

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: CSA:
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
```

Sincronón (σ) — Ficha Técnica v1

Proyecto TMRCU / MSL — Hoja de ruta experimental y de hardware

1) Definición y rol en la TMRCU

El Sincronón (σ) es el cuarto del campo de Sincronización Lógica Σ ; bosón escalar (spin 0) que media el acople de coherencia entre nodos del CGA. Al acoplarse con el sustrato χ (Materia Espacial Inerte) atenúa la aperiodicidad (ruido) y favorece estados de fase bloqueados; base para el enfriamiento por coherencia y los dispositivos SYNCTRON/SFET.

2) Lagrangiano mínimo y ruptura espontánea

Forma (texto plano):

$$\mathcal{L}_{\text{TMRCU}} = 1/2(\partial_\mu \Sigma)^2 + 1/2(\partial_\mu \chi)^2 - \Big[-1/2\mu^2 \Sigma^2 + 1/4\lambda \Sigma^4 + 1/2m_\chi \chi^2 \partial_\mu \chi^2 + (g/2)\Sigma^2 \chi^2 \Big]$$

Vacio: $\Sigma = \pm \sqrt{\mu^2/\lambda}$.

3) Espectro y vértices alrededor del vacío

Masa del Sincronón: $m_\sigma = \sqrt{2}\mu$.

| Vértice | Factor de acople |
|------------------|------------------|
| σ^3 | $3\lambda\Sigma$ |
| $\sigma\chi$ | 6λ |
| $\sigma\chi^2$ | $g\Sigma$ |
| $\sigma^2\chi^2$ | g |

4) Dinámica efectiva de coherencia (Stuart–Landau)

Ecuación (texto plano):

$$\dot{z} = (\mu_{\text{eff}} + i\omega)z - (1 + i\gamma)|z|^2z + Kz_{\text{in}}$$

Predicciones: umbral de Hopf, injection locking (lengua de Arnold), estrechamiento de línea ($\Delta f \downarrow$ con $|z| \uparrow$).

5) Producción y detección (canales preferentes)

A) Mesa de laboratorio: (i) SYNCTRON/SFET magnónico (SHNO/STNO): curva $\Sigma(u_g)$, umbral reproducible, locking y reducción de ruido; (ii) Cavidades fotónicas/Josephson paramétricas: conversión $\sigma \leftrightarrow$ fotón/fase; (iii) Espectroscopía de ruido de fase $S_\phi(\omega)$. B) Colisionadores (opcional): resonancia escalar si se implementa portal a SM.

6) Escalas y dominios de parámetros (guías)

Escalas libres a fijar por experimento: $m_\sigma \sim \text{MHz-GHz}$ (modo cuasi-colectivo de dispositivo) o eV–GeV (portal). $g \in [10^{-12}, 1]$ (dispositivo) con $\lambda > 0$ para estabilidad. Ancho Γ_σ gobernado por disipación en χ .

7) Métricas de validación (falsabilidad)

- Curva $\Sigma(u_g)$: ajuste a Stuart–Landau con RMSE < 0.1 y umbral estable ($F1 \rightarrow F2$).

- Injection locking: ancho de captura $\Delta\omega \approx |z_{in}|$; reproducible por dispositivo.
- Estrechamiento de línea: caída significativa de Δf al activar control Q_control.
- Repetibilidad: $\geq 3-5$ celdas por wafer con dispersión $\leq 10-15\%$.

8) Integración Σ -hardware (SYNCTRON/ Σ FET)

Gate u_g ajusta μ_{eff} (ganancia) y el bus Σ implementa K (acople). Celdas Σ : $C\Sigma A$ (acople \approx producto), $C\Sigma S$ (sincronización \approx máximo), $C\Sigma D$ (desincronización \approx diferencia absoluta). Re-phase periódico para $P(x \in \blacksquare) \geq 0.99$.

