

MÓDULO 4 — SENSORES DE OXÍGENO Y CONTROL DE MEZCLA

Circonio · Titanio · Banda ancha A/F · Post-catalizador · NOx · Fuel Trims

Índice

PRESENTACIÓN DEL MÓDULO	4
La confusión que hay que resolver primero	4
Conceptos y unidades	4
4.1 · SONDA DE CIRCONIO DE BANDA ESTRECHA (1, 2, 3 Y 4 HILOS)	6
Principio de funcionamiento	6
Configuraciones por número de hilos	6
1 · Valores en ralentí (motor caliente, lazo cerrado)	7
2 · Valor aproximado a 2000 – 2500 RPM	7
3 · Rango de funcionamiento normal	8
4 · Síntomas de falla	8
5 · Posibles soluciones y reparaciones	9
6 · Estrategia de diagnóstico avanzado paso a paso	9
7 · Valores comunes de resistencia	13
8 · Alimentaciones y tierras	13
9 · Aplicación de la Ley de Ohm	14
10 · Nomenclatura de cableado	15
11 · Simbología y diagrama de conexión	15
12 · Análisis de oscilogramas	16
13 · Señales PWM / ciclo de trabajo	16
14 · Análisis de corriente	17
15 · Preguntas de autoevaluación — Sonda de circonio	18
4.2 · SONDA DE TITANIO (TiO₂)	19
Principio de funcionamiento	19
Ventajas y por qué casi desapareció	19
1 · Valores en ralentí	20
2 · Valor aproximado a 2000 – 2500 RPM	20
3 · Rango de funcionamiento normal	20
4 · Síntomas de falla	20
5 · Posibles soluciones y reparaciones	21
6 · Estrategia de diagnóstico avanzado	21
7 · Valores comunes de resistencia	21
8 – 11 · Alimentaciones, Ley de Ohm, cableado y simbología	22
12 – 14 · Oscilogramas, PWM y corriente	22

15 · Preguntas de autoevaluación — Titanio	23
4.3 · SENSOR A/F DE BANDA ANCHA (UEGO / LAF / AFR)	24
Principio de funcionamiento	24
Tabla maestra de corriente de bombeo (Bosch LSU 4.9)	24
Cómo lo muestra el escáner: valores simulados	25
1 · Valores en ralentí (motor caliente, lazo cerrado)	25
2 · Valor aproximado a 2000 – 2500 RPM	26
3 · Rango de funcionamiento normal	27
4 · Síntomas de falla	27
5 · Posibles soluciones y reparaciones	28
6 · Estrategia de diagnóstico avanzado paso a paso	28
7 · Valores comunes de resistencia	29
8 · Alimentaciones y tierras	30
9 · Aplicación de la Ley de Ohm	30
10 · Nomenclatura de cableado	31
11 · Simbología y diagrama de conexión	32
12 · Análisis de oscilogramas	32
13 · Señales PWM / ciclo de trabajo	33
14 · Análisis de corriente	34
15 · Preguntas de autoevaluación — Banda ancha	34
4.4 · SONDA POST-CATALIZADOR Y EFICIENCIA DEL CATALIZADOR	36
Función de la sonda posterior	36
Cómo funciona el catalizador y por qué la sonda posterior es plana	36
1 · Valores en ralentí (catalizador sano)	37
2 · Valor aproximado a 2000 – 2500 RPM	37
3 · Rango de funcionamiento normal	37
4 · Síntomas de falla	37
5 · Posibles soluciones y reparaciones	38
6 · Estrategia de diagnóstico avanzado	38
7 – 11 · Resistencia, alimentaciones, Ley de Ohm, cableado y simbología	40
12 · Análisis de oscilogramas	40
13 · Señales PWM	41
14 · Análisis de corriente	41
15 · Preguntas de autoevaluación — Post-catalizador	41
4.5 · SENSOR DE NOx	42
Principio de funcionamiento	42
Ubicaciones y funciones	42
1 · Valores en ralentí	42
2 · Valor aproximado a 2000 RPM	42
3 · Rango de funcionamiento normal	42
4 · Síntomas de falla	43
5 · Posibles soluciones y reparaciones	44
6 · Estrategia de diagnóstico avanzado	44
7 · Valores comunes de resistencia	44
8 · Alimentaciones y tierras	45
9 · Aplicación de la Ley de Ohm	45
10 · Nomenclatura de cableado	46
11 · Simbología y diagrama de conexión	46

12 · Análisis de oscilogramas	46
13 · Señales PWM	47
14 · Análisis de corriente	47
15 · Preguntas de autoevaluación — NOx	47
4.6 · FUEL TRIMS: CÁLCULO E INTERPRETACIÓN	49
Qué son exactamente	49
Interpretación del signo	49
Umbral de interpretación	50
Estimación de la mezcla real sin corrección	50
MATRIZ DIAGNÓSTICA POR RÉGIMEN — el método central	50
Comparación entre bancos (motores en V)	51
Procedimiento completo de diagnóstico por fuel trims	52
Errores frecuentes de interpretación	52
Preguntas de autoevaluación — Fuel trims	53
CUESTIONARIO INTEGRADOR — MÓDULO 4	54
HOJA DE REFERENCIA RÁPIDA — MÓDULO 4	55

PRESENTACIÓN DEL MÓDULO

Los módulos 2 y 3 trataron los sensores que le dicen a la ECU **cuánto aire entra**. Este módulo trata el sensor que le dice **si acertó**.

La sonda de oxígeno es el único sensor de **realimentación** del sistema de combustible: mide el resultado de la combustión y permite a la ECU corregir su propio cálculo. Esa corrección se llama **fuel trim**, y es la herramienta diagnóstica más poderosa del taller moderno — **siempre que se sepa leer**.

La confusión que hay que resolver primero

Existen dos familias de sensores de oxígeno que se ven parecidas, se montan en el mismo sitio y se llaman igual en el lenguaje del taller. **No se diagnostican igual, no miden lo mismo y no comparten un solo valor de referencia:**

	Banda estrecha (circonio)	Banda ancha (A/F, UEGO, LAF)
Qué mide	Solo si está rica o pobre	Cuánto de rica o pobre
Magnitud física	Voltaje generado (0 - 1 V)	Corriente de bombeo (-2.3 a +2.3 mA)
Rango útil	$\lambda = 0.98$ a 1.02 ($\pm 2\%$)	$\lambda = 0.65$ a aire libre
Comportamiento	Conmuta como un interruptor	Lineal y proporcional
Hilos	1, 2, 3 o 4	5 o 6
Se puede medir con multímetro	Sí (con reservas)	No de forma directa

Regla de identificación en 5 segundos: cuente los hilos. **1 a 4 hilos = banda estrecha. 5 o 6 hilos = banda ancha.** Aplicar la lógica de una a la otra produce diagnósticos completamente erróneos.

Conceptos y unidades

Concepto	Definición
λ (Lambda)	Relación entre el aire real y el aire estequiométrico. $\lambda = 1.00$ es la mezcla perfecta
AFR	Relación aire/combustible en masa. Gasolina: 14.7 : 1 equivale a $\lambda = 1.00$
Estequiométrica	Mezcla en la que todo el combustible y todo el oxígeno se consumen
Rica	$\lambda < 1.00$ · exceso de combustible · $AFR < 14.7$
Pobre	$\lambda > 1.00$ · falta de combustible · $AFR > 14.7$
Lazo abierto	La ECU ignora la sonda y usa tablas fijas
Lazo cerrado	La ECU corrige la inyección según la sonda

Conversión fundamental:

$$AFR = \lambda \times 14.7 \quad \lambda = \frac{AFR}{14.7}$$

Para otros combustibles el multiplicador cambia: diésel 14.5, E85 9.8, GLP 15.7, GNC 17.2, etanol puro 9.0. **La sonda mide λ ; el escáner convierte a AFR usando el combustible que tenga programado.**

4.1 · SONDA DE CIRCONIO DE BANDA ESTRECHA (1, 2, 3 Y 4 HILOS)

