

# FET: Construcción, uso y presupuesto para una unidad

Proyecto TCDS

October 17, 2025

## Respuesta directa

Se entrega un manual conciso para construir y operar un solo transistor de coherencia (FET), con metas de locking ajustadas usando los últimos datos PWS de Voyager (corridas del usuario). Se incluye presupuesto en MXN y la mano de obra separada. Compila sin figuras externas.

## 1 Principio de operación

Modelo efectivo de oscilador cercano a Hopf con inyección coherente:

$$\dot{z} = (\mu_{\text{eff}} + i\omega_0)z - (1 + ic)|z|^2z + K z_{\text{in}}.$$

La puerta de coherencia  $u_g$  controla  $\mu_{\text{eff}}$ . La inyección  $(A_c, f_{\text{in}})$  genera bloqueo de fase con lengua(s) de Arnold. Salida observada en frecuencia y fase.

## 2 Arquitectura funcional mínima

- **Entrada RF**  $\rightarrow$  C1 (acoplo AC)  $\rightarrow$  nodo de inyección al FET.
- **Puerta de coherencia**  $u_g \rightarrow$  R3 con filtro C3 a masa.
- **Carga** R1 desde  $V_{cc}$  al drenador; R2 a masa en la fuente + C2 de desacoplo.
- **Salida** por C4 al LNA/analizador (no cargar el oscilador).
- **Referencias** comunes de 10.00 MHz; blindaje tipo Faraday; plano de masa continuo.

## 3 Instrumentalización

**Cadena recomendada.** Generador RF coherente (1–6 GHz, ref. 10 MHz)  $\rightarrow$  atenuador  $\rightarrow$  C1  $\rightarrow$  FET;  $u_g$  con DAC aislado  $\rightarrow$  R3/C3; drenador: R1 a  $V_{cc}$  y C4 a LNA/analizador; lectura de  $\Delta f$ ,  $S_\phi(f)$  y  $\sigma_y(\tau)$ . Control térmico de  $\pm 0.50^\circ\text{C}$ .

### Procedimiento.

1. Calentamiento 30 min. Referencia común 10.00 MHz. Blindaje cerrado.
2. Ajustar  $u_g$  hasta borde de auto-oscilación. Medir  $f_0$  y línea base sin inyección.
3. Inyectar  $f_{\text{in}} \approx f_0$  y barrer potencia/frecuencia. Mapear  $\Delta f_{\text{lock}}(A_c)$ .
4. Cerrar lazo sobre  $u_g$  para maximizar  $LI$  y  $R$  con  $RMSE_{SL}$  mínimo.
5. Controles: gemelo sin cavidad, inversión de fase, fuera de banda, dummy loads.

## 4 KPIs y metas con datos Voyager

Se usaron los CSV del usuario (PWS promedio y etapas) para estimar la variabilidad ambiental anual  $\sigma_{\text{env}} = \text{std}(n_e)/\text{mean}(n_e)$  y fijar metas por régimen:

$$LI_{\text{meta}} = 1 - \beta \sigma_{\text{env}}, \quad \beta = 0.3, \quad RMSE_{SL, \text{meta}} \in [0.03, 0.12] \text{ según } LI.$$

Política operativa:

- Régimen cuasi-estacionario (baja  $\sigma_{\text{env}}$ ): exigir  $LI \geq 0.95$ ,  $RMSE_{SL} \leq 0.05$ .
- Régimen turbulento (alta  $\sigma_{\text{env}}$ ):  $0.85 \leq LI < 0.95$ ,  $0.05 < RMSE_{SL} \leq 0.10$  con PLL de lectura.
- Ventanas  $p:q$ : 1:1–3:2 en baja  $\sigma_{\text{env}}$ ; 1:1–5:3 en alta  $\sigma_{\text{env}}$ .

Criterio de aceptación MP: locking estable con  $LI \geq 0.90$ ,  $R \geq 0.95$ ,  $RMSE_{SL} < 0.10$  y monotonicidad de  $\Delta f_{\text{lock}}(A_c)$ .

## 5 Diseño electrónico mínimo

Componentes típicos:

- FET: MOSFET/JFET canal N de alta  $g_m$  (p. ej. 2N7000 como placeholder).
- R1: 100–330.00  $\Omega$  (carga de drenador). R2: 100–1000.00  $\Omega$  (fuente). R3: 10.00 k $\Omega$  (polarización  $u_g$ ).
- C1: 10–100.00 pF NP0 (acoplo RF). C2: 10.00  $\mu\text{F}$ + 100.00 nF (desacoplo). C3: 100.00 nF (filtro  $u_g$ ). C4: 1.00 nF (acoplo salida).
- LNA banda ancha para lectura.  $V_{cc}$  5–12.00 V regulado, ruido  $< 1.00$  mV<sub>pp</sub>.

