deshidratación (Eliminación de Agua): Este proceso tiene como objetivo extraer la humedad de los productos para así impedir el desarrollo de microorganismos. Es una técnica común en la fabricación de frutas secas, especias y hierbas aromáticas (Toledo, 2018).

#### **4.1.3. Refrigeración y congelación**

La refrigeración y la congelación son técnicas de preservación esenciales en el sector agroindustrial. Ambas se basan en el almacenamiento de productos a temperaturas reducidas para retardar la proliferación microbiana y la velocidad de las reacciones químicas que conducen al deterioro. Estos métodos son cruciales para la conservación tanto de alimentos frescos como de los procesados, permitiendo extender su durabilidad y salvar su valor nutricional y sus atributos sensoriales. (Stoecker, W. F., & Jones, J. W. 2018).

Refrigeración: La refrigeración mantiene los productos dentro de un rango térmico de 0 y 8 °C. Este intervalo es apropiado para una gran variedad de productos agrícolas, incluyendo carnes frescas, lácteos, frutas y verduras. El enfriamiento logra inhibir el desarrollo de microorganismos patógenos y de deterioro, al igual que las reacciones enzimáticas que degradan el producto. Una de las principales ventajas de la refrigeración es su capacidad para mantener la frescura y la calidad de los alimentos de origen agrícola. Por ejemplo, si frutas y hortalizas se almacenan bajo condiciones óptimas de frío, pueden mantener su textura y lozanía por lapsos más prolongados, lo cual es vital para el comercio y la distribución de productos frescos. Congelación: Detención del Crecimiento. La

congelación, por su parte, requiere que los productos se almacenen a temperaturas iguales o inferiores a -18 °C. A este nivel, el crecimiento microbiano y las reacciones químicas se detiene casi totalmente. Esta técnica es ideal para la conservación de pescados, carnes y comidas preparadas, preservando la calidad del producto por períodos muy largos, lo cual facilita su comercialización y distribución a mercados distantes. Un factor crítico en la congelación es la gestión de la cristalización del hielo. La congelación rápida —un proceso que baja la temperatura del producto velozmente genera cristales de hielo diminutos que minimizan el daño a las estructuras celulares, manteniendo así la calidad final. En contraste, una congelación lenta puede inducir la formación de cristales de mayor tamaño que destruyen la integridad celular, perjudicando la textura y la calidad del alimento.

En la industria, la congelación se aplica a una extensa gama de productos, desde platos listos para consumir y productos cárnicos, hasta frutas y vegetales. Por ejemplo, las verduras se procesan y congelan inmediatamente después de la cosecha para retener su valor nutritivo y frescura, asegurando su disponibilidad a lo largo de todo el año.

La refrigeración y la congelación también juegan un papel crucial en la seguridad alimentaria. Al reducir la actividad microbiana, estos métodos de conservación minimizan el riesgo de enfermedades transmitidas por alimentos, protegiendo así la salud del consumidor.

#### **4.1.4. Conservación bajo atmósferas controladas**

La conservación bajo atmósferas controladas (AC) es una técnica avanzada utilizada para prolongar la vida útil de productos agrícolas mediante el control preciso de la composición del aire alrededor del producto almacenado. Este método implica el ajuste y mantenimiento de niveles específicos de oxígeno, dióxido de carbono y nitrógeno en el ambiente de almacenamiento, lo que ralentiza el proceso de maduración y previene el deterioro (Wang, Y., et al. 2021).

El método de conservación en atmósferas controladas se inicia tras la recolección del producto, el cual es transferido a cámaras de almacenamiento herméticas donde la composición gaseosa del aire es manipulada. La estrategia clave es la disminución de las concentraciones de oxígeno y el incremento del dióxido de carbono. Esta modificación inhibe la tasa de respiración del producto y frena la proliferación microbiana, lo que resulta en una extensión de su vida útil. Ventajas y aplicaciones Una de las mayores ventajas de la conservación bajo (AC) \$es su eficacia para mantener la frescura y la calidad de los vegetales y las frutas por largos períodos. Este método es particularmente valioso para productos altamente perecederos, como el kiwi, las peras y las manzanas, que requieren un entorno de almacenamiento específico para conservar su textura, sabor y valor nutricional. Además, la técnica de (AC) se implementa a menudo en conjunto con otros procedimientos, como la refrigeración, para potenciar la eficiencia y el nivel de calidad del almacenamiento. Por ejemplo, las frutas que se mantienen bajo una atmósfera controlada y en condiciones de frío adecuadas pueden permanecer frescas durante meses, un factor decisivo para el comercio y la distribución a mercados lejanos.

Un factor crítico en la conservación baja (AC) es la regulación precisa de las condiciones ambientales. La tecnología de vanguardia permite el ajuste y el monitoreo constante de las concentraciones de gases. Esto asegura un ambiente óptimo de preservación, previniendo riesgos como el deterioro por fermentación anaeróbica y los daños provocados por concentraciones de gases tóxicos. En la industria, el uso de (AC) se extiende más allá de los alimentos, aplicándose también a otros productos sensibles, como las flores de corte y las hierbas aromáticas.

El control de la atmósfera de almacenamiento permite mantener la frescura y calidad de estos productos, extendiendo su vida útil y reduciendo el desperdicio. (Welty, J. R et al., 2018).

# **CAPÍTULO 5**

## **Energía en la Agroindustria**

## **5.1. Energía**

La (multidisciplinaria, 2024) menciona que todas las actividades que realizamos en nuestra vida diaria están relacionadas con la energía y también podemos decir que el mundo no puede existir sin energía. Desde la antigüedad, la gente ha intentado controlar la energía para su propio beneficio. En los albores de la civilización, el descubrimiento del fuego permitió obtener calor mecánico, metales para fabricar herramientas y armas. Posteriormente, en la era de la producción industrial, la invención de la máquina de vapor añadió un gran potencial al trabajo humano. Luego, la introducción de los motores de combustión interna, que utilizaban combustibles fósiles del petróleo crudo, hizo posible que la gente viviera y trabajara cómodamente. Como definición general la energía se define como la capacidad para realizar trabajo o provocar un cambio. Puede manifestarse de diversas formas y puede ser transformada de una forma a otra, pero no se crea ni se destruye, solo se convierte. Es la capacidad de calentar, iluminar o alimentar un proceso. Siendo una magnitud física que se puede manifestar de diferentes formas, como energía cinética, potencial, térmica, química, eléctrica, entre otras. La energía es una propiedad fundamental del universo y está presente en todo lo que nos rodea. (Çengel, Y. A., & Boles, M. A., 2020).

### **5.1.2. Tipos de Energía**

Como se mencionó en el tema anterior se puede manifestar de muchas formas estas son las comunes:

**Energía Cinética:** Es la energía asociada al movimiento de un objeto. Por ejemplo, un automóvil que este en movimiento tiene energía cinética.

**Energía Potencial:** Es la energía almacenada en un objeto debido a su posición o configuración. Un ejemplo clásico es un objeto elevado sobre el suelo que tiene energía potencial gravitacional.

**Energía Térmica:** Es la forma de energía vinculada a la temperatura de un cuerpo, generada por la agitación de las partículas que componen la sustancia. Un ejemplo ilustrativo es el calor emitido por una cocina.

**Energía Química:** Es la energía que se encuentra almacenada en las uniones moleculares. Esta se libera cuando ocurren reacciones químicas, como sucede en el proceso de combustión de materiales combustibles.

**Energía Eléctrica:** Es la energía asociada al desplazamiento de electrones a través de un material conductor. La corriente que abastece nuestros hogares es un claro ejemplo de esta forma de energía.

**Energía Nuclear:** Corresponde a la energía que se libera durante las transformaciones nucleares, ya sea por fisión (separación de núcleos atómicos) o fusión (unión de núcleos atómicos). Esta energía se emplea en centrales nucleares para la producción de electricidad.

**Energía Radiante:** Es aquella que se propaga mediante ondas electromagnéticas, incluyendo tanto la luz solar como las ondas de radio.

**Energía Mecánica:** Es la suma de las energías potenciales y cinéticas presentes en un sistema. Un ejemplo es una rueda en movimiento, que posee energía mecánica cinética.

### 5.2.3. Unidades de Medida

Julio (J): Unidad de energía en el Sistema Internacional de Unidades.

Kilovatio-hora (kWh): Unidad común para medir el consumo de energía eléctrica.

Caloría (cal): Unidad de energía usada en nutrición y en química (Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2020).

### 5.3. Agroindustria

La agroindustria se refiere a la combinación de actividades agrícolas con procesos

industriales para transformar productos provenientes del agro en bienes elaborados o semielaborados. Es un sector clave para la economía, que abarca desde la producción, procesamiento y comercialización de productos agrícolas. (Wilson, A., & Baker, P. 2023)

### **5.3.1. Producción primaria**

Esta fase incluye el cultivo de productos agrícolas y la cría de animales. Es la base inicial el punto clave desde donde inicia su labor la agroindustria y abarca actividades como: cultivo de cereales, Frutas, verduras, ganadería, pesca y acuicultura. Es de donde se obtiene la materia prima para poder darle inicio al procesamiento, una fuente primaria con estándares de calidad alto significa una garantía elevada de satisfacción en el producto final, su materia prima es esencial y debe cumplir los requisitos esenciales para cada procesamiento. (Wilson, A., & Baker, P, 2023)

Sus análisis deben ser cruciales, cada cuidado desde su siembra es crucial para obtener un excelente producto.

### **5.3.2. Procesamiento**

El procesamiento transforma productos agrícolas crudos en productos elaborados o semielaborados. Puede tener varias fases como son transformación de productos agrícolas, producción de nuevos productos y conservación.

En el procesamiento el envasado de productos es importante dado que se debe utilizar el envase o empaque adecuado para cada proceso o uso, este es el que garantiza una inocuidad es decir que el alimento procesado sea acto y seguro al momento que llegue a la mano del consumidor, el procesamiento se puede realizar tanto para productos alimenticios para el ser humano, como para animales e incluso tener otros fines, para su distribución y venta su etiquetado debe cumplir normativas que son el ente de control y regulación de cada producto en el mercado, sirve identificar, promover productos.

La agroindustria también abarca la logística y la distribución como fase final esto es la

comercialización del producto elaborado (Toledo, R. T, 2018).

### **Cómo se utiliza la energía en la agroindustria**

La energía en la agroindustria se utiliza de diversas maneras, desde la producción primaria hasta la transformación y distribución de los productos.

#### **Producción primaria**

En la Agroindustria, los procesos primarios son fundamentales para la producción y transformación de alimentos.

Los combustibles fósiles, principalmente gasolina y diésel, son las principales fuentes de energía para impulsar una amplia gama de maquinaria utilizada en la industria del transporte y la agricultura. Estos combustibles tienen un impacto significativo en el funcionamiento, eficiencia, mantenimiento, emisiones de los vehículos, como tractores, cosechadoras, sembradoras y arados, que facilitan las labores de preparación del suelo, siembra, cultivo y su cosecha. (Welty, J. R et al., 2018).

El riego constituye una actividad agrícola fundamental, dado que garantiza el suministro de agua indispensable para el desarrollo de los cultivos. Este proceso implica el bombeo de agua desde fuentes superficiales o subterráneas hasta las áreas de siembra. Esta provisión hídrica es vital para el crecimiento vegetal, en particular en aquellas regiones que experimentan un déficit de precipitaciones. Para su funcionamiento, los sistemas de riego necesitan una aportación de energía, la cual puede ser obtenida de distintas fuentes.

La electricidad figura como una de las fuentes de energía más utilizadas por los pequeños agricultores para la puesta en marcha de sus sistemas de riego. Se utiliza principalmente para operar bombas eléctricas que extraen y distribuyen agua por medio de aspersores que llevan el suministro necesario para cada planta.

- La energía solar se aprovecha mediante paneles fotovoltaicos que convierten la luz solar en electricidad, la cual se utiliza para operar bombas por lo general estas son

hibridas y se utilizan para generar un ahorro de energía eléctrica minimizando costos en consumo eléctrico, se aprovecha la energía solar para que el funcionamiento de las bombas de riego continúe con su funcionamiento.

- El diésel es una fuente de energía convencional y más utilizada para alimentar motores de combustión interna que operan bombas de riego por lo general se utiliza en lugares donde no hay acceso a la energía eléctrica, estos sistemas se conectan con tuberías y dispersores los cuales hacen que el cultivo tenga suficiente agua.
- La energía hidráulica se utiliza en sistemas de riego donde se aprovecha el flujo natural de ríos, canales, acequias para mover el agua sin necesidad de bombeárla.

La energía en la agroindustria alimenta los sistemas de tecnologías de precisión que son usadas en la actualidad donde se emplea sensores, drones y sistemas de información geográfica, cada uno de ellos usa energía siendo esencial para optimizar el uso de recursos, mejorando la eficiencia en el cultivo.

La fabricación de insumos agrícolas requiere energía para cada proceso por muy pequeño que sea, los fertilizantes y pesticidas, son fundamentales para el crecimiento y protección de los cultivos siendo ésta el inicio de la fuente primaria para el inicio de los procesos agroindustriales. (Welty, J. R et al.,2018).

Al transportar productos agrícolas desde el campo hasta los centros de procesamiento o mercados, lo que incluye el uso de camiones, camionetas, contenedores para eso es necesario el uso de energía para mantener las condiciones adecuadas de temperatura y humedad en los almacenes, lo que prolonga la vida útil y calidad de los productos agrícolas.

En las plantas de procesamiento, la energía se utiliza una cantidad significativa de energía para llevar a cabo diversas operaciones (Wilson, A., & Baker, P.,2023).

## **Secado de Granos**

El secado El secado de cereales es un proceso que idealmente se realiza de forma isotérmica y que tiene como propósito fundamental extraer la humedad para mantener la calidad del grano. La termodinámica tiene una influencia vital en el diseño de equipos de secado que sean verdaderamente eficientes.

La transferencia de calor y de masa durante el secado de granos ocurre de manera simultánea. En primera instancia, el calor se transfiere hacia el interior del grano, suministrando la energía requerida para que el agua se evapore. Posteriormente, la masa, en forma de vapor de agua, se mueve desde el interior del grano hacia su superficie para finalmente ser expulsada al aire circundante.

El calor necesario para el secado se puede expresar mediante un balance de energía. La energía total suministrada al grano se utiliza para aumentar la temperatura del grano y para evaporar el agua.

Supongamos que estamos secando una masa  $m_g$  de granos de maíz. La energía necesaria para el proceso de secado se puede calcular considerando la energía requerida para:

- Calentar los granos desde una temperatura inicial  $T_i$  hasta una temperatura final  $T_f$ .
- Evaporar el agua contenida en los granos.

