

Metrología Coherencial del Tiempo (MCT): Un protocolo TCDS para auditar y extender la definición del segundo

Proyecto TCDS / Motor de Formalización GPT-5 Σ -Trace

2025-11-06

Abstract

Se propone y detalla la *Metrología Coherencial del Tiempo* (MCT), un estudio verificable que aplica la Teoría de la Cromodinámica Sincrónica (TCDS) para auditar la definición vigente del segundo y su implementación en redes de relojes atómicos y ópticos. El eje técnico es la **Ley de Balance Coherencial Universal (LBCU)** $\dot{\Sigma} = Q - \phi$, empleada aquí como ecuación constitutiva de medición. Introducimos tres magnitudes operativas: (i) *rigidez coherencial* κ_{Σ} para evaluar estabilidad de fase entre laboratorios, (ii) *flujo causal coherente* $C = (Q - \phi)/(Q + \phi)$ como índice de causalidad metrológica, y (iii) *velocidad coherencial efectiva* $v_{\Sigma} = c/(1 + \kappa_{\Sigma}^{-1})$ como métrica de transferencia de información temporal. Definimos KPIs auditable ($LI \geq 0.9, R > 0.95, RMSE_{SL} < 0.1$, reproducibilidad $\geq 95\%$) y un protocolo de falsación por *Diseño Entrópico* (precursor si $\Delta H < -0.2$ con mejora simultánea de LI y R). El resultado esperado es una prueba independiente de que la métrica temporal vigente es consistente dentro de los límites experimentales, o bien la detección de *gradientes* κ_{Σ} sistemáticos entre entornos que sugieran una extensión coherencial de la definición del segundo.

1 Objetivo y veredicto operativo

Objetivo: resolver, con herramientas TCDS, si la métrica temporal vigente es eficaz y si requiere ajustes.

Veredicto operativo: la eficacia se decide por el *cierre coherencial* en redes de tiempo; si la LBCU produce $\dot{\Sigma} \approx 0$ (locking estacionario) bajo perturbaciones controladas y κ_{Σ} resulta *invariante* entre laboratorios dentro de ppm, la definición es adecuada. Si aparecen *gradientes reproducibles* de κ_{Σ} no explicables por relatividad ni ambiente, la TCDS prescribe una *corrección coherencial* y un *índice Σ -temporal* de fase (STI) para acompañar al segundo.

2 Marco teórico TCDS aplicado al tiempo

La LBCU:

$$\dot{\Sigma}(t) = Q(t) - \phi(t), \tag{1}$$

interpreta la medición como acoplamiento de fase entre patrón y observador. Distinguimos:

Medición: $\dot{\Sigma} = 0 \Rightarrow Q = \phi$, Inferencia: $Q < \phi$, Definición: $Q > \phi$.

Definimos magnitudes metrológicas:

$$C \equiv \frac{Q - \phi}{Q + \phi} \in [-1, 1], \quad (2)$$

$$\kappa_{\Sigma} \equiv \left\langle \frac{\|\Delta \hat{\Sigma}\|}{\|\Delta x\|} \right\rangle_{\Delta x \rightarrow 0}, \quad (3)$$

$$v_{\Sigma} \equiv \frac{c}{1 + \kappa_{\Sigma}^{-1}}. \quad (4)$$

Aquí $\hat{\Sigma}$ es un estimador de coherencia de fase entre relojes, y Δx una perturbación controlada (ruido añadido, offset de altura, gradiente térmico o presión).

3 Hipótesis y criterios de éxito

H1. La red temporal (TAI/UTC/relojes ópticos) exhibe κ_{Σ} constante dentro de tolerancias ppm cuando se corrige por relatividad y ambiente.

H2. C se mantiene > 0.9 en ventanas $p:q$ durante operación nominal.

H3. Si existen gradientes κ_{Σ} residuales reproducibles, éstos definen un término coherencial δ_{Σ} que extiende la definición operacional del segundo para entornos específicos, sin contradecir la relatividad.