PCB de 2 capas con plano de masa, trazas de 50  $\Omega$  en C1 y C4, desacoplos a  $< 10.00$  mm del dispositivo, blindaje metálico.

## 6 Puesta en marcha y uso

1. **Base.** Sin inyección: medir  $f_0$ , ancho de línea y  $S_\phi(f)$ .
2. **Bloqueo.** Inyectar  $f_{\text{in}}$  y barrer  $\pm$  algunos kHz. Registrar mapas  $\Delta f_{\text{lock}}$  vs. potencia.
3. **Optimización.** Ajustar  $u_g$  y fase relativa para maximizar  $LI$  con  $RMSE_{SL}$  mínimo. Documentar ATA y  $Q_\Sigma = f_0/\Delta f$ .
4. **Controles.** Repetir con dispositivo dummy y fuera de banda; verificar que  $LI \rightarrow 0$  sin inyección.

## 7 Presupuesto en MXN (1 unidad)

Precios de referencia nacionales. Dos escenarios: *Base* y *Base+GPSDO+control térmico* usados para cumplir  $LI \geq 0.95$  sostenido.

Concepto	Cant.	Costo unit. (MXN)	Subtotal (MXN)
MOSFET 2N7000 (placeholder FET)	1	9.4	9.4
Conectores SMA para PCB	2	40.4	80.8
Cable RG316 SMA–SMA	1	92.7	92.7
Caja blindaje aluminio	1	192.6	192.6
PCB 2 capas 10×10 (prorrato 1/10)	1	73.8	73.8
Pasivos R/C varios	1	100.0	100.0
LNA banda ancha (opcional)	1	199.8	199.8
<b>Total materiales Base</b>			<b>749.1</b>
GPSDO 10 MHz económico (opcional)	1	1800.0	1800.0
Control térmico simple (almohadilla+sensor)	1	350.0	350.0
<b>Total Base + GPSDO + control térmico</b>			<b>2899.1</b>

**Mano de obra (separada).** Tarifa de referencia ingeniero electrónico: 273.00 MXN/h. Tareas y tiempos:

- Esquemático y verificación: 2 h
- PCB/Logística/Perforado: 3 h

- Ensamble y soldadura: 3 h
- Pruebas básicas y reporte: 3 h

Total:  $11 \text{ h} \times 273 = \mathbf{3003}$  MXN.

## 8 Seguridad y riesgos

No exceder 12 V ni 10 mA de drenador. Mantener blindaje cerrado. Referencia común de 10 MHz para todo el instrumental. Control térmico para estabilidad de  $\mu_{\text{eff}}$ . Artefactos RF y deriva térmica son los riesgos dominantes.

## 9 Anexo: netlist SPICE mínimo

```
* FET mínimo (NGSPICE)
VCC VCC 0 DC 5
VUG GC 0 DC 0.8
VIN IN 0 SIN(0 0.1 1e6)
R1 VCC D 220
R2 S 0 330
R3 GC G 10k
C1 IN G 47p
C2 S 0 10u
C2b S 0 100n
C3 GC 0 100n
C4 D OUT 1n
Cvcc VCC 0 100n
M1 D G S S NM1
.model NM1 NMOS (LEVEL=1 VTO=1 KP=5e-3 L=1u W=200u LAMBDA=0.02)
RLOAD OUT 0 1e9
.tran 0.1u 10m
.control
run
plot V(OUT)
.endc
.end
```

## 10 Autocrítica y trazabilidad

Base técnica y KPIs alineados al MP. Las metas  $LI$  y  $RMSE_{SL}$  se fijaron con los CSV PWS del usuario mediante  $\sigma_{\text{env}}$ ;  $\beta = 0.3$  es un cierre de ingeniería y puede recalibrarse cuando existan  $LI$  medidos del FET. El presupuesto separa materiales de mano de obra; el escenario con GPSDO y control térmico se recomienda si el objetivo es  $LI \geq 0.95$  sostenido. Falsación explícita: ausencia de locking con  $A_c > 0$  o no-monotonicidad de  $\Delta f_{\text{lock}}(A_c)$ .