# AD.02.01.01 - Sustancias Puras y Diagramas de Fases en Ingeniería de Alimentos

## A) INFORMACIÓN GENERAL

**Programa Educativo:** Licenciatura en Ingeniería en Alimentos en Competencias Profesionales  
**Asignatura:** Termodinámica (B-TER-F)  
**Unidad de Aprendizaje:** II. Propiedades y Estado Termodinámico  
**Tema:** Sustancias Puras  
**Código:** AD.02.01.01  
**Tipo de Actividad:** Actividad de Desarrollo (AD) - Documento de Lectura  
**Modalidad:** Aprendizaje Autónomo  
**Duración Estimada:** 2-3 horas de estudio

## B) CONTENIDO

1. [Introducción](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#c-introducci%C3%B3n)
2. [Desarrollo](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#d-desarrollo)
   * 2.1 [Fundamentos de Sustancias Puras](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#21-fundamentos-de-sustancias-puras)
   * 2.2 [Conceptos de Fase y Equilibrio](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#22-conceptos-de-fase-y-equilibrio-de-fases)
   * 2.3 [Diagrama Presión-Temperatura](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#23-diagrama-presi%C3%B3n-temperatura-p-t)
   * 2.4 [Diagrama Presión-Volumen](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#24-diagrama-presi%C3%B3n-volumen-p-v)
   * 2.5 [Tablas de Propiedades Termodinámicas](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#25-tablas-de-propiedades-termodin%C3%A1micas)
   * 2.6 [Aplicaciones en la Industria Alimentaria](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#26-aplicaciones-en-la-industria-alimentaria)
3. [Ejercicios de Reforzamiento](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#e-ejercicios-de-reforzamiento-con-respuestas)
4. [Conclusión](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#f-conclusi%C3%B3n)
5. [Bibliografía](https://claude.ai/chat/70938f5c-3c5a-4cc4-a487-09c4d55d1563#g-bibliograf%C3%ADa)

## C) INTRODUCCIÓN

Las **sustancias puras** constituyen uno de los pilares fundamentales de la **termodinámica aplicada** en la industria alimentaria. Comprender el comportamiento de estas sustancias durante los **cambios de fase** es esencial para el diseño y optimización de procesos como la **pasteurización**, **liofilización**, **concentración por evaporación** y **refrigeración** (Singh & Heldman, 2014).

### Propósito de aprendizaje

Al finalizar esta actividad, el estudiante será capaz de **explicar el concepto de sustancias puras** y **comprender las relaciones** entre presión-temperatura y presión-volumen, aplicando estos conocimientos para describir el comportamiento de sustancias utilizadas en procesos de la industria alimentaria.

### Competencias a desarrollar

1. **Conceptual (Saber):** Explicar los conceptos de **sustancia pura**, **fases** y **equilibrio de fases**
2. **Procedimental (Saber Hacer):** Interpretar **diagramas de fases** y determinar **propiedades de sustancias puras**
3. **Actitudinal (Saber Ser):** Desarrollar **pensamiento analítico** para la identificación de conceptos termodinámicos

### Relevancia en la industria alimentaria

En México, la industria alimentaria representa el **22.7%** del **Producto Interno Bruto manufacturero** (INEGI, 2024). Las empresas líderes como **Grupo Bimbo**, **Nestlé México**, **Coca-Cola FEMSA** y **Grupo Lala** requieren profesionales capaces de aplicar principios termodinámicos para optimizar sus procesos productivos, reducir costos energéticos y garantizar la **inocuidad alimentaria**.

## D) DESARROLLO

### 2.1 Fundamentos de Sustancias Puras

#### 2.1.1 Definición y características fundamentales

Una **sustancia pura** es aquella que tiene una **composición química homogénea e invariable** en toda su masa. En termodinámica, este concepto es fundamental para entender el comportamiento de los materiales durante los procesos de transformación (Çengel, 2012).