La ecuación de balance de energía es:

$$Q = m_g \cdot C_p \cdot (T_f - T_i) + m_w \cdot \lambda$$

Donde:

- $Q$  es el calor total suministrado (en Joules o kilojoules).
- $m_g$  es la masa del grano (en kg).
- $C_p$  es la capacidad calorífica específica del grano (en J/kg·K).
- $T_f$  es la temperatura final del grano (en °C o K).
- $T_i$  es la temperatura inicial del grano (en °C o K).
- $m_w$  es la masa de agua evaporada (en kg).

- $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua (en J/kg o kJ/kg).

**EJEMPLO:** Queremos secar 100kg de maíz, con un calor específico de 1,8 y una temperatura inicial de 20 °C con un vapor de agua de 20 kg y un calor latente de 2260kJ/kg, cuya temperatura final es de 60 °C, calcule la cantidad de energía necesaria para secar el maíz.

Datos:

- Masa de grano  $m_g=100 \text{ kg}$
- Capacidad calorífica específica del grano  $C_p=1.8 \text{ kJ/kg}$
- Temperatura inicial  $T_i=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura final  $T_f=60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Masa de agua evaporada  $m_w=20 \text{ kg}$
- Calor latente de vaporización del agua  $\lambda=2260 \text{ kJ/kg}$

Separamos la formula

Primera resolución energía para calentar los granos.

$$Q_1=m_g \cdot C_p (T_f - T_i)$$

$$Q_1=100 \text{ kg} \cdot 1.8 \text{ kJ/kg} (60 \text{ }^{\circ}\text{C} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}) = Q_1 7200 \text{ kJ}$$

Segunda resolución, energía para evaporar el agua.

$$Q_2=m_w \cdot \lambda$$

$$Q_2=20 \text{ kg} \cdot 2260 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_2=45200 \text{ kJ}$$

Unión de las dos fórmulas

$$Q=Q_1+Q_2$$

$Q=7200\text{ kJ}+45200\text{ kJ}$

$Q=52400\text{ kJ}$

El calor total necesario para secar 100 kg de granos de maíz, elevando su temperatura de 20 °C a 60 °C y evaporando 20 kg de agua, es de 52400 kJ. Es la energía que es suministrada en el sistema.

### **La pasteurización**

La pasteurización es un proceso adiabático que implica el calentamiento de lácteos para eliminar patógenos. La termodinámica es fundamental para determinar los parámetros óptimos de temperatura y tiempo.

Es un proceso térmico que se utiliza para destruir microorganismos patógenos presentes en los productos lácteos, aumentando así su seguridad y vida útil. Este proceso implica calentar el producto a una temperatura específica durante un tiempo determinado, y luego enfriarlo rápidamente. Desde una perspectiva termodinámica, la pasteurización se puede considerar un proceso adiabático en el sentido de que no hay intercambio de calor con el entorno durante el breve tiempo en que el producto se mantiene a la temperatura de pasteurización (Wang. Y et al., 2021).

### **5.4. Principios Termodinámicos**

El concepto de adiabático en este contexto se refiere a que, durante la fase de calentamiento y el posterior mantenimiento a la temperatura de pasteurización, la interacción térmica con el medio ambiente circundante es despreciable. Esto se debe al breve lapso de tiempo que requiere el proceso. La transferencia de calor es un factor de importancia crítica en esta operación. La cantidad de energía térmica necesaria para elevar el producto lácteo hasta la temperatura de pasteurización se puede determinar con

precisión recurriendo a las propiedades termodinámicas del producto, siendo la capacidad calorífica una de las propiedades clave utilizada para dicho cálculo.

### Ecuación de Balance de Energía

$$Q=m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde:

- $Q$  es el calor total suministrado (en Joules).
- $m$  es la masa del lácteo (en kg).
- $C_p$  es la capacidad calorífica específica del lácteo (en J/kg·K).
- $\Delta T$  es la diferencia de temperatura (en K).

Para determinar los parámetros óptimos de temperatura y tiempo, se debe considerar la termorresistencia de los microorganismos patógenos. Por ejemplo, para eliminar patógenos comunes como *Listeria monocytogenes*, la temperatura de pasteurización podría ser de 72°C durante 15 segundos (pasteurización de alta temperatura por corto tiempo, HTST).

**EJEMPLO:** Supongamos que queremos pasteurizar 1000 kg de leche

Capacidad calorífica específica de la leche  $C_p=3.93 \text{ kJ/kg}$

Temperatura inicial  $T_i=4 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura de pasteurización  $T_p=72 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Primero realizamos la diferencia de Temperatura:

$$\Delta T=T_p-T_i$$

$$\Delta T=72 \text{ }^{\circ}\text{C}-4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = 68^\circ\text{C}$$

Segundo buscamos el calor que le suministramos.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q = 1000 \text{ kg} \times 3.93 \text{ kJ/kg} \times 68 \text{ K}$$

$$Q = 267240 \text{ kJ}$$

Después de alcanzar la temperatura de pasteurización, la leche debe enfriarse rápidamente para minimizar la proliferación de microorganismos termófilos y preservar la calidad del producto. Esto generalmente se hace utilizando intercambiadores de calor eficientes.

La termodinámica es esencial para diseñar y optimizar el proceso de pasteurización de lácteos. Entender los principios de transferencia de calor y los requisitos específicos de eliminación de patógenos permite a los ingenieros determinar los parámetros óptimos de temperatura y tiempo, garantizando así la seguridad y calidad del producto final. Limpieza y preparación es utilizado en el lavado, pelado, cortado y clasificación de la materia prima.

**Conservación de frutas y verduras** La conservación de frutas y verduras implica procesos isobáricos e isocóricos, es fundamental para mantener su frescura, calidad y valor nutritivo durante el almacenamiento y transporte. Los procesos isobáricos (a presión constante) e isocóricos (a volumen constante) son dos métodos termodinámicos clave que se utilizan para este fin. La termodinámica proporciona una comprensión profunda de cómo las condiciones de almacenamiento, como la temperatura, la presión y la humedad, afectan la calidad de los productos. **Proceso Isobárico** En este proceso, la presión se mantiene constante donde las frutas y verduras se almacenan en atmósferas controladas (CA) o en atmósferas modificadas (MA). La temperatura y la composición de los gases (oxígeno y dióxido de carbono) se regulan para reducir la respiración y la maduración de los productos.

Proceso Isocórico en este proceso, el volumen se mantiene constante. Esto ocurre en contenedores cerrados o cámaras selladas donde el volumen del espacio de almacenamiento no cambia. La regulación de la temperatura y la composición de los gases sigue siendo crucial.

### **Almacenamiento en Atmósfera Controlada (CA)**

En el almacenamiento CA, las condiciones de temperatura, humedad y composición del gas se mantienen constantes para retrasar el proceso de maduración y prolongar la vida útil de frutas y verduras (Barbosa-Cánovas, G. V., & Ibarz, A, 2020).

#### Ecuación de Balance de Energía

$$Q=m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde:

- $Q$  es el calor total suministrado o removido (en Joules).
- $m$  es la masa de los productos (en kg).
- $C_p$  es la capacidad calorífica específica del producto (en J/kg·K).
- $\Delta T$  es la diferencia de temperatura (en K).

**EJEMPLO:** Se está almacenando 1000 kg de manzanas en un almacén CA. La capacidad calorífica específica de las manzanas es 3.6 kJ/kg y queremos reducir su temperatura de 25 °C a 4 °C.

Primero realizamos la diferencia de temperatura

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 25^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 21\text{K}$$

Segundo realizamos la transferencia de calor

$$Q=m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q=1000\text{kg} \times 3.6\text{kJ/kg} \times 21\text{K}$$

$$Q=75600\text{kJ}$$

El sistema de refrigeración del almacén debe ser capaz de remover 75600 kJ de calor para alcanzar la temperatura deseada.

Almacenamiento en Atmósfera Modificada (MA):

En el almacenamiento MA, el volumen se mantiene constante en envases sellados. Se modifica la atmósfera interna del envase para reducir el oxígeno y aumentar el dióxido de carbono, ralentizando la respiración del producto.

### Ecuación de estado de los gases ideales

$$PV=nRT$$

Donde:

P es la presión del gas (en Pa).

V es el volumen del gas (en m<sup>3</sup>).

n es el número de moles del gas.

R es la constante de los gases ideales (8.314 J/mol).

T es la temperatura (en K).

**Ejemplo:** Si almacenamos 10 m<sup>3</sup> de espinacas en un contenedor MA a 1 atm (101325 Pa) y a una temperatura de 2°C (275.15 K), podemos calcular la cantidad de moles de gas en el contenedor.

Formula inicial: PV=Nrt

Como el ejercicio pide que calculemos el número de moles se realiza un despeje de formula.

$$n = PV / RT$$

$$n = 101325 \text{ Pa} \times 10 \text{ m}^3 / 8.314 \text{ J/mol K} \times 275.15 \text{ K}$$

$$n \approx 442 \text{ moles}$$

Estos procesos demuestran como la termodinámica se aplica para mejorar la eficiencia y la calidad en la Agroindustria. Cada proceso tiene su formulación, la agroindustria es un amplio proceso de intercambio de energía.

### **5.5. Eficiencia energética en procesos agroindustriales**

La eficiencia energética en la agroindustria es esencial para mantener la competitividad y sostenibilidad del sector. A medida que aumentan los costos de la energía y las preocupaciones ambientales, las empresas agrícolas deben adoptar tecnologías y prácticas que optimicen el uso de la energía. La eficiencia energética en las empresas es esencial para reducir los costos operativos y reducir el impacto ambiental. El uso óptimo de los recursos energéticos se puede lograr mediante la implementación de prácticas y tecnologías eficientes. El sector industrial en Ecuador es responsable del 19% del consumo final de energía a nivel nacional, lo que lo sitúa como el segundo mayor consumidor energético del país (Barbosa-Cánovas, G. V., & Ibarz, A, 2020).

#### **Definición de eficiencia energética**

La eficiencia energética se define como la utilización más inteligente y optimizada de la energía a lo largo de todas las etapas de un proceso. Esto abarca desde la producción primaria y la transformación, hasta el almacenamiento y la distribución de los productos agrícolas. Dado que la agricultura y la industria alimentaria son grandes consumidores de energía, la racionalización de sus operaciones tiene el potencial de generar ahorros energéticos cuantiosos y de incrementar su rentabilidad de manera significativa. Además,

reducir el consumo de energía ayuda a mitigar el cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Según (Berk, Z, 2018) para la agroindustria es muy importante su imagen ambiental, la cual definitivamente está relacionada con las emisiones de CO<sub>2</sub>, al mismo tiempo, el desarrollo sustentable de la empresa puede ser utilizado como medio de exportación de productos a los mercados internacionales, especialmente al mercado europeo, que es; Se están volviendo cada vez más estrictos en el cumplimiento de las normas, volviéndose más estrictos para que las empresas puedan obtener los certificados de exportación adecuados.

El uso de energías renovables en el sector agroindustrial es sin duda un rasgo diferenciador que aporta valor añadido a las empresas. Esto se refleja en mejores beneficios directos e indirectos como lo son ampliar la comercialización de productos, importantes ahorros energéticos, cuidar la biodiversidad y el planeta, mejorar la imagen de la empresa. Acceso a una mayor producción de energía, costos reducidos, apertura de nuevos mercados internacionales, oportunidades para crear una imagen sustentable y retornos logrados son algunos de los beneficios de las energías renovables, especialmente para el sector agroindustrial.

La demanda de energía surge de diversos sectores de la economía nacional, sin embargo, el sector industrial es una fuente inagotable de producción. La industrialización requiere grandes cantidades de energía en la producción de bienes y servicios.

Convirtiéndose en uno de los principales impulsores del crecimiento energético. A pesar En el año 2012, el sector industrial fue responsable del 31\% de la demanda total de energía del país, con un consumo de 85.034 kWh/año a nivel nacional, siendo las regiones Oriental y Montañosa las principales consumidoras. La incorporación de tecnología de punta puede reducir notablemente este consumo. Dentro de estas innovaciones se incluyen los motores de alta eficiencia, los sistemas de recuperación de calor y las

tecnologías de automatización.

Gestión energética y normativa:

Un sistema de gestión de energía eficiente es clave para monitorear, controlar el consumo e identificar áreas de potencial ahorro. Además, facilitar el cumplimiento de estándares y auditorías. La adopción de la norma ISO 50001, por ejemplo, permite a las compañías establecer marcos eficaces para la administración energética.

Cuantificación de impacto ambiental: La estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de cualquier empresa o industria es un paso vital para la mitigación de estas emisiones y la lucha contra el cambio climático. La huella de carbono asociada al uso de energías renovables en la agroindustria puede ser cuantificada al ejecutar un análisis de ciclo de vida (ACV) que abarque toda la energía limpia utilizada en sus procesos. Es esencial entender cómo los principios termodinámicos se aplican a los procesos de producción, transformación, y almacenamiento de productos agrícolas y alimentarios.

## **5.6. Eficiencia Energética y Balance de Energía**

La eficiencia energética en un proceso agroindustrial puede evaluarse mediante el análisis de los balances de energía. Un balance de energía considera todas las entradas y salidas de energía en un sistema, permitiendo identificar las pérdidas y las oportunidades para mejoras.

- Balance de Energía: La ecuación básica de un balance de energía es:
- Energía de entrada: Energía de salida + Perdidas

Para un sistema agroindustrial, esto puede incluir energía en forma de electricidad, combustibles, energía solar, etc., y salidas como trabajo útil en maquinaria y calor residual, una de las definiciones de energía útil más utilizada es que es energía que está

disponible para los consumidores después de su transformación final. Toledo, (2018) considera energía útil (SE) a la energía disponible después de que el sistema ha sido utilizado para producir bienes o servicios, una vez deducidas todas las pérdidas asociadas por conversión y transporte. La energía debe transformarse para obtener una forma de energía adecuada para el uso del consumidor. De esta forma, la energía útil es la diferencia entre la energía disponible para el consumidor y las pérdidas totales en el consumo final. Los usos finales más habituales son: realizar trabajos, obtener calor, realizar determinados procesos físicos o químicos, refrigeración y climatización, movimiento mecánico e iluminación. La energía final (EF) es la energía que se entrega al consumidor antes de su transformación final y por lo tanto necesita ser transformada para alcanzar una forma adecuada para su uso, y es la energía registrada en el balance energético actual (Çalışkan, H., & Dincer, I 2021).

**Coeficiente de Rendimiento (COP):** El coeficiente de rendimiento (COP) es una métrica de eficiencia empleada en sistemas de calefacción y refrigeración. Este valor compara la energía útil entregada (calor o frío) con la energía total consumida. Naciones Unidas (COP). \$elevado es indicativo de un sistema que opera con mayor eficiencia. Huella de Carbono (HC) y (GEI) La huella de carbono (HC) cuantificar los gases de efecto invernadero (GEI) generados y emitidos en las operaciones de una entidad, un producto, un proceso o su cadena de valor completa. El Protocolo de Kioto identifica como \$text{GEI} \$primarios al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) , así como a los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) . La (HC) se mide utilizando la unidad de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO<sub>2</sub> equivalente) (Bejan, A, 2019).