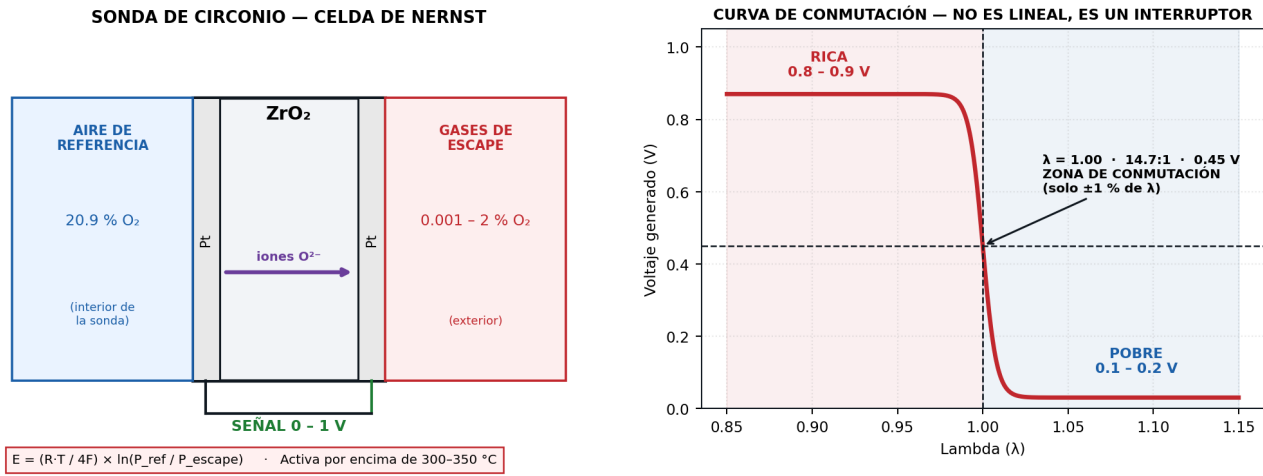


Figura 1: Celda de Nernst y curva de conmutación

Principio de funcionamiento

Un electrolito sólido de **dióxido de circonio (ZrO₂)** separa el aire atmosférico de referencia (dentro de la sonda) de los gases de escape (fuera). Por encima de **300 - 350 °C** el circonio se vuelve conductor de iones oxígeno. La diferencia de presión parcial de O₂ entre ambas caras genera una fem según la **ecuación de Nernst**:

$$E = \frac{R \cdot T}{4F} \times \ln \left(\frac{P_{O_2 \text{ referencia}}}{P_{O_2 \text{ escape}}} \right)$$

La sonda es un generador, no un sensor pasivo. No necesita alimentación para producir su señal. Los hilos adicionales son exclusivamente para el calefactor.

La consecuencia decisiva de la ecuación: el término logarítmico hace que la respuesta sea **abrupta**. Al pasar de $\lambda = 0.99$ a $\lambda = 1.01$, el oxígeno libre en el escape cambia varios órdenes de magnitud y el voltaje salta de 0.8 V a 0.2 V. **Por eso la sonda de banda estrecha no mide: conmuta.**

Configuraciones por número de hilos

Hilos	Señal	Masa de señal	Calefactor	Notas
1	Sí	Por la carcasa y el escape	No	Muy antigua. Depende del calor del escape; tarda 2 - 5 min en activarse

Hilos	Señal	Masa de señal	Calefactor	Notas
2	Sí	Hilo dedicado	No	Elimina la dependencia de la masa del escape
3	Sí	Por la carcasa	Sí (2 hilos)	Muy común en los años 90
4	Sí	Hilo dedicado	Sí (2 hilos)	El estándar moderno

Por qué desapareció la masa por carcasa: el retorno de la señal atravesaba la rosca, el tubo de escape, los soportes y la trenza de masa del motor. Una junta corroída o una trenza deficiente introducía décimas de voltio de error en una señal cuyo rango total es 1 V. Ver §4.1 punto 9.

1 · Valores en ralentí (motor caliente, lazo cerrado)

Parámetro	Valor esperado
Rango de oscilación	0.10 - 0.90 V (mínimo aceptable 0.15 - 0.85 V)
Voltaje promedio	0.40 - 0.50 V
Frecuencia de conmutación	0.5 - 1.5 Hz (más lenta que a 2500 RPM)
Tiempo de transición pobre → rica	< 100 ms
Tiempo de transición rica → pobre	< 100 ms
Voltaje con la sonda fría (polarizada)	0.45 V plano
Resistencia del calefactor	3 - 15 Ω (típico 5 - 9 Ω)
Corriente del calefactor en régimen	0.3 - 1.2 A

2 · Valor aproximado a 2000 - 2500 RPM

El régimen de referencia para evaluar una sonda es 2500 RPM, porque a esa velocidad el flujo de gases es suficiente para exigirle respuesta al sensor.

Parámetro	Valor esperado
Rango de oscilación	0.10 - 0.90 V, completo
Frecuencia de conmutación	1 - 5 Hz
Criterio de aprobación (cross counts)	Mínimo 8 cruces por el punto de 0.45 V en 10 segundos
Voltaje promedio	0.42 - 0.50 V
Tiempo total de una transición completa	< 300 ms

El criterio de las 8 conmutaciones en 10 segundos a 2500 RPM es el estándar de la industria. Menos de eso define una sonda perezosa, aunque la amplitud sea correcta y no haya código.

3 · Rango de funcionamiento normal

Condición	Voltaje	Interpretación
Mezcla muy rica (arranque en frío, propano)	0.85 - 1.00 V	Máximo generable
Rica	0.60 - 0.85 V	—
Punto estequiométrico	0.45 V	$\lambda = 1.00$
Pobre	0.15 - 0.35 V	—
Mezcla muy pobre (DFCO, fuga de escape)	0.00 - 0.15 V	Mínimo generable
Plana en 0.45 V	0.45 V fijo	Polarización de la ECU: la sonda no genera
Plana en 0.00 V	0 V	Corto a masa, o mezcla extremadamente pobre
Plana por encima de 1.0 V	> 1.0 V	Imposible en circonio: hay contaminación de la señal por otro circuito

Temperaturas:

Parámetro	Valor
Temperatura mínima de activación (<i>light-off</i>)	300 - 350 °C
Temperatura de operación óptima	600 - 800 °C
Tiempo hasta activación con calefactor	20 - 60 s
Tiempo hasta activación sin calefactor (1 - 2 hilos)	2 - 5 min
Temperatura máxima admisible	≈ 930 °C

4 · Síntomas de falla

Falla	Aspecto de la señal	Síntoma en el vehículo
Sonda perezosa (<i>lazy</i>)	Amplitud comprimida, transiciones lentas	Consumo elevado, emisiones altas, P0133
Sonda muerta	Plana en 0.45 V	Lazo abierto permanente, consumo alto, P0134
Sesgada rica	Oscila alto (0.5 - 0.9 V)	La ECU empobrece → LTFT negativo falso → posible detonación
Sesgada pobre	Oscila bajo (0.1 - 0.5 V)	La ECU enriquece → LTFT positivo falso → consumo alto
Calefactor abierto	Tarda minutos en activarse; muerta en ralentí prolongado	P0135 / P0141 , emisiones altas en frío
Envenenamiento por silicona	Amplitud reducida, respuesta lenta	Uso de selladores RTV no compatibles
Envenenamiento por plomo o fósforo	Sonda muerta prematuramente	Combustible con plomo, consumo de aceite

Falla	Aspecto de la señal	Síntoma en el vehículo
Contaminación por refrigerante	Depósitos blancos, sonda muerta	Junta de culata, radiador de aceite
Fuga de escape antes de la sonda	Oscila permanentemente bajo	Aire falso: la ECU enriquece de más

Códigos:

Código	Significado
P0130	Circuito de la sonda B1S1
P0131	Voltaje bajo B1S1
P0132	Voltaje alto B1S1
P0133	Respuesta lenta B1S1 (sonda perezosa)
P0134	Sin actividad detectada B1S1
P0135	Circuito del calefactor B1S1
P0136 - P0141	Equivalentes para B1S2 (post-catalizador)
P0150 - P0161	Equivalentes para el banco 2
P0030 - P0038	Control del calefactor (códigos genéricos)
P2195 / P2197	Señal atascada en pobre (banco 1 / 2)
P2196 / P2198	Señal atascada en rica (banco 1 / 2)

