

# **Tema-07: EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD TERMODINÁMICOS**

- 7.1 CONDICIÓN GENERAL DE EQUILIBRIO ESTABLE**
- 7.2 CRITERIOS DE GIBBS**
- 7.3 EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD DE UN SISTEMA HOMOGÉNEO**
- 7.4 EQUILIBRIO DE UN SISTEMA HETEROGÉNEO**
- 7.5 TRANSICIÓN DE FASES. ESTADOS METASTABLES**
- 7.6 ESTADO CRÍTICO. CRITERIO DE GIBBS**
- 7.7 RECTA TRIPLPE**
- 7.8 APLICACIÓN TÉCNICA DE LA INESTABILIDAD. FENÓMENO BLEVE**

## 7.1 CONDICIÓN GENERAL DE EQUILIBRIO ESTABLE

Sea: - un sistema homogéneo cualquiera, caracterizado por sus dos variables de estado:  $x, y$   
 - que ya ha alcanzado el equilibrio

Para verificar que dicho equilibrio es estable, consideremos una perturbación cualquiera en el entorno (debido p.ej. a sus fluctuaciones microscópicas):

**Criterio de Prigogine:** “si la perturbación conduce en cualquier caso a una generación entrópica negativa  $\sigma < 0$ , diremos que el equilibrio inicial es un equilibrio estable”

Según el 2º Ppio, todo proceso real posible lleva a  $\sigma \geq 0$ , por lo que si la perturbación conduce a un valor negativo de  $\sigma$ , el proceso “no” puede progresar y el sistema vuelve indefectiblemente a su estado inicial de equilibrio (llamado estado “atractor”). Es decir:

**Condición general de estabilidad:** función disipación (4.72):  $\psi = \int T \cdot \delta\sigma < 0$  (7.1)

La perturbación queda caracterizada por la modificación de una variable interna al sistema “ $\xi$ ”, de la cual las variables  $x, y$  son funciones bien determinadas  $x = x(\xi)$ ,  $y = y(\xi)$ , siendo  $\delta\xi$  el diferencial del “proceso virtual” (que no progresará), asociado a la perturbación.

¡IMP!: “ $\delta$ ” indica el diferencial de un “proceso virtual” asociado a la perturbación, en el equilibrio (¡OJO!: en este caso, no significa diferencial inexacta sino, diferencial virtual)

- Naturaleza de las perturbaciones  $\delta\xi$ :
  - en una fase homogénea: podría ser la aparición de una cantidad elemental de masa de una 2ª fase.
  - en un sistema heterogéneo: podría ser el desplazamiento de masa de una fase a otra.
  - en una reacción química: podría ser el desplazamiento del grado de avance de la reacción.
- Clases de perturbaciones  $\delta\xi$ :
  - unilaterales: donde  $\delta\xi$  solo puede adoptar un signo (p.ej.: formación incipiente de una 2ª fase en un sistema homogéneo)
  - bilaterales: donde  $\delta\xi$  puede tener cualquier signo (p.ej.: desplazamiento: de un sistema heterogéneo y por tanto polifásico, hacia una de las fases o, de una reacción química en equilibrio, hacia un sentido de la reacción)

### Campo de aplicación:

Sea: - un sistema cerrado.  
 - no existen trabajos disipativos, ni disequilibrios mecánicos con el ambiente (aunque los resultados obtenidos también serán válidos cuando existan trabajos disipativos)  
 - efectos despreciables de campos externos.

- la expresión de un proceso elemental en el espacio  $U - S - V$  vendría dada por:

$$(3.24) \text{ 1º Ppio: } \delta U = \delta Q - P \cdot \delta V \quad (7.2)$$

$$(4.19) \text{ 2º Ppio y (4.72): } T \cdot \delta S = \delta Q + T \cdot \delta\sigma = \delta Q + \delta\psi \quad (7.3)$$

- pero, la variación de estado debe darse en un espacio  $U - S - V - \xi$  y por tanto:

- (6.67a) queda:  $\delta U = T. \delta S - P. \delta V - F. \delta \xi$  siendo:  $F = - \left( \frac{dU}{d\xi} \right)_{S,V}$  (7.4)