KPIs (*-metrics*):

$$LI \geq 0.90, \quad R > 0.95, \quad \text{RMSE}_{SL} < 0.10, \quad \text{repr} \geq 95\%.$$

E-Veto: precursor válido si $\Delta H < -0.2$ y co-mejora de LI y R en la misma ventana.

4 Instrumentación y señales

- **Relojes:** al menos un par de *relojes ópticos* (Sr, Yb o Lu) y uno de Cs-133 como *ancora* SI.
- **Enlaces:** fibra óptica estabilizada y/o enlaces ópticos libres; referencia GNSS como respaldo.
- **Sensores ambientales:** temperatura, presión, humedad, vibración, campo magnético; altura geodésica para redshift gravitacional.
- **Coherencímetro Σ -FET/PLL:** módulo de bloqueo de fase que entrega $\theta_k(t)$ y residuales de fase.

5 Definiciones operativas de las métricas

5.1 Índice de locking LI

$$r(t) = \left| \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M e^{i\theta_k(t)} \right|, \quad LI = \langle r(t) \rangle_{t \in W}. \quad (5)$$

θ_k es la fase entre el reloj k y el patrón compuesto.

5.2 Rigidez coherencial κ_Σ

Versión diferencial (sensibilidad):

$$\kappa_\Sigma = \left\langle \frac{\|\Delta \hat{\Sigma}\|}{\|\Delta x\|} \right\rangle, \quad \hat{\Sigma} \equiv LI \text{ o } R. \quad (6)$$

Versión espectral (lazo de fase):

$$\kappa_\Sigma^{(\omega)} = \frac{1}{1 + |G(j\omega)|^{-2}}, \quad (7)$$

con G función de transferencia del PLL coherencial.

5.3 Flujo causal coherente C

A partir de residuos de fase $\epsilon(t)$ y espectros de ruido:

$$Q \equiv \text{SNR}_{\text{coh}} = \frac{P_{\text{portadora}}}{P_{\text{ruido coherente}}}, \quad (8)$$

$$\phi \equiv \text{SNR}_{\text{incoh}} = \frac{P_{\text{ruido coherente}}}{P_{\text{ruido total}}}, \quad (9)$$

$$C = \frac{Q - \phi}{Q + \phi}. \quad (10)$$

La estimación práctica usa PSDs y descomposición coherente/incoherente de lazo.

5.4 Velocidad coherencial v_Σ

$$v_\Sigma = \frac{c}{1 + \kappa_\Sigma^{-1}}, \quad (11)$$

que aproxima la tasa de transferencia de *información temporal* efectiva; $v_\Sigma \rightarrow c$ cuando la red está rigidamente bloqueada.

5.5 Diseño Entrópico: ΔH

Para ventanas W :

$$\Delta H = H(p_{\text{out}}) - H(p_{\text{in}}), \quad H(p) = - \sum_i p_i \log p_i, \quad (12)$$

donde p es distribución de eventos de fase/estado del lazo. Se exige $\Delta H < -0.2$ para declarar *precursor*.

6 Protocolo experimental

6.1 Fase A: Calibración VR

Simulación de red de relojes con perturbaciones controladas para ajustar los lazos y verificar KPIs:

1. Estimar $LI, \kappa_\Sigma, C, v_\Sigma, \Delta H$ en $N \geq 20$ corridas.
2. Ajustar ganancias del PLL para margen de fase $> 45^\circ$ y $\text{RMSE}_{SL} < 0.1$.

6.2 Fase B: Ensayos χ_1 (laboratorio)

1. Parear relojes (óptico-óptico y óptico-Cs) por fibra estabilizada.
2. Barrer perturbaciones: (i) ruido de tracción térmica, (ii) variación de altura Δh , (iii) jitter electrónico.
3. Medir las métricas por ventanas $p:q$; aplicar E-Veto.
4. Fijar *bitácora* JSON por ventana (hora ISO, LI , R , κ_Σ , margen de fase, ΔH , C , v_Σ , energía/tiempo).

6.3 Fase C: Interlaboratorio

1. Repetir con enlace remoto (fibra o free-space) a un segundo laboratorio.
2. Comparar κ_Σ y v_Σ ; buscar *gradientes estables* no explicables por entorno ni relatividad.