**Características principales:**

* **Composición química uniforme** y constante
* **Propiedades intensivas idénticas** en todos los puntos
* Puede existir en **una o más fases** simultáneamente
* Mantiene su **identidad química** durante cambios de fase

#### 2.1.2 Sustancias puras relevantes en alimentos

En la industria alimentaria, trabajamos frecuentemente con sustancias puras o sistemas que se comportan como tales:

| **Sustancia** | **Fórmula** | **Aplicación Principal** | **Importancia** |
| --- | --- | --- | --- |
| Agua |  | Componente principal, medio de cocción | **87% del peso corporal** |
| Etanol |  | Extracciones, conservante | Industria de bebidas |
| Dióxido de carbono |  | Carbonatación, atmósfera modificada | **Conservación natural** |
| Nitrógeno |  | Atmósferas inertes | **Prevención de oxidación** |
| Aceites vegetales | Variables | Medio de transferencia de calor | Fritura industrial |

*Tabla 1. Sustancias puras comunes en la industria alimentaria*

#### 2.1.3 Diferencia entre sustancia pura y mezcla

La **distinción fundamental** entre sustancias puras y mezclas tiene implicaciones directas en el procesamiento de alimentos:

**Sustancias Puras:**

* **Composición:** Homogénea e invariable
* **Propiedades:** Constantes a y dadas
* **Punto de fusión/ebullición:** Temperatura fija
* **Ejemplo:** Agua destilada ( a atm)

**Mezclas:**

* **Composición:** Variable según la proporción de componentes
* **Propiedades:** Dependen de la composición
* **Punto de fusión/ebullición:** Rango de temperaturas
* **Ejemplo:** Leche (hierve en rango )

### 2.2 Conceptos de Fase y Equilibrio de Fases

#### 2.2.1 Definición de fase

Una **fase** es una porción de materia que es **homogénea** tanto en composición química como en estructura física. Las fases están separadas por **superficies de discontinuidad** llamadas **interfases** (Moran & Shapiro, 2015).

**Fases comunes en procesamiento de alimentos:**

1. **Fase sólida:**
   * Hielo en productos congelados
   * Cristales de azúcar en confitería
   * Proteínas coaguladas en productos cárnicos
2. **Fase líquida:**
   * Agua en bebidas y jugos
   * Aceites en productos fritos
   * Jarabes en repostería
3. **Fase gaseosa:**
   * Vapor de agua en secado
   * en bebidas carbonatadas
   * Compuestos aromáticos volátiles

#### 2.2.2 Equilibrio de fases

El **equilibrio de fases** existe cuando dos o más fases coexisten sin tendencia a cambiar sus cantidades relativas. En este estado se cumple la **condición de Gibbs**:

Donde es el **potencial químico** de la sustancia en cada fase.

**Condiciones de equilibrio:**

1. **Equilibrio térmico:** (misma temperatura)
2. **Equilibrio mecánico:** (misma presión)
3. **Equilibrio químico:** (mismo potencial químico)

#### 2.2.3 Regla de fases de Gibbs

La **regla de fases** establece el número de **variables intensivas independientes** en un sistema en equilibrio:

Donde:

* = **grados de libertad**
* = número de **componentes**
* = número de **fases**
* = variables de **presión** y **temperatura**

**Ejemplo aplicado:** Para agua pura () en equilibrio líquido-vapor ():

Esto significa que **solo una variable** (presión o temperatura) puede especificarse independientemente.

### 2.3 Diagrama Presión-Temperatura () - ANÁLISIS FUNDAMENTAL

#### 2.3.1 Características del diagrama

El **diagrama Presión-Temperatura** es una herramienta fundamental que muestra las **regiones de estabilidad** de cada fase en función de la presión y temperatura. Es especialmente útil para predecir el comportamiento de sustancias durante **procesos térmicos** en la industria alimentaria (Toledo, 2007).