9) Parámetros principales

| Parámetro | Significado | Unidad | Impacto |
|----------------------|---------------------------------|--------|------------------------------------|
| μ | Escala de ruptura en V_Σ | masa | Fija $m_\sigma = \sqrt{2} \mu$ |
| λ | Autoacople de Σ | — | Estabilidad y no linealidad |
| g | Acople $\Sigma-\chi$ | — | Transducción/damping; controla K |
| m_χ | Masa/susceptibilidad de χ | masa | Respuesta del sustrato |
| $\Sigma\blacksquare$ | VEV de Σ | — | Aparece en vértices trilineales |
| μ_{eff}, K | Ganancia y acople efectivos | — | Controlados por gate/bus |

Checklist Técnico Integral — Sincronón → Sincronograma (TMRCU)

Versión: v1.0 • Proyecto TMRCU / MSL

Fecha: 2025-08-15

Documento de control operativo para laboratorio y desarrollo: checklists y KPIs por fase, alineados al contrato Stuart–Landau/Σ y al objetivo de alcanzar el nivel necesario en el Sincronograma humano.

Fase 1a — Física y Metroología Cuántica (Pre-fabricación)

Instrumentación mínima (lab RF/cuántica)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-------------------------|--|--------|
| Fuente DC mA | 0–50 mA, resolución $\leq 10 \mu\text{A}$, bajo ruido, protección térmica | ■ |
| Generador RF | 1–20 GHz, salida +10 dBm, FM/AM/PM opcional | ■ |
| Analizador espectro/VNA | >20 GHz, RBW $\leq 1 \text{ kHz}$ para linewidth (Δf) | ■ |
| Lock-in / Fase | Sensibilidad $\geq 10 \text{ nV}$, referencia externa | ■ |
| Estación de sondas RF | Líneas coplanares 50Ω , calibración SOLT | ■ |
| Control térmico | Criostato 77–350 K o hotplate estable | ■ |
| Blindaje/EMI | Cables coaxiales, caja Faraday, ferritas | ■ |

Protocolos cuánticos (observables falsables)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|--------------------------------|--|--------|
| Bifurcación de Hopf | Trazo $\Sigma(u_g)$ y aparición de oscilación auto-sostenida | ■ |
| Injection locking | Lenguas de Arnold; medir $\Delta\omega$ vs $ RF_{in} $ (1f y 2f) | ■ |
| Linewidth Δf | Estrechamiento de línea con $ z ^\uparrow$ (ganancia μ) | ■ |
| PSD de fase $S\varphi(\omega)$ | Caída del ruido de fase al activar control | ■ |
| Histéresis | Barridos ascendentes/descendentes u_g ; reproducibilidad | ■ |

Análisis de datos (Stuart–Landau)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|----------------------|--|--------|
| Ajuste $\Sigma(u_g)$ | Fitting SL \rightarrow RMSE < 0.10 | ■ |
| Extracción μ, K | IC95 %; estabilidad ante ruido | ■ |
| Validación cruzada | Seeds múltiples; χ^2 de bondad de ajuste | ■ |
| Reporte estándar | CSV: u_g , potencia, Δf , fase; figura $\Sigma(u_g)$ | ■ |

Fase 1b — Plataforma de Materialización (Materiales y Nanofabricación)

Pilas y materiales (ejemplos; adaptar a fab)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-----------------|--|--------|
| Stack magnónico | W/CoFeB/MgO/Ta (u otros), rugosidad <0.3 nm RMS | ■ |
| Espesores | W: 3–5 nm; CoFeB: 1.2–1.8 nm; MgO: 1–2 nm (ejemplo) | ■ |
| Deposición | Sputter DC/RF con base <5e-7 Torr; uniformidad <±5 % | ■ |
| Anneal | 250–350 °C, 30–60 min, N2; validar anisotropía | ■ |
| Caracterización | VSM/MOKE para Ms/Hk; TEM/AFM para estructura | ■ |

Litografía y etching

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|------------------------|---|--------|
