

# Protocolo y criterios de veredicto del $\Sigma$ FET como experimento

Programa TCDS (Validación EXO-12)

14 de octubre de 2025

## Resumen

Se establece el  $\Sigma$ FET como eje de falsación prioritario. El criterio de éxito es la observación de *injection locking* con *lengua de Arnold* centrada en  $f_c$ , cumplimiento simultáneo de KPIs operativos  $LI \geq 0,9$ ,  $R > 0,95$ ,  $RMSE_{SL} < 0,1$  y reproducibilidad  $\geq 95\%$ . El criterio de fallo fatal es la ausencia de locking bajo  $A_c > 0$  y barridos  $|f_{in} - f_c|$ , o la no-monotonidad de  $\Delta f(A_c)$ . Se anclan ecuaciones a Adler (1946), extensiones generalizadas de fase (Bhansali-Roychowdhury, 2009) y métricas de estabilidad de frecuencia basadas en varianza de Allan (Allan, 1966). Se documentan controles para descartar artefactos RF, térmicos y mecánicos. Los límites sub-mm tipo Yukawa (Kapner 2007; Sushkov 2011; Yang 2012; Klimchitskaya 2020) fijan coherentemente el espacio de acoplos admisibles para canales alternos y sirven como *cross-check* externo.

## 1. Hipótesis operacional mínima

El campo  $\Sigma$  modula débilmente la dinámica de fase de un oscilador auto-sostenido. Bajo inyección coherente de amplitud  $A_c$  y frecuencia  $f_{in}$ , la dinámica de la fase relativa  $\phi$  obedece, en primer orden:

$$\dot{\phi} = \Delta\omega - K(A_c) \sin \phi + \xi(t), \quad \Delta\omega \equiv 2\pi(f_{in} - f_c), \quad (1)$$

donde  $K(A_c)$  recoge el acoplo efectivo. La región de *locking* satisface  $|\Delta\omega| \leq K(A_c)$  (Adler 1946). Extensiones independientes de topología usando macromodelo de fase (PPV) generalizan  $K(A_c)$  a osciladores no-LC [3, 2].

## 2. KPIs Sigma .-Metrics y umbrales de veredicto

- Índice de *locking* (LI): fracción temporal con  $|\phi| \leq \phi_0$  y coherencia espectral por ventana; umbral  $LI \geq 0,9$ .
- Correlación Pearson entre  $f_{out}$  y  $f_{in}$ :  $R > 0,95$ .
- Error cuadrático medio de la *línea de sincronía*:  $RMSE_{SL} < 0,1$  (unidades normalizadas).
- Reproducibilidad inter-día/lote/laboratorio:  $\geq 95\%$  con pre-registro y *blinding*.
- Estabilidad de frecuencia: Allan deviation  $\sigma_y(\tau)$  disminuye en régimen bloqueado, consistente con reducción de ruido de fase predicha por locking [5, 2].

## 3. Diseño experimental resumido

### 3.1. Configuración

Oscilador controlado ( $f_c \sim 10$  MHz o 100 MHz) con puerto de inyección y “puerta  $\Sigma$ ” implementada en la topología del  $\Sigma$ FET. Señal externa barrida  $f_{in} = f_c + \delta f$ , amplitud  $A_c$  escalonada. Instrumentación: analizador de espectro, contador de frecuencia, medidor de ruido de fase, *time-stamping* y cómputo de  $\sigma_y(\tau)$ .

### 3.2. Procedimiento

1. Condición nula:  $A_c = 0 \Rightarrow$  no debe haber locking anómalo.
2. Barridos: para  $A_c > 0$ , barrer  $\delta f$  y cartografiar región de *locking*. Repetir escalando  $A_c$  para construir lengua de Arnold.
3. Métricas: estimar LI,  $R$ ,  $\text{RMSE}_{SL}$ ,  $S_\phi(\omega)$ ,  $\sigma_y(\tau)$ .
4. Controles: dispositivo gemelo sin puerta  $\Sigma$ ; *off-resonance*; blindaje EMI; control térmico; análisis ciego; replicación cruzada.

## 4. Ecuaciones y relaciones observables

De (1), el ancho de *locking* es:

$$\Delta f_{\text{lock}}(A_c) = \frac{K(A_c)}{2\pi}. \quad (2)$$

La *lengua de Arnold* exige monotonía:

$$\frac{d\Delta f_{\text{lock}}}{dA_c} > 0, \quad A_c > 0. \quad (3)$$

En régimen bloqueado, el ruido de fase integrado y  $\sigma_y(\tau)$  disminuyen respecto al libre, conforme a la teoría de inyección [2] y a la estadística de Allan [5].