- con (7.2), (7.3) y (7.4):  $F. \delta \xi = T. \delta S - \delta U - P. \delta V = T. \delta S - \delta Q = \delta \psi$  (7.5)

- (7.1), cond. equil. queda:  $\forall \Delta \xi \rightarrow \psi < 0$  (7.6)

- combinando (7.5) y (7.6):  $\psi = \int_{\psi_0}^{\psi} \delta \psi = \int_{\xi_0}^{\xi} F(\xi). \delta \xi < 0$  (7.7)

- desarrollando por Taylor:  $F(\xi) = \frac{1}{0!} \cdot F(\xi_0) + \frac{1}{1!} \cdot \left( \frac{dF}{d\xi} \right)_{\xi_0} \cdot \Delta \xi + \frac{1}{2!} \cdot \left( \frac{d^2F}{d\xi^2} \right)_{\xi_0} \cdot (\Delta \xi)^2 + \dots$  (7.8)

con:  $\Delta \xi = \xi - \xi_0 \rightarrow$  variación de la var. interna que mide la perturbación

- integrando (7.8):  $\psi = F(\xi_0). \Delta \xi + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{dF}{d\xi} \right)_{\xi_0} \cdot (\Delta \xi)^2 + \frac{1}{6} \cdot \left( \frac{d^2F}{d\xi^2} \right)_{\xi_0} \cdot (\Delta \xi)^3 + \dots < 0$  (7.9)

• Se pueden dar los siguientes casos:

1/ equilibrio estable:  $\forall \Delta \xi \rightarrow \psi < 0$

2/ equilibrio inestable:  $\exists \Delta \xi \rightarrow \psi > 0$

3/ equilibrio metastable:  $\left\{ \begin{array}{l} \forall \Delta \xi < \Delta' \xi \rightarrow \psi < 0 \\ \exists \Delta \xi > \Delta' \xi \rightarrow \psi > 0 \end{array} \right.$

4/ equilibrio indiferente:  $\forall \Delta \xi \rightarrow \psi = 0$

• En (7.9), para fluctuaciones suficientemente pequeñas, basta detenerse en la menor potencia de  $\Delta \xi$ , con un término no nulo (ya que:  $(\Delta \xi)^2 \ll \Delta \xi$ ; etc.):

1/ equilibrio estable: a/ unilateral:  $\Delta \xi > 0 \rightarrow F(\xi_0) < 0$  (ver Figura 4.1) (7.10)

b/ bilateral:  $\forall \Delta \xi \left\{ \begin{array}{l} F(\xi_0) = 0 \\ \left( \frac{dF}{d\xi} \right)_{\xi_0} < 0 \end{array} \right.$  (ver Figura 4.2) (7.11)

2/ equilibrio inestable:  $\psi > 0$ , es decir: el sistema podría iniciar un proceso, por lo que no es objeto de este análisis del Tema-07 (sistemas en equilibrio)

3/ equilibrio metastable:

puede darse también un caso de estabilidad relativa, en la que el sistema puede adoptar dos estados diferentes de estabilidad. Para pequeñas perturbaciones  $\Delta \xi < \Delta' \xi$  (ver Figura 4.3) el sistema retorna a su posición inicial  $\xi_0$  pero, para perturbaciones mayores  $\Delta \xi > \Delta' \xi$  el sistema es atraído por otro estado de mayor estabilidad, con  $\xi = \xi'_0$  y por tanto ya no retorna al inicial. El de menor estabilidad se llama "metaestable".

4/ equilibrio indiferente:  $\forall \Delta \xi \rightarrow \psi(\xi) = 0$  (ver Figura 4.4)

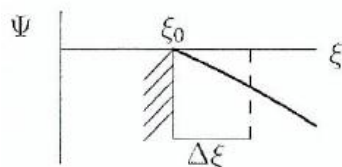


Figura 4.1. Eq. unilateral.

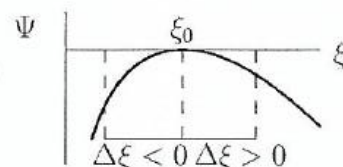


Figura 4.2. Eq. bilateral.

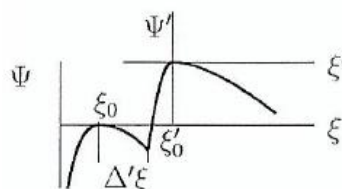


Figura 4.3. Eq. metastable.