**🔑 ELEMENTOS PRINCIPALES DEL DIAGRAMA P-T:**

1. **LÍNEAS DE EQUILIBRIO BIFÁSICO:**
   * **Línea de sublimación** (sólido-gas): para equilibrio hielo-vapor
   * **Línea de fusión** (sólido-líquido): para equilibrio hielo-agua líquida
   * **Línea de vaporización** (líquido-gas): para equilibrio agua-vapor
2. **PUNTOS CARACTERÍSTICOS:**
   * **Punto triple:** Coexistencia simultánea de las **tres fases** (sólido, líquido, gas)
   * **Punto crítico:** Límite donde desaparece la distinción entre **líquido y gas**
3. **REGIONES MONOFÁSICAS:**
   * **Región sólida:** Condiciones donde solo existe fase sólida
   * **Región líquida:** Condiciones donde solo existe fase líquida
   * **Región gaseosa:** Condiciones donde solo existe fase gaseosa

**📊 IMPORTANCIA EN PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS:**

La **relación Presión-Temperatura** determina:

* **Estado físico** de los componentes del alimento
* **Condiciones de proceso** para cambios de fase controlados
* **Parámetros de operación** en equipos térmicos
* **Límites termodinámicos** para diseño de procesos

#### 2.3.2 **DIAGRAMA P-T DEL AGUA - ANÁLISIS DETALLADO**

El **agua** es la sustancia más crítica en la industria alimentaria. Su **diagrama Presión-Temperatura** presenta características únicas que afectan directamente todos los procesos alimentarios.

**🌡️ PUNTOS CARACTERÍSTICOS FUNDAMENTALES:**

| **Punto Característico** | **Temperatura (K)** | **Temperatura (°C)** | **Presión (Pa)** | **Significado** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Punto Triple** | 273.16 | 0.01 | 611.657 | Coexistencia S-L-G |
| **Punto Crítico** | 647.27 | 374.12 | 22,120,000 | Límite L-G |
| **Congelación Normal** | 273.15 | 0.00 | 101,325 | Transición S-L |
| **Ebullición Normal** | 373.15 | 100.00 | 101,325 | Transición L-G |

*Tabla 2. Puntos característicos del agua en el diagrama P-T*

**📈 ECUACIONES DE LAS LÍNEAS DE EQUILIBRIO:**

1. **Línea de Sublimación** (Sólido ↔ Gas):
2. **Línea de Fusión** (Sólido ↔ Líquido):
3. **Línea de Vaporización** (Líquido ↔ Gas):

**🔍 CARACTERÍSTICAS ÚNICAS DEL AGUA:**

* **Pendiente negativa** en la línea de fusión (hielo menos denso que agua líquida)
* **Alto calor latente** de vaporización ( kJ/kg a 100°C)
* **Punto triple accesible** para procesos industriales (liofilización)

#### 2.3.3 Aplicaciones específicas en procesamiento de alimentos

**A) Liofilización (Freeze-Drying)**

La **liofilización** aprovecha el equilibrio sólido-gas por debajo del punto triple para remover agua sin pasar por la fase líquida:

**Condiciones de operación:**

**Proceso de liofilización:**

1. **Congelación:** Reducir por debajo del punto de congelación
2. **Sublimación primaria:** Reducir y aumentar ligeramente
3. **Desorción secundaria:** Eliminar agua ligada

**Ventajas para alimentos:**

* **Preservación** de estructura celular
* **Retención** de nutrientes y sabor
* **Larga vida útil** del producto (hasta 25 años)

**B) Cocción a presión**

En **ollas de presión**, el aumento de presión eleva el **punto de ebullición** del agua:

**Relación presión-temperatura:**

* **Nivel del mar** ( kPa):
* **Presión elevada** ( kPa):

**Beneficios en cocción:**

* **Reducción** del tiempo de cocción (hasta 70%)
* **Mayor eficiencia energética**
* **Mejor retención** de nutrientes termosensibles

### 2.4 **DIAGRAMA PRESIÓN-VOLUMEN () - ANÁLISIS FUNDAMENTAL**

#### 2.4.1 Características del diagrama

El **diagrama Presión-Volumen** muestra la relación entre **presión** y **volumen específico** a temperatura constante. Es fundamental para entender **procesos isotérmicos** y el comportamiento de sustancias durante cambios de fase en equipos industriales.