5 · Posibles soluciones y reparaciones

1. **Reparar fugas de escape antes de la sonda.** Es la causa n.º 1 de lecturas falsamente pobres. Una fuga de escape hace entrar aire por pulsos de presión negativa, la sonda lo detecta como oxígeno libre y la ECU enriquece innecesariamente.
2. **Reparar el circuito del calefactor** antes de reemplazar la sonda: una sonda perfecta con calefactor abierto se comporta exactamente como una sonda muerta.
3. **Verificar la masa de la señal y la masa del escape** en sondas de 1 y 3 hilos (ver punto 9).
4. **Eliminar la fuente de contaminación** antes de instalar la sonda nueva — consumo de aceite, fuga de refrigerante o sellador de silicona inadecuado destruirán la sonda nueva en pocos días.
5. **Usar únicamente antiagarrotante libre de cobre y grafito** en la rosca, y nunca sobre la punta cerámica.
6. **Verificar que el problema no sea de mezcla real** antes de acusar a la sonda: una sonda que reporta mezcla pobre puede estar diciendo la verdad.
7. Reemplazar la sonda cuando la prueba de respuesta forzada (punto 6, Fase C) lo confirme.

6 · Estrategia de diagnóstico avanzado paso a paso**Fase A — Verificación del calefactor**

Paso A1 — Alimentación del calefactor. Con KOEO o el motor en marcha, medir entre el pin de 12 V del calefactor y masa de chasis: dentro de 0.5 V del voltaje de batería.

Paso A2 — Resistencia del calefactor. Sonda desconectada, óhmetro entre los dos pines del calefactor **del sensor: 3 - 15 Ω** según el modelo. Infinito = calefactor abierto → reemplazar.

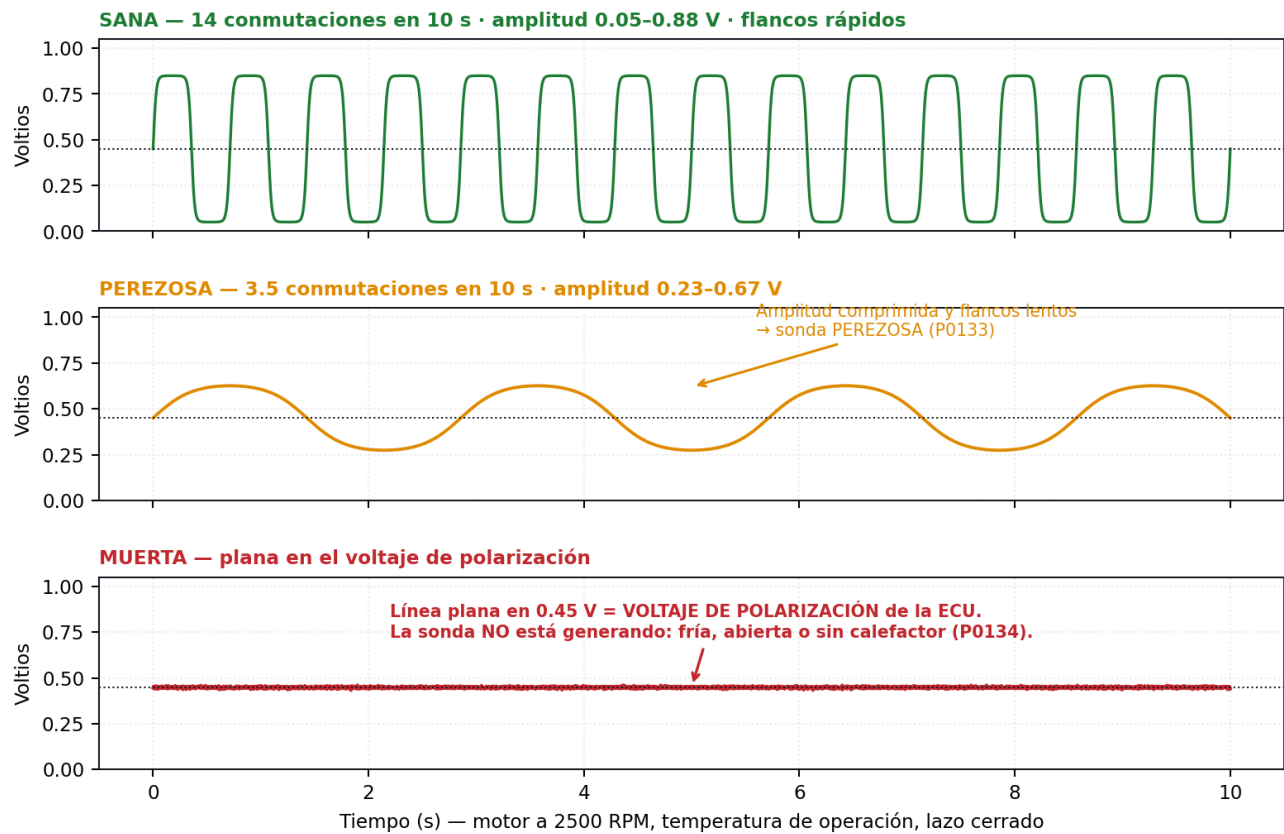
SONDA DE CIRCONIO PRE-CATALIZADOR — LOS TRES DIAGNÓSTICOS DE UNA CAPTURA

Figura 2: Los tres diagnósticos de una captura

Paso A3 — Control del calefactor. Osciloscopio en el pin de control (lado masa): debe mostrar PWM. Ver punto 13.

Fase B — Verificación de la señal en lazo cerrado

1. Motor a temperatura de operación, en lazo cerrado confirmado por el escáner.
2. Osciloscopio en el pin de señal, referencia en el **pin de masa de la sonda** (no en el chasis).
3. Ajustes: **DC, 0.2 V/div, 500 ms - 1 s/div**, modo *roll*.
4. Llevar el motor a **2500 RPM sostenidas** y capturar 20 segundos.

Criterio	Aprobación
Voltaje máximo alcanzado	> 0.80 V
Voltaje mínimo alcanzado	< 0.20 V
Conmutaciones en 10 s	≥ 8
Tiempo de transición completa	< 300 ms
Voltaje promedio	0.40 - 0.50 V
Forma de onda	Simétrica arriba y abajo del punto de 0.45 V

Fase C — Prueba de respuesta forzada (la prueba que aprueba la sonda)

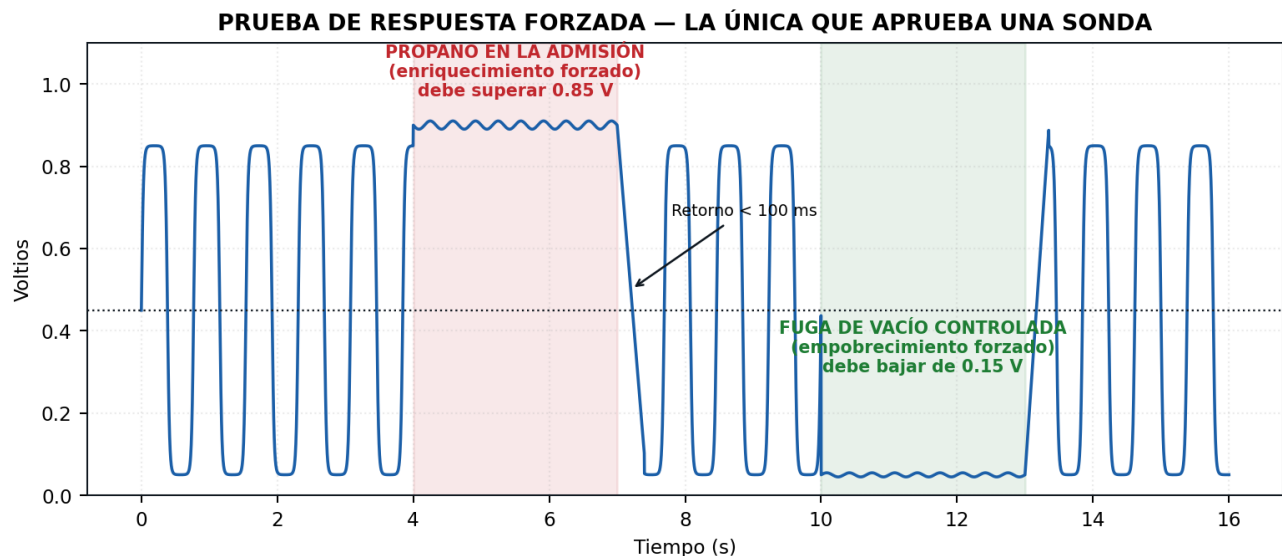


Figura 3: Prueba de respuesta forzada

Enriquecimiento forzado: Introduzca una pequeña cantidad de **propano** en la admisión (o accione brevemente el bote de arranque). La sonda debe:

- Subir por encima de **0.85 V** en menos de 200 ms.
- **Mantenerse** arriba mientras dure el enriquecimiento.
- Regresar a conmutar en menos de 100 ms al retirar el propano.