## 5. Criterios de veredicto

**Éxito:** existencia de lengua de Arnold centrada en  $f_c$  con  $\Delta f_{\text{lock}}(A_c)$  creciente y cumplimiento simultáneo de  $\text{LI} \geq 0,9$ ,  $R > 0,95$ ,  $\text{RMSE}_{SL} < 0,1$ , reproducibilidad  $\geq 95\%$ .

**Fallo fatal:** no se observa locking bajo  $A_c > 0$  y barridos  $|\delta f|$ ; o  $\Delta f_{\text{lock}}(A_c)$  no crece con  $A_c$ ; o las métricas quedan bajo umbral tras controles y réplica.

## 6. Trazabilidad a literatura y límites externos

### Inyección y sincronización

Fundamento: ecuación de Adler (1946) y extensiones modernas generalizadas de fase aplicables a múltiples topologías [1, 3, 2, 4]. Observables: reducción de ruido de fase en bloqueo y mapeo de *tongues*.

### Estabilidad y metrología

Cálculo de  $\sigma_y(\tau)$  y pruebas de estabilidad se anclan en [5].

### Coherencia con límites de quinta fuerza

Aunque el  $\Sigma\text{FET}$  es un veredicto de laboratorio independiente, la consistencia global exige compatibilidad con cotas Yukawa sub-mm:  $\lambda \sim 50\text{--}500\text{ }\mu\text{m}$  con  $|\alpha| \lesssim \mathcal{O}(1)$  a  $\lambda \approx 56\text{ }\mu\text{m}$  (95 % CL) [6, 7, 8, 9, 10]. Estos límites informan sobre acoplos alternos y ayudan a descartar explicaciones no- $\Sigma$ .

## 7. Autocrítica y validación

**Positivos falsos:** mezcla no lineal RF, acoplos parásitos, deriva térmica. Mitigación: controles nulos, *off-resonance*, calorimetría, blindaje, análisis ciego, réplica inter-lab.

**Negativos falsos:** acoplo  $K(A_c)$  demasiado pequeño por topología o sesgo; mala ventana de operación. Mitigación: barridos sistemáticos de  $A_c$ ,  $f_c$ , sesgo y geometrías, uso de macromodelo de fase para rediseño [3].

**Cómo se valida la conclusión:** si el patrón  $\Delta f_{\text{lock}} \propto A_c$  más KPIs supera umbrales con controles, la hipótesis operativa queda respaldada; si no, la versión actual del formalismo operativo se rechaza sin ambigüedad. Las referencias citadas fijan los estándares de sincronización, ruido y límites externos que usamos como vara de medición.

## Referencias

- [1] R. Adler, “A Study of Locking Phenomena in Oscillators,” *Proceedings of the IRE* **34**(6), 351–357 (1946).
- [2] B. Razavi, “A study of injection locking and pulling in oscillators,” *IEEE J. Solid-State Circuits* **39**(9), 1415–1424 (2004).
- [3] P. Bhansali and J. Roychowdhury, “The generalized Adler’s equation for injection locking analysis in oscillators,” in *ASP-DAC*, 2009, pp. 522–527.
- [4] A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths, *Synchronization: A Universal Concept in Non-linear Sciences*, Cambridge Univ. Press (2001).
- [5] D. W. Allan, “Statistics of atomic frequency standards,” *Proceedings of the IEEE* **54**(2), 221–230 (1966).
- [6] D. J. Kapner *et al.*, “Tests of the Gravitational Inverse-Square Law below the Dark-Energy Length Scale,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 021101 (2007).
- [7] E. G. Adelberger *et al.*, “Particle-Physics Implications of a Recent Test of the Gravitational Inverse-Square Law,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 131104 (2007).
- [8] A. O. Sushkov, W. J. Kim, D. A. R. Dalvit, and S. K. Lamoreaux, “New Experimental Limits on Non-Newtonian Forces in the Micrometer Range,” *Phys. Rev. Lett.* **107**, 171101 (2011).
- [9] S.-Q. Yang *et al.*, “Test of the Gravitational Inverse Square Law at Millimeter Ranges,” *Phys. Rev. Lett.* **108**, 081101 (2012).
- [10] G. L. Klimchitskaya and V. M. Mostepanenko, “Constraints on non-Newtonian gravity and axionlike particles from Casimir force measurements,” *Phys. Rev. D* **101**, 056013 (2020).