7 Criterios de decisión

Aceptación de consistencia:

$$\text{var}(\kappa_\Sigma) \leq \text{ppm}, \quad C > 0.9, \quad v_\Sigma \rightarrow c, \quad \text{repr} \geq 95\%. \quad (13)$$

Detección de extensión coherencial:

$$\exists \delta_\Sigma \neq 0 : \kappa_\Sigma^{(lab1)} - \kappa_\Sigma^{(lab2)} = \delta_\Sigma \quad (14)$$

reproducibile bajo permutación de roles y correcciones relativistas. En tal caso, se reporta un *Índice Σ -Temporal* (STI) por laboratorio:

$$\text{STI} \equiv \frac{\kappa_\Sigma}{\kappa_{\Sigma, \text{ancla}}} - 1. \quad (15)$$

8 Resultados esperados

- **Escenario 1 (consistencia):** v_Σ indistinguible de c dentro de incertidumbre; κ_Σ invariante; confirmación de que la métrica vigente del segundo *ya* representa un estado $\dot{\Sigma} \approx 0$.
- **Escenario 2 (extensión):** STI distinto de cero y estable por entorno; se propone adjuntar STI a reportes de tiempo de alta precisión como *metadato coherencial*.

9 Reproducibilidad y datos

KPIs: $LI \geq 0.9$, $R > 0.95$, $RMSE_{SL} < 0.1$, $\text{repr} \geq 95\%$.

Bitácora mínima por ventana (formato JSON):

```
{
  "t_window": "IS08601",
  "LI": 0.93, "R": 0.97, "RMSE_SL": 0.08,
  "kappa_Sigma": 0.74, "phase_margin_deg": 56,
  "DeltaH": -0.27, "C": 0.92, "vSigma_rel": 0.9999998,
  "energy_J": 32.1, "reproducible": true, "notes": "jitter 3%"
}
```

10 Discusión

La MCT no sustituye la definición SI; la *audita* en el eje de coherencia. Si no se detectan gradientes κ_Σ , la TCDS justifica por qué la evolución histórica hacia relojes atómicos corrigió la incoherencia astronómica: el patrón actual está en régimen de medición ($Q = \phi$). Si hay gradientes, la MCT ofrece una cantidad conservativa (STI) que *extiende* la trazabilidad sin contradecir la relatividad.

11 Autocrítica

Solidez: las métricas son explícitas, con KPIs y veto entrópico; el protocolo escala $VR \rightarrow \chi_1 \rightarrow \text{interlab}$.

Riesgos: estimar C requiere separar ruido coherente/incoherente con baja varianza; κ_Σ depende del modelado del lazo; v_Σ es una métrica derivada que no debe interpretarse como superación de c .

Cómo se llegó: se partió de su crítica sobre el origen astronómico del tiempo; se formalizó la medición como $\dot{\Sigma} = 0$; se introdujeron κ_Σ , C y v_Σ para cuantificar *coherencia temporal*; se establecieron criterios de aceptación y extensión coherencial con falsación por ΔH .

12 Conclusión

La MCT emplea la TCDS para ofrecer una vía *única y verificable* de auditar y, si procede, extender la métrica del tiempo sin alterar su núcleo SI: la causalidad se mide como *coherencia sostenida*. Si la red actual ya cumple el cierre LBCU, el resultado es confirmatorio; si aparecen gradientes coherenciales reproducibles, la salida es una corrección trazable (STI) que mejora la metrología sin romper la física vigente.

Apéndice: Metadatos JSON-LD del estudio

```
{
  "@context": "https://schema.org",
  "@type": "Dataset",
  "name": "Metrología Coherencial del Tiempo (MCT) | Protocolo TCDS",
  "description": "Métricas kappa_Sigma, C y v_Sigma para auditoría del segundo SI.",
}
```

```
"variableMeasured":["LI","R","RMSE_SL","kappa_Sigma","C","v_Sigma","DeltaH"],  
"measurementTechnique":["PLL coherencial","PSD de fase","E-Veto"],  
"license":"https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"  
}
```