Empobrecimiento forzado: Desconecte brevemente una manguera de vacío o cree una fuga controlada. La sonda debe:

- Bajar por debajo de **0.15 V** en menos de 200 ms.
- Regresar a conmutar al cerrar la fuga.

Resultado	Diagnóstico
Alcanza ambos extremos con rapidez	Sonda sana , aunque no conmute en operación normal
No supera 0.7 V con propano	Sonda contaminada o envenenada
No baja de 0.3 V con fuga	Sonda contaminada, o el escape retiene combustible
Responde pero lentamente (> 500 ms)	Sonda perezosa — reemplazar
No responde en absoluto	Sonda muerta o circuito abierto

Por qué esta prueba es imprescindible: una sonda que muestra una línea plana puede estar sana y estar reportando correctamente una mezcla que realmente no varía (por ejemplo, con un inyector goteando). La prueba forzada separa **sonda defectuosa** de **mezcla realmente desviada**. Sin ella, se reemplazan sondas sanas.

Fase D — Prueba de caída de voltaje

Situación particular: el circuito de señal de la sonda de circonio maneja **microamperios** (la impedancia interna de la sonda caliente es de decenas a cientos de ohmios, pero la entrada de la ECU es de megaohmios). La caída de voltaje clásica **no detecta resistencia parásita en el circuito de señal**.

Sin embargo, el circuito de masa de la señal sí es crítico, y el circuito del calefactor maneja amperios y se diagnostica normalmente.

Circuito	Corriente	Límite de caída
Alimentación del calefactor (12 V)	0.3 – 2.0 A	0.20 V
Masa / control del calefactor	0.3 – 2.0 A	0.10 V
Masa de señal de la sonda	μA	0.02 V (medir de pin a pin)
Señal de la sonda	μA	No aplica la prueba clásica

Método alternativo para el circuito de señal (comparación de amplitud): capture la señal simultáneamente en el conector de la sonda y en el conector de la ECU. Si la amplitud difiere en más del 5 %, hay resistencia parásita o una derivación en el cableado.

Fase E — Prueba de resistencia interna (solo con instrumento adecuado)

ADVERTENCIA: nunca use un óhmetro convencional sobre el circuito de señal de una sonda de circonio. El óhmetro inyecta corriente en la celda de Nernst y puede dañarla permanentemente. Además, la lectura carece de significado porque la impedancia depende de la temperatura.

La medición de impedancia interna solo la realizan las ECUs modernas (para controlar el calefactor) y los bancos de prueba especializados. Valores de referencia únicamente informativos:

Temperatura de la sonda	Impedancia interna
Fría (20 °C)	> 10 MΩ (prácticamente abierta)

Temperatura de la sonda	Impedancia interna
350 °C (<i>light-off</i>)	$\approx 10 \text{ k}\Omega$
600 – 800 °C (operación)	30 - 300 Ω

7 · Valores comunes de resistencia

Medición	Valor	Utilidad
Calefactor (entre sus dos pines)	3 - 15 Ω (típico 5 - 9 Ω)	Sí, la medición más útil
Calefactor a carcasa	> 10 M Ω	Sí, detecta fuga a masa
Circuito de señal	NO MEDIR	Riesgo de dañar la celda
Continuidad de cada conductor del arnés	< 1 Ω	Sí

Resistencias de calefactor por familia:

Familia	Resistencia a 20 °C
Bosch LSH / LSF	3.5 - 9 Ω
NTK / NGK	5 - 8 Ω
Denso	5 - 14 Ω
Delphi (GM)	4 - 8 Ω

8 · Alimentaciones y tierras

Pin	Función	Valor esperado
Calefactor +	12 V del relé principal o del relé de la sonda	11.5 - 14.5 V
Calefactor -	Control por masa conmutada de la ECU (PWM)	0 - 14 V según duty cycle
Señal	Generada por la sonda	0.1 - 0.9 V
Masa de señal	Retorno dedicado a la ECU (sondas de 2 y 4 hilos)	< 0.02 V

Voltaje de polarización (*bias*): muchas ECUs aplican **0.45 V** al circuito de señal a través de una resistencia de alto valor. Sirve para dos cosas:

1. Que una sonda fría o desconectada muestre un valor neutro en lugar de 0 V.
2. Permitir a la ECU detectar circuitos abiertos.

Consecuencia diagnóstica: una línea plana en 0.45 V no significa “mezcla perfecta”. Significa que la ECU está viendo su propio voltaje de polarización porque la sonda **no está generando nada**. Es el error de interpretación más frecuente con este sensor.

Código de colores universal Bosch (sondas de reemplazo de 4 hilos):

Color	Función
NEGRO	Señal
GRIS	Masa de señal
BLANCO + BLANCO	Calefactor (sin polaridad)

9 · Aplicación de la Ley de Ohm

Cálculo 1 — Circuito del calefactor

Calefactor de 6.5Ω a 13.8 V con duty cycle del 100 %:

$$I = \frac{13.8}{6.5} = 2.12 \text{ A} \quad P = 13.8 \times 2.12 = 29.3 \text{ W}$$

En régimen, con duty cycle del 40 %:

$$I_{media} = 2.12 \times 0.40 = 0.85 \text{ A} \quad P_{media} = 11.7 \text{ W}$$

Efecto de 1.5Ω de resistencia parásita en el circuito del calefactor:

$$I = \frac{13.8}{6.5 + 1.5} = 1.73 \text{ A} \quad P_{calefactor} = 1.73^2 \times 6.5 = 19.5 \text{ W}$$

Pérdida del 33 % de la potencia calefactora. La sonda tarda mucho más en activarse y, en ralentí prolongado con escape frío, **puede enfriarse por debajo del punto de activación y “morir” intermitentemente.** Síntoma: la sonda funciona en carretera y se queda plana en ciudad.

Cálculo 2 — Por qué la masa por carcasa es tan crítica (sondas de 1 y 3 hilos)

El rango total de la señal es de 1 V y la zona de decisión está en 0.45 V . Si la masa del motor tiene una caída de 0.12 V con el ventilador encendido, esa caída **se suma directamente a la señal:**

$$V_{ECU} = V_{generado} + V_{masa}$$

Una señal real de 0.20 V (pobre) se lee como 0.32 V . Una señal de 0.45 V se lee como $0.57 \text{ V} \rightarrow$ **la ECU cree que la mezcla está rica y la empobrece.**

Síntoma característico: los *fuel trims* cambian cuando se enciende el electroventilador, las luces o el desempañador. Ese síntoma, en un vehículo con sonda de 1 o 3 hilos, apunta directamente a la masa del motor. Verifíquela con caída de voltaje (Módulo 0: máximo 0.20 V con el motor en marcha).