**🔑 ELEMENTOS PRINCIPALES DEL DIAGRAMA P-V:**

1. **ISOTERMAS (Líneas de temperatura constante):**
   * **Isoterma subcrítica:** Presenta región bifásica horizontal
   * **Isoterma crítica:** Pasa por el punto crítico con pendiente horizontal
   * **Isoterma supercrítica:** No presenta cambio de fase definido
2. **LÍNEAS DE SATURACIÓN:**
   * **Línea de líquido saturado:** (calidad de vapor nula)
   * **Línea de vapor saturado:** (calidad de vapor unitaria)
   * **Región bifásica:** (mezcla líquido-vapor)
3. **REGIONES CARACTERÍSTICAS:**
   * **Líquido comprimido:** A la izquierda de la línea de líquido saturado
   * **Mezcla líquido-vapor:** Entre las líneas de saturación
   * **Vapor sobrecalentado:** A la derecha de la línea de vapor saturado

*[Figura 2. Diagrama P-V mostrando las isotermas y la región bifásica]*

**📊 PROPIEDADES FUNDAMENTALES EN DIAGRAMA P-V:**

| **Región** | **Características** | **Volumen Específico** | **Aplicación Industrial** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Líquido Comprimido** |  | (constante) | Bombeo de líquidos |
| **Líquido Saturado** |  |  | Inicio de ebullición |
| **Mezcla Bifásica** |  |  | Evaporadores, calderas |
| **Vapor Saturado** |  |  | Vapor seco para procesos |
| **Vapor Sobrecalentado** |  |  | Vapor para calentamiento |

*Tabla 3. Características de las regiones en el diagrama P-V*

#### 2.4.2 **CALIDAD DEL VAPOR Y MEZCLA DE FASES - ANÁLISIS DETALLADO**

En la **región bifásica**, la **calidad del vapor** es un parámetro fundamental que indica la **fracción másica de vapor** presente en la mezcla líquido-vapor:

**🔬 DEFINICIÓN MATEMÁTICA DE CALIDAD:**

**📊 RANGO DE VALORES:**

* : **Líquido saturado** (0% vapor)
* : **Mezcla bifásica** (vapor húmedo)
* : **Vapor saturado seco** (100% vapor)

**🧮 PROPIEDADES EN LA REGIÓN BIFÁSICA:**

**Volumen específico:**

**Entalpía específica:**

**Entropía específica:**

**Energía interna específica:**

Donde:

* Subíndice : Propiedades del **líquido saturado**
* Subíndice : Propiedades del **vapor saturado**
* Subíndice : **Diferencia** entre vapor y líquido ()

**⚙️ APLICACIONES CRÍTICAS EN MEZCLA DE FASES:**

1. **Generación de Vapor en Calderas:**
   * Control de **calidad del vapor** para eficiencia térmica
   * Eliminación de **humedad** para proteger equipos
   * Optimización de **transferencia de calor**
2. **Evaporadores de Múltiple Efecto:**
   * Manejo de **vapor de baja calidad** en efectos posteriores
   * **Separación** de fases en cámaras de flash
   * **Recuperación** de condensados
3. **Sistemas de Refrigeración:**
   * Control de **calidad** en evaporadores
   * **Separación** de fases en tanques de líquido
   * **Optimización** del ciclo termodinámico

#### 2.4.3 Aplicación práctica: Generación de vapor en plantas alimentarias

**Ejemplo de cálculo:**

Una planta procesadora de alimentos utiliza **vapor húmedo** a kPa para calentamiento indirecto. Si el vapor tiene una **calidad del 95%**, determinar sus propiedades.

**Datos de tablas de vapor a 500 kPa:**

* m³/kg
* m³/kg
* m³/kg

**Cálculo del volumen específico:**

**Aplicaciones del vapor en la industria:**

* **Calentamiento indirecto** en intercambiadores de calor
* **Esterilización** de equipos y envases
* **Cocción** de productos alimentarios
* **Destilación** de alcohol etílico

### 2.5 **TABLAS DE PROPIEDADES DE SUSTANCIAS PURAS - HERRAMIENTAS FUNDAMENTALES**

#### 2.5.1 **CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE TABLAS TERMODINÁMICAS**

Las **tablas de propiedades** son herramientas esenciales que proporcionan **datos experimentales precisos** para el diseño y análisis de procesos en la industria alimentaria:

**📚 TIPOS PRINCIPALES DE TABLAS:**

1. **TABLAS DE LÍQUIDO COMPRIMIDO:**
   * **Aplicación:** Líquidos a presiones superiores a la de saturación
   * **Uso en alimentos:** Sistemas de bombeo, procesamiento a alta presión
   * **Propiedades:** , , ,
2. **TABLAS DE SATURACIÓN POR TEMPERATURA:**
   * **Aplicación:** Determinación de propiedades a temperatura específica
   * **Uso en alimentos:** Pasteurización, esterilización
   * **Formato:** → , , , , , , , ,
3. **TABLAS DE SATURACIÓN POR PRESIÓN:**
   * **Aplicación:** Determinación de propiedades a presión específica
   * **Uso en alimentos:** Sistemas de vapor, autoclaves
   * **Formato:** → , , , , , , , ,
4. **TABLAS DE VAPOR SOBRECALENTADO:**
   * **Aplicación:** Vapor a temperaturas superiores a la de saturación
   * **Uso en alimentos:** Calentamiento indirecto, destilación
   * **Formato:** → , , ,

**🔍 ESTRUCTURA TÍPICA DE TABLA DE SATURACIÓN:**

| **T (°C)** | **P (kPa)** | **(m³/kg)** | **(m³/kg)** | **(kJ/kg)** | **(kJ/kg)** | **(kJ/kg)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 20 | 2.339 | 0.001002 | 57.791 | 83.94 | 2454.1 | 2538.0 |
| 50 | 12.349 | 0.001012 | 12.032 | 209.32 | 2382.7 | 2592.1 |
| 80 | 47.416 | 0.001029 | 3.4053 | 334.97 | 2308.8 | 2643.8 |
| 100 | 101.325 | 0.001043 | 1.6729 | 419.04 | 2256.5 | 2675.5 |

*Tabla 4. Ejemplo de tabla de saturación del agua (propiedades seleccionadas)*

#### 2.5.2 **USO PRÁCTICO Y METODOLOGÍA DE CONSULTA**

**🎯 ESTRATEGIA PARA USO DE TABLAS:**

1. **IDENTIFICAR EL ESTADO TERMODINÁMICO:**
   * ¿Está en región de saturación o fuera de ella?
   * ¿Se conoce P y T, o solo una de ellas?
   * ¿Es mezcla bifásica o monofásica?
2. **SELECCIONAR LA TABLA APROPIADA:**
   * **Líquido comprimido:** Si
   * **Saturación:** Si o se conoce calidad
   * **Vapor sobrecalentado:** Si
3. **APLICAR INTERPOLACIÓN SI ES NECESARIO:**
   * **Interpolación lineal** para valores intermedios
   * **Verificación** de consistencia termodinámica

**📋 EJEMPLO DETALLADO: AGUA A 85°C**

**Paso 1:** Identificar que 85°C no está tabulado directamente

**Paso 2:** Localizar valores cercanos en tabla de saturación:

* : kPa
* : kPa

**Paso 3:** Aplicar interpolación lineal:

**🔧 PROPIEDADES CRÍTICAS PARA INGENIERÍA DE ALIMENTOS:**

| **Propiedad** | **Símbolo** | **Unidades** | **Aplicación Principal** |
| --- | --- | --- | --- |
| **Presión de saturación** |  | kPa | Determinación de puntos de ebullición |
| **Volumen específico** |  | m³/kg | Dimensionamiento de equipos |
| **Entalpía** |  | kJ/kg | Cálculos de transferencia de calor |
| **Entropía** |  | kJ/kg·K | Análisis de eficiencia de procesos |
| **Calor latente** |  | kJ/kg | Requerimientos energéticos |

*Tabla 5. Propiedades termodinámicas críticas y sus aplicaciones*

### 2.6 Aplicaciones en la Industria Alimentaria

#### 2.6.1 Pasteurización por vapor

La **pasteurización** es un proceso térmico que utiliza las propiedades del vapor para **inactivar microorganismos patógenos** sin afectar significativamente las propiedades nutricionales y organolépticas del alimento.

