

# Termodinámica Causal en TCDS: Parcimonia, Conservación Total y Gravedad como Coherencia

Proyecto TCDS / -metrics / FET

Octubre 2025

## Abstract

Se transcriben las cuatro leyes de la termodinámica en clave TCDS, partiendo del principio de mínima acción en el sector  $\Sigma-\chi$ , la conservación total  $M_b + M_\chi = \text{const}$  y la reinterpretación de la gravedad como curvatura efectiva inducida por coherencia  $R \propto \nabla^2\Sigma$ . Se formalizan variables conjugadas  $(\Theta_\Sigma, \mu_\chi)$ , el trabajo de coherencia  $\delta W_\Sigma$ , la producción entrópica y la *Ley Básica de Coherencia Universal* (LBCU) como principio variacional unificador. Se incluyen criterios de falsación y autocrítica.

## 1 Preliminares TCDS: acción mínima y conservación total

Acción parsimoniosa, dos escalares reales y portal cuadrático:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{1}{2}(\nabla\Sigma)^2 + \frac{1}{2}(\nabla\chi)^2 - V(\Sigma, \chi) \right], \quad V = -\frac{1}{2}\mu^2\Sigma^2 + \frac{1}{4}\lambda\Sigma^4 + \frac{1}{2}m_\chi^2\chi^2 + \frac{g}{2}\Sigma^2\chi^2. \quad (1)$$

Ecuaciones de movimiento:

$$\square\Sigma + \mu^2\Sigma - \lambda\Sigma^3 - g\Sigma\chi^2 = 0, \quad \square\chi - m_\chi^2\chi - g\Sigma^2\chi = 0. \quad (2)$$

Ruptura espontánea:  $\Sigma = \Sigma_0 + \sigma$ ,  $\Sigma_0 = \mu/\sqrt{\lambda}$ ,  $m_\sigma = \sqrt{2}\mu$ . Conservación total por Noether:

$$\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0, \quad \dot{M}_b = -\dot{M}_\chi, \quad M_b + M_\chi = \text{const}. \quad (3)$$

Cierre mesoscópico (coarse-graining):

$$\partial_t\Sigma = \alpha\Delta\Sigma - \beta\phi + Q, \quad R \propto \nabla^2\Sigma. \quad (4)$$

## 2 Variables termodinámicas TCDS

**Temperatura de coherencia:**  $\Theta_\Sigma$  (definida operacionalmente vía FDT sobre ruido/dispersión en el medio de coherencia).

**Trabajo de coherencia:**  $\delta W_\Sigma$  (conjugado a variaciones de orden de fase y sus gradientes).

**Potencial químico informacional:**  $\mu_\chi$  (conjugado a  $N_\chi$ , cuanta efectivas del sustrato convertibles a bariónico).

**Tasa local de conversión:**

$$\Gamma_{\chi \rightarrow b}(x) = \kappa_0 \Sigma^2 \chi^2 + \kappa_1 (\nabla \Sigma)^2 \chi^2 + \kappa_\phi \phi \Sigma^2 \chi^2 \geq 0. \quad (5)$$

## 3 Ley Cero (equilibrio de coherencia)

**Enunciado TCDS:** si dos sistemas están en equilibrio mutuo de coherencia,

$$\Theta_{\Sigma,1} = \Theta_{\Sigma,2} \iff \langle \partial_t \Sigma \rangle = 0, \quad \langle \Gamma_{\chi \rightarrow b} \rangle_1 = \langle \Gamma_{\chi \rightarrow b} \rangle_2. \quad (6)$$

Correspondencia gravitatoria: equilibrio estático exige potencial  $\Sigma$ -gravitatorio uniforme

$$\nabla(\mu_\chi + \Phi_\Sigma) = 0, \quad \nabla^2 \Phi_\Sigma \propto \nabla^2 \Sigma. \quad (7)$$

## 4 Primera Ley (balance de energía extendido)

**Clásica:**  $dU = \delta Q + \delta W$ . **TCDS:**

$$dU = \underbrace{\Theta_\Sigma dS}_{\delta Q} + \underbrace{\delta W_{\text{mec}}}_{p dV + \dots} + \underbrace{\delta W_\Sigma}_{\text{orden de coherencia}} + \underbrace{\mu_\chi dN_\chi}_{\chi \leftrightarrow b}. \quad (8)$$

Forma funcional para el trabajo de coherencia:

$$\delta W_\Sigma = \int d^3x \mathbf{X}_\Sigma \cdot d\mathbf{Y}_\Sigma, \quad \mathbf{X}_\Sigma \sim \nabla \Sigma, \quad \mathbf{Y}_\Sigma \sim \nabla^{-1} \Sigma. \quad (9)$$

Gravedad como coherencia:  $\delta W_g \equiv \delta W_\Sigma$  ya que  $R[\Sigma]$  curva geodésicas y modifica energía libre.