Cálculo 3 — Impedancia y por qué el óhmetro daña la sonda

Una sonda caliente presenta $\approx 100 \Omega$ de impedancia interna. Un óhmetro en escala de 200Ω inyecta típicamente 1 mA :

$$P = I^2 \times R = (0.001)^2 \times 100 = 0.0001 \text{ W}$$

La potencia es baja, pero **la corriente circula a través del electrolito de circonio en un solo sentido**, arrastrando iones oxígeno y provocando polarización y migración del material. Repetido, degrada la celda de forma permanente. **Con la sonda fría (impedancia de megaohmios), el óhmetro aplica toda su tensión de prueba a la celda, con peores consecuencias.**

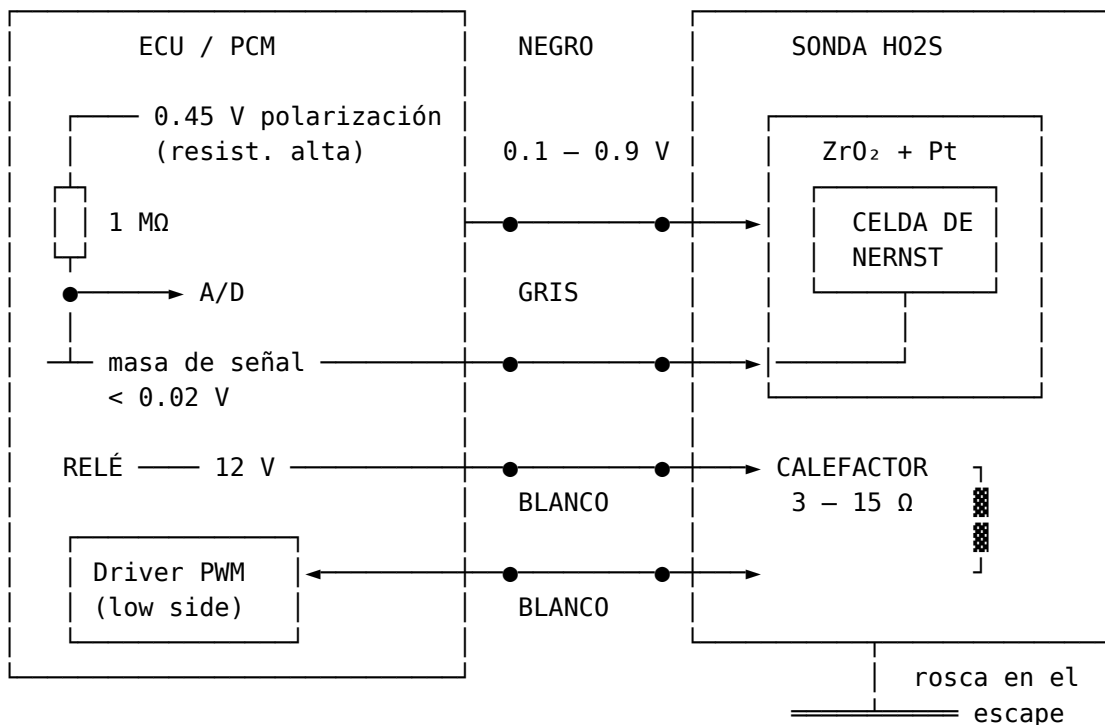
10 · Nomenclatura de cableado

Marca	Señal	Masa de señal	Calefactor +	Calefactor –
GM	PPL/WHT	TAN	PNK	BLK/WHT
Ford	GRY/LT BLU, RED	ORN, BRN	WHT, RED	BLK/WHT, LT GRN
Chrysler	BLK/DK BLU	BLK/LT BLU	DK GRN/ORN	WHT/DK BLU
Toyota	OX1 / OXS	E1 / E2	HT1	HT (control)
Honda	WHT/RED	GRN/WHT	BLK/YEL	WHT/BLK
VW / Audi	sw (negro)	gr (gris)	ws (blanco)	ws (blanco)
Bosch universal	NEGRO	GRIS	BLANCO	BLANCO

Nomenclatura Toyota: OX u OXS = señal de la sonda; HT = calefactor; E1 = masa de la ECU; AF = sensor de banda ancha (§4.3).

11 · Simbología y diagrama de conexión

SONDA DE CIRCONIO DE 4 HILOS (la configuración estándar)



SÍMBOLO: $-(\lambda)-$ El circonio GENERA voltaje: no lleva VREF de 5 V. Los hilos "extra" son SÓLO del calefactor.

12 · Análisis de oscilogramas

Los seis criterios de una captura de banda estrecha

Criterio	Correcto	Falla que indica
Amplitud máxima	> 0.80 V	Sonda contaminada o mezcla nunca rica
Amplitud mínima	< 0.20 V	Sonda contaminada, o fuga de escape que impide ver mezcla pobre
Frecuencia a 2500 RPM	≥ 8 conmutaciones / 10 s	Sonda perezosa (P0133)
Velocidad de flanco	< 100 ms por transición	Sonda envejecida
Voltaje promedio	0.40 - 0.50 V	> 0.55 V = mezcla rica real · < 0.35 V = pobre real
Simetría	Tiempo arriba ≈ tiempo abajo	Asimetría = desviación real de la mezcla

Distinción esencial: los tres primeros criterios evalúan **la sonda**. Los tres últimos evalúan **la mezcla**. Una sonda rápida y de amplitud completa cuyo promedio está en 0.68 V no es una sonda defectuosa: es una sonda buena reportando un motor rico.

Configuración del osciloscopio

Ajuste	Valor
Acoplamiento	DC
V/div	0.2 V/div (rango 0 - 1 V)
Time/div	500 ms - 1 s/div, modo <i>roll</i>
Duración de captura	20 - 30 s a 2500 RPM
Trigger	Automático
Referencia de la sonda	Pin de masa de señal de la sonda , no el chasis
Canales adicionales útiles	Sonda post-catalizador · señal de inyector · MAF

13 · Señales PWM / ciclo de trabajo

La señal de la sonda no es PWM. Es un voltaje analógico generado.

El circuito del calefactor SÍ es PWM, y es plenamente diagnosticable:

Parámetro del calefactor	Valor
Tipo de control	Low side (masa conmutada)
Frecuencia	5 - 30 Hz (algunos hasta 100 Hz)
Duty cycle al arrancar en frío	Rampa progresiva 20 % → 90 % en 10 - 20 s
Duty cycle en régimen	20 - 50 %
Duty cycle en ralentí prolongado	Sube (el escape se enfría)
Duty cycle a alta carga	Baja o se anula (el escape ya calienta)

Parámetro del calefactor	Valor
--------------------------	-------

Por qué la rampa progresiva: aplicar el 100 % de potencia a una sonda fría con condensado de agua en el escape produce **choque térmico** y agrieta la cerámica. Por eso la ECU espera a que se libere el punto de rocío del escape y luego sube el duty cycle gradualmente. **Un calefactor que arranca de golpe al 100 % indica un módulo o un montaje incorrecto.**

Diagnóstico del duty cycle:

Observación	Diagnóstico
Duty cycle 0 % con motor frío	La ECU no está comandando: driver o estrategia
Duty cycle 100 % permanente	La ECU no logra calentar: calefactor con resistencia alta o alimentación deficiente
Duty cycle correcto pero sonda fría	Calefactor abierto (verificar con óhmetro)

14 · Análisis de corriente

Medición	Valor esperado	Método
Corriente del calefactor, pico inicial	1.0 - 2.0 A	Pinza de baja corriente sobre el cable del calefactor
Corriente del calefactor en régimen	0.3 - 1.2 A	Igual
Corriente de la señal	µA	No medible ni útil

Interpretación de la corriente del calefactor:

Hallazgo	Diagnóstico
Rampa suave hasta el valor nominal	Sistema sano
Corriente nula con duty cycle presente	Calefactor abierto
Corriente inferior a la calculada por Ley de Ohm	Resistencia parásita en el circuito
Corriente muy superior	Calefactor en corto parcial; puede quemar el driver
Corriente errática	Conexión intermitente

Verificación cruzada obligatoria: calcule la corriente esperada con la resistencia medida del calefactor y el voltaje de sistema. Si la corriente real es menor, la diferencia es resistencia parásita:

$$R_{par} = \frac{V_{sistema}}{I_{medida}} - R_{calefactor}$$

Ejemplo: calefactor de 6.0 Ω, sistema a 13.9 V, corriente medida 1.55 A al 100 % de duty cycle:

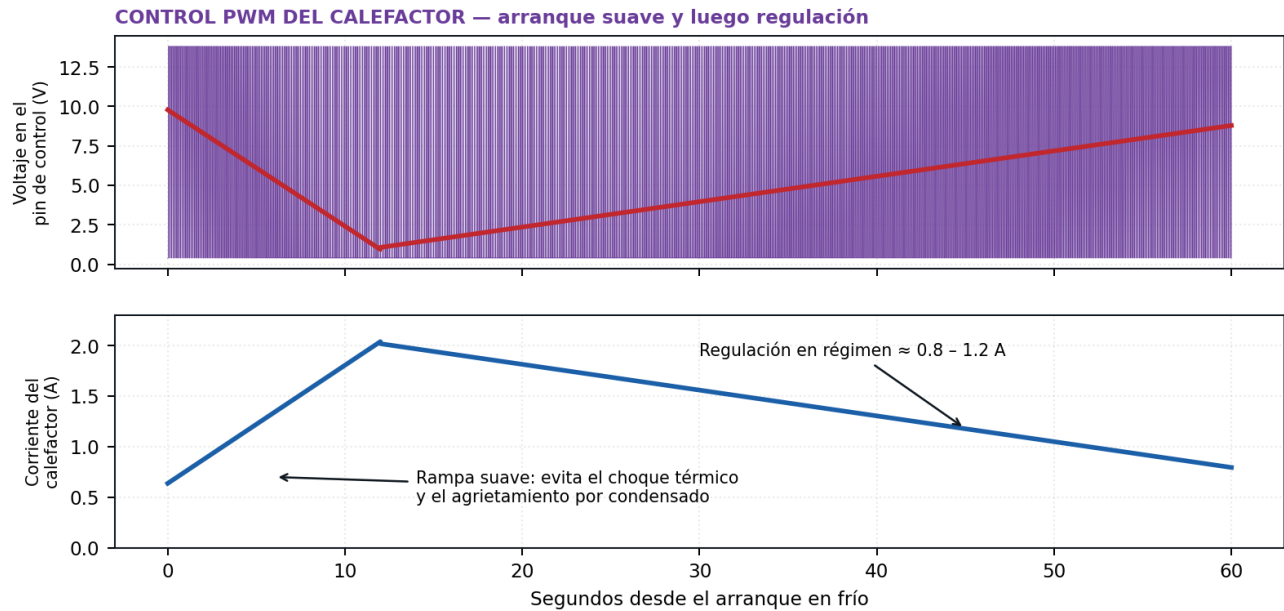
CIRCUITO DEL CALEFACTOR (HO2S) — CONTROL POR MASA CONMUTADA

Figura 4: Control PWM del calefactor

$$R_{total} = \frac{13.9}{1.55} = 8.97 \, \Omega \quad R_{par} = 8.97 - 6.0 = 2.97 \, \Omega$$

Casi $3 \, \Omega$ de resistencia parásita: el calefactor recibe apenas dos tercios de la potencia que debería.

15 · Preguntas de autoevaluación — Sonda de circonio

P1. Una sonda muestra una línea perfectamente plana en 0.450 V con el motor caliente y a 2500 RPM . Un técnico concluye que la mezcla es perfecta. Explique por qué se equivoca, qué está midiendo realmente el instrumento y qué prueba realizaría para confirmar el diagnóstico.

P2. Un vehículo con sonda de 3 hilos presenta *fuel trims* que se desvían $+9 \%$ cada vez que se enciende el electroventilador. La sonda es nueva. Explique el mecanismo físico completo, indique qué prueba realiza y con qué límite.

P3. El calefactor de una sonda mide $6.2 \, \Omega$. Con el motor en marcha y el duty cycle al 100% , la pinza amperimétrica lee 1.42 A y el voltaje de sistema es de 14.1 V . Calcule la resistencia parásita del circuito y explique qué síntoma producirá.

4.2 · SONDA DE TITANIO (TiO_2)

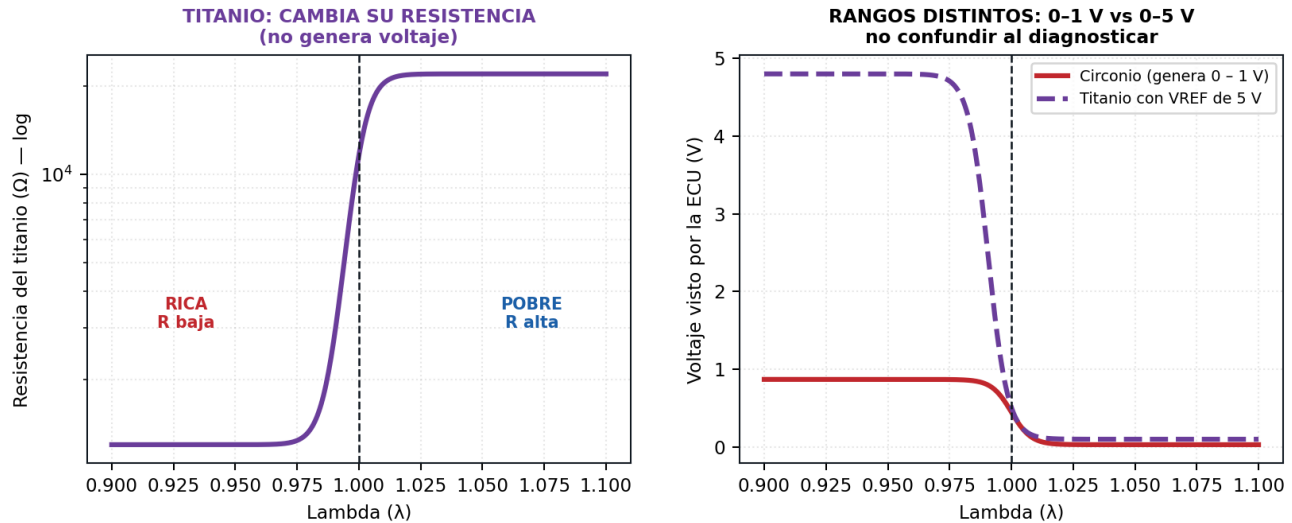


Figura 5: Comparación titanio vs circonio

Principio de funcionamiento

A diferencia del circonio, **la sonda de titanio no genera voltaje**. Es un **semiconductor cuya resistencia cambia** con la presión parcial de oxígeno:

- **Mezcla rica** (poco O_2) → el TiO_2 pierde oxígeno de su red cristalina → **resistencia BAJA** ($\approx 1 \text{ k}\Omega$).
- **Mezcla pobre** (mucho O_2) → recupera oxígeno → **resistencia ALTA** ($\approx 20 \text{ k}\Omega$ o más).

La ECU la alimenta con una tensión de referencia (**1 V o 5 V** según el fabricante) y la lee como un divisor de tensión, igual que un NTC (Módulo 3).

Ventajas y por qué casi desapareció

Ventaja	Inconveniente
No necesita aire de referencia → encapsulado sellado, inmune a la humedad y a la contaminación por el interior	Requiere alimentación
Respuesta más rápida que el circonio	Muy sensible a la temperatura: exige compensación térmica precisa
Más compacta y robusta	Su curva no es un salto tan definido
Menor sensibilidad al envenenamiento por silicona	Fue desplazada por la banda ancha

Usada principalmente por **Nissan**, algunos **Jeep/Eagle** de los 90 y modelos puntuales de otras marcas.