| Definición nanogap | EBL o DUV; ancho 50–200 nm (variantes A/B/C) | ■ |
| Grabado/ion milling | Control de sidewall y subgrabar MgO si aplica | ■ |
| Metalización contactos | Au/Cu con barrera; baja Rc; passivation | ■ |
| Wafer map | ≥20–50 celdas por diseño para selección por curva | ■ |

Bring-up de wafer

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-------------------------|--|--------|
| Prueba eléctrica DC | IV de continuidad y Rc por celda | ■ |
| RF S-params | S11/S21 en banda; matching a 50 Ω | ■ |
| Uniformidad intra-wafer | ≤10–15 % en Δf, potencia, umbral Hopf | ■ |
| Selección por curva | Elegir ≥3 celdas por diseño para Fase 1c | ■ |

Fase 1c — Validación Σ FET (P0)

PCB/Fixturas y red RF

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|---------------------|--|--------|
| Líneas CPW 50 Ω | Longitud mínima; transiciones SMA bien definidas | ■ |
| Aislamiento térmico | Sensor T en zócalo; registro continuo | ■ |
| Referencias | Marcadores de fase para lock-in y sincronización | ■ |

Medición principal (contrato SL)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-------------------|--|--------|
| Barrido u_g | Pasos de 50–100 μA; registro Δf/potencia/fase | ■ |
| Ajuste SL | RMSE < 0.10; curva $\Sigma(u_g)$ con umbral reproducible | ■ |
| Injection locking | Barrido de f_in; medir Δω y estabilidad | ■ |
| Histéresis | Barrido inverso; documentar región y ancho | ■ |
| Mini-arrays | 2x2: sincronía mutua y divisores de fase básicos | ■ |

Gate F1→F2 (aceptación)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|----------------------|---------------------------------|--------|
| RMSE < 0.10 | Contrato SL verificado | ■ |
| Hopf estable | Umbral consistente dentro ±10 % | ■ |
| Locking reproducible | Δω medible en ≥2 modos (1f/2f) | ■ |
| Repetibilidad | ≥3 celdas/wafer dentro ±10 % | ■ |

Fase 2 — Lógica Σ y Procesador 32x32

Celdas Σ (caracterización)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|---------------------------------|--|--------|
| C Σ A (Acople) | $y \approx x_1 \cdot x_2$; error RMSE_lógica < 0.10 | ■ |
| C Σ S (Sincronización) | $y \approx \max(x_1, x_2)$; RMSE_lógica < 0.10 | ■ |
| C Σ D (Desincronización) | $y \approx x_1 - x_2 $; RMSE_lógica < 0.10 | ■ |
| Σ -Latch | Retención estable; jitter de fase bajo reloj | ■ |

Integración 32x32

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-----------------|---|--------|
| Topología | 'Small-world': acople local + atajos | ■ |
| Ruteo RF | Impedancias controladas; simetría de fase | ■ |
| Autocalibración | μ, K por Σ -IR en startup | ■ |
| Telemetría | Monitores Δf , locking, R_global | ■ |

Benchmark Kuramoto-1024

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|--------------|--|--------|
| Dataset | ω_k (Lorentz), A_{kj} (small-world), θ_0 uniformes | ■ |
| R_global | Objetivo ≥ 0.95 | ■ |
| MVC | ≥ 100 vs GPU: medir T_{σ}/E_{σ} y T_{gpu}/E_{gpu} | ■ |
| Error lógico | <1e-3 en 10^5 ciclos | ■ |

Fase 3 — CSL-H y SAC

CSL-H (piloto ‘órgano’)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|---------------|---|--------|
| Sensores | EEG/ECG/PPG/IMU/Temp; sampling constante | ■ |
| Modelo | R_n, R_s, I con filtros de estado en Σ | ■ |
| KPIs clínicos | AUC ≥ 0.85 ; lead $\geq 5-7$ días (endpoint) | ■ |
| Validación | Pre-registro y protocolo ciego donde aplique | ■ |