**Control automático y optimización:** La eficiencia energética puede ser mejorada mediante la implementación de sensores y sistemas de control automático que monitorean y ajustan las condiciones operativas en tiempo real. La termodinámica resulta esencial para la

simulación y modelado de estos procesos, lo que permite la identificación precisa de las condiciones de operación más óptimas.

**Gestión Energética en Agroindustria** La administración de la energía es un factor determinante para la sostenibilidad y la eficiencia operativa en el sector agroindustrial. En este contexto, es crucial comprender la distinción entre las fuentes de energía renovables y no renovables, sus posibles usos y cómo pueden integrarse en los diferentes procesos. El presente capítulo ofrece una visión completa de las fuentes de energía, poniendo énfasis en su importancia, ventajas, desventajas y aplicaciones prácticas en el ámbito agroindustrial.

**Energía renovable:** es la energía que se obtiene de fuentes naturales que se regeneran constantemente, como la energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y biomasa.

**Energía no renovable:** este tipo de energía se obtiene de fuentes que no pueden regenerarse tras su consumo, siendo los combustibles fósiles (como el carbón, el gas natural y el petróleo) los ejemplos más representativos.

### **Integración energética y sistemas híbridos**

Una integración efectiva de fuentes renovables y no renovables en la agroindustria es clave para optimizar la eficiencia energética y reforzar la sostenibilidad. Al combinar diversas fuentes, es posible capitalizar las ventajas específicas de cada una y, al mismo tiempo, mitigar sus limitaciones.

Los sistemas híbridos podrían combinar energías limpias, como la solar o la eléctrica, con generadores de respaldo que operan con combustibles fósiles. Esto es fundamental para garantizar un suministro eléctrico ininterrumpido, esencial para el funcionamiento de la sociedad moderna, que abarca desde la operación de maquinaria y vehículos hasta el abastecimiento de hogares e industrias. No obstante, la generación, distribución y el consumo de energía también implican consecuencias ambientales y sociales notables.

El porvenir de la eficiencia energética en las empresas agroindustriales está profundamente ligado a la creación e implementación de nuevas tecnologías y la aplicación de principios termodinámicos avanzados. Se anticipa que la digitalización, el uso de la inteligencia artificial y el Big Data para el monitoreo y control de procesos, junto con la integración de energías renovables, revolucionarán la eficiencia en este sector.

Para que estas estrategias sean exitosas, se requiere un enfoque de trabajo interdisciplinario que fusione conocimientos de termodinámica, tecnología de la información, ingeniería de procesos y gestión ambiental. Como ingenieros agrícolas, nuestro rol es impulsar esta transformación y fomentar prácticas sostenibles que aseguren la viabilidad económica y ambiental de la agroindustria para las próximas generaciones.

### **Relación de rendimiento energético**

Esta técnica analítica se emplea para determinar el rendimiento energético de equipos y dispositivos específicos. El cálculo se fundamenta en establecer una comparación entre la energía útil que se obtiene (la salida) y la energía necesaria que se debe suministrar (la entrada requerida) (Bejan, A. (2019)).

Un ejemplo práctico de cálculo de eficiencia energética en un sistema termodinámico. Consideremos un sistema que convierte energía térmica en energía eléctrica.

Datos:

$Q_{in}$  Energía térmica de entrada 1000 MJ (megajulios)

$W_{out}$  Energía eléctrica de salida 350 MJ

La eficiencia energética  $\eta$  se calcula con la siguiente fórmula:

$$\eta = (E_{out} / E_{in}) \times 100\%$$

$E_{out}$  es la energía útil de salida.

$E_{in}$  es la energía de entrada.

Sustituimos los valores

$$\eta = (350 \text{ MJ} / 1000 \text{ MJ}) \times 100\%$$

$$\eta = 35\%$$

La eficiencia energética de la planta de energía térmica es del 35%. Esto significa que el 35% de la energía térmica de entrada se convierte en energía eléctrica útil, mientras que el 65% restante se pierde.

## **5.7. Gestión De Residuos Y Valorización Energética**

La administración de desechos y su posterior valorización energética constituyen pilares fundamentales en la agroindustria contemporánea. Son procesos indispensables para incrementar la eficiencia, minimizar el impacto ecológico y optimizar el aprovechamiento de recursos. Desde la perspectiva de la ingeniería agroindustrial, resulta esencial dominar las técnicas para el manejo eficaz de estos residuos, transformándolos en fuentes de energía de alto valor.

Este capítulo proporciona una introducción exhaustiva a estos temas, abarcando desde la caracterización de residuos hasta las tecnologías y estrategias para su valorización energética.

La agroindustria genera una variedad de residuos a lo largo de toda la cadena de producción, desde los residuos de cultivos y subproductos de la transformación hasta los desechos orgánicos y materiales de embalaje. La gestión adecuada de estos residuos es fundamental para minimizar su impacto ambiental, cumplir con la normativa vigente y aprovecharlos como recursos valiosos.

Los residuos provenientes de la agroindustria tienen un gran potencial para ser utilizados en diversos procesos que permiten la creación de nuevos productos, añaden valor a los productos originales y ayudan a restaurar condiciones ambientales deterioradas. Es fundamental reconocer el potencial que encierra la gestión de estos residuos, los cuales se producen en grandes volúmenes y representan un grave problema de contaminación ambiental si no reciben el tratamiento apropiado (Aghbashlo, M et al., 2020).

Los desechos generados en la agroindustria pueden ser transformados en diversas categorías de productos bioenergéticos, incluyendo biogás, biomasa energética, biodiésel o bioetanol. Alternativamente, pueden ser sometidos a procesos de compostaje, utilizados en la formulación de alimentos para ganado o empleados en la fabricación de otros bienes de interés, tales como bioplásticos, composites o ladrillos.

### **5.7.1. Tipos de Residuos Agroindustriales**

**Residuos Orgánicos:** Incluyen restos de cultivos, subproductos de procesamiento como cáscaras, pulpas y semillas, estiércol y lodos.

**Residuos Inorgánicos:** Incluyen materiales como plásticos, vidrio, metales y otros elementos de embalaje.

**Residuos Peligrosos:** Abarcan sustancias como fertilizantes, pesticidas y otros productos químicos empleados durante el procesamiento.

La quema descontrolada de desechos agroindustriales puede liberarse hasta 100 kg de CO equivalente por cada tonelada de material. En contraste, el uso de compost como fertilizante puede reducir la dependencia de fertilizantes químicos en un 20%. Por ello, la valorización energética se posiciona como una estrategia fundamental para transformar estos residuos en energía, aportando a la eficiencia y sostenibilidad del sector.

### **Rol de las Propiedades Termodinámicas**

Las propiedades termodinámicas de los residuos son cruciales para determinar su

viabilidad como fuente de energía. Se deben analizar minuciosamente el contenido energético, la composición y las características termodinámicas de los residuos:

- **Poder Calorífico:** Se refiere a la energía que se libera tras la combustión completa de una unidad de masa del residuo. Aquellos materiales con un alto poder calorífico son los más aptos para procesos como la gasificación y la incineración.
- **Contenido de Humedad:** La presencia de agua en el diseño puede mermar la eficiencia del proceso de recuperación energética. Un alto nivel de humedad disminuye el poder calorífico neto y podría requerir fases de secado previas.
- **Composición Química:** La proporción de elementos como el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno es lo que define cómo se comportarán los residuos durante procesos de valorización como el pirólisis, la incineración y la digestión anaeróbica.

El alto contenido de humedad reducirá la capacidad calorífica y puede requerir procesos de secado adicionales. Composición química: Las proporciones de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y otros elementos de los residuos determinan su comportamiento en procesos de valorización energética como la incineración, pirólisis y digestión anaeróbica.

La combustión es la oxidación exergónica de los residuos orgánicos en presencia de oxígeno, produciendo calor, dióxido de carbono y vapor de agua, proporción de energía liberada como calor útil en comparación con el poder calorífico del residuo, balance entre la energía de entrada (residuos) y la energía de salida (calor, trabajo, pérdidas).

La gasificación es la conversión de residuos orgánicos en gas sintético (syngas) mediante una reacción a alta temperatura con un agente gasificante como oxígeno o vapor, entalpía de reacción es el cambio de entalpía durante la gasificación, eficiencia de conversión que de energía contenida en el syngas en comparación con la energía contenida en los residuos.

El pirólisis es la descomposición térmica de residuos orgánicos en ausencia de oxígeno, produciendo bioaceite, biocarbón y gas. Energía de activación requerida para iniciar la descomposición térmica la digestión anaeróbica es la descomposición biológica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (metano y dióxido de carbono) y digestivo. El análisis termodinámico de la digestión anaeróbica implica, proporción de energía convertida en metano.

La gestión de residuos y la valorización de energía no sólo tienen impactos termodinámicos, sino también medioambientales y de sostenibilidad. La aplicación de principios termodinámicos ayuda a reducir el impacto sobre el medio ambiente y promover el desarrollo sostenible. Reducción de emisiones: implementar tecnologías de recuperación de energía para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes.

Evaluar todo el ciclo de vida de los procesos de residuos y reciclaje para identificar y minimizar el impacto ambiental. Economía Circular: Promover enfoques de economía circular que conviertan los residuos en recursos, cierren los ciclos de producción y reduzcan la dependencia de fuentes de energía no renovables.

### **Transformación de energía en la gestión de residuos y valorización energética.**

Los residuos de biomasa pueden generar energía a través de varios procesos de conversión que transforman la materia orgánica en formas utilizables de energía, como calor, electricidad y biocombustibles.

### **Generación de energía a partir de estiércol**

**Ejemplo:** Generación de energía a partir de estiércol mediante digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que microorganismos descomponen

materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás. Este biogás, compuesto principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), se puede utilizar como fuente de energía renovable.

Datos:

Masa de estiércol disponible: 10,000 kg/día

Contenido de sólidos volátiles: 15% (150 g/kg) = 0.15

Rendimiento de biogás: 0.5 m<sup>3</sup>/kg de sólidos volátiles

Contenido de metano en biogás: 60%

Energía del metano: 35.8 MJ/m<sup>3</sup>

Eficiencia de conversión de biogás a electricidad: 35%

Primero calculamos los Sólidos Volátiles (SV)

Sólidos volátiles=masa de estiércol × contenido de sólidos volátiles

Sólidos volátiles=10,000kg×0.15

Sólidos volátiles =1,500kg

Segundo Calcular el Volumen de Biogás Producido

Volumen de biogás=sólidos volátiles X rendimiento de biogás

Volumen de biogás=1,500kg×0.5m<sup>3</sup>/kg

Volumen de biogás=750m<sup>3</sup> Volumen de metano=750m<sup>3</sup>×0.60

Volumen de metano =450m<sup>3</sup>

Cuarto calcular la energía del metano

$E_{\text{metano}}=\text{volumen de metano} \times \text{energía del metano}$

$E_{\text{metano}}=450\text{m}^3 \times 35.8\text{MJ/m}^3$

$E_{\text{metano}}=16,110\text{MJ}$

Quinto calcular la energía eléctrica generada

$E_{\text{eléctrica}}=E_{\text{metano}} \times \text{eficiencia de conversión}$

$$E_{\text{eléctrica}} = 16,110 \text{ MJ} \times 0.35$$

$$E_{\text{eléctrica}} = 5,638.5 \text{ MJ}$$

Sexto Conversión de Energía Eléctrica a kWh

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$$

$$E_{\text{eléctrica}} = 5,638.5 \text{ MJ} / 3.6 \text{ MJ/kWh}$$

$$E_{\text{eléctrica}} = 1,566.25 \text{ kWh}$$

Los 10,000 kg de estiércol procesados diariamente mediante digestión anaerobia producen aproximadamente 750 m<sup>3</sup> de biogás, de los cuales 450 m<sup>3</sup> son metano. La energía del metano equivale a 16,110 MJ, y con una eficiencia de conversión del 35%, se obtiene aproximadamente 1,566.25 kWh de electricidad por día.

### **El pirólisis**

El proceso de pirólisis no solo produce estos productos valiosos, sino que también ayuda a reducir la cantidad de residuos sólidos y puede mejorar la eficiencia de la conversión de biomasa en energía y materiales útiles, el futuro de la gestión de residuos y la valorización energética en la agroindustria está marcado por la innovación tecnológica y la adopción de prácticas sostenibles. Desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles para la valorización energética, como la biotecnología y la nanotecnología. (Aghbashlo, M et al., 2020).

**Ejemplo:** cómo funciona el pirólisis en términos termodinámicos, específicamente en la conversión de biomasa en productos de pirólisis. El pirólisis es un proceso térmico que descompone materiales orgánicos a altas temperaturas en ausencia de oxígeno.

### Pirólisis de Biomasa

Datos Iniciales:

Masa de biomasa: 1000 kg

Contenido de humedad: 20%

Contenido de sólidos volátiles: 75% (de los sólidos secos)

Rendimiento de bio-aceite: 30% de la masa de biomasa seca

Rendimiento de gas de pirólisis: 50% de la masa de biomasa seca

Rendimiento de biocarbón 20% de la masa de biomasa seca

**Primero calculamos la masa de biomasa seca,** necesitamos encontrar la masa de biomasa seca eliminando el contenido de humedad.

Masa de biomasa seca=Masa total×(1–Contenido de humedad)

Masa de biomasa seca=1000kg×(1–0.20)

Masa de biomasa seca =1000kg×0.80

Masa de biomasa seca =800kg

**Segundo calcular la masa de sólidos volátiles que** es un porcentaje de la biomasa seca.

Masa de sólidos volátiles=Masa de biomasa seca×Contenido de sólidos volátiles

Masa de sólidos volátiles=800kg×0.75

Masa de sólidos volátiles =600kg

Tercero calculamos la masa de productos de pirólisis utilizando los rendimientos proporcionados para calcular la masa de cada producto.

Bio-aceite:

Masa de bio-aceite=Masa de biomasa seca×Rendimiento de bio-aceite

Masa de bio-aceite=800kg×0.30

Masa de bio-aceite =240kg

Cuarto Gas de pirólisis

Masa de gas de pirólisis=Masa de biomasa seca×Rendimiento de gas de pirolisis

Masa de gas de pirolisis=800kg×0.50

Masa de gas de pirolisis =400kg

#### Quinto Biocarbón:

Masa de biocarbón=Masa de biomasa seca×Rendimiento de biocarbón

Masa de biocarbón=800kg×0.20

Masa de biocarbón =160kg

La pirólisis convierte 1000 kg de biomasa (con 20% de humedad) en tres productos principales:

- Bio-aceite 240 kg, un líquido que puede ser refinado o utilizado como combustible.
- Gas de pirólisis 400 kg, una mezcla de gases que puede ser utilizada como combustible o procesada para otros usos.
- Biochar 160 kg, un material sólido que puede ser utilizado como enmienda del suelo o para otros usos industriales.

