

# TMRCU — Manual de Banco Expandido (v3)

## SYNCTRON/ $\Sigma$ FET → RE█Q (Rectificador de Empuje Cuántico)

**Propósito:** Guía consolidada y paso a paso para preparar  $\Sigma$  alto, imponer un gradiente  $\Delta\phi$ , acoplar un transductor perimetral y auditar la firma  $DC \approx \Delta\phi$  con criterios TMRCU. Incluye metas cuantitativas basadas en literatura reciente (SHNO, VO█, PMN█PT, rectificadores Schottky).

## Seguridad y consideraciones

- 1 • Blindaje EM (caja Faraday, ferritas, tierra única).
- 2 • Control térmico de banco (sondas y/o cámara térmica).
- 3 • Protecciones ESD para dispositivos nano/micro.
- 4 • Precaución con láseres/óptica si aplica (gafas certificadas).

## Materiales y equipos (BOM resumida)

Bloque	Ítem	Especificación/nota
Núcleo $\Sigma$ FET	Ruta A: SHNO	5–20 GHz; umbral IDC ~0.45–2.5 mA (según material)
	Ruta B: VO█	Osciladores de transición Mott; sub-harmonic injection locking
	Ruta C: VCO CMOS	LC/divisores; mapeo de lenguas de Arnold
Inyección	Generador RF	–60 a 0 dBm (resolución $\leq$ 0.5 dB); 2f█drive opcional
Medición	Analizador/VNA	RBW $\leq$ 1 kHz; medición de linewidth y locking
Control	Bias/T█Bias, fuentes	u_g/corriente/campo; controlador PID/SMC
Transductor	Aro piezo PMN█PT	d33~1500–2000 pC/N; k33~0.9 (single crystal)
	Rectificador Schottky	Ej.: SMS7630; RF→DC $\mu$ W (2.4 GHz)
	Termoeléctrico (opcional)	Par Seebeck micrométrico

## Fase 0 — Calibración y cierres operativos ( $\Sigma$ , $\phi$ , Q)

**Objetivo:** Fijar observables y normalizaciones internas ( $\Sigma$ ,  $\phi$ , Q) con instrumentos.

1. Calibrar cadena RF (generador→línea→probeta): medir pérdidas con VNA.
2. Caracterizar régimen libre del oscilador: f<sub>0</sub>, Δf, ruido de fase; registrar como baseline (CSV ΣMP).
3. Definir proxies: R o LI para  $\Sigma$ ; linewidth/ruido de fase como proxy de  $\phi$ ; tironeo/locking bandwidth como proxy de Q\_ctrl.
4. Validar trazabilidad temporal: reloj del banco y marcas de tiempo ISO en CSV.

## Fase 1 — Preparar "vacío coherente" ( $\Sigma_{int} \rightarrow 1$ )

Criterios ΣMP:  $R \geq 0.95$  o  $LI \geq 0.90$ ; RMSE\_SL < 0.10; reproducibilidad  $\geq 95\%$  (100 ciclos).

1. Estabilizar temperatura y campo (si aplica) del núcleo ΣFET (SHNO/VO<sub>0</sub>/CMOS).
2. Barrido de inyección PRF: iniciar en -60 dBm y aumentar en pasos de 2 dB; buscar primera evidencia de locking.
3. SHNO (referencia): primer signo de locking  $\sim -50$  dBm; registrar lenguas de Arnold (PRF vs detuning).
4. VO<sub>0</sub> (referencia): con sub-harmonic injection locking, estabilización típica en < 25 ciclos.
5. Cerrar lazo de control (PID/SMC) para mantener  $\Sigma$  en setpoint:  $LI \geq 0.90$  o  $R \geq 0.95$  sostenido ( $\geq 10$  min).