Σ -OS y Compilador (3b)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|--|---|--------|
| Planificador | Determinista con presupuesto de coherencia | ■ |
| Memoria Σ | Gestión de estados/fases con jitter acotado | ■ |
| Compilador Synk \rightarrow Σ -IR | Optimiza μ, K ; verificación runtime | ■ |
| CBFs | Barreras de control activas (seguridad) | ■ |

CSL-H completo + SAC (3c)

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|----------------|---|--------|
| Sincronograma | Huella Σ multiescala ($\Sigma_g, \Sigma_c, \Sigma_s, \Sigma_n$) | ■ |
| Intervenciones | Políticas bayesianas; límites CBF activos | ■ |
| KPIs | $\Delta R_n \uparrow, \Delta I \downarrow$ con $p < 0.05$; SLAs Σ -OS | ■ |
| Privacidad | Cifrado y gobernanza (consentimiento granular) | ■ |

Fase 4.0 — Biobanco de Coherencia y Ética

Estudio longitudinal

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|------------------|--|--------|
| Cohortes | $\geq 5\,000$ sujetos; ≥ 12 meses | ■ |
| Retención | $\geq 85\%$; incentivos éticos | ■ |
| Esquema de datos | Σ -IR del Sincronograma + metadata | ■ |
| Gobernanza | Acceso federado, auditoría, consentimiento | ■ |

Fase 4 — SAC-EMERG (Despliegue Social)

Pipeline AEL/PGI

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-----------------|---|--------|
| Detección aguda | Tiempo < 1 s (edge) | ■ |
| Riesgo PGI | Calibración por Sincronograma | ■ |
| Notificación | $t_{notif} < 30$ s a 911/112 y contactos | ■ |
| KPIs | $\kappa > 0.6$; FP/FN bajo umbrales clínicos | ■ |

Módulos TCA y CNH

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-----------|--|--------|
| TCA | UWB/mmWave/EIT para mapa 3D; decisión por Σ | ■ |
| CNH | Registro 10–15 s del Sincronograma; hash/firmas | ■ |
| Seguridad | TLS, almacenamiento endurecido | ■ |
| Legal | Política de acceso forense y caducidad | ■ |

Apéndice A — Ecuaciones y Definiciones

Ecuación de Stuart–Landau (modo coherente):

$$\dot{z} = (\mu_{eff} + i\omega)z - (1+i\zeta)|z|^2 z + K z_{in}$$

Contrato $\Sigma(u_g)$ y criterios:

- Ajuste SL con RMSE < 0.10
- Umbral de Hopf reproducible
- Locking con $\Delta\omega(|z_{in}|)$ medible
- $\Delta f \downarrow$ con $|z| \uparrow$

Apéndice B — Plantillas de Datos (CSV)

Archivos mínimos

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|------------------------|---|--------|
| F1c_Sigma_vs_ug.csv | u_g , potencia, Δf , fase, Σ | ■ |
| F2_Kuramoto_inputs.zip | $\omega_k.csv$, $A_{kj}.csv$, $\theta_0.csv$ | ■ |
| F3_SAC_metrics.csv | timestamp, R_n , R_s , I, acción, resultado | ■ |

Apéndice C — Materiales y BOM (ejemplo)

BOM resumido

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-----------------|---|--------|
| Sustratos/wafer | Si/SiO ₂ ■ 100–200 mm | ■ |
| Metales | W, Ta, CoFeB, Au/Cu (contactos) | ■ |
| Dieléctricos | MgO, SiN/SiO ₂ (passivation) | ■ |
| Conectividad RF | SMA/SMK, CPW 50 Ω, cables semi-rígidos | ■ |

Apéndice D — Riesgos y Mitigaciones

Riesgos técnicos

| Ítem | Especificación / Descripción | Status |
|-------------------|--------------------------------------|--------|
| Deriva térmica | Control T, duty-cycle, blindaje | ■ |
| Crosstalk RF | Separación, apantallado, filtros | ■ |
| Variabilidad fab | DOE, SPC, selección por curva | ■ |
| Seguridad clínica | CBFs, auditoría, telemetría Σ | ■ |