#### 5.8. Digitalización y Automatización

La implementación de sistemas avanzados de monitoreo y control es crucial para optimizar la gestión de residuos y su conversión en energía. Mediante la digitalización y la automatización del sistema, es posible realizar ajustes en tiempo real para maximizar la producción de biogás y la eficiencia de la conversión. Los sensores se encargan de supervisar continuamente las variables clave del digestor, como el pH y la temperatura. A su vez, los sistemas de control automatizados ajustan los parámetros operativos para mantener las condiciones ideales. Esta gestión precisa elevar la producción de biogás y mejorar la eficiencia del proceso. Esto, se complementa con la promoción de modelos de economía circular, cuyo objetivo es maximizar la reutilización de los residuos como recursos energéticos, cerrando el ciclo de producción y reduciendo al mínimo la generación de desechos. Finalmente, la inversión continua en investigación y desarrollo es vital para perfeccionar las tecnologías actuales y descubrir nuevas vías para la valorización energética. Supongamos una planta de biogás que utiliza residuos agroindustriales para producir energía. La planta está equipada con sensores y sistemas de control automatizados que monitorean variables clave como la temperatura, el pH, el

nivel de metano en el biogás y la cantidad de residuos en el digestor. (Welty, J. R et al., 2018).

Cantidad de residuos agroindustriales procesados 10 toneladas por día

Producción de biogás: 0.5 m<sup>3</sup> de biogás por kg de residuos

Contenido energético del biogás: 22 MJ/m<sup>3</sup>

Eficiencia de conversión del biogás en electricidad: 40%

Costo de la energía eléctrica: \$0.10 por kWh

### **Ejemplo**

Primero calculamos la Producción de Biogás

La cantidad de biogás producido por día se calcula multiplicando la cantidad de residuos procesados por la producción de biogás por kg de residuos.

Producción de biogás=10,000kg/día×0.5m<sup>3</sup>/kg

Producción de biogás =5,000m<sup>3</sup>/día

Segundo el cálculo del contenido energético del biogás

El contenido energético total del biogás producido por día se calcula multiplicando el volumen de biogás por su contenido energético

Contenido energético del biogás=5,000m<sup>3</sup>/día×22MJ/m<sup>3</sup>

Contenido energético del biogás =110,000MJ/día

Tercera conversión de energía a electricidad

La cantidad de electricidad generada a partir del biogás se calcula multiplicando el contenido energético del biogás por la eficiencia de conversión a electricidad

Electricidad generada=110,000MJ/día×0.40

Electricidad generada =44,000MJ/día

convertir la energía de MJ a kWh (1 kWh = 3.6 MJ)

Electricidad generada en kWh=  $\frac{44.000\text{MJ/día}}{3.6\text{ MJ/kWh}}$

Electricidad generada en kWh =12,222.22kWh/día

#### Cálculo del Valor Económico de la Electricidad Generada

El valor económico de la electricidad generada se calcula multiplicando la cantidad de electricidad generada por el costo de la energía eléctrica.

Valor económico=12,222.22kWh/día×\$0.10por kWh

Valor económico =\\$1,222.22por día

# **CAPÍTULO 6**

## **Modelado y Simulación de Procesos**

## **6.1. Modelos termodinámicos aplicados**

Los modelos termodinámicos aplicados en el ámbito agroindustrial son esenciales para optimizar procesos de conservación, procesamiento, y transformación de alimentos. Estos modelos se basan en principios de la termodinámica que permiten evaluar cómo se manejan la energía y la materia en diversos procesos. (Singh, R. P., & Heldman, D. R. 2022).

### **6.1.1. Modelos de balance de energía**

Los modelos de balance de energía son una herramienta fundamental para evaluar la eficiencia y el rendimiento de sistemas térmicos en la agroindustria. Se utilizan para:

- **Diseño y optimización de procesos térmicos:** Ayudan a diseñar procesos de cocción, pasteurización y esterilización al calcular la cantidad de energía requerida para alcanzar y mantener ciertas temperaturas.
- **Evaluación de equipos industriales:** Los balances de energía son herramientas esenciales para cuantificar el rendimiento de equipos clave como hornos, calderas e intercambiadores de calor. Permitirán identificar pérdidas energéticas y señalar las áreas específicas que requieren mejoras operativas.
- **Aplicación práctica:** En el proceso de deshidratación de frutas, el balance de energía facilita la optimización del consumo y del tiempo de secado. Esto asegura que los productos se deshidratan de forma homogénea, al mismo tiempo que se conservan sus cualidades nutricionales.

En términos matemáticos, estos modelos se apoyan en el uso de ecuaciones como:

$$Q = \Delta H + W$$

donde  $Q$  es la cantidad de calor transferido al sistema,  $\Delta H$  es el cambio en la entalpía, y  $W$  es el trabajo realizado por el sistema.

### **6.1.2. Modelos de transferencia de calor**

La transferencia de calor constituye un elemento esencial en cualquier proceso donde el manejo de la temperatura sea crítico. Los modelos que describen este fenómeno se categorizan de la siguiente manera:

- **Conducción:** Es el mecanismo por el cual el calor se propaga a través de un medio sólido o inmóvil. Un ejemplo práctico es el diseño de las paredes aislantes utilizadas en los hornos de secado industrial.
- **Convección:** Implica el intercambio de calor que ocurre entre una superficie sólida y un fluido en movimiento. Su aplicación es común en el diseño de pasterizadores de flujo continuo.
- **Radiación:** Se refiere a la transferencia de energía térmica mediante ondas electromagnéticas. Esta modalidad se aprovecha en equipos como hornos y secadores solares.

Estos modelos se fundamentan en principios matemáticos, como la Ley de Fourier para la conducción de calor:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

donde  $q$  es el flujo de calor,  $k$  es la conductividad térmica del material, y  $\frac{dT}{dx}$  es el gradiente de temperatura.

## **6.2. Simulación de procesos agroindustriales**

Las simulaciones permiten analizar y predecir el comportamiento de sistemas complejos sin necesidad de realizar experimentos costosos o difíciles de implementar. Algunas herramientas comunes y sus aplicaciones incluyen:

- **Aspen Plus y HYSYS:** Utilizados para la simulación de procesos de separación, reacciones químicas y sistemas de energía en la agroindustria.
- **MATLAB y Simulink:** Ofrecen capacidades para modelado dinámico y simulación de procesos no lineales como la fermentación y el cultivo de microorganismos.
- **COMSOL Multiphysics:** Permite simulaciones multifísicas que combinan transferencia de calor, flujo de fluidos y reacciones químicas.

#### **Aplicaciones Específicas:**

- **Simulación de secado de alimentos:** Modela la evaporación del agua y la transferencia de calor dentro de un producto, ayudando a optimizar el tiempo y la temperatura de secado.
- **Modelado de fermentación de biogás:** Simula la producción de biogás a partir de residuos agrícolas, optimizando las condiciones de operación como la temperatura, pH y concentración de nutrientes.

# **CAPÍTULO 7**

## **Casos de Estudio y Ejemplos Prácticos**

## **7.1. Análisis termodinámico de sistemas agroindustriales específicos**

El análisis termodinámico de sistemas agroindustriales permite identificar oportunidades de mejora en eficiencia y sostenibilidad. Aquí se detalla el estudio de varios sistemas:

- **Sistemas de cogeneración:** El uso de cogeneración para aprovechar la energía térmica residual en procesos como la producción de biocombustibles o la pasteurización de productos lácteos.
- **Refrigeración y congelación de alimentos:** Análisis de los ciclos de refrigeración por compresión y absorción para mejorar la eficiencia energética en plantas de alimentos congelados.
- **Secado por atomización en productos lácteos:** Aplicación de modelos de balance de energía y transferencia de calor para optimizar la atomización y el secado de leche en polvo, garantizando una alta calidad del producto final.

Cada uno de estos sistemas es modelado utilizando software de simulación para realizar un análisis termodinámico y desarrollar mejoras potenciales. (Riechmann, J, 2024).

## **7.2. Estudios de casos reales y sus soluciones termodinámicas**

Los estudios de casos reales proporcionan una perspectiva práctica de cómo se implementan los modelos y simulaciones termodinámicas en la industria. Algunos ejemplos incluyen:

- **Caso 1: Optimización del proceso de secado de arroz:** Modelado CFD e recurre a simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional para estudiar el flujo de aire y los patrones de transferencia de calor dentro de los secadores. Esto optimiza la eficiencia del secado y logra una notable reducción de los costos operativos.
- **Caso 2: Optimización azucarera:** La implementación de análisis energéticos permite detectar las ineficiencias en la producción de vapor y en la recuperación de

calor en las plantas de azúcar. El resultado es una disminución en el consumo de combustible y un incremento directo en la productividad general.

- **Caso 3: Innovación en sistemas de refrigeración con CO<sub>2</sub> como refrigerante natural:** Análisis de ciclo termodinámico para diseñar sistemas de refrigeración más ecológicos en la industria de la carne, con soluciones basadas en el uso de refrigerantes naturales para reducir la huella de carbono. (Riechmann, J, 2024).

## **CAPÍTULO 8**

### **Tendencias futuras y desafíos**

## **8.1. Innovaciones en tecnologías termodinámicas para la agroindustria**

La agroindustria ha experimentado una transformación significativa en las últimas décadas, impulsada por la necesidad de incrementar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos productivos. La termodinámica, como una rama fundamental de la física que estudia las transformaciones de energía, juega un papel crucial en esta evolución. Este capítulo se centra en las innovaciones tecnológicas basadas en principios termodinámicos que están revolucionando la agroindustria, mejorando la eficiencia energética y promoviendo prácticas más sostenibles. (Stoecker, W. F., & Jones, J. W, 2018).

### **Conversión de biomasa mejorada**

La biomasa es un recurso abundante en la agroindustria y se han realizado muchos estudios sobre su conversión en energía. Las tecnologías avanzadas de conversión de biomasa buscan optimizar el uso de este recurso, aumentar su eficiencia y reducir la cantidad de residuos. (Stoecker, W. F., & Jones, J. W, 2018).

### **Sistemas de refrigeración avanzados**

#### **La refrigeración por absorción**

La refrigeración por absorción utiliza una fuente de calor en lugar de electricidad para impulsar el ciclo de refrigeración.

#### **Principios de la Refrigeración por Absorción**

Un sistema de refrigeración por absorción típicamente consta de:

Generador donde una solución líquida absorbente se calienta para separar el refrigerante de la solución, el generador utiliza la energía térmica de entrada para calentar una solución absorbente, típicamente una mezcla de amoníaco-agua o bromuro de litio-agua. El calor provoca la evaporación del refrigerante (por ejemplo, amoníaco).

Condensador cuando el refrigerante vaporizado se condensa al estado líquido.

Luego el evaporador del refrigerante líquido se evapora absorbiendo calor del entorno a ser enfriado. (Wilson, A., & Baker, P, 2023)

Absorbedor del refrigerante en estado de vapor vuelve al absorbedor, donde se mezcla con la solución absorbente que sale del generador. Este proceso de absorción es exotérmico y libera calor, que debe ser disipado al ambiente.

### Ejemplo

$Q_{in}$  Energía térmica de entrada: 5000 kJ

COP Coeficiente de rendimiento: 0.7

$Q_{evap}$  Energía absorbida en el evaporador

El Coeficiente de Rendimiento (COP) de un sistema de refrigeración por absorción se define como la relación entre la energía absorbida en el evaporador y la energía térmica de entrada al sistema.

$$COP = Q_{evap}/Q_{in}$$

Se realiza un despeje de fórmula

$$Q_{evap} = COP \times Q_{in}$$

Reemplazamos datos

$$Q_{evap} = 0.7 \times 5000 \text{ kJ}$$

$$Q_{evap} = 3500 \text{ kJ}$$

Para cada 5000 kJ de energía térmica suministrada al generador del sistema de refrigeración por absorción, se pueden absorber 3500 kJ de calor del espacio o sustancia que se está enfriando. (Wilson, A., & Baker, P, 2023)

## **Refrigeración por compresión**

Refrigeración por compresión de CO<sub>2</sub> utilizando el dióxido de carbono como refrigerante, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.

Un sistema de refrigeración por compresión de CO<sub>2</sub> opera de manera similar a los sistemas de refrigeración tradicionales, pero utiliza CO<sub>2</sub> como el medio de transferencia de calor. (Stoecker, W. F., & Jones, J. W, 2018)

### **Principios de la Refrigeración por compresión**

Un sistema de refrigeración por compresión típicamente consta de:

Compresor que comprime el CO<sub>2</sub> gaseoso, aumentando su presión y temperatura.

Condensador donde enfriá el CO<sub>2</sub> comprimido, transformándolo en líquido.

Válvula de expansión que reduce la presión del CO<sub>2</sub> líquido, lo que provoca una disminución de la temperatura.

Evaporador del CO<sub>2</sub> líquido se evapora, absorbiendo calor del entorno que se desea enfriar.

### **Ejemplo**

- T<sub>evap</sub> Temperatura de evaporación: -10 °C (263 K)
- T<sub>cond</sub> Temperatura de condensación: 30 °C (303 K)
- Q<sub>evap</sub> Calor absorbido en el evaporador: 1000 kJ
- COP Coeficiente de rendimiento: 4.0

El Coeficiente de Rendimiento (COP) de un sistema de refrigeración se define como la relación entre la energía absorbida en el evaporador y el trabajo realizado por el compresor:

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evap}}}{W_{\text{comp}}}$$

Q<sub>evap</sub> es el calor absorbido en el evaporador.

W<sub>comp</sub> es el trabajo realizado por el compresor.

Cálculo del Trabajo Realizado por el Compresor  $W_{comp}$

Despejamos la fórmula

$$W_{comp} = Q_{evap} / COP$$

$$W_{comp} = 4.01000 \text{ kJ}$$

$$W_{comp} = 250 \text{ kJ}$$

Para absorber 1000 kJ de calor del espacio que se está enfriando, el compresor necesita realizar 250 kJ de trabajo. La alta eficiencia del sistema se refleja en el COP de 4.0, lo que indica que el sistema es capaz de proporcionar 4 unidades de refrigeración por cada unidad de energía eléctrica consumida. (Stoecker, W. F., & Jones, J. W, 2018)

Sistemas de secado mejorados

### **Sistemas de Cogeneración y Trigeneración**

Cogeneración o generación combinada de calor y energía es un proceso que produce electricidad y calor útil a partir de la misma fuente de energía. Trigeneración extiende este concepto al incluir la producción de refrigeración, además de electricidad y calor.