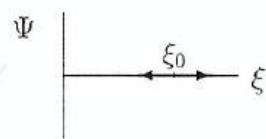


Figura 4.4. Eq. indiferente.

## 7.2 CRITERIOS DE GIBBS

El criterio general de Prigogine puede difractarse en criterios particulares considerando perturbaciones pequeñas, que “dejen fijas” a las dos variables que se decida considerar en el sistema, para lo que ampliando la interpretación de la Ec. (7.5), queda:

$$-(7.5): \quad \delta\psi = F \cdot \delta\xi = T \cdot \delta S - \delta U - P \cdot \delta V \stackrel{\substack{\uparrow \\ (6.5) \text{ y } (6.22)}}{=} -\delta A - S \cdot \delta T - P \cdot \delta V \stackrel{\substack{\uparrow \\ (6.22) \text{ y } (6.27)}}{=} -\delta G - S \cdot \delta T + V \cdot \delta P < 0 \quad (7.12)$$

Así tendremos los criterios alternativos de equilibrio estable llamados criterios de Gibbs al aplicar (7.10) y (7.11) a (7.5)

1/ equilibrio estable:

a/ unilateral:  $\delta\xi > 0 \rightarrow F(\xi_0) < 0$  (7.10)  $\Delta\xi > 0$

- manteniendo ctes.:  $U, V \rightarrow \delta U = \delta V = 0$   $\Rightarrow \delta S < 0$  (7.13)
- " " :  $S, V \rightarrow \delta S = \delta V = 0$   $\Rightarrow \delta U > 0$  (7.14)
- " " :  $T, V \rightarrow \delta T = \delta V = 0$   $\Rightarrow \delta A > 0$  (7.15)
- " " :  $T, P \rightarrow \delta T = \delta P = 0$   $\Rightarrow \delta G > 0$  (7.16)

b/ bilateral ( $\delta\xi \cong 0$ ): (7.11)  $\forall \Delta\xi$

- ctes.:  $U, V \rightarrow F \cdot \delta\xi = T \cdot \delta S \rightarrow \left(\frac{\delta S}{\delta\xi}\right)_{U,V} = \frac{F}{T} = 0$  (7.17)
- 2ª derivada  $\rightarrow \left(\frac{d^2 S}{d\xi^2}\right)_{U,V} = \frac{1}{T} \cdot \frac{dF}{d\xi} - \frac{F}{T^2} \cdot \frac{dT}{d\xi} = \frac{1}{T} \cdot \frac{dF}{d\xi} < 0 \Rightarrow$  S tiene máximo (7.18)
- ctes.:  $S, V \rightarrow F \cdot \delta\xi = -\delta U \rightarrow \left(\frac{\delta U}{\delta\xi}\right)_{S,V} = -F = 0$  (7.19)
- 2ª derivada  $\rightarrow \left(\frac{d^2 U}{d\xi^2}\right)_{S,V} = -\frac{dF}{d\xi} > 0 \Rightarrow$  U tiene mínimo (7.20)
- ctes.:  $T, V \rightarrow F \cdot \delta\xi = -\delta A \rightarrow \left(\frac{\delta A}{\delta\xi}\right)_{T,V} = -F = 0$  (7.21)
- 2ª derivada  $\rightarrow \left(\frac{d^2 A}{d\xi^2}\right)_{T,V} = -\frac{dF}{d\xi} > 0 \Rightarrow$  A tiene mínimo (7.22)
- ctes.:  $T, P \rightarrow F \cdot \delta\xi = -\delta G \rightarrow \left(\frac{\delta G}{\delta\xi}\right)_{T,P} = -F = 0$  (7.23)
- 2ª derivada  $\rightarrow \left(\frac{d^2 G}{d\xi^2}\right)_{T,P} = -\frac{dF}{d\xi} > 0 \Rightarrow$  G tiene mínimo (7.24)

Como puede observarse, los estados de equilibrio con variación bilateral corresponden a extremos matemáticos máximo o mínimo (ver Figura 4.5), y los de variación unilateral, a valores máximos o mínimos pero, no relativos (ver Figura 4.6).