1 · Valores en ralentí

Sistema	Rica	Estequiométrica	Pobre
Referencia de 1 V	0.6 – 1.0 V	≈ 0.5 V	0.0 – 0.3 V
Referencia de 5 V	3.5 – 4.8 V	≈ 2.5 V	0.2 – 1.5 V
Resistencia del elemento	1 – 5 kΩ	≈ 8 kΩ	20 – 100 kΩ

La trampa del diagnóstico: en un sistema de 5 V, la señal de la sonda de titanio **se parece a la de un TPS o un MAP**. Si el técnico asume el rango 0 – 1 V del circonio, interpretará 3.8 V como “imposible” y condenará una sonda sana. **Identifique el tipo antes de medir.**

2 · Valor aproximado a 2000 - 2500 RPM

Parámetro	Valor
Rango de oscilación (5 V)	0.3 – 4.7 V, completo
Frecuencia de conmutación	1 – 5 Hz (igual criterio que el circonio)
Valor promedio	≈ 2.5 V (sistema de 5 V) o ≈ 0.5 V (sistema de 1 V)
Tiempo de transición	< 200 ms

3 · Rango de funcionamiento normal

Condición	Resistencia del TiO ₂	Voltaje (sistema 5 V)
Muy rica (propano)	500 – 1 200 Ω	4.5 – 4.9 V
Rica	1 – 4 kΩ	3.5 – 4.5 V
λ = 1.00	≈ 8 kΩ	≈ 2.5 V
Pobre	20 – 60 kΩ	0.8 – 1.8 V
Muy pobre (DFCO)	> 100 kΩ	0.1 – 0.6 V
Temperatura de activación	300 – 400 °C	—

4 · Síntomas de falla

Los mismos del circonio (§4.1 punto 4), con dos particularidades:

Falla específica del titanio	Síntoma
Pérdida de la referencia (1 V o 5 V)	Señal plana en 0 V; la ECU no puede leer nada
Deriva térmica (compensación degradada)	La señal se desplaza con la temperatura del escape; <i>fuel trims</i> que varían con la carga sin causa aparente

Códigos: los mismos genéricos de la sonda (P0130 – P0141, P0150 – P0161).

5 · Posibles soluciones y reparaciones

1. **Verificar la tensión de referencia** en el conector antes que nada: sin referencia no hay señal, y el síntoma es idéntico al de una sonda muerta.
2. Reparar el circuito del calefactor (todas las de titanio lo llevan).
3. Reparar masas y conectores.
4. Reemplazar la sonda cuando la prueba de respuesta forzada lo confirme.

Nunca sustituya una sonda de titanio por una de circonio, ni al revés. Son eléctricamente incompatibles: una genera voltaje y la otra necesita recibirlo.

6 · Estrategia de diagnóstico avanzado

Paso 1 — Identificar el tipo. Con el motor apagado y el conector desconectado, mida la resistencia entre el pin de señal y el de masa **del sensor**:

Lectura	Tipo
Infinito (MΩ) en frío	Circonio
Valor finito (kΩ) que cambia al calentar la punta	Titanio

Paso 2 — Verificar la tensión de referencia en el conector del arnés con KOEO: 1.0 V o 5.0 V según el sistema. Ausencia de referencia = problema del cableado o de la ECU, no de la sonda.

Paso 3 — Captura en lazo cerrado con la escala adecuada al sistema (0 - 1 V o 0 - 5 V). Aplican los mismos criterios de frecuencia y amplitud del circonio.

Paso 4 — Prueba de respuesta forzada con propano y con fuga controlada, idéntica al §4.1 Fase C, pero verificando que alcance los extremos **del rango correspondiente a su tensión de referencia**.

Paso 5 — Prueba de caída de voltaje.

Circuito	Límite
Referencia (1 V o 5 V)	0.05 V
Masa de señal	0.02 V
Alimentación del calefactor	0.20 V
Masa del calefactor	0.10 V

Aquí sí importa la caída en la referencia, porque —igual que en el MAP del Módulo 2— la señal es una fracción de esa referencia. Con 4.7 V en lugar de 5.0 V, todas las lecturas quedan desplazadas un 6 %.

7 · Valores comunes de resistencia

Medición	Valor
Elemento de TiO₂ a temperatura ambiente	1 - 50 kΩ (varía enormemente; no es diagnóstico)

Medición	Valor
Elemento caliente en mezcla rica	1 - 5 kΩ
Elemento caliente en mezcla pobre	20 - 100 kΩ
Calefactor	3 - 15 Ω
Aislamiento a carcasa	> 10 MΩ

A diferencia del circonio, **aquí sí se puede medir el elemento con el óhmetro** sin dañarlo, porque es un resistor, no una celda electroquímica. Pero el valor solo tiene sentido a temperatura conocida y con mezcla conocida.

8 - 11 · Alimentaciones, Ley de Ohm, cableado y simbología

Pin	Función	Valor
1	Referencia (1 V o 5 V)	0.95 - 1.05 V o 4.90 - 5.10 V
2	Señal	0 - 1 V o 0 - 5 V
3	Masa de señal	< 0.02 V
4	Calefactor +	11.5 - 14.5 V
5	Calefactor -	PWM

Ley de Ohm — el divisor de tensión del titanio (idéntico en forma al NTC del Módulo 3):

$$V_{sig} = V_{REF} \times \frac{R_{fija}}{R_{fija} + R_{TiO_2}}$$

Ejemplo con $R_{fija} = 8 \text{ k}\Omega$ interna, $V_{REF} = 5 \text{ V}$ y mezcla rica ($R_{TiO_2} = 2 \text{ k}\Omega$):

$$V_{sig} = 5 \times \frac{8000}{8000 + 2000} = 4.0 \text{ V}$$

Con mezcla pobre ($R_{TiO_2} = 40 \text{ k}\Omega$):

$$V_{sig} = 5 \times \frac{8000}{48000} = 0.83 \text{ V}$$

Efecto de resistencia parásita: 200 Ω en serie sobre 2 kΩ (rica) es un 10 % de error; sobre 40 kΩ (pobre) es apenas un 0.5 %. **La sonda de titanio, como el NTC, es más vulnerable en el extremo de baja resistencia.**

Cableado (Nissan típico): referencia W/R · señal B/W o Y · masa B · calefactor B/Y y W/B.

Simbología: se representa como una resistencia variable dependiente del oxígeno, no como una fuente. En el diagrama aparece un pin de referencia adicional que **el circonio nunca tiene** — es la forma más rápida de identificarla en el manual.

12 - 14 · Oscilogramas, PWM y corriente

Punto	Titanio
12 · Oscilograma	Mismos criterios del circonio, con la escala del sistema (0–1 V o 0–5 V). Ajuste V/div a 1 V/div en sistemas de 5 V
13 · PWM	La señal no es PWM. El calefactor sí, con los mismos parámetros del §4.1
14 · Corriente	Calefactor 0.3 – 1.2 A. La corriente del elemento es de μA y no es diagnóstica

15 · Preguntas de autoevaluación — Titanio

P1. Un técnico conecta el osciloscopio a la sonda de un Nissan y observa una señal que oscila entre 0.6 V y 4.5 V. Concluye que la sonda está averiada porque “una sonda no puede pasar de 1 V”. Explique el error, indique cómo debió identificar el sensor y cuál es el rango correcto.

P2. Calcule el voltaje de señal de una sonda de titanio con referencia de 5 V y resistencia interna fija de 8 k Ω , cuando el elemento mide 6 k Ω . Determine si la mezcla está rica o pobre.

P3. Explique por qué una sonda de titanio puede medirse con el óhmetro sin riesgo mientras que una de circonio no, y qué diferencia física fundamental lo justifica.