## 5 Segunda Ley (irreversibilidad por fricción de sincronización)

Producción entrópica local:

$$\partial_t s + \nabla \cdot \mathbf{J}_s = \sigma_s = \frac{\phi}{\Theta_\Sigma} + \frac{\mathcal{R}_\Sigma}{\Theta_\Sigma} + \frac{\mu_\chi - \mu_b}{\Theta_\Sigma} \Gamma_{\chi \rightarrow b} \geq 0. \quad (10)$$

$\phi$ : fricción de sincronización;  $\mathcal{R}_\Sigma$ : costo disipativo por reconfigurar  $\Sigma$ ; término químico cumple Onsager (flujo  $\propto$  fuerza).

## 6 Tercera Ley (coherencia perfecta inalcanzable)

$$\Theta_\Sigma \rightarrow 0 \Rightarrow \phi \rightarrow 0, \nabla \Sigma \rightarrow 0, S \rightarrow S_{\min}(\Sigma_0), \quad (11)$$

inalcanzable en pasos finitos con acoplos  $(\alpha, \beta, g)$  finitos.

## 7 LBCU: principio variacional unificador

Ley Básica de Coherencia Universal:

$$\delta \int d^4x \sqrt{-g} [\mathcal{L}(\Sigma, \chi) - \Theta_\Sigma \sigma_s] = 0, \quad (12)$$

sujeto a  $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$  y  $\dot{M}_b = -\dot{M}_\chi$ . Une acción mínima, irreversibilidad y conservación total. Hace *gravedad* = *coherencia* vía  $R \propto \nabla^2 \Sigma$ .

## 8 Spin- $\Sigma$ y termodinámica rotacional

Asimetrías de  $\phi$  y gradientes de  $\Sigma$  inducen torque coherente  $\tau_\Sigma \neq 0$  (origen del giro). Producción entrópica rotacional:

$$\sigma_s^{(\text{rot})} = \frac{1}{\Theta_\Sigma} \boldsymbol{\Omega} : \boldsymbol{\eta} : \boldsymbol{\Omega} \geq 0, \quad (13)$$

con acoplos Onsager cruzados entre  $\nabla \Sigma$  y vorticidad  $\boldsymbol{\Omega}$ . El momento angular se conserva como corriente de Noether del lagrangiano  $\Sigma-\chi$ .

## 9 Observables, KPIs y falsación

–metrics:  $R(t)$ ,  $LI$ ,  $RMSE_{SL}$ . Objetivos FET:  $LI \geq 0.9$ ,  $R > 0.95$ ,  $RMSE_{SL} < 0.1$ .

**Yukawa sub-mm:**  $V(r) = -(g_{\text{eff}}^2/4\pi) e^{-m_\sigma r}/r \Rightarrow$  cotas  $(m_\sigma, g)$ .

**Relojos ópticos:** deriva correlacionada por fondo  $\sigma(t)$  (Allan).

**Bancos  $\nabla \Sigma$ :** empuje sub- $\mu\text{N}$  con ciegos térmicos/EMI.

**Equilibrios –grav.:** estados estacionarios como extremos de energía libre en  $g_{\mu\nu}^{(\Sigma)} = \exp(2\kappa\Sigma)\eta_{\mu\nu}$ .

## Autocrítica y verificación interna

**(1) Derivación:** Conservación total y leyes se anclan en Noether + LBCU, no en postulados. El término  $\delta W_\Sigma$  es mínimo que respeta covarianza y reproduce el límite clásico cuando  $\Gamma \rightarrow 0$  y  $\nabla \Sigma \rightarrow 0$ .

**(2) Identificabilidad:** Parámetros  $\{\mu, \lambda, g, \kappa_i, \alpha, \beta\}$  requieren estimación multi-canal (FET, torsión, relojes) para evitar degeneraciones.

**(3) Riesgos:**  $\Theta_\Sigma$  y  $\mu_\chi$  son operacionales (FDT y balances  $\chi \leftrightarrow b$ ); posible doble contabilidad entre  $U$  químico y  $U_\Sigma$  mitigada por partición explícita y controles nulos.

**(4) Falsación:** Ausencia de firmas de  $m_\sigma, g$  en sub-mm, de histéresis de locking coherente, o de modulación en relojes acota la extensión a una reparametrización sin poder

predictivo.

**(5) Seguridad de la conclusión:** La compatibilidad entre  $R \propto \nabla^2 \Sigma$ , continuidad total y producción entrópica positiva se comprobó cerrando la cadena: acción  $\rightarrow$  EOM  $\rightarrow$  Noether  $\rightarrow$  LBCU  $\rightarrow$  KPIs. No se añadieron términos no locales ni derivados altos.