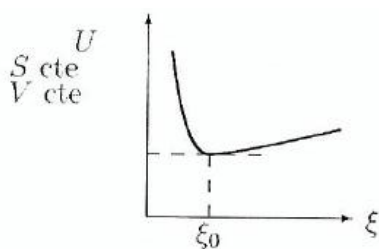


Figura 4.5.  $\Delta\xi \cong 0$

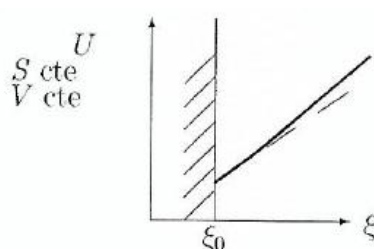


Figura 4.6.  $\Delta\xi > 0$

### 7.3 EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD DE UN SISTEMA HOMOGÉNEO

Sea: - un sistema cerrado

- monocomponente, no perturbado

- formado por "n" moles de una sola fase-1, de propiedades específicas:  $u_0^1, s_0^1, v_0^1$

Se produce una perturbación y se forma una pequeña cantidad  $\delta\xi$  de otra fase-2, de propiedades específicas:  $u_1^2, s_1^2, v_1^2$ ; muy diferentes de la fase inicial.

Sin embargo, las propiedades de la fase-1 habrán variado muy poco como consecuencia de la segregación de una pequeña cantidad a la fase-2 (ver Cuadro 4.1)

Estado	Fase 1		Fase 2	
	Masa	Propiedad	Masa	Propiedad
Inicial	$n$	$u_0^1, s_0^1, v_0^1$		
Final	$n - \delta\xi$	$u_1^1 = u_0^1 + \delta u$ $s_1^1 = s_0^1 + \delta s$ $v_1^1 = v_0^1 + \delta v$	$\delta\xi$	$u_1^2 = u_0^1 + \Delta u$ $s_1^2 = s_0^1 + \Delta s$ $v_1^2 = v_0^1 + \Delta v$

Cuadro 4.1. Perturbación unilateral en un sistema homogéneo.

**Desarrollando:** con las siguientes consideraciones:

- los estados finales pueden ponerse en función del inicial por su desarrollo en serie de Taylor

- se trata de una perturbación unilateral, por lo que la condición de equilibrio estable es:  $\delta\xi > 0$

- con lo que aplicando el criterio de Gibbs (7.13)

- teniendo en cuenta las restricciones:  $S = cte, V = cte$

(ya que consideramos a estas como las variables que definen el estado, de equilibrio)

**Conclusiones:** (se omite el desarrollo por extenso y relativo interés práctico)

1/ Estabilidad térmica  $\Rightarrow c_v > 0$  (7.25)

2/ Estabilidad mecánica  $\Rightarrow \kappa^{-1} > 0$  (7.26)

**Línea espinodal:** es el lugar geométrico de los estados que cumplen la condición límite (tránsito de la forma de estabilidad  $\kappa^{-1} > 0$ , a la de inestabilidad  $\kappa^{-1} < 0$ )

$$\kappa^{-1} = 0 \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{\delta P}{\delta v}\right)_T = 0 \quad (7.27)$$

**Nota:** el análisis realizado no discrimina entre estados estables y metastables (su distinción resultará más sencilla al representar gráficamente las transiciones de fase).

## 7.4 EQUILIBRIO DE UN SISTEMA HETEROGÉNEO

- Sea:
- un sistema cerrado
  - monocomponente
  - formado por dos fases en equilibrio estable, definidas por sus variables de estado:  $U_0^1, S_0^1, V_0^1, n_0^1, U_0^2, S_0^2, V_0^2, n_0^2$
  - se desprecian los efectos de tensión superficial entre ambas fases.

Se produce una perturbación:  $\delta\xi = \delta n^1 = -\delta n^2$  (definida por una transferencia elemental de materia entre las dos fases)

Se trata de una perturbación bilateral.

