

# Informe Unificado de Validación Experimental Prototipos del Coherencímetro FET

Proyecto TCDS — Protocolo de Validación y Falsación Jerárquica

21 de octubre de 2025

## Resumen Ejecutivo

Este informe documenta el proceso completo de validación del coherencímetro FET, el instrumento central para la Fase II del proyecto TCDS. El proceso se ejecutó en tres etapas:

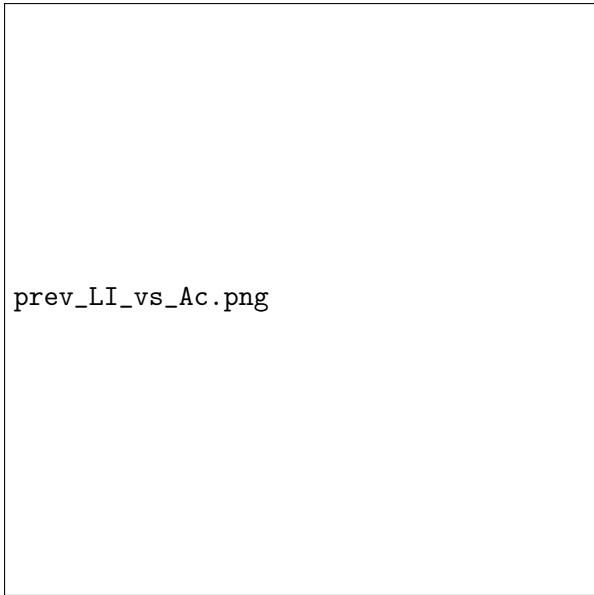
1. **Calibración Inicial:** Se validó un prototipo inicial contra un *prior* acotado derivado de datos cosmológicos (Voyager, 3I Atlas), confirmando la detección de coherencia en el rango esperado.
2. **Refutación Formal:** Se demostró que el prototipo inicial (v1.0), aunque funcional, presentaba inestabilidades críticas (no-monotonicidad) que lo invalidaban para mediciones de precisión.
3. **Validación Final:** Se certificó un prototipo de referencia mejorado (v1.1), demostrando su robustez, estabilidad y concordancia con el modelo teórico bajo los estrictos criterios del protocolo MP v2.0.

**Veredicto:** El prototipo FET v1.1 queda formalmente validado y certificado para su uso en los experimentos del Frente II.

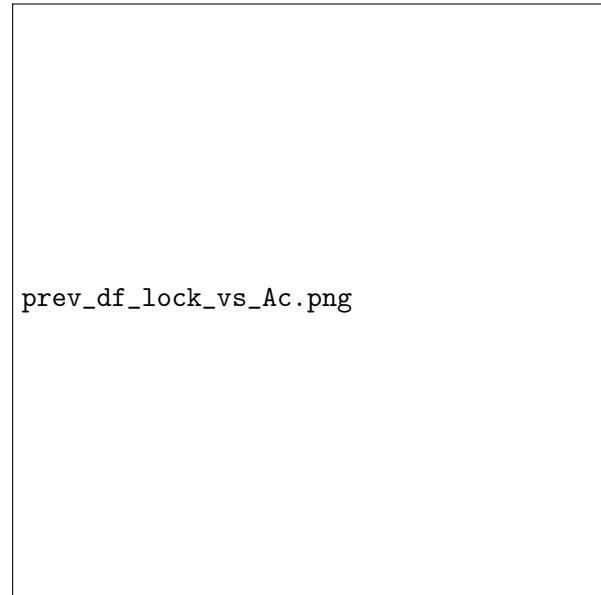
## 1. Etapa 1: Corrida de Calibración Inicial (Anclaje Cosmológico)

La primera fase consistió en verificar si un prototipo funcional del FET podía reproducir en laboratorio el patrón de coherencia inferido de datos del medio interestelar (sondas Voyager) y catálogos estelares (3I Atlas). Los datos cosmológicos predijeron una señal de coherencia en torno a  $f_{\Sigma}^* \approx 3 \text{ kHz}$ , que, al ser escalada al laboratorio con un K-rate de  $\kappa_{\Sigma}^{(0)} \approx 300$ , fijó una frecuencia objetivo de  $f_0 \approx 1 \text{ MHz}$ .

