

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): $R(t) = |(1/N) \sum e^{i\theta_k(t)}| \in [0,1]$. • 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 • $K_{eff} \approx \Delta\omega_{lock} / |z_{in}|$ (pequeña señal). • Índice de locking: $LI = |\int e^{i(\theta_{out}-\theta_{in})} \Sigma_W|$. • Área de lengua de Arnold (ATA): área en $(\omega_{in}, |z_{in}|)$ con $LI >$ umbral.

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

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

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

3) Métricas por nivel

3.1 Dispositivo (Σ FET): $Q_\Sigma = f_0 / \Delta f$; umbral de Hopf u_g^{th} ; LI; K_{eff} ; RMSE_{SL}<0.1. 3.2 Compuerta (CΣA/CΣS/CΣD): Fidelidad F , τ_ε , CPW, S_{noise} , p_{CBF} , mapa de validez. 3.3 Circuito (matriz Σ): Orden R , MVC=(T_{gpu}/T_σ)(E_{gpu}/E_σ), slip-rate. 3.4 Sistema (SAC/CSL-H): retorno a envolvente [L, U], ΔR_n , ΔI , robustez inter-sesión p_{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; $\Delta\omega_{lock}$ por barrido; NRMSE por rejilla de puntos. Significancia: SNR ≥ 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≥0.80; MVC>10; ΔR_n significativo ($p<0.05$). Plata: RMSE_{SL}<0.10; LI>0.75; F≥0.90; MVC>50; ΔR_n & ΔI sig. en ≥2 cohortes. Oro: RMSE_{SL}<0.07; LI>0.85; F≥0.95; $\tau_{-0.05}<50$ ms; ρ_CBF>0.99; MVC>100; replicación multi-sitio.

6) Esquema de reporte (YAML)

```
sigmametrics: 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
```