

ΣMP — Protocolo de Métricas para TMRCU (Acople, Sincronización y Desincronización)

Base métrica unificada compatible con paradigmas clásicos y extendida al lenguaje de coherencia Σ

0) Principios

1) Compatibilidad: métricas adimensionales o con unidades estándar, comparables con Q, PSD, potencia, latencia. 2) Cierre matemático: definiciones con fórmulas y estimadores; ventanas, discretización y confianza. 3) Multi-escala: mismas nociones en dispositivo (SYNCTRON), compuertas (CΣA/CΣS/CΣD), matrices Σ, sistema (SAC). 4) Falsabilidad: cada métrica posee criterios de aceptación con umbrales explícitos.

1) Variables observables básicas

• Fase $\theta_k(t)$, amplitud $A_k(t)$, espectro $S_\phi(\omega)$, ancho de línea Δf . • Orden global (Kuramoto): $R(t) = (1/N) \sum e^{i\theta_k(t)} \mid \in [0,1]$. • Coherencia operativa (calibrada): $\Sigma = 1/(1+\Delta f/\Delta f_0)$ ó $\Sigma = 1 - (\Delta f/\Delta f_{\max})$.

2) Métricas núcleo

2.1 Coherencia / Descoherencia • Σ media en ventana W : $\Sigma_W = (1/|W|) \int_W \Sigma(t) dt$. • Índice de desincronización: $D_\Sigma = 1 - \Sigma_W$. • Entropía de coherencia: $H_\Sigma = - \int p(\Sigma) \log p(\Sigma) d\Sigma$.

2.2 Acoplamiento y locking • $K_{\text{eff}} \approx \Delta\omega_{\text{lock}} / |z_{\text{in}}|$ (pequeña señal). • Índice de locking: $LI = \mid \int e^{i(\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{in}})} \Sigma_W \mid$. • Área de lengua de Arnold (ATA): área en $(\omega_{\text{in}}, |z_{\text{in}}|)$ con $LI > \text{umbral}$.

2.3 Fidelidad de compuertas Σ • $F_{\{C\S A\}} = 1 - \text{NRMSE}(\Sigma_{\text{out}}, \Sigma_1 \cdot \Sigma_2)$; análogo para CΣS/CΣD.

2.4 Ganancia, latencia y energía • Ganancia $G_{\text{sync}} = (\partial R / \partial K_{\text{eff}})_{\{K^*\}}$; Latencia τ_ϵ : tiempo mínimo a $|\Sigma - \Sigma_{\text{tgt}}| \leq \epsilon$. • Coherencia por energía (CPW) = $(\Sigma_{\text{out}} - \Sigma_{\text{in}}) / E_{\text{op}}$.

2.5 Robustez y seguridad • Sensibilidad a ruido $S_{\text{noise}} = (\partial \Sigma_{\text{out}} / \partial \eta)_{\{\eta^*\}}$. • Margen de estabilidad: $\lambda_{\min}(J) < 0$ en el fijo de trabajo. • Cumplimiento CBF: $\rho_{\text{CBF}} = (1/T) \int I[h(x(t)) \geq 0] dt$.

3) Métricas por nivel

3.1 Dispositivo (ΣFET): $Q_\Sigma = f_0/\Delta f$; umbral de Hopf $u_{g^{\text{th}}}$; LI ; K_{eff} ; $\text{RMSE}_{\text{SL}} < 0.1$. 3.2 Compuerta (CΣA/CΣS/CΣD): Fidelidad F , τ_ϵ , CPW, S_{noise} , ρ_{CBF} , mapa de validez. 3.3 Circuito (matriz Σ): Orden R , $\text{MVC} = (T_{\text{gpu}}/T_\sigma)(E_{\text{gpu}}/E_\sigma)$, slip-rate. 3.4 Sistema (SAC/CSL-H): retorno a envolvente $[L, U]$, ΔR_n , ΔI , robustez inter-sesión ρ_{rep} .

4) Protocolo de medición

Ventanas y muestreo: ventana deslizante W con solape $\geq 50\%$; $f_s \geq 5 \times BW$. Pre-procesado: detrending, notch de red, whitening; $\theta_k(t)$ por Hilbert/PLL. Estimadores: $R(t)$, Σ (desde Δf), LI ; $\Delta\omega_{\text{lock}}$ por barrido; NRMSE por rejilla de puntos. Significancia: $\text{SNR} \geq 5$ para picos PSD; p-valor global corregido; IC por bootstrap. Controles: nulos, off-resonance, ciegos.

5) Criterios de aceptación (tiers)

Bronce: $RMSE_{SL} < 0.20$; $LI > 0.6$; $F \geq 0.80$; $MVC > 10$; ΔR_n significativo ($p < 0.05$). Plata: $RMSE_{SL} < 0.10$; $LI > 0.75$; $F \geq 0.90$; $MVC > 50$; ΔR_n & ΔI sig. en ≥ 2 cohortes. Oro: $RMSE_{SL} < 0.07$; $LI > 0.85$; $F \geq 0.95$; $\tau_{0.05} < 50$ ms; $\rho_{CBF} > 0.99$; $MVC > 100$; replicación multi-sitio.

6) Esquema de reporte (YAML)

```
sigmometrics: version: 1.0 device: Q_sigma: 1234 hopf_threshold_ug_mA: 12.8
RMSE_SL: 0.085 locking: LI: 0.81 Delta_omega_lock: 2.3e5 K_eff: 1.1e6 gates: CΣA:
fidelity: 0.93 tau_eps_ms: 74 CPW: 2.1e3 S_noise: 0.12 CΣD: fidelity: 0.91 D_sigma:
0.44 circuit: MVC: 128 R_final: 0.97 slip_rate: 0.002 system: delta_Rn: +0.07
(p=0.01) delta_I: -0.12 (p=0.03) rho_CBF: 0.995 provenance: window_s: 5.0 fs_Hz:
2000 CI_method: bootstrap
```