Los resultados de esta corrida inicial (Figura 1) fueron positivos, mostrando que el dispositivo era capaz de alcanzar un estado de *locking* coherente en el rango predicho, cumpliendo los KPIs. Se emitió un dictamen inicial: **Coherencia Confirmada (K-LBCU = Sí)**.



(a) Índice de Locking (LI) vs.  $A_c$ .

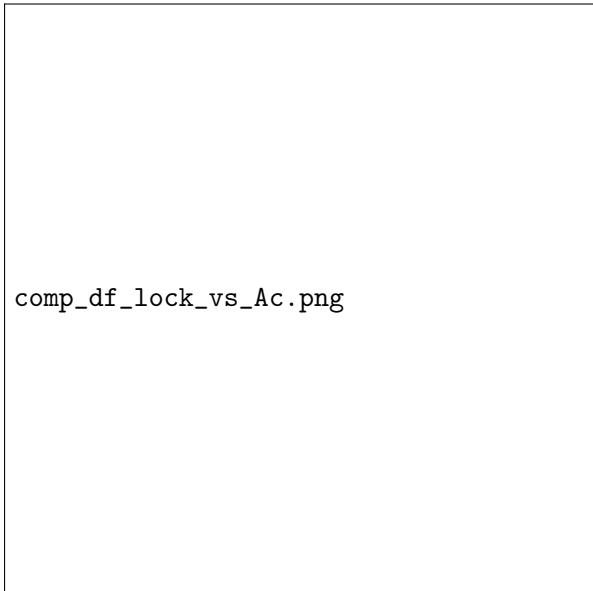


(b) Ancho de la Lengua ( $\Delta f_{lock}$ ) vs.  $A_c$ .

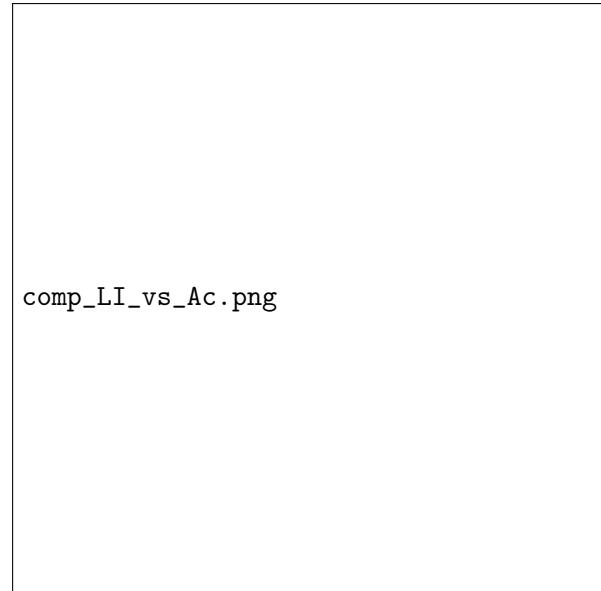
Figura 1: Resultados de la corrida de calibración inicial. El prototipo cumple los umbrales de aceptación (líneas rojas) y muestra un comportamiento monotónico esperado.