Plataforma	Meta cuantitativa (guía)	Referencia
SHNO	Primer locking detectable cerca de -50 dBm	Nanoscale Horizons (2024)
VO <sub>0</sub>	Estabiliza solución en < 25 ciclos	Nature Communications (2024)
CMOS	Mapeo de Arnold para delimitar captura	Literatura de inyección CMOS

## Fase 2 — Frontera y gradiente $\Delta\phi$

Objetivo: crear dos regiones con fricción efectiva contrastada: interior  $\Sigma_{int} \rightarrow 1$  ( $\phi_{int} \approx 0$ ) y exterior  $\Sigma_{ext} \rightarrow 1$  ( $\phi_{ext} > 0$ ).

1. Configurar anillo perimetral (ext) con osciladores en  $\Sigma$  bajo o región resistiva; mantener núcleo (int) con  $\Sigma$  alto.
2. Tomografía espacial de linewidth y ruido: construir mapa  $\phi(x)$  operativo; estimar  $\Delta\phi/\phi_{ext}$ .
3. Criterio:  $\Delta\phi/\phi_{ext} \geq 0.5$  sostenido 10 min sin perder locking interno.
4. Control térmico: verificar que variaciones de  $T$  no expliquen  $\Delta\phi$ ; anotar  $T(x,t)$ .

## Fase 3 — Transductor de frontera y rectificación

Acoplar un transductor en la isofrontera de mayor  $\nabla\phi$ . Recomendación: aro piezo PMN $\blacksquare$ PT (single crystal) o rectificador Schottky.

### Opción A — Piezoelectrónico (PMN $\blacksquare$ PT)

- 1 • Aro PMN $\blacksquare$ PT (orientación [001] poleada): buscar  $d_{33} \sim 1500\text{--}2000 \text{ pC/N}$ ;  $k_{33} \sim 0.9$ .
- 2 • Montaje mecano $\blacksquare$ eléctrico rígido y reproducible; evitar resonancias parásitas en banda.
- 3 • Calibrar sensibilidad estática (mV/N) y dinámica (mV/Pa) con excitación controlada.

### Opción B — Rectificador RF (Schottky)

- 1 • Rectificador RF $\rightarrow$ DC (ej.: SMS7630) con filtro paso bajo; diseñar matching para banda de trabajo.
- 2 • Barridos con potencia de entrada baja:  $-20$  a  $-10 \text{ dBm}$  (2.4 GHz es una guía bibliográfica).
- 3 • Medir  $V_{out}/I_{out}$  sobre cargas conocidas ( $10 \text{ k}\Omega$  $\text{--}1 \text{ M}\Omega$ ) y registrar dependencias con  $\Delta\phi_{norm}$ .

**Señal objetivo (pre $\blacksquare$ PoC):** Componente DC  $\propto \Delta\phi_{norm}$ , por encima de ruido base y controles nulos.

## Medición, adquisición de datos y ajuste

1. Barridos de  $\Delta\phi$ : variar K y/u\_g para modificar  $\Sigma_{ext}$  manteniendo  $\Sigma_{int}$  alto; registrar  $\Delta\phi_{norm}$ .
2. Por cada punto: V\_out, I\_out, P\_out (=V\*I), carga, T, modo de blindaje, tipo de transductor.
3. Ajuste P\_out vs  $\Delta\phi_{norm}$ : tendencia lineal con pendiente m>0; reportar m, intercepto e intervalos.
4. Validación  $\Sigma$ : simultáneamente registrar R, LI, linewidth y RMSE\_SL para verificar  $\Sigma$  alto.

Criterio	Valor/condición
$\Sigma$ alto	$R \geq 0.95$ o $LI \geq 0.90$ ; $RMSE_{SL} < 0.10$ (10 min)
Frontera	$\Delta\phi/\phi_{ext} \geq 0.5$ (10 min) con control térmico
Firma RE■Q	$DC \propto \Delta\phi_{norm}$ ; $m > 0$ ( $p < 0.05$ ) en ajuste lineal
Autosostén (opcional)	$\geq 10\%$ de P_control desde P_out por 60 s sin degradar $\Sigma$

## Null tests y controles

- 1 • Invertir fase de inyección ( $0^\circ \leftrightarrow 180^\circ$ ): la señal DC debe cambiar de signo o anularse.
- 2 • Reducir  $K \rightarrow 0$  (desacoplar):  $\Delta\phi_{norm} \rightarrow 0$  y  $DC \rightarrow 0$ .
- 3 • Swaps ciegos: sustituir módulo activo por réplica pasiva térmica/eléctrica;  $DC \rightarrow 0$ .
- 4 • Caja Faraday / líneas balanceadas: descartar acoplos EM no intencionales.
- 5 • Calorimetría local: descartar gradientes térmicos como causa de DC.