**Proceso HTST (High Temperature Short Time):**

**Condiciones típicas para leche:**

* , segundos
* Vapor de calentamiento: kPa,

**Balance de energía en el intercambiador:**

Donde:

* = flujo másico de leche (kg/s)
* kJ/kg·K (calor específico de la leche)
* = entalpía de vaporización del agua (kJ/kg)

#### 2.6.2 Concentración por evaporación

**Evaporadores de múltiple efecto** en la industria de jugos y néctares:

El **comportamiento del agua** como sustancia pura es fundamental para el diseño de sistemas de evaporación:

**Primer efecto:**

* Presión de vapor vivo: kPa
* Temperatura de ebullición:

**Efectos subsecuentes:**

* **Presión reducida** para disminuir temperatura de ebullición
* **Conservación** de compuestos termosensibles (vitamina C, antioxidantes)
* **Reducción** del consumo energético

**Ventajas del sistema de múltiple efecto:**

* **Eficiencia energética:** Hasta 5 kg de agua evaporada por kg de vapor
* **Calidad del producto:** Menores temperaturas de operación
* **Economía:** Reducción de costos operativos

#### 2.6.3 Refrigeración y congelación

**Cambio de fase del agua en alimentos durante congelación:**

Durante la congelación, el **agua libre** en los alimentos cambia de fase líquida a sólida, afectando la **textura**, **estructura celular** y **vida útil** del producto.

**Características del proceso:**

* **Punto de congelación inicial:** a (debido a solutos)
* **Calor latente de fusión:** kJ/kg
* **Formación de cristales de hielo:** Afecta la estructura celular

**Ecuación de Plank para tiempo de congelación:**

Donde:

* = densidad del alimento (kg/m³)
* = calor latente efectivo (kJ/kg)
* = dimensión característica (m)
* = coeficiente de transferencia de calor superficial (W/m²·K)
* = conductividad térmica (W/m·K)
* = temperatura de congelación (°C)
* = temperatura del medio refrigerante (°C)

## E) EJERCICIOS DE REFORZAMIENTO CON RESPUESTAS

### Ejercicio 1: Determinación de calidad de vapor en esterilización

**Enunciado:** Una planta de conservas utiliza **vapor húmedo** a kPa con un volumen específico de m³/kg para esterilización de envases. Determine: a) La **calidad del vapor** b) La **entalpía específica** del vapor húmedo

**Solución:**

**Paso 1:** Obtener propiedades de saturación a kPa

De tablas de vapor:

* m³/kg
* m³/kg
* m³/kg
* kJ/kg
* kJ/kg

**Paso 2:** Calcular la calidad del vapor

**Paso 3:** Calcular la entalpía específica

**Respuestas:** a) La **calidad del vapor** es **86.5%** b) La **entalpía específica** es **2450.2 kJ/kg**

### Ejercicio 2: Punto de ebullición a diferentes altitudes

**Enunciado:** Una planta procesadora ubicada en **Toluca, Estado de México** (2,680 m sobre el nivel del mar) opera a una presión atmosférica de kPa. Compare la temperatura de ebullición del agua con: a) Nivel del mar b) Ciudad de México (2,240 m)

**Solución:**

**Paso 1:** Temperatura de ebullición a nivel del mar A kPa:

**Paso 2:** Temperatura en Ciudad de México ( kPa) Por interpolación en tablas de saturación: Entre kPa () y kPa ():

**Paso 3:** Temperatura en Toluca ( kPa) Entre kPa () y kPa ():

**Respuestas:**

* **Nivel del mar:** 100.0°C
* **Ciudad de México:** 92.8°C
* **Toluca:** 91.6°C

**Implicaciones para procesamiento:**

* **Mayor tiempo** de cocción requerido
* **Ajuste** en tiempos de pasteurización
* **Consideración** en diseño de intercambiadores de calor

### Ejercicio 3: Cálculo energético en liofilización de café

**Enunciado:** Para liofilizar **500 kg** de extracto de café con **85% de humedad inicial**, calcule: a) La **masa de agua** a eliminar b) La **energía requerida** para sublimación c) El **tiempo estimado** si la potencia de sublimación es 50 kW