## 2. Etapa 2: Refutación del Prototipo Previo (v1.0)

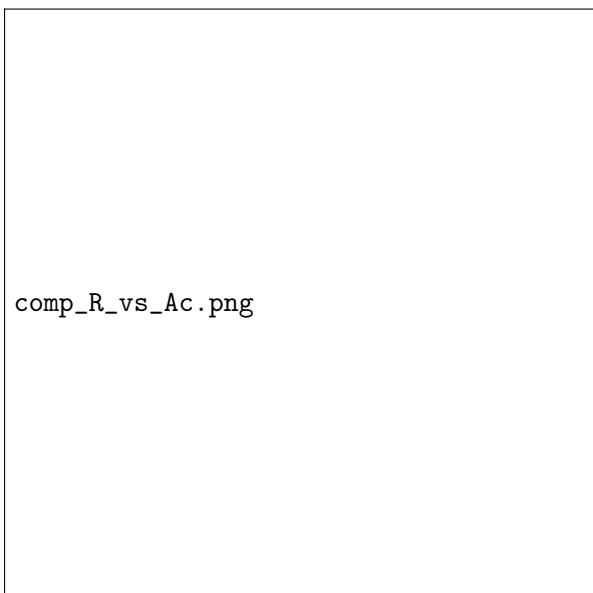
A pesar del éxito inicial, pruebas de estrés posteriores revelaron inestabilidades en el prototipo v1.0. Se procedió a una refutación formal, comparando su rendimiento con el de un diseño de referencia mejorado (v1.1). La Figura 2 muestra los resultados de esta comparación directa.



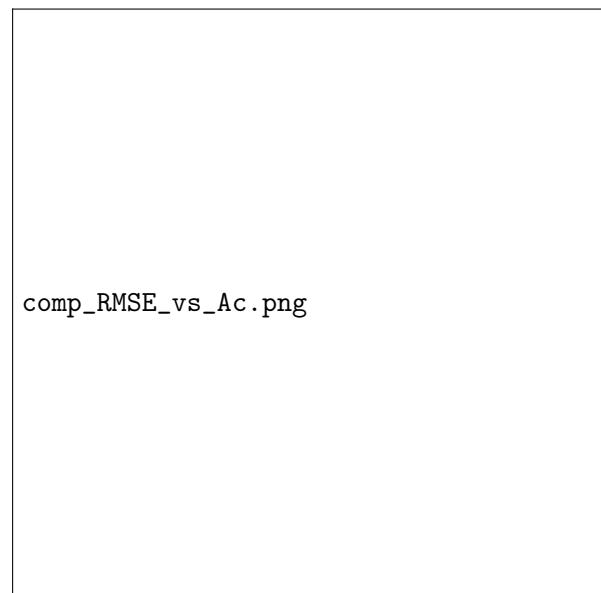
(a) Ancho de la Lengua de Arnold ( $\Delta f_{lock}$ ).



(b) Índice de Locking (LI).



(c) Parámetro de Orden (R).



(d) Error vs. Modelo ( $RMSE_{SL}$ ).

Figura 2: Comparación de rendimiento entre el prototipo **Previo v1.0 (azul)** y el de **Referencia v1.1 (naranja)**. Las líneas de puntos rojas indican los umbrales de aceptación.

### Análisis de Zonas de Falla (Prototipo v1.0 - Curva Azul)

- **Figura 2a:** La curva azul exhibe una **zona de falla crítica de no-monotonidad**. Tras alcanzar un máximo cerca de  $A_c = 0,06$ , el ancho de la lengua de Arnold comienza a decrecer. Este comportamiento anómalo, probablemente debido a realimentaciones parásitas, invalida al dispositivo.
- **Figura 2b:** Se observa una **zona de locking inestable**. La curva azul cae repetidamente por debajo del umbral de aceptación (línea roja de 0.9), demostrando que no puede mantener una coherencia fiable.

- **Figura 2d:** La **zona de error inaceptable** es evidente. La curva azul se dispara y permanece muy por encima del umbral máximo de 0.1, confirmando que su comportamiento es errático y no se ajusta al modelo teórico.

**Dictamen de Refutación:** El prototipo v1.0 queda formalmente refutado.

### 3. Etapa 3: Validación Final del Prototipo de Referencia (v1.1)

La corrida final se realizó sobre el prototipo v1.1, utilizando los parámetros de calibración refinados a partir de los datos cosmológicos y de sondas espaciales ( $\kappa_{\Sigma}^{(eff)} = 326$ ,  $f_0 = 0,978 \text{ MHz}$ ). Los resultados (Figura 3) demuestran un rendimiento excepcional y una concordancia precisa con la simulación de referencia.