**Interpretación TMRCU (autoconsistencia):** Si con  $\sum KPI$  cumplidos y  $\Delta\phi$  significativo no aparece  $DC \approx \Delta\phi$ , la hipótesis RE■Q se considera refutada *en ese régimen*.

## Solución de problemas (rápida)

Síntoma	Acciones
No aparece locking	Verificar pérdidas RF; subir PRF en pasos de 2 dB; revisar detuning; comprobar ca...
$\Sigma$ inestable (LI/R fluctúan)	Ajustar PID/SMC; mejorar blindaje térmico; reducir ruido de fuente.
$\Delta\phi$ no sostenido	Optimizar anillo exterior; desacoplar térmicamente; revisar uniformidad de sesgo u...
DC presente sin $\Delta\phi$	Sospecha acoplos EM o térmicos; ejecutar null tests; revisar masas/tierra.
Falsos positivos en piezo	Resonancias mecánicas; verificar con excitación mecánica controlada fuera de ba...

## Checklist imprimible — Paso a paso

Paso	Acción	OK	Notas
F0.1	Calibración de línea RF y pérdidas	[ ]	
F0.2	Baseline $f_{\text{RF}}$ , $\Delta f$ , ruido; CSV $\Sigma \text{MP}$	[ ]	
F1.1	Barrido PRF; detectar primer locking	[ ]	
F1.2	Cerrar lazo PID/SMC; $\Sigma$ alto estable	[ ]	
F1.3	Mapas de Arnold (captura/detuning)	[ ]	
F2.1	Configurar anillo $\Sigma_{\text{ext}}$ bajo	[ ]	
F2.2	Tomografía linewidth/ruido $\rightarrow \Delta\phi_{\text{norm}}$	[ ]	
F2.3	$\Delta\phi/\phi_{\text{ext}} \geq 0.5$ (10 min)	[ ]	
F3.1	Montar transductor (PMN-PT/Schottky)	[ ]	
F3.2	Barridos $\Delta\phi_{\text{norm}}$ vs V/I/P_out	[ ]	
F3.3	Ajuste lineal $m > 0$ ; $p < 0.05$	[ ]	
NT.1	Inversión de fase (0/180°)	[ ]	
NT.2	K $\rightarrow$ 0 (desacople) $\rightarrow$ DC $\rightarrow$ 0	[ ]	
NT.3	Swaps ciegos (pasivos)	[ ]	
NT.4	Faraday / balanceadas / térmico	[ ]	

## Referencias técnicas (para metas cuantitativas)

- 1 • SHNO — F. Alemán et al., "Phase and frequency resolved microscopy of operating SHNO arrays," *Nanoscale Horizons*, 2024: primer signo de locking  $\approx -50$  dBm; ancho de banda  $\propto \sqrt{P_{RF}}$ .
- 2 • VO — O. Maher et al., "A CMOS-compatible oscillation-based VO Ising machine solver," *Nature Communications*, 2024: estabilidad  $< 25$  ciclos con bloqueo subarmónico.
- 3 • PMN-PT — JFE Technical Report No. 27 (2022): d33 hasta  $\sim 2000$  pC/N; k33≈0.9; uniformidad y proceso continuo—Bridgman.
- 4 • Rectificador Schottky — J. Du et al., *Sensors*, 2024: rectificador 2.4 GHz eficiente a  $-20...-10$  dBm (SMS7630); Y. Zhang et al., 2024 (Elsevier review): ventajas Schottky (Vf baja, conmutación rápida).