### Desarrollando:

- aplicando el criterio de Gibbs (7.19) (condición de mínimo)
- teniendo en cuenta las restricciones:  $S = cte, V = cte, n = cte$

**Conclusiones:** (se omite el desarrollo por extenso y relativo interés práctico)

$$1/ \text{ Condición de equilibrio térmico} \quad \Rightarrow \quad T^1 = T^2 \quad (7.28)$$

$$2/ \text{ Condición de equilibrio mecánico} \quad \Rightarrow \quad P^1 = P^2 \quad (7.29)$$

$$3/ \text{ Condición de equilibrio difusivo} \quad \Rightarrow \quad g^1 = g^2 \quad (7.30)$$

**Línea binodal:** es el lugar geométrico de los estados que cumplen la condición (7.30) (ver Figura 4.7, en el diagrama  $P - v$ )

Puede comprobarse que las condiciones de estabilidad aplicadas al sistema heterogéneo de un componente no añade ninguna condición nueva a las ya vistas para los sistemas homogéneos. Es decir, que basta con que todas las fases sean estables para que lo sea el sistema.

## 7.5 TRANSICIÓN DE FASES. ESTADOS METASTABLES

Para tener una visión geométrica completa de las transiciones de fase se pueden emplear los diagramas en los planos:  $P - v(T)$  (Figura 4.7);  $a - v(T)$  (Figura 4.9);  $g - P(T)$  (Figura 4.10);  $g - T(P)$  (Figura 4.11); que son las representaciones más usadas.

Los diagramas  $g - T$  y  $g - P$  presentan punto anguloso en el estado de transición  $\Rightarrow$  variación discontinua de  $v$  y  $s$  en dicho estado (son las llamadas transiciones de primer orden).

En la Figura 4.7 se representa el caso particular de una transición de primer orden con punto crítico, como es el caso de la transición líquido-vapor.

Algunos sistemas no presentan dicha discontinuidad en la transición (son las llamadas transiciones de segundo orden), que aparecen generalmente en sistemas sólidos (aleaciones y sustancias ferromagnéticas).

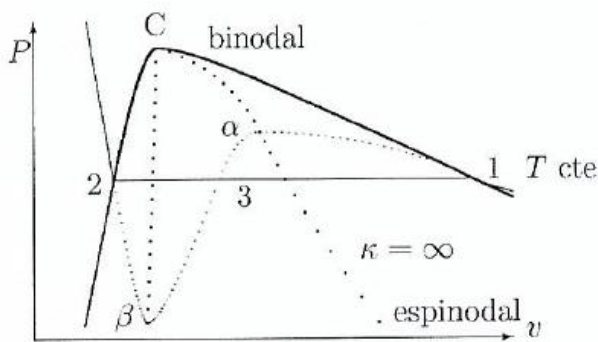


Figura 4.7. Diagrama  $P-v$

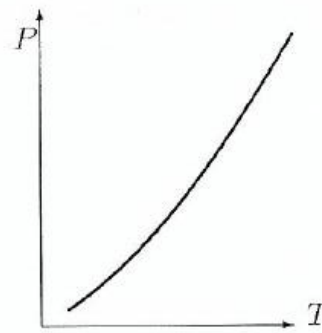


Figura 4.8. Diagrama  $P-T$

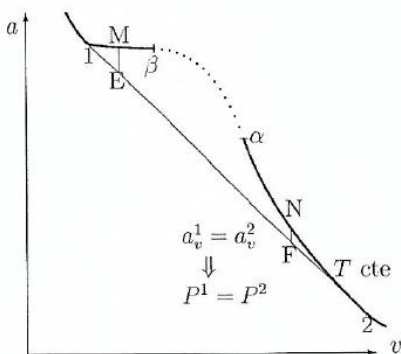


Figura 4.9. Diagrama  $a-v$ .

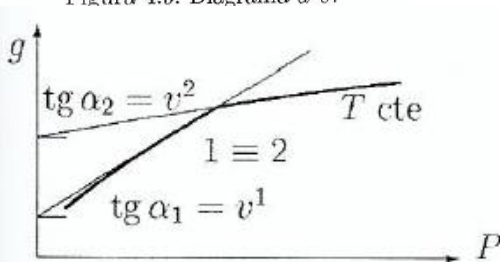


Figura 4.10. Diagrama  $g-P$ .

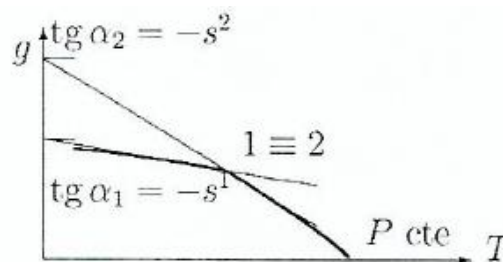


Figura 4.11. Diagrama  $g-T$ .