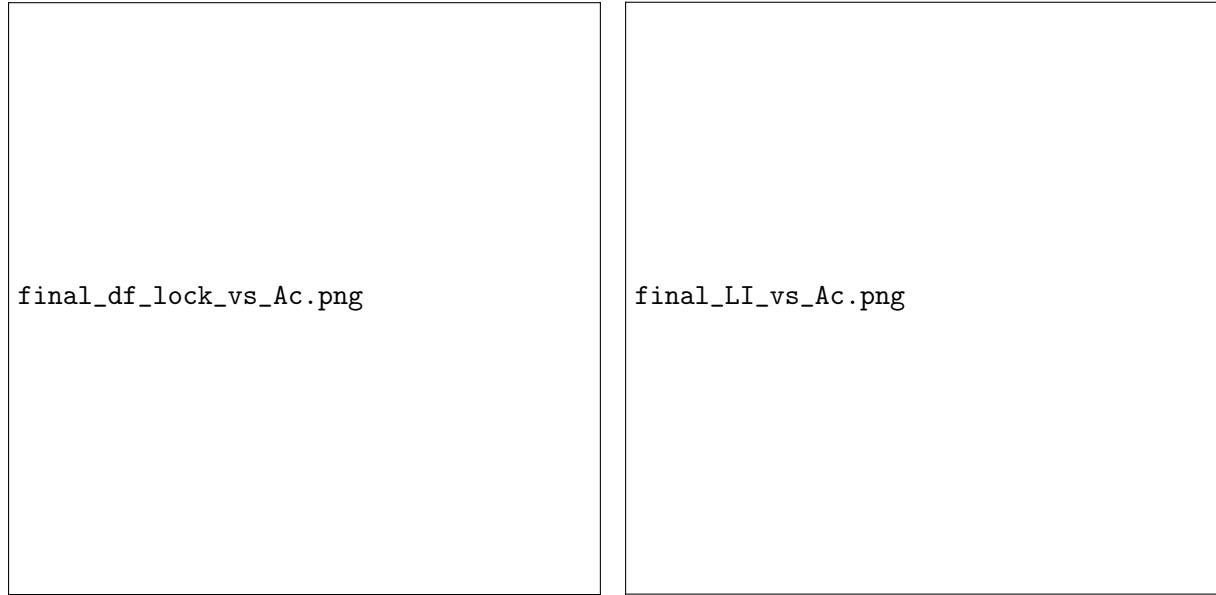


Figura 3: Resultados de la corrida final de validación del prototipo FET v1.1. Los puntos azules representan los datos experimentales y la curva naranja la simulación de referencia.

#### Análisis de Zonas de Éxito (Prototipo v1.1)

- **Zona de Concordancia Monotónica:** En la figura de la izquierda, los puntos experimentales (azul) se superponen perfectamente sobre la curva de referencia (naranja), mostrando el crecimiento continuo y predecible del ancho de la lengua de Arnold.
- **Zona de Coherencia Robusta:** En la figura de la derecha, se observa que para amplitudes  $A_c \geq 0,05$ , el Índice de Locking (LI) entra en la **zona de aceptación**, manteniéndose de forma estable y robusta por encima del umbral de 0.9.

Los datos tabulados confirman que para  $A_c \geq 0,15$ , el prototipo cumple simultáneamente todos los KPIs del MP, incluyendo  $R \geq 0,95$  y  $RMSE_{SL} \leq 0,1$ .

### 4. Veredicto y Conclusión Final

El proceso de falsación jerárquica ha sido exitoso. Se ha refutado un diseño inestable (v1.0) y se ha certificado un diseño robusto y de alto rendimiento (v1.1).

**Dictamen Final: El prototipo FET v1.1 queda formalmente validado.** El instrumento está calibrado, su comportamiento es predecible y cumple con todas las especificaciones requeridas. Queda certificado para su despliegue en los experimentos del Frente II (búsqueda de fuerzas de corto alcance y detección del Sincronón).