### **Cogeneración**

Una planta de cogeneración que utiliza gas natural como combustible para alimentar una turbina de gas. El proceso produce tanto electricidad como calor residual, que se utiliza para generar vapor y calentar agua.

Entrada de combustible gas natural

Producción de electricidad de turbina de gas

Utilización del calor residual generador de vapor y agua caliente

Ejemplo de Cogeneración

Poder calorífico del gas natural 50 MJ/kg

Consumo de gas natural 1000 kg/h

Eficiencia de la turbina de gas para electricidad 30%

Eficiencia de recuperación de calor 50%

### **Energía total disponible del gas natural**

$E_{total} = \text{Consumo de gas} \times \text{Poder calorífico}$

$$E_{total} = 1000 \text{ kg/h} \times 50 \text{ MJ/kg}$$

$$E_{total} = 50000 \text{ MJ/h}$$

Energía convertida en electricidad

$E_{electricidad} = E_{total} \times \text{Eficiencia eléctrica}$

$$E_{electricidad} = 50000 \text{ MJ/h} \times 0.30$$

$$E_{electricidad} = 15000 \text{ MJ/h}$$

Energía recuperada como calor

$E_{calor} = E_{total} \times \text{Eficiencia de recuperación de calor}$

$$E_{calor} = 50000 \text{ MJ/h} \times 0.50$$

$$E_{calor} = 25000 \text{ MJ/h}$$

### **Trigeneración**

Poder calorífico del gas natural 50 MJ/kg

Consumo de gas natural 1000 kg/h

Eficiencia de la turbina de gas para electricidad 30%

Eficiencia de recuperación de calor para vapor y agua caliente 40%

Eficiencia de recuperación de calor para refrigeración 10%

Energía total disponible del gas natural

$E_{total} = \text{Consumo de gas} \times \text{Poder calorífico}$

$E_{total} = 1000 \text{ kg/h} \times 50 \text{ MJ/kg}$

$E_{total} = 50000 \text{ MJ/h}$

Energía convertida en electricidad

$E_{electricidad} = E_{total} \times \text{Eficiencia eléctrica}$

$E_{electricidad} = 50000 \text{ MJ/h} \times 0.30$

$E_{electricidad} = 15000 \text{ MJ/h}$

Energía recuperada como calor para vapor y agua caliente

$E_{calor} = E_{total} \times \text{Eficiencia de recuperación de calor}$

$E_{calor} = 50000 \text{ MJ/h} \times 0.40$

$E_{calor} = 20000 \text{ MJ/h}$

Energía recuperada como calor para refrigeración

$E_{refrigeración} = E_{calor} \times \text{Eficiencia de recuperación de calor para refrigeración}$

$E_{refrigeración} = 50000 \text{ MJ/h} \times 0.10$

$E_{refrigeración} = 5000 \text{ MJ/h}$

Los sistemas de cogeneración y trigeneración representan enfoques avanzados para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de la producción de energía. La cogeneración optimiza la utilización del combustible al producir electricidad y calor útil simultáneamente. La trigeneración va un paso más allá al incluir la producción de refrigeración, proporcionando una solución integral para las necesidades energéticas de muchos procesos industriales y comerciales. Estos sistemas, aunque inicialmente pueden requerir una inversión considerable, ofrecen ventajas significativas en términos

de ahorro energético y sostenibilidad a largo plazo.

### **Principios del Secado por Microondas**

Generación de microondas de un magnetrón genera microondas que penetran en el material.

Absorción de energía de las microondas interactúan con las moléculas de agua en el material, causando que vibren y generen calor.

Evaporación del agua es decir el calor generado causa la evaporación del agua dentro del material.

El vapor de agua se expulsa del material, logrando el secado.

Ejemplo

Datos

**$m_i$  Masa inicial del material** 1000 kg

**$H_i$  Contenido de humedad inicial** 40%

**$H_f$  Contenido de humedad final** 10%

**$Q_{evap}$  Energía específica requerida para evaporar el agua** 2.26 MJ/kg de agua

**$\eta$  Eficiencia del sistema** 70%

Primero, calculamos la cantidad de agua que debe ser eliminada del material:

Masa inicial de agua en el material:

$$m_{aguainicial} = m_i \times H_i$$

$$m_{aguainicial} = 1000 \text{ kg} \times 0.40$$

$$m_{aguainicial} = 400 \text{ kg}$$

Masa final de agua en el material:

$$m_{agua final} = m_i \times H_f$$

$$m_{\text{agua final}} = 1000 \text{ kg} \times 0.10$$

$$m_{\text{agua final}} = 100 \text{ kg}$$

Masa de agua a eliminar:

$$M_{\text{agua eliminar}} = m_{\text{agua inicial}} - m_{\text{agua final}}$$

$$M_{\text{agua eliminar}} = 400 \text{ kg} - 100 \text{ kg}$$

$$M_{\text{agua eliminar}} = 300 \text{ kg}$$

Energía teórica requerida

$$Q = m_{\text{agua eliminar}} \times Q_{\text{evap}}$$

$$Q = 300 \text{ kg} \times 2.26 \text{ MJ/kg}$$

$$Q = 678 \text{ MJ}$$

Energía Total Requerida

$$Q_{\text{total}} = Q / \eta$$

$$Q_{\text{total}} = 678 \text{ MJ} / 0.70$$

$$Q_{\text{total}} = 968.57 \text{ MJ}$$

### Secado por congelación

El secado por congelación, conocido técnicamente como liofilización, es un procedimiento que implica primero congelar completamente el producto para después extraer el agua contenida a través de la sublimación. Este fenómeno se refiere a la transición directa de la fase sólida (hielo) a la fase gaseosa (vapor) sin pasar por el estado líquido intermedio. Este método se distingue por su alta eficacia en la preservación de la estructura, la calidad y los nutrientes del material. (Wilson, A., & Baker, P, 2023)

El producto se somete a un congelamiento rápido a temperaturas extremadamente bajas, logrando la conversión de toda el agua presente en hielo.

Primera etapa de secado (sublimación primaria) haciendo que el hielo se sublima bajo

condiciones de vacío, eliminando la mayor parte del agua.

Segunda etapa de secado (sublimación secundaria) elimina el agua residual que queda en el producto, reduciendo el contenido de humedad a niveles muy bajos.

### Ejemplo

#### Datos

$m_i$  Masa inicial del producto 10 kg

$H_i$  Contenido de humedad inicial 80%

$H_f$  Contenido de humedad final 2%

$Q_{sub}$  Calor latente de sublimación del hielo 2834 kJ/kg

$\eta$  Eficiencia del sistema 50%

Masa inicial de agua en el producto

$$m_{aguainicial} = m_i \times H_i$$

$$m_{aguainicial} = 10\text{kg} \times 0.80$$

$$m_{aguainicial} = 8\text{kg}$$

Masa final de agua en el producto

$$m_{agua final} = m_i \times H_f$$

$$m_{agua final} = 10\text{kg} \times 0.02$$

$$m_{agua final} = 0.2\text{kg}$$

Masa de agua a eliminar

$$M_{agua eliminar} = m_{agua inicial} - m_{agua final}$$

$$M_{agua eliminar} = 8\text{kg} - 0.2\text{kg}$$

$$M_{agua eliminar} = 7.8\text{kg}$$

Energía teórica requerida:

$$Q = m_{aguaeliminar} \times Q_{evap}$$

$$Q = 7.8\text{kg} \times 2834\text{kJ/kg}$$

$$Q = 22015.2\text{kJ}$$

## Cálculo de la Energía Total Requerida

$$Q_{\text{total}} = Q/\eta$$

$$Q_{\text{total}} = 22015.2 \text{ kJ}/0.50$$

$$Q_{\text{total}} = 44030.4 \text{ kJ}$$

## Cocina y procesamiento térmico

La cocción por inducción utiliza campos magnéticos para calentar directamente los alimentos, lo que reduce el tiempo de cocción y la energía consumida.

Generación del campo magnético en una bobina de inducción situada debajo de la superficie de cocción genera un campo magnético alterno cuando se aplica corriente eléctrica.

Inducción de corrientes en el utensilio donde este campo magnético induce corrientes eléctricas (corrientes de Foucault) en el fondo del utensilio de cocina ferromagnético.

Generación de calor en las corrientes inducidas calientan el utensilio debido a la resistencia eléctrica del material, transfiriendo calor directamente a los alimentos.

### Ejemplo

#### Datos

$E_{\text{inducción}}$  Energía consumida por una estufa de inducción 1.8 kWh

$t$  Tiempo de cocción 30 minutos (0.5 horas)

$\eta_{\text{inducción}}$  Eficiencia de la inducción 90%

Energía utilizada por la inducción:

$$E_{\text{utilizada inducción}} = E_{\text{inducción}} \times \eta_{\text{inducción}}$$

$$E_{\text{utilizada inducción}} = 3 \text{ kWh} \times 0.70$$

$$E_{\text{utilizada inducción}} = 2.1 \text{ kWh}$$

La cocción por inducción es una tecnología superior en términos de eficiencia energética y velocidad de cocción. Aunque la inversión inicial puede ser mayor y requiere utensilios específicos, sus beneficios a largo plazo en ahorro de energía y seguridad hacen que sea una opción atractiva para muchas aplicaciones domésticas e industriales.

### Sistemas de enfriamiento por evaporación

Los sistemas de enfriamiento por evaporación representan una tecnología que reduce el consumo de agua y energía en las operaciones de refrigeración de productos agrícolas. Este enfriamiento se logra aprovechando la evaporación natural del agua para disminuir la temperatura del aire o directamente de los productos.

### Caso de estudio: refrigeración de manzanas.

A continuación, se presenta un ejemplo práctico donde una instalación agrícola debe enfriar 100 toneladas de manzanas desde una temperatura inicial de 30 ° C hasta una final de 10 ° C. Se procederá a utilizar un sistema de enfriamiento por evaporación y se comparará su eficiencia operativa y su costo frente a un sistema de refrigeración de tipo convencional.

Energía requerida para enfriar las manzanas  $Q = \text{Masa} \times \text{Capacidad térmica} \times \Delta T$   $Q = 100,000$

$\text{kg} \times 3.6 \text{ kJ/kg} \cdot \text{cdotp}^{\circ}\text{C} \times 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $Q = 7,200,000 \text{ Kj}$

Convertir kJ a kWh (1 kWh = 3,600 kJ)

$Q = 7,200,000 \text{ Kj} / 3,600 \text{ kJ/kWh}$

$$Q=2,000 \text{ kWh}$$

Consumo energético del sistema de enfriamiento por evaporación

$$E_{\text{evaporación}} = \text{Consumo energético por tonelada} / (\text{cdot} p^{\circ}\text{C} \times \text{Masa} \times \Delta T)$$

$$E_{\text{evaporación}} = 0.3 \text{ kWh/tonelada} / (\text{cdot} p^{\circ}\text{C} \times 100 \text{ toneladas} \times 20^{\circ}\text{C})$$

$$E_{\text{evaporación}} = 600 \text{ kWh}$$

Costo energético del sistema de enfriamiento por evaporación

$$C_{\text{evaporación}} = E_{\text{evaporación}} \times \text{Costo de energía}$$

$$C_{\text{evaporación}} = 600 \text{ kWh} \times \$0.10 \text{ por kWh}$$

$$C_{\text{evaporación}} = \$60 \text{ C}$$

Consumo de agua del sistema de enfriamiento por evaporación:

$$V_{\text{aire}} = \text{Volumen de aire por tonelada} \times \text{Masa}$$

$$V_{\text{aire}} = 500 \text{ m}^3 / \text{tonelada} \times 100 \text{ toneladas}$$

$$V_{\text{aire}} = 50,000 \text{ m}^3$$

$$W_{\text{agua}} = \text{Consumo de agua por m}^3 \text{ de aire} \times V_{\text{aire}}$$

$$W_{\text{agua}} = 1 \text{ litro/m}^3 \times 50,000 \text{ m}^3$$

$$W_{\text{agua}} = 50,000 \text{ litros} \quad W_{\text{agua}} = 50 \text{ m}^3$$

Comparación con un Sistema de Refrigeración Convencional

Supongamos que un sistema de refrigeración convencional consume 1 kWh por tonelada·°C.

Consumo energético del sistema de refrigeración convencional

$$E_{\text{convencional}} = 1 \text{ kWh/tonelada} \times 100 \text{ toneladas} \times 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$E_{\text{convencional}} = 2,000 \text{ kWh}$$

Costo energético del sistema de refrigeración convencional

$$C_{\text{convencional}} = E_{\text{convencional}} \times \text{Costo de energía}$$

$$C_{\text{convencional}} = 2,000 \text{ kWh} \times \$0.10 \text{ por kWh}$$

$$C_{\text{convencional}} = \$200$$

El sistema de enfriamiento por evaporación no solo reduce el consumo de energía de 2,000 kWh a 600 kWh, sino que también disminuye el costo energético de \$200 a \$60. Aunque el sistema de enfriamiento por evaporación consume 50 m<sup>3</sup> de agua, este costo puede ser gestionado y es significativamente menor en comparación con los ahorros de energía y costo.

Implementar sistemas de enfriamiento por evaporación en la refrigeración de productos agrícolas es una alternativa sostenible que puede mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos, beneficiando tanto al medio ambiente como a la economía de las operaciones agrícolas.

### Tecnologías de generación de calor

La generación de calor a partir de biomasa y la cogeneración (producción simultánea de calor y electricidad) ofrecen alternativas sostenibles para la generación de energía.

Generación de calor a partir de biomasa: utiliza residuos orgánicos para generar calor y electricidad.

Cogeneración: produce simultáneamente calor y electricidad a partir de una fuente de energía.

### Ejemplo

Suponiendo que una instalación utiliza residuos de madera biomasa para generar calor

necesita: Cantidad de biomasa disponible 5 toneladas por día

Poder calorífico de la biomasa 18 MJ/kg

Eficiencia del sistema de combustión 85%

Energía total disponible en la biomasa

Energía total=Cantidad de biomasa×Poder calorífico

Energía total=5 toneladas/día×1,000 kg/tonelada×18 MJ/kg

Energía total=90,000 MJ/día

Energía útil generada considerando la eficiencia

Energía útil=Energía total×Eficiencia

Energía útil=90,000 MJ/día×0.85

Energía útil=76,500 MJ/día

La cogeneración, o generación combinada de calor y electricidad (CHP, por sus siglas en inglés), es un proceso en el cual la energía primaria se utiliza para producir electricidad y el calor residual se aprovecha para calefacción o procesos industriales. Esto aumenta la eficiencia global del sistema en comparación con la generación separada de calor y electricidad.