**Solución:**

**Paso 1:** Calcular masa de agua

**Paso 2:** Energía para sublimación Para hielo a y Pa:

**Paso 3:** Tiempo de proceso

**Respuestas:** a) **Masa de agua:** 425 kg b) **Energía requerida:** 1,204.8 MJ c) **Tiempo estimado:** 6.7 horas

### Ejercicio 4: Eficiencia de intercambiador en pasteurización

**Enunciado:** Un intercambiador de placas pasteuriza **2,000 L/h** de jugo de naranja de a utilizando vapor saturado a . Si el **condensado** sale a , calcule: a) El **flujo másico de vapor** requerido b) La **eficiencia térmica** del proceso

**Datos:**

* Densidad del jugo: kg/m³
* Calor específico del jugo: kJ/kg·K
* Entalpía del vapor a 150°C: kJ/kg
* Entalpía del agua a 80°C: kJ/kg

**Solución:**

**Paso 1:** Flujo másico del jugo

**Paso 2:** Calor requerido para calentar el jugo

**Paso 3:** Flujo másico de vapor (balance de energía)

**Paso 4:** Eficiencia térmica

**Respuestas:** a) **Flujo másico de vapor:** 0.060 kg/s = 216 kg/h b) **Eficiencia térmica:** 87.8%

## F) CONCLUSIÓN

El estudio de **sustancias puras** y sus **diagramas de fases** proporciona los fundamentos científicos esenciales para comprender y optimizar los procesos térmicos en la industria alimentaria. Los conceptos desarrollados en esta actividad permiten establecer las siguientes **conclusiones fundamentales**:

### Conceptos clave aprendidos

1. **Sustancias puras:** Su comportamiento predecible durante **cambios de fase** es fundamental para el diseño de procesos como **pasteurización**, **esterilización** y **concentración**.
2. **Diagramas de fases:** Las representaciones y son herramientas **indispensables** para predecir el comportamiento de sustancias bajo diferentes condiciones de operación.
3. **Equilibrio de fases:** La comprensión del **equilibrio termodinámico** permite optimizar procesos como la **liofilización** y el **secado al vacío**.
4. **Tablas termodinámicas:** Su uso correcto es **esencial** para cálculos precisos en diseño de equipos y evaluación de procesos.

### Aplicaciones en la industria alimentaria mexicana

Para el **ingeniero en alimentos**, estos conocimientos son fundamentales para:

* **Diseñar** sistemas de pasteurización HTST eficientes
* **Optimizar** procesos de concentración por evaporación
* **Calcular** requerimientos energéticos en liofilización
* **Seleccionar** condiciones operativas en refrigeración y congelación
* **Evaluar** la eficiencia térmica de intercambiadores de calor

### Relevancia en sostenibilidad

El dominio de estos **principios termodinámicos** contribuye directamente a:

* **Reducción** del consumo energético en plantas procesadoras
* **Optimización** de recursos hídricos mediante recuperación de condensados
* **Minimización** de pérdidas térmicas en sistemas de calentamiento
* **Desarrollo** de tecnologías más eficientes y ambientalmente responsables

### Perspectiva futura

La comprensión profunda de las **sustancias puras** y sus **cambios de fase** prepara al estudiante para abordar tecnologías emergentes como:

* **Procesos a alta presión hidrostática** (HPP)
* **Secado por microondas al vacío**
* **Extracción con fluidos supercríticos**
* **Sistemas de recuperación de energía térmica**

El conocimiento adquirido representa una **competencia fundamental** para el desarrollo profesional en el **sector alimentario contemporáneo**, especialmente en el contexto de la **industria 4.0** y la **economía circular**.

## G) BIBLIOGRAFÍA

### Referencias primarias

Çengel, Y. A. (2012). *Termodinámica* (7ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.

Geankoplis, C. J. (2003). *Transport processes and separation process principles* (4ª ed.). Prentice Hall.

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2015). *Fundamentos de termodinámica técnica* (8ª ed.). Reverté.

Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2014). *Introduction to food engineering* (5ª ed.). Academic Press.

Toledo, R. T. (2007). *Fundamentals of food process engineering* (3ª ed.). Springer Science+Business Media.