■ En el plano  $P - T(v)$ :

- el lugar geométrico de los estados de transición se obtendrá con:

$$g^1 = g^2 \stackrel{(6.26)}{\Rightarrow} h^1 - T^1 \cdot s^1 = h^2 - T^2 \cdot s^2 \quad \text{y como: } T^1 = T^2 = T \Rightarrow \boxed{s^2 - s^1 = \frac{h^2 - h^1}{T} = \frac{l}{T}} \quad (7.31)$$

$$\text{calor latente de cambio de estado de 1 a 2} \Rightarrow \boxed{l = h^2 - h^1} \quad (7.32)$$

- a lo largo de la curva de equilibrio entre ambas fases deberá cumplirse la condición de equilibrio:

$$\frac{dg^1}{dT} = \frac{dg^2}{dT} = \frac{-s^1 \cdot dT + v^1 \cdot dP}{dT} = \frac{-s^2 \cdot dT + v^2 \cdot dP}{dT}$$

Ec. Clausius-Clapeyron

$$\Rightarrow \boxed{\frac{dP}{dT} = \frac{s^2 - s^1}{v^2 - v^1} = \frac{l}{T \cdot (v^2 - v^1)}} \quad (7.33)$$

- esta ec. es válida para cualquier transición de fase de primer orden, es decir, que haya discontinuidad en las primeras derivadas de  $g$  (volumen, entropía).
- Casos posibles:
  - si " $v^2 - v^1$ " tiene signo contrario a " $l$ " correspondiente  $\Rightarrow$  la pendiente de la curva en un diagrama  $P - T$  es negativa (p.ej.: equilibrio sólido-líquido en el agua, bismuto, galio y antimonio, en los que el sólido flota).
  - $l = 0 ; v^2 - v^1 \neq 0 \Rightarrow$  la curva tiene tangente horizontal en dichos puntos (p.ej.: en algunas transiciones sólido-sólido, como transición hielo-I- hielo-III en zona metaestable a unos  $-40^\circ\text{C}$ )
  - $l \neq 0 ; v^2 - v^1 = 0 \Rightarrow$  la curva tiene tangente vertical en dichos puntos (p.ej.: en algunas transiciones sólido-sólido)
  - $l = 0 ; v^2 - v^1 = 0 \Rightarrow$  (6.48) queda indeterminada (p.ej.: en el Pto. Crítico y en las transiciones de orden superior)

■ En el plano  $a - v$ :

- trazando la línea:  $P^1 = P^2$  ; o lo que es lo mismo:  $a_v^1 = a_v^2$  ; tangente común a las líneas:  $a^1 = a^2$ :
  - $\alpha$  y  $\beta$  son los límites de estabilidad (según: "libro de texto, sección 9.4, punto 3" ???), que exige la convexidad de  $A$  , por la convexidad de  $U$  , la concavidad de  $S$  y ser  $T$  estrictamente positiva.
  - E y F cumplen la condición de equilibrio heterogéneo:  $g^1 = g^2$
  - M y N cumplen la condición de estabilidad en sistema homogéneo:  $\kappa > 0$ . Siendo E y F más estables ( $A_E < A_M ; A_F < A_N$ ), M y N serán pues metastables.

■ En el plano  $P - v$ :

- la isóbara de transición de fase cumple la condición:  $(g^1 - g^2 = 0)_T \Rightarrow \int_1^2 v \cdot dP = 0 \quad (7.34)$   
 Es decir: la recta 1 - 3 - 2 (ver Figura 4.7) biseca en dos partes de igual área:  $1\alpha 3 = 3\beta 2$  (regla de Maxwell).

■ En el plano  $g - P(T)$ :

- se proyecta en el punto anguloso  $1 \equiv 2$  siendo las pendientes de las dos tangentes la expresión de los volúmenes específicos  $v^1, v^2$  de saturación (ver Figura 4.10)

## 7.6 ESTADO CRÍTICO. CRITERIO DE GIBBS

Se define el estado crítico como el estado límite en el que se unen las dos ramas de la curva binodal. En dicho estado deja de haber diferencia entre las dos fases.