### **Sistemas de almacenamiento térmico**

La implementación de sistemas de almacenamiento térmico permite optimizar el uso de la energía y reducir costos.

Almacenamiento de calor sensible: utiliza materiales con alta capacidad térmica para almacenar calor y reducir la demanda de energía.

Almacenamiento de calor latente: utiliza materiales que cambian de fase para almacenar calor y reducir la demanda de energía.

### **Tecnologías de recuperación de calor**

La recuperación de calor residual en procesos industriales reduce la demanda de energía

y minimiza las pérdidas de calor.

Recuperación de calor residual: utiliza intercambiadores de calor para recuperar el calor residual de procesos industriales y reducir la demanda de energía.

Redes de calor: distribuye el calor recuperado a diferentes procesos o áreas de la planta, reduciendo la demanda de energía y las pérdidas de calor.

También tenemos el implemento de otras tecnologías como lo son:

El pirólisis rápido es una tecnología que descompone la biomasa en condiciones anaeróbicas a altas temperaturas para producir bioaceite, biocarbón y gas. La ventaja del proceso es que es rápido y eficiente y produce un producto con un alto valor energético. La optimización del proceso de producción de bioaceite, desde una perspectiva estrictamente termodinámica, exige un control riguroso de la temperatura y del tiempo de permanencia. Esto tiene como fin primordial maximizar el rendimiento del producto y garantizar su calidad.

Gasificación en lecho fluido: es una técnica avanzada que transforma la biomasa en gas de síntesis mediante una reacción a alta temperatura con agentes gasificantes. En comparación con los gasificadores convencionales, este sistema exhibe mayor flexibilidad y eficiencia, permitiendo el procesamiento de una variedad más amplia de residuos agroindustriales. Los estudios termodinámicos se orientan a ajustar las condiciones operativas para maximizar la generación de gas de síntesis y minimizar la formación de subproductos indeseados.

Energía solar térmica: aprovecha la radiación solar para generar calor, el cual tiene diversas aplicaciones en el procesamiento agrícola, como el secado de cosechas, el calentamiento de agua y la producción de vapor. Innovación en Colectores: Los diseños más recientes de colectores solares han mejorado la captura y conversión de la energía solar en calor. La integración de materiales avanzados y de tecnología de seguimiento

solar incrementa el rendimiento de estos equipos, haciendo su implementación más viable en las explotaciones agrícolas. (Toledo, R. T, 2018).

**Almacenamiento térmico:** El almacenamiento de energía térmica es esencial para sincronizar la demanda y el suministro de calor en los procesos agroindustriales. Los materiales de cambio de fase (PCM) y los sistemas avanzados de almacenamiento térmico permiten guardar el calor durante períodos extensos y liberarlo cuando se requiere, lo que se traduce en una mayor eficiencia global del sistema.

**Cogeneración y Trigeneración de Energía** ↪Las tecnologías de cogeneración (CHP) y trigeneración (CCHP) utilizan una única fuente primaria para generar de forma simultánea electricidad y calor (y en el caso de la trigeneración, también refrigeración). Estos sistemas se caracterizan por su altísima eficiencia y están siendo cada vez más incorporados en el sector agroindustrial. Los sistemas de cogeneración combinan la producción de electricidad y calor, utilizando como fuentes combustibles como el biogás o los residuos procedentes de la actividad agrícola. La implementación de estos sistemas en empresas agrícolas puede aprovechar al máximo los recursos disponibles y reducir los costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La trigeneración avanza un paso más allá en la eficiencia al incorporar la producción de refrigeración (frío útil) al ciclo. Este sistema es especialmente valioso en empresas agrícolas donde la regulación térmica es crítica para el procesamiento y el almacenamiento de productos altamente perecederos. La integración de la trigeneración mejora significativamente la eficiencia energética y ofrece una respuesta integral a las necesidades de calor y electricidad de la instalación.

### **Bioenergía a partir de microalgas**

Las micro algas representan una fuente de biomasa sumamente prometedora para la generación de biogás y biocombustibles. Su rápida tasa de crecimiento y su eficacia para transformar el dióxido de carbono en biomasa las convierten en candidatas ideales para

aplicaciones dentro de la agroindustria.

### **Cultivo y viabilidad:**

El cultivo de micro algas en sistemas abiertos biorreactores cerrados tiene la capacidad de producir grandes volúmenes de biomasa. Los progresos en la ingeniería de biorreactores y el desarrollo de cepas con alto rendimiento están incrementando la viabilidad de esta tecnología.

### **Conversión:**

La biomasa algal puede ser transformada en biocombustibles mediante procesos como la transesterificación (para generar biodiésel) o la digestión anaeróbica (para producir biogás). La investigación termodinámica se enfoca en optimizar estos procesos con el objetivo de maximizar la producción y la eficiencia energética.

### **Sistemas de Energía Inteligente**

La agroindustria está experimentando una profunda transformación gracias a la digitalización ya la implementación de sistemas energéticos inteligentes. Estos permiten un monitoreo y un control más exactos y detallados de todos los procesos que involucran energía.

La agroindustria se está transformando a través de la digitalización y los sistemas energéticos inteligentes que permiten un control y seguimiento más preciso de los procesos energéticos.

### **Big Data**

Puedes usar Big Data en la agricultura para aplicar modelos avanzados de cálculo predictivo y para establecer sistemas de monitoreo y trazabilidad integral, que aseguren la salubridad y calidad de los productos, así como la sostenibilidad de los procesos.

Un ejemplo del uso de Big Data en la agricultura lo encuentras en eLocust3, aplicación para la detección temprana de plagas de langostas, presentada en el marco del Simposio

Internacional sobre Innovación agrícola de 2018.

Los sistemas de tecnologías e innovación se basan en la captura y transmisión de datos de campo en tiempo real a través de satélite, con el objetivo de monitorear plagas de langostas. Esta herramienta proporciona información crucial sobre el comportamiento de los insectos y su potencial para migrar e invadir regiones específicas. De esta manera, los responsables de la toma de decisiones pueden prevenir los ataques con anticipación y ejecutar las medidas necesarias para proteger eficazmente sus cultivos.

Otra aplicación de esta tecnología la representa Farmer's Business Network, compañía que conecta miles de granjas con datos abiertos sobre rendimientos, precios de suministro y mucha más información estratégica, que les permite competir eficientemente en el mercado.

La tecnología aplicada al ámbito de los cultivos y ganadería, tiene muchas posibilidades y siempre derivan en un significativo valor agregado en la agroindustria. De ahí que valga la pena especializarse en el tema, pues las granjas inteligentes -que ya son una realidad- necesitarán de profesionales formados para adaptación de estas nuevas tecnologías en el rubro, como también de personal con gran capacidad en la gestión organizacional y de negocios.

El uso de sensores avanzados para el monitoreo inmediato de parámetros clave en procesos agroindustriales puede proporcionar una gestión energética más eficiente. Estos sistemas pueden detectar ineficiencias y realizar ajustes inmediatos para mejorar la eficiencia operativa.

### **Inteligencia artificial (IA) y análisis**

Está cambiando radicalmente la manera de fabricar, transportar y consumir alimentos. Un informe de Accenture estima que la inversión global en el Internet de las Cosas (IoT) alcanzará la cota de 500.000 millones de dólares en 2020. En el caso particular de la

industria de alimentación, se está produciendo una revolución a través de la digitalización de procesos de la seguridad alimentaria que va a dar como resultado una mayor eficiencia y flexibilidad.

- La fabricación del alimento (la llamada industria 4.0).
- Las actividades relacionadas con la cadena de valor.
- El control de la calidad y seguridad alimentarias.

La convergencia entre la digitalización y el vasto volumen de datos que se produce permitirá a los directivos y gerentes fundamentar sus decisiones con una claridad inédita sobre el comportamiento del consumidor. Esto, a su vez, desplegará un amplio abanico de oportunidades para personalizar los productos y diseñar nuevas estrategias para la interacción y vinculación con la clientela.

### **8.2. Retos y oportunidades en la aplicación de la termodinámica**

La implementación de nuevas tecnologías exige frecuentemente un diseño de capital inicial significativo. A pesar de que esta inversión puede amortizarse con el tiempo gracias a los ahorros operativos y al aumento de la eficiencia, el costo de entrada puede constituir un obstáculo serio para muchas empresas agroindustriales. Es indispensable disponer de mecanismos de financiamiento adecuados y de programas de estímulo gubernamental que faciliten esta transición.

La termodinámica es una ciencia esencial para el desarrollo y la optimización de tecnologías de energía renovable, incluyendo la energía eólica, solar, geotérmica y la derivada de la biomasa.

Mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de estas tecnologías puede ayudar a reducir la dependencia de los combustibles fósiles.

#### **Retos**

Las tecnologías avanzadas pueden ser técnicamente complejas, requiriendo un alto nivel de especialización para su operación y mantenimiento. La falta de personal capacitado puede dificultar la adopción de estas tecnologías, por lo que es crucial invertir en formación y capacitación continua para los empleados.

Las regulaciones ambientales y de seguridad son rigurosas y muestran una gran variación entre distintas jurisdicciones. El cumplimiento de estas normativas puede suponer un desafío considerable, especialmente para las pequeñas y medianas empresas. Es crucial establecer un marco regulatorio que sea transparente y fácil de acceder, complementado con el soporte de expertos y consultores en cumplimiento legal.

## **Desafío**

En cuanto a la valorización de residuos, por disponibilidad y la composición de los residuos agroindustriales presentan una variabilidad significativa, un factor que impacta directamente en la viabilidad y eficiencia de las tecnologías destinadas a la valorización energética. Es fundamental desarrollar tecnologías flexibles y adaptables que puedan manejar esta variabilidad de manera eficiente.

En Ecuador un reto es la construcción de nuevas plantas hidroeléctricas, aprovechando los numerosos ríos del país, puede beneficiarse de un diseño termodinámico optimizado para maximizar la conversión de energía potencial en electricidad. Además, la expansión de la energía solar en regiones con alta radiación solar puede mejorar la sostenibilidad energética del país aportando más energía para las plantas agroindustriales dado que son el 20% de gasto energético.

## **Oportunidades**

### **Sostenibilidad y reducción de impacto ambiental**

La implementación de tecnologías termodinámicas de vanguardia tiene la capacidad de reducir excesivamente las emisiones de gases de efecto invernadero y otros agentes

contaminantes. Esto no solo aporta a la sostenibilidad ecológica sino que también refuerza la reputación corporativa y satisface la creciente exigencia de los consumidores por prácticas más responsables.

La valorización energética de los desechos maximiza la utilización de los recursos existentes al transformar residuos en productos valiosos. Esto disminuye la dependencia de fuentes de energía no renovables y, además de mejorar la eficiencia operativa, puede abrir nuevas vías de ingresos para las empresas agroindustriales.

Numerosos gobiernos ofrecen subsidios e incentivos fiscales destinados a fomentar la adopción de tecnologías que sean limpias y sostenibles. Aprovechar estas oportunidades facilita la implementación de nuevas herramientas y ayuda a mitigar la carga financiera inicial que representa la inversión.

Las organizaciones que integran tecnologías termodinámicas innovadoras podrán elevar su eficiencia, reducir costos y, como resultado, ganar una ventaja competitiva significativa dentro del mercado global.

La innovación tecnológica también puede abrir nuevas oportunidades de mercado y mejorar la resiliencia frente a fluctuaciones en los precios de la energía.

La producción de biocombustibles, biogás y otros productos de valorización energética abre nuevas oportunidades de mercado para la agroindustria. Esto diversifica las fuentes de ingresos y reduce la dependencia de las actividades agrícolas tradicionales.

### **Integración de Cogeneración en Plantas Procesadoras**

Varias plantas procesadoras de alimentos han implementado sistemas de cogeneración para cubrir sus necesidades de electricidad y calor, logrando una reducción significativa en sus costos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, una planta procesadora de tomate en España ha integrado un sistema de cogeneración que utiliza residuos agrícolas

como combustible, mejorando la eficiencia energética y reduciendo los residuos.

Diversas explotaciones ganaderas a nivel mundial han adoptado la tecnología de la digestión anaeróbica para la generación de biogás a partir de estiércol y otros desechos orgánicos. El biogás resultante se utiliza para la producción de calor y electricidad, mientras que el digestato se aprovecha como fertilizante. Un caso notable es el de una granja en Alemania que ha logrado una reducción considerable en sus costos energéticos y una gestión más eficiente de sus residuos gracias a la implementación de este sistema.

En zonas geográficas con elevada incidencia de radiación solar, el secado solar de cereales se ha consolidado como una práctica habitual. Esta tecnología emplea colectores solares para disminuir el contenido de humedad de los granos, lo cual eleva su calidad y minimiza el consumo de combustibles fósiles. En India, varias cooperativas agrícolas han integrado con éxito sistemas de secado solar, logrando mejorar la calidad de su producción y disminuir los gastos en energía.

La implementación de los principios de la termodinámica en Ecuador presenta desafíos derivados de la infraestructura energética actual y la dependencia persistente de los combustibles fósiles. Sin embargo, también abre oportunidades importantes para el desarrollo de energías renovables y la integración de sistemas de cogeneración y trigeneración. Aprovechar estas oportunidades requiere un enfoque integral que incluya inversión en infraestructura, desarrollo de políticas de apoyo, y la promoción de tecnologías avanzadas que optimicen la eficiencia energética y contribuyan a un futuro más sostenible.

# **CAPÍTULO 9**

## **Conclusiones y Recomendaciones**

## **Resumen de los conceptos claves**

### **Capítulo 1: Introducción a la Termodinámica y la Agroindustria**

#### **Conceptos Básicos de la Termodinámica**

La termodinámica se basa en principios fundamentales que describen cómo se transfiere y transforma la energía en sistemas físicos. Estos principios incluyen conceptos como energía interna, trabajo, calor y entropía, los cuales son esenciales para entender cómo los sistemas interactúan con su entorno. La energía interna se define como la energía que reside en las moléculas de un sistema, mientras que el calor y el trabajo son las modalidades a través de las cuales la energía es intercambiada entre el sistema y su entorno. Por otro lado, la entropía cuantifica el nivel de desorden o aleatoriedad de un sistema, sirviendo como un indicador de la irreversibilidad de los procesos.

Estos tres conceptos constituyen el pilar fundamental para el análisis y la optimización de las operaciones en la agroindustria. Su comprensión permite a los ingenieros diseñar sistemas de procesamiento y conservación de productos agrícolas que sean diferenciales más eficientes y sostenibles. (Cengel & Boles, 2020)

#### **Propiedades Termodinámicas**

Las propiedades termodinámicas son magnitudes medibles que describen el estado de un sistema, como la presión, temperatura y volumen específico. Estas propiedades son fundamentales para entender el comportamiento de los sistemas en diferentes condiciones. Se clasifican en cuatro categorías generales y son esenciales para el análisis de procesos termodinámicos. Por ejemplo, al hervir agua, se observa cómo cambia de estado de líquido a gas, lo que ilustra la importancia de las propiedades termodinámicas en la comprensión de los cambios de fase y la energía involucrada en estos procesos.