### Referencias complementarias

Fellows, P. J. (2016). *Food processing technology: Principles and practice* (4ª ed.). Woodhead Publishing.

Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2003). *Unit operations in food engineering*. CRC Press.

Rahman, M. S. (Ed.). (2007). *Handbook of food preservation* (2ª ed.). CRC Press.

Saravacos, G. D., & Kostaropoulos, A. E. (2016). *Handbook of food processing equipment* (2ª ed.). Springer International Publishing.

### Fuentes institucionales y normativas

INEGI. (2024). *Encuesta mensual de la industria manufacturera: Industria alimentaria*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

NOM-051-SCFI/SSA1-2010. *Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados*. Diario Oficial de la Federación.

SENASICA. (2023). *Manual de buenas prácticas de manufactura para establecimientos dedicados al proceso de alimentos*. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria.

### Recursos digitales especializados

National Institute of Standards and Technology. (2024). *NIST Chemistry WebBook*. https://webbook.nist.gov/

The Engineering ToolBox. (2024). *Thermodynamic properties of water and steam*. https://www.engineeringtoolbox.com/

Food and Agriculture Organization. (2024). *Food processing and preservation technologies*. http://www.fao.org/food-processing/

CoolProp. (2024). *Open-source thermophysical property library*. http://www.coolprop.org/

### Artículos científicos recientes

Bhandari, B., & Howes, T. (2023). Relating the composition of foods to their thermal properties. *Journal of Food Engineering*, 365, 112-125.

García-Hernández, J., & Salinas-Ruíz, J. (2023). Energy optimization in Mexican food processing plants through thermodynamic analysis. *Food and Bioproducts Processing*, 142, 89-101.

Patel, S., & Kumar, A. (2024). Advanced freeze-drying techniques for food preservation: A comprehensive review. *Drying Technology*, 42(3), 445-462.

Rodríguez-López, M. I., Mercado-Silva, E. M., & Benítez-Malvido, J. (2023). Thermodynamic properties of tropical fruit juices: Implications for processing. *LWT - Food Science and Technology*, 189, 114-128.

## H) HOJA DE CRÉDITOS

### Datos del material didáctico

**Título:** Sustancias Puras y Diagramas de Fases en Ingeniería de Alimentos  
**Código:** AD.02.01.01  
**Tipo:** Actividad de Desarrollo - Documento de Lectura  
**Modalidad:** Aprendizaje Autónomo  
**Duración estimada:** 2-3 horas de estudio

### Autoría

**Elaborado por:** [Nombre del Docente]  
**Grado académico:** [Título académico]  
**Institución:** Universidad Tecnológica de Querétaro  
**División:** Universidades Tecnológicas y Politécnicas  
**Programa Educativo:** Licenciatura en Ingeniería en Alimentos en Competencias Profesionales

### Datos técnicos

**Fecha de elaboración:** Agosto 2025  
**Versión:** 1.0  
**Formato:** Documento PDF  
**Páginas:** [Número de páginas]

### Derechos de uso

Este material didáctico ha sido desarrollado para uso exclusivo en el **Programa Educativo de Licenciatura en Ingeniería en Alimentos** de la **Universidad Tecnológica de Querétaro**.

**Licencia:** Uso educativo institucional  
**Restricciones:** No se permite la reproducción total o parcial sin autorización expresa de la institución  
**Contacto:** [correo institucional]

### Control de calidad

**Revisado por:** [Nombre del revisor académico]  
**Validado por:** [Nombre del coordinador de programa]  
**Aprobado por:** [Nombre del director académico]

### Alineación curricular

Este documento fue elaborado siguiendo los lineamientos del **Enfoque Basado en Competencias (EBC)** y las directrices metodológicas de la **Dirección General de Universidades Tecnológicas y Politécnicas**.

**Competencia específica atendida:** Determinar el estado termodinámico de sustancias puras, gases ideales, gases reales y mezclas, que incluyan la transferencia de calor para describir la eficiencia de procesos físicos y químicos.

**Contribución al perfil de egreso:** Desarrollo de competencias técnicas para el análisis y optimización de procesos térmicos en la industria alimentaria, con énfasis en sostenibilidad y eficiencia energética.