Si representamos en un diagrama " $\alpha - v$ " las sucesivas líneas isotermas en progresión creciente hacia la isoterma crítica, observamos que los estados  $1 - 1' - \dots; 2 - 2' - \dots$  de la línea binodal convergen y asimismo los estados  $\alpha - \alpha' - \dots; \beta - \beta' - \dots$  de la línea espinodal. En el límite cuando se alcanza la isoterma crítica, por la definición dada se confunden los volúmenes específicos de las dos fases ( $\lim_{T \rightarrow T_c} v^L = \lim_{T \rightarrow T_c} v^V$ ), o dicho de otro modo, se confunden en un solo punto los estados de la línea binodal ( $1 - 1' - \dots; 2 - 2' - \dots$ ). Al estar los puntos ( $\alpha - \alpha' - \dots; \beta - \beta' - \dots$ ) de la línea espinodal dentro del intervalo de los de la binodal, también convergerán hacia este mismo estado, que es por definición el estado del punto crítico.

Por tanto, dicho estado:

1/ pertenece al lugar geométrico de estados espinodales, es decir: 
$$\left(\frac{\delta P}{\delta v}\right)_T^c = 0 \tag{7.35}$$

2/ es tal que al realizar desde él un proceso isotérmico cualquiera conduce a estados siempre estables:

$$\forall \Delta v_T: \Delta \frac{1}{\kappa} > 0 \Rightarrow \Delta \left(\frac{\delta P}{\delta v}\right)_T < 0$$

desarrollando y considerando un  $\Delta v$  muy pequeño, tenemos: 
$$\left(\frac{\delta^2 P}{\delta v^2}\right)_T^c = 0 \tag{7.36}$$

La simultaneidad de (7.35) y (7.36) lleva a la condición geométrica de que el pto. crítico es pto. de inflexión de la isoterma crítica.

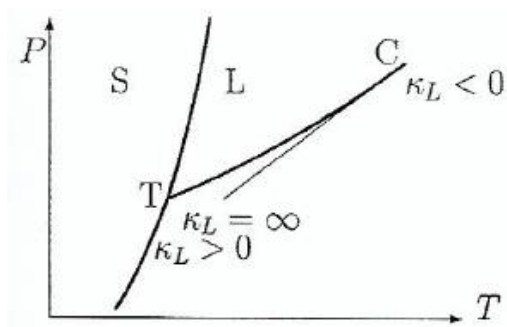


Figura 4.12. Diagrama P-T.

Las tangentes a la curva binodal y a la isócora crítica en el pto. crítico en el plano  $P - T$  coinciden, y coinciden a su vez con la tangente a la línea espinodal, que para la fase líquida es muy aproximadamente una línea recta (ver Figura 4.12)

## 7.7 RECTA TRIPLE

La condición en forma estable de tres fases diferentes lleva a la condición: 
$$g^1 = g^2 = g^3 \quad (7.37)$$
 valor único en el que  $P_t$  y  $T_t$  cumplen la condición anterior.

Todos los estados en los que  $v = v(P_t, T_t)$  constituyen una recta, lugar geométrico de estados isóbaro-isotermos (proyectada como un pto. en el diagrama  $P - T(v)$  de la Figura 4.12.

**Nota:** una sustancia pura puede tener más de un pto. triple, cuando (como es frecuente) pueda darse en más de una fase sólida, p.ej.: el agua puede darse en 6 fases sólidas estables (hielo I, II, III, V, VI y VII) y en dos metastables (hielo IV y VIII), que dan lugar a seis ptos. triples además del habitual hielo I-agua-vapor, a presiones de varios miles de bares.

## 7.8 APLICACIÓN TÉCNICA DE LA INESTABILIDAD. FENÓMENO BLEVE

Cuando un gas licuado está almacenado en un tanque a su presión de saturación, puede súbitamente evaporarse en su totalidad si, como consecuencia de un fallo mecánico en la envolvente, pasa el fluido bruscamente a la presión ambiente y en tales condiciones la fase líquida es inestable. Se produce, en tal caso, un fenómeno explosivo denominado BLEVE (acrónimo de: Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion) con un brusco incremento de volumen, que proyecta a gran distancia los trozos de la carcasa envolvente.