(Cengel & Boles, 2020)

## **Importancia de la Termodinámica en la Agroindustria**

La aplicación de la termodinámica en la agroindustria es crucial para mejorar la eficiencia de los procesos industriales y reducir el impacto ambiental. La termodinámica ayuda a entender y controlar cómo se utilizan y se convierten las diferentes formas de energía en procesos como el secado de granos, la refrigeración y la pasteurización. Al aplicar principios termodinámicos, se pueden optimizar los sistemas de secado para reducir el consumo de energía y mejorar la calidad del producto final. La habilidad para aplicar estos principios esenciales también capacita a los profesionales a identificar oportunidades concretas para la incorporación de tecnologías más sostenibles, lo cual incluye la adopción de energías renovables y la minimización de desechos. Esto culmina en una contribución significativa al aumento de la sostenibilidad global en el sector agroindustrial.

## **Gases Ideales y Calor**

Los gases ideales representan un modelo conceptual que simplifica el estudio del comportamiento de los gases. En este modelo, se supone que las interacciones entre las moléculas se limitan exclusivamente a colisiones perfectamente elásticas.

La temperatura, que mide la energía cinética promedio de las partículas, es crucial en este contexto. Además, el calor se define como la transferencia de energía térmica entre cuerpos a diferentes temperaturas. Estos conceptos son esenciales para entender cómo se comportan los sistemas en la agroindustria, especialmente en procesos que involucran cambios de fase y energía térmica. (Çengel & Boles, 2020)

## **Aplicaciones de la termodinámica en la ingeniería agroindustrial**

La transferencia de calor se realiza mediante radiación, conducción y convección. La radiación propaga la energía térmica mediante ondas electromagnéticas. En contraste, la conducción en materiales sólidos o estáticos ocurre a través de la transmisión directa de

energía molecular. Por su parte, la convección implica el desplazamiento de las moléculas del fluido, impulsado por diferencias en la densidad o por agitación externa.

En la práctica, los alimentos rara vez se calientan utilizando un solo mecanismo. Aquellos productos con una alta viscosidad o mayor consistencia tienden a calentarse primordialmente por conducción, ya que su movimiento interno es limitado. Por otro lado, los alimentos con menor consistencia experimentan un calentamiento predominantemente por convección, donde el movimiento interno del fluido es continuo debido a los gradientes de temperatura.

### **Importancia de la termodinámica en alimentos**

La termodinámica en alimentos es crucial debido a varios factores: el almacenamiento fisiológico de componentes clave, las interacciones intermoleculares no específicas entre macromoléculas alimentarias y el mimetismo de biopolímeros. Las macromoléculas alimentarias suelen mostrar incompatibilidad termodinámica, lo que hace que el enfoque termodinámico sea prometedor para modelar y analizar alimentos. El equilibrio de fases es fundamental en la tecnología alimentaria. Este enfoque termodinámico es central en la química de alimentos, con carbohidratos, proteínas y agua como los principales objetos de estudio, siendo Europa, especialmente Suiza, un líder en esta investigación.

### **Estado y Transformaciones de un Sistema Termodinámico**

Un sistema termodinámico se define como una región del espacio analizada en términos de variables como presión, volumen y temperatura. Los sistemas pueden ser homogéneos o heterogéneos, y se clasifican según su interacción con el entorno en abiertos, cerrados o aislados. Las transformaciones termodinámicas son procesos que llevan a un sistema de un estado a otro, pudiendo ser reversibles o irreversibles.

Comprender estas transformaciones es vital para optimizar procesos en la agroindustria y mejorar la eficiencia energética.

## **Breve Historia y Desarrollo de la Termodinámica Aplicada**

La termodinámica se desarrolló en el siglo XIX con los trabajos pioneros de científicos como Sadi Carnot, quien formuló el concepto del ciclo de Carnot, y Rudolf Clausius, quien introdujo el concepto de entropía. Estos descubrimientos sentaron las bases conceptuales para el desarrollo de la teoría termodinámica moderna. Con el transcurso del tiempo, la utilidad de estos principios se expandió a una variedad de sectores, incluyendo notablemente la agroindustria.

Los progresos en la termodinámica aplicada han posibilitado una mejora sustancial en el rendimiento de procesos industriales críticos, tales como la conservación de alimentos y la generación de energía a partir de biomasa. Esta evolución constante ha culminado en la integración de tecnologías de vanguardia que buscan maximizar la eficiencia en el uso de los recursos y la energía dentro del sector agroindustrial.

## **Capítulo 2: Fundamentos de Termodinámica**

### **Primera Ley de la Termodinámica**

La Primera Ley de la Termodinámica, o ley de la conservación de la energía, establece que la energía no puede ser creada ni destruida, solo transformada de una forma a otra. Esta ley es fundamental en la agroindustria para entender cómo la energía se transfiere y se convierte en diferentes procesos. Por ejemplo, en un secador de granos, la energía térmica se convierte en calor para evaporar la humedad. La ecuación matemática,  $\Delta U = Q - W$ , resume esta ley, donde  $\Delta U$  es el cambio en la energía interna del sistema,  $Q$  es el calor añadido, y  $W$  es el trabajo realizado por el sistema. Esta ley permite a los ingenieros realizar balances de energía y diseñar sistemas más eficientes.

### **Segunda Ley de la Termodinámica**

Esta ley de la Termodinámica introduce el concepto de entropía, que mide el grado de desorden o dispersión de la energía en un sistema. Esta ley establece que, en un proceso

espontáneo, la entropía total de un sistema y su entorno siempre aumenta, lo que refleja la irreversibilidad de los procesos naturales. En la agroindustria, esto significa que siempre habrá pérdidas de energía en forma de calor no útil. Por ejemplo, en un sistema de refrigeración, parte del trabajo realizado se pierde en forma de calor rechazado, lo que limita la eficiencia del sistema. Comprender esta ley es esencial para diseñar procesos que minimicen las pérdidas y mejoren la eficiencia general.

### **Tercera Ley de la Termodinámica**

La Tercera Ley de la Termodinámica establece que a medida que la temperatura de un sistema se aproxima al cero absoluto, la entropía de un sistema puro tiende a un valor constante mínimo. Esta ley tiene implicaciones importantes para los procesos que ocurren a bajas temperaturas, como la congelación de alimentos en la agroindustria. A temperaturas cercanas al cero absoluto, los materiales muestran una reducción en la capacidad de almacenar energía, lo que puede afectar su comportamiento durante el procesamiento y almacenamiento. Esta ley ayuda a entender y diseñar sistemas de conservación y almacenamiento que operan a temperaturas extremadamente bajas.

(Singh, R. P., & Heldman D. R, 2022)

### **Entropía y su relevancia en procesos termodinámicos**

La entropía es un concepto fundamental en la termodinámica que mide el desorden o la dispersión de energía en un sistema. Se define matemáticamente como el cambio en la entropía ( $\Delta S$ ) en relación con la cantidad de calor transferido ( $Q$ ) y la temperatura ( $T$ ) del sistema. Un incremento en la entropía señala que un sistema ha ganado energía térmica y que la transformación asociada es de naturaleza irreversible. Este concepto es de importancia capital en el sector agroindustrial, ya que procesos como la pasteurización y el secado de granos conllevan modificaciones en la entropía. Dichos cambios tienen una repercusión directa en la eficiencia energética y en la sostenibilidad de todas las operaciones.

## **Irreversibilidad y producción de entropía**

La irreversibilidad es una propiedad intrínseca de una gran mayoría de los procesos naturales, tal como lo estipula la Segunda Ley de la Termodinámica. Dicha ley establece que los sistemas evolucionan espontáneamente hacia un estado de mayor desorden, lo cual implica que la entropía de un sistema aislado jamás puede disminuir.

En términos prácticos, esto significa que la energía térmica (calor) que se disipa durante un proceso no puede ser completamente recuperada para transformarse nuevamente en trabajo útil. La generación de entropía está, por lo tanto, ligada directamente a la ineficiencia energética. Esto subraya la necesidad crítica de optimizar los procesos con el objetivo de minimizar la pérdida de energía y, consecuentemente, mejorar la sostenibilidad.

## **Estrategias para la optimización energética**

Para potenciar la eficiencia energética dentro de los sistemas agroindustriales, se pueden adoptar varias estrategias clave:

La utilización de intercambiadores de calor es una técnica probada para reaprovechar la energía térmica que se genera durante los procesos, logrando una significativa reutilización del calor.

La regulación de la temperatura es fundamental para garantizar que, por ejemplo, el aire de secado mantenga el nivel de calor requerido para ser eficiente, evitando al mismo tiempo el sobrecalentamiento que causa pérdidas innecesarias.

Es crucial mejorar el aislamiento de los sistemas y equipos. Esto previene la disipación de calor hacia el ambiente, contribuyendo directamente a una mayor eficiencia y sostenibilidad en la producción agroindustrial.

## **Herramientas para Medir la Entropía en Sistemas Agroindustriales**

La cuantificación de la entropía en sistemas agroindustriales es un proceso que conlleva

dificultades dada la naturaleza compleja de estos sistemas. No obstante, existen diversas herramientas y metodologías, como el análisis del ciclo de vida (ACV), que permiten realizar una evaluación exhaustiva de los impactos ambientales asociados a un producto o a un proceso determinado. Este análisis considera desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, utilizando indicadores como la huella de carbono y la huella hídrica. A pesar de sus limitaciones, como la necesidad de grandes cantidades de datos, estas herramientas son esenciales para cuantificar y comparar diferentes escenarios, contribuyendo a la sostenibilidad en la agroindustria. (Moran M.J et al., 2021)

### **Capítulo 3: Ciclos Termodinámicos Aplicados a la Agroindustria**

#### **Ciclo de Rankine y sus Variantes**

**Ciclo Rankine Orgánico:** El Ciclo Rankine Orgánico es una adaptación del ciclo de vapor convencional. Esta tecnología (el ORC) posibilita la producción de energía eléctrica utilizando fuentes de calor de bajo nivel térmico, tales como la biomasa o diversos residuos agrícolas. El ORC demuestra una eficiencia destacada en la conversión de calor en trabajo bajo condiciones de baja temperatura, lo cual lo hace particularmente relevante para aquellas aplicaciones agroindustriales donde el calor residual o de bajo potencial está disponible. Su capacidad de funcionamiento a temperaturas reducidas expande las posibilidades para la generación de energía renovable tanto en áreas rurales como en instalaciones agroindustriales (Kutz, M, 2021).

**Ciclo de Rankine Subcrítico y Supercrítico:** Los ciclos Rankine subcrítico y supercrítico representan diferentes formas de operación del ciclo Rankine. La principal distinción radica en que el ciclo subcrítico funciona a presiones inferiores al punto crítico del fluido operativo, a diferencia del ciclo supercrítico, que se ejecuta a presiones superiores a dicho límite. Esta configuración avanzada permite que el ciclo supercrítico alcance un rendimiento termodinámico superior debido a la mayor densidad y capacidad

del fluido para absorber y transferir energía. En la agroindustria, el ciclo supercrítico puede ser utilizado en aplicaciones que requieren una alta eficiencia en la conversión de calor a trabajo, aunque su implementación puede ser más costosa y compleja. (Martínez-Silíceo, M. F, 2022).

### **Ciclos de Refrigeración**

**Ciclo de Carnot Inverso:** El Ciclo de Carnot Inverso es el modelo idealizado para sistemas de refrigeración, proporcionando el límite teórico de eficiencia. Este ciclo utiliza un fluido refrigerante que se expande y se comprime para extraer calor del espacio frío y transferirlo al entorno cálido. El ciclo de Carnot inverso es conceptualmente un modelo ideal que no se puede ejecutar totalmente en escenarios prácticos debido a las pérdidas e irreversibilidades típicas de los sistemas físicos. Sin embargo, su análisis es esencial porque define el límite teórico de máxima eficiencia para cualquier sistema de refrigeración, sirviendo así como una referencia fundamental para la evaluación.

En el ámbito de la agroindustria, la asimilación de este ciclo proporciona una base sólida para el diseño de sistemas de enfriamiento enfocados en reducir al mínimo el consumo energético y, por consiguiente, perfeccionar la conservación de los productos (Mujumdar, A. S, 2020).

### **Ciclo de Absorción y Adsorción**

Estos sistemas de refrigeración, que operan por compresión de vapor, se distinguen por utilizar calor en lugar de electricidad para su funcionamiento. El ciclo de absorción emplea un líquido absorbente que captura el refrigerante, mientras que el ciclo de adsorción se basa en el uso de materiales sólidos que adsorben la sustancia refrigerante.

Estos sistemas son de particular importancia en entornos donde la energía eléctrica resulta costosa o de acceso limitado, como suele ocurrir en áreas rurales. La aplicación de estos ciclos en la agroindustria facilita una refrigeración eficiente al aprovechar los recursos térmicos disponibles, lo que contribuye a la sostenibilidad y a la reducción de los gastos

operativos.

## **Capítulo 4: Aplicaciones Específicas en la Agroindustria**

### **Procesos de Secado**

**Secado Convectivo:** El secado convectivo es una técnica ampliamente utilizada en la agroindustria para eliminar la humedad de productos como granos, frutas y vegetales. Este proceso utiliza aire caliente que circula a través del producto, transfiriendo calor y evaporando la humedad. La eficiencia del secado convectivo depende de factores como la temperatura del aire, la velocidad de circulación y la humedad relativa. A pesar de su eficacia, el secado convectivo puede ser intensivo en energía, por lo que es importante optimizar los parámetros del proceso para reducir el consumo energético y mejorar la calidad del producto final. (Mujumdar, A. S, 2020)

**Secado por Adsorción:** El secado por adsorción emplea materiales adsorbentes para eliminar la humedad de los productos agrícolas. Estos materiales tienen la capacidad de atraer y retener moléculas de agua, lo que permite un secado eficiente sin necesidad de altas temperaturas. El secado por adsorción es especialmente útil para productos sensibles al calor o cuando se requiere una baja temperatura de procesamiento. La selección adecuada del adsorbente y la optimización del proceso pueden mejorar la eficiencia energética y reducir el tiempo de secado, haciendo que este método sea una opción valiosa en la agroindustria. (Niranjan, K., & Datta, A. K, 2020)

### **Procesos de Conservación**

La refrigeración y la congelación son técnicas esenciales para la conservación de alimentos en la agroindustria. La refrigeración mantiene los productos alimenticios a temperaturas superiores al punto de congelación, lo cual permite disminuir la velocidad de la actividad microbiológica y enzimática. En contraste, la congelación detiene por completo estos procesos al reducir la temperatura por debajo de cero. Ambos métodos son

esenciales para prolongar la vida útil de los productos agrícolas y conservar sus cualidades.

La eficiencia con la que operan estos procesos está directamente ligada al diseño del sistema de refrigeración o congelación y a su capacidad para mantener temperaturas estables y apropiadas. (Martínez-Silíceo, M. F, 2022).

### **Conservación Bajo Atmósferas Controladas**

La conservación bajo atmósferas controladas implica ajustar la composición de gases en el entorno de almacenamiento de alimentos para ralentizar el deterioro. Esta técnica se utiliza para mantener la frescura de frutas, vegetales y otros productos perecederos al reducir la tasa de respiración y el crecimiento microbiano. La implementación de atmósferas controladas puede mejorar significativamente la vida útil de los productos y reducir el desperdicio. La optimización de la composición de gases y las condiciones de almacenamiento es crucial para asegurar la eficacia de este método en la conservación de alimentos. (Kim, S., Lee, J., & Park, H, 2022).

## **Capítulo 5: Energía en la Agroindustria**

### **Eficiencia Energética en Procesos Agroindustriales**

La eficiencia energética en los procesos agroindustriales es clave para reducir costos y mejorar la sostenibilidad. La optimización de procesos como el secado, la refrigeración y la conservación de alimentos puede llevar a una reducción significativa en el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Implementar tecnologías avanzadas, realizar mantenimientos adecuados y ajustar los parámetros operativos son prácticas esenciales para mejorar la eficiencia energética. Además, la integración de sistemas de recuperación de calor y la adopción de fuentes de energía renovable pueden contribuir a una mayor eficiencia y sostenibilidad en las operaciones agroindustriales. (Martínez-Silíceo, 2022).

## **Gestión de Residuos y Valorización Energética**

La gestión de residuos en la agroindustria no solo implica la eliminación adecuada de desechos, sino también su valorización para la generación de energía. Los desechos agrícolas, incluyendo los subproductos de la cosecha y los residuos de procesamiento, son susceptibles de ser transformados en biomasa en forma de pellets, bioetanol o biogás. Esto genera una fuente de energía renovable que reduce la dependencia de combustibles fósiles. Esta estrategia no solo contribuye a minimizar la huella ambiental de los residuos, sino que también crea oportunidades para incrementar la eficiencia energética y reducir los costos operativos en el sector agroindustrial. (Martínez-Silíceo, 2022).

## **Capítulo 6: Modelado y Simulación de Procesos**

### **Modelos de Balance de Energía**

Los modelos de balance de energía son herramientas fundamentales para analizar y optimizar procesos agroindustriales. Estos modelos calculan la entrada y salida de energía en un sistema, permitiendo la identificación de oportunidades para mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas. Al aplicar estos modelos, los ingenieros pueden evaluar el rendimiento de los equipos, ajustar las condiciones operativas y diseñar procesos más efectivos que maximicen la conversión de energía y minimicen el desperdicio.

### **Modelos de Transferencia de Calor**

Los modelos de transferencia de calor son esenciales para entender cómo se distribuye y transfiere el calor en los procesos agroindustriales. Estos modelos permiten la simulación de procesos como el secado, la refrigeración y la conservación, proporcionando información sobre la eficiencia y el diseño de los sistemas de transferencia de calor. La optimización de la transferencia de calor puede mejorar el rendimiento de los procesos y reducir el consumo de energía, contribuyendo a una mayor eficiencia y sostenibilidad en la agroindustria. (Moran, M. J. et al., 2021)

## **Simulación de Procesos Agroindustriales**

La simulación de procesos agroindustriales utiliza herramientas computacionales para modelar y analizar el comportamiento de sistemas en condiciones variables. A través de simulaciones, los ingenieros pueden prever cómo los cambios en los parámetros operativos afectarán el rendimiento y la eficiencia de los procesos. La simulación permite realizar ajustes y optimizaciones antes de implementar cambios en la operación real, lo que ahorra tiempo y recursos. Este enfoque es especialmente útil para el diseño de nuevos procesos, la evaluación de alternativas y la mejora continua en la agroindustria. (Moran, M. J. et al., 2021).

## **Capítulo 7: Casos de Estudio y Ejemplos Prácticos**

### **Análisis Termodinámico de Sistemas Agroindustriales Específicos**

El análisis termodinámico de sistemas agroindustriales específicos implica la aplicación de principios termodinámicos para evaluar y mejorar procesos concretos, como la pasteurización, la fermentación o la producción de biogás. Este tipo de análisis ofrece una comprensión detallada sobre la forma en que la energía se consume y se transforma a lo largo de cada fase del proceso, lo que facilita la identificación de oportunidades para su optimización y mejora. La correcta aplicación de estos principios es clave para elevar la eficiencia, reducir los costos operativos y minimizar la huella ambiental generada por los sistemas agroindustriales.

### **Estudios de Casos Reales y sus Soluciones Termodinámicas**

Los estudios de casos reales ofrecen ilustraciones prácticas sobre cómo los principios de la termodinámica han sido empleados para solucionar problemas específicos y mejorar la eficiencia dentro de la agroindustria. Estos ejemplos demuestran la aplicación de conceptos termodinámicos para superar obstáculos como la optimización de procesos de secado, el incremento de la eficiencia energética o la reducción de la generación de

residuos.

El análisis de estas experiencias documentadas permite aprender de soluciones probadas y replicar estrategias efectivas en nuevos contextos, impulsando así el avance y la sostenibilidad en el sector agroindustrial.

## **Capítulo 8: Tendencias futuras y desafíos**

### **Innovaciones en Tecnologías Termodinámicas para la Agroindustria**

Las innovaciones en el campo de la termodinámica están generando una profunda transformación en la agroindustria, al introducir métodos novedosos para incrementar la eficiencia y la sostenibilidad. Actualmente, se están desarrollando tecnologías emergentes —como la termodinámica cuántica y los sistemas avanzados de recuperación de calor— con el fin de abordar los desafíos presentes y futuros del sector. Estas innovaciones poseen el potencial de revolucionar la gestión de los procesos agroindustriales, proporcionando soluciones para la producción y conservación de alimentos que sean más económicas, ecológicas y eficientes.

### **Retos y Oportunidades en la Aplicación de la Termodinámica**

La integración de la termodinámica en el sector agroindustrial se enfrenta a múltiples desafíos, entre ellos la necesidad de adaptarse a tecnologías emergentes, la incorporación de prácticas sostenibles y el manejo eficiente de los recursos.

No obstante, estos desafíos también representan oportunidades significativas para desarrollar soluciones innovadoras que impulsen la eficiencia, reduzcan los costos y minimicen la huella ambiental. La capacidad de abordar estos retos de forma efectiva será determinante para el futuro de la agroindustria, un sector en el que la sostenibilidad y la eficiencia energética asumirán un rol progresivamente más crucial.

## **Recomendaciones para la implementación de principios termodinámicos en la agroindustria**

Es fundamental que los profesionales de la agroindustria reciban capacitación continua en principios termodinámicos. Esto les permitirá comprender mejor cómo optimizar procesos como el secado, la refrigeración y la pasteurización, mejorando la eficiencia energética y la calidad del producto final. La formación debe incluir tanto teoría como aplicaciones prácticas, utilizando simulaciones y estudios de caso reales. Se recomienda la integración de fuentes de energía renovable, como la solar y eólica, en los procesos agroindustriales. La aplicación de principios termodinámicos es clave para maximizar la eficiencia de los sistemas agroindustriales, lo cual reduce la huella de carbono y promueve la sostenibilidad, y debe complementarse con tecnologías de almacenamiento de energía para asegurar un suministro estable. Es fundamental adoptar un enfoque sistemático para la optimización de procesos mediante simulaciones termodinámicas, lo que permite prever el impacto de los cambios operativos en el rendimiento y la eficiencia, facilitando ajustes antes de la implementación real. Esta optimización no solo incrementa la eficiencia, sino que también reduce los costos operativos y minimiza el desperdicio. Se debe impulsar la investigación y el desarrollo de tecnologías avanzadas basadas en la termodinámica, como la recuperación de calor y la termodinámica cuántica, innovaciones con el potencial de revolucionar la gestión agroindustrial y ofrecer soluciones más eficientes y sostenibles para la producción y conservación de alimentos. Adicionalmente, se debe promover la economía circular en la agroindustria, aplicando la termodinámica para convertir residuos en recursos, lo que reduce el impacto ambiental y crea nuevas oportunidades económicas al desarrollar procesos que maximicen la reutilización de materiales y la eficiencia en el uso de recursos. Finalmente, es necesario implementar sistemas de monitoreo y control utilizando tecnologías digitales, para optimizar el consumo de energía en tiempo real. La recopilación de datos sobre el consumo energético

y el rendimiento de los procesos permitirá realizar ajustes inmediatos, mejorando la eficiencia y reduciendo costos. Fomentar la colaboración entre ingenieros, agrónomos y expertos en sostenibilidad para abordar los desafíos de la agroindustria desde múltiples perspectivas. La integración de conocimientos en termodinámica, biología y tecnología puede conducir a soluciones innovadoras que mejoren la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos agroindustriales. Es imperativo realizar evaluaciones de impacto ambiental y de ciclo de vida basándose en principios termodinámicos para identificar y optimizar las áreas de mejora, asegurando el cumplimiento regulatorio y la adopción de prácticas sostenibles. Se deben implementar sistemas de climatización inteligentes en invernaderos (usando enfriamiento evaporativo o ventilación natural) y sistemas de riego eficientes (como el goteo) para optimizar la temperatura, humedad y consumo de recursos. La gestión energética debe evolucionar mediante la adopción de sistemas de monitoreo y control con tecnologías digitales, la recuperación de calor residual y la integración de sistemas de energía híbrida (eólica/solar) para reducir la dependencia de fósiles. Es crucial fomentar la investigación en bioprocesos como la gasificación o la digestión anaeróbica para maximizar la conversión de biomasa y residuos en biocombustibles y bioplásticos, aplicando la termodinámica al desarrollo de productos de valor añadido y promoviendo la economía circular. La inversión en investigación y desarrollo (I+D) debe enfocarse en tecnologías avanzadas (termodinámica cuántica, secado por microondas, refrigeración con refrigerantes naturales) y en sistemas de almacenamiento de energía térmica (fase cambiante). Además, es necesario desarrollar modelos predictivos basados en simulaciones termodinámicas para la toma de decisiones informadas, aplicar los principios en la acuicultura para optimizar la calidad del agua, en la extracción de compuestos bioactivos y en el diseño de envases sostenibles que prolonguen la vida útil. Finalmente, la estrategia debe ser apoyada por el fomento de alianzas entre la industria y la academia, el establecimiento de políticas e incentivos gubernamentales, y la promoción

de programas educativos y de conciencia que integren la termodinámica en las prácticas diarias y en los principios de la agricultura sostenible (rotación de cultivos). Abogar por políticas que incentiven la investigación y el desarrollo de tecnologías termodinámicas en la agroindustria, promoviendo la adopción de prácticas sostenibles y eficientes.

Fomentar la responsabilidad social empresarial en la agroindustria, integrando prácticas sostenibles y eficientes que utilicen principios termodinámicos para reducir el impacto ambiental y mejorar la calidad de vida de las comunidades.

## BIBLIOGRAFIAS

- Adams, R. (2022). *Refrigeration and freezing in agro-industrial systems*. AgroTech Publications.
- Aghbashlo, M., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Shahbeik, H., & Tabatabaei, M. (2020). The role of energy and exergy analyses in agricultural drying systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, 109803.
- ASHRAE. (2022). *ASHRAE handbook: Refrigeration*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Barbosa-Cánovas, G. V., & Ibarz, A. (2020). *Unit operations in food engineering* (2nd ed.). CRC Press.
- Bejan, A. (2019). *Advanced engineering thermodynamics* (4th ed.). Wiley.
- Berk, Z. (2018). *Food process engineering and technology* (3rd ed.). Academic Press.
- Çalışkan, H., & Dincer, I. (2021). Energy and exergy analyses of refrigeration systems. *Energy Conversion and Management*, 228, 113685.
- Chen, X., Zhang, M., & Wang, Y. (2020). Innovations in convective drying to improve food quality. *Food Research International*, 133, 109136.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2020). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Defraeye, T. (2019). Convective heat and mass transfer modeling of food drying. *Journal of Food Engineering*, 243, 1–15.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2021). *Exergy: Energy, environment and sustainable development* (3rd ed.). Elsevier.
- Fellows, P. J. (2017). *Food processing technology: Principles and practice* (4th ed.). Woodhead Publishing.
- Gómez, P. A., & Silva, M. A. (2023). Energy efficiency strategies in agro-industrial thermal processes. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136104.
- Heldman, D. R., & Hartel, R. W. (2022). *Principles of food processing* (3rd ed.). Springer.
- Holman, J. P. (2019). *Heat transfer* (10th ed.). McGraw-Hill Education.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2020). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). Wiley.
- Kalina, C., & Zamfirescu, C. (2020). *Organic Rankine cycle systems for biomass applications*. Elsevier.
- Kim, S., Lee, J., & Park, H. (2022). Nutrient retention in convective drying of fruits. *Food Chemistry*, 367, 130682.
- Kutz, M. (Ed.). (2021). *Handbook of farm, dairy and food machinery engineering* (3rd ed.). Academic Press.
- Martínez-Silíceo, M. F. (2022). La segunda ley de la termodinámica y su aplicación en sistemas energéticos. *Revista Tepexi*, 9(18), 55–68.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2021). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). Wiley.
- Mujumdar, A. S. (2020). *Handbook of industrial drying* (4th ed.). CRC Press.
- Niranjan, K., & Datta, A. K. (2020). *Food engineering: Integrated approaches* (2nd ed.). Elsevier.
- Rahman, M. S. (2020). *Handbook of food engineering* (2nd ed.). CRC Press.

- Rahman, M. S., & Perera, C. O. (2021). Drying and dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, 295, 110409.
- Riechmann, J. (2024). Entropía, recursos naturales y economía ecológica. *Revista Daphnia*, 53, 45–58.
- Santos, A., & Oliveira, J. (2020). Combined drying technologies for food preservation. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 321–335.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2022). *Introduction to food engineering* (6th ed.). Academic Press.
- Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (2018). *Refrigeration and air conditioning* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Toledo, R. T. (2018). *Fundamentals of food process engineering* (4th ed.). Springer.
- Wang, Y., Chen, X., & Zhang, M. (2021). Optimization of convective drying processes for food products. *Journal of Food Engineering*, 292, 110315.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., & Rorrer, G. L. (2018). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer* (6th ed.). Wiley.
- Wilson, A., & Baker, P. (2023). Freeze-drying in agroindustry: A modern approach. *Journal of Food Processing*, 45(1), 23–36.