4.3 · SENSOR A/F DE BANDA ANCHA (UEGO / LAF / AFR)

SENSOR A/F DE BANDA ANCHA — DOS CELDAS + CÁMARA DE DIFUSIÓN

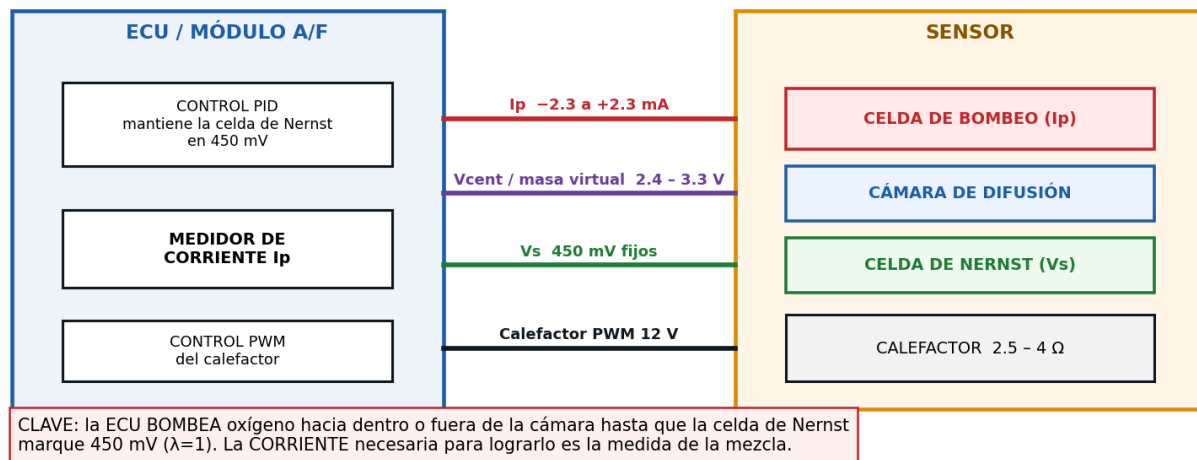


Figura 6: Circuito del sensor de banda ancha

Principio de funcionamiento

El sensor de banda ancha resuelve la limitación fundamental del circonio: **su rango útil de ± 2 % alrededor de $\lambda = 1$** . Lo hace combinando **dos celdas electroquímicas** separadas por una **cámara de difusión**:

1. La **celda de Nernst** (idéntica a una sonda de circonio) mide el contenido de oxígeno **dentro de la cámara de difusión**.
2. La ECU compara ese valor con **450 mV** ($\lambda = 1$).
3. Si la cámara está rica, la ECU ordena a la **celda de bombeo** que **inyecte** oxígeno; si está pobre, que lo **extraiga**.
4. La **corriente necesaria para mantener la cámara exactamente en $\lambda = 1$** es la **medida de la mezcla real del escape**.

La magnitud medida es la CORRIENTE DE BOMBEO (I_p), no un voltaje

Tabla maestra de corriente de bombeo (Bosch LSU 4.9)

Lambda	AFR (gasolina)	Corriente I_p	Condición
0.65	9.6 : 1	-2.25 mA	Extremadamente rica
0.70	10.3 : 1	-1.85 mA	Muy rica (WOT en turbo)
0.80	11.8 : 1	-1.08 mA	Rica (plena carga)
0.90	13.2 : 1	-0.50 mA	Ligeramente rica
1.00	14.7 : 1	0.00 mA	Estequiométrica
1.02	15.0 : 1	+0.07 mA	Ligeramente pobre

Lambda	AFR (gasolina)	Corriente I_p	Condición
1.18	17.3 : 1	+0.48 mA	Pobre (crucero en mezcla pobre)
1.43	21.0 : 1	+0.96 mA	Muy pobre
1.70	25.0 : 1	+1.26 mA	Diésel a carga parcial
2.42	35.6 : 1	+1.70 mA	Diésel a baja carga
Aire libre	—	+2.3 a +3.0 mA	Valor de verificación en banco

Convención de signos: Bosch usa I_p **negativa en rica**. Algunos fabricantes invierten el signo en sus PIDs. **Lo que nunca cambia es que $I_p = 0$ en $\lambda = 1.00$** , y ese es el punto de referencia universal.

Cómo lo muestra el escáner: valores simulados

El escáner casi nunca muestra la corriente real. Muestra un valor **calculado** que varía por fabricante:

Sistema	Qué muestra el escáner	Valor en $\lambda = 1.00$
Toyota / Denso (A/F)	Voltaje simulado	3.30 V — rica por debajo, pobre por encima
Honda (LAF)	Lambda o voltaje simulado	$1.00 \lambda \cdot \text{voltaje según modelo}$
GM / Ford	Lambda o relación de equivalencia	1.00
Bosch / VAG	Lambda	1.00
Genérico OBD-II	Relación de equivalencia ϕ	1.00
Algunos escáneres avanzados	Corriente en mA	0.00 mA

Valores de referencia Toyota / Denso (voltaje simulado):

Condición	Voltaje mostrado
Muy rica (propano, WOT)	2.7 – 3.0 V
Rica	3.0 – 3.29 V
$\lambda = 1.00$	3.30 V
Pobre	3.31 – 3.6 V
Muy pobre (DFCO)	3.7 – 4.5 V

Nota crítica sobre Toyota: el valor de 3.3 V **no se puede medir con el multímetro en el conector del sensor**. Es un número calculado por la ECU a partir de la corriente de bombeo. Medir voltaje en los pines dará valores sin relación con lo que muestra el escáner.

1 · Valores en ralentí (motor caliente, lazo cerrado)

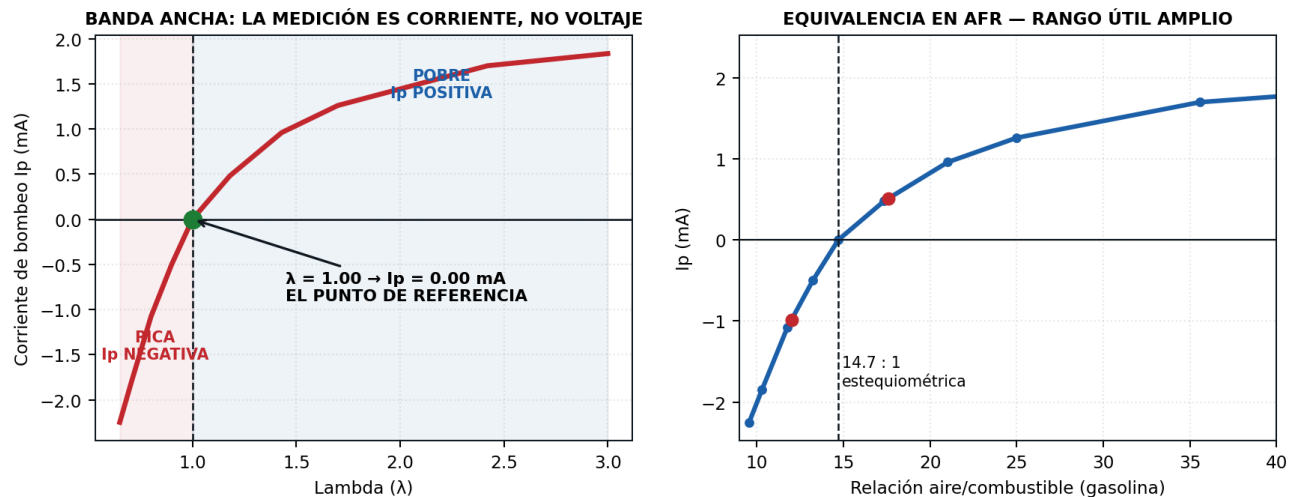


Figura 7: Curva de corriente de bombeo

Parámetro	Valor esperado
Lambda	0.99 - 1.01
Corriente I_p	-0.05 a +0.05 mA
Voltaje simulado Toyota	3.28 - 3.32 V
Voltaje de la celda de Nernst (Vs)	450 mV, fijos
Voltaje de masa virtual (Vcent)	2.4 - 3.3 V según fabricante
Resistencia del calefactor	2.5 - 4.0 Ω
Corriente del calefactor en régimen	0.6 - 1.5 A
Estabilidad del PID de lambda	±0.01

Diferencia fundamental con el circonio: en lazo cerrado, **la señal de un sensor de banda ancha NO conmuta**. Se mantiene prácticamente plana en $\lambda = 1.00$ con oscilaciones muy pequeñas. **Una línea plana en un sensor de banda ancha es lo normal y esperado**; en un circonio sería una falla. Este es el error de interpretación más frecuente del módulo.

2 · Valor aproximado a 2000 - 2500 RPM

Condición	Lambda	I_p
2500 RPM sin carga, lazo cerrado	0.99 - 1.01	≈ 0 mA
2500 RPM con carga media	0.98 - 1.02	-0.10 a +0.10 mA
Desaceleración con corte (DFCO)	> 1.5, hasta aire libre	+1.2 a +2.5 mA
Aceleración a fondo (atmosférico)	0.85 - 0.92	-0.85 a -0.40 mA
Aceleración a fondo (turbo)	0.78 - 0.85	-1.25 a -0.80 mA

La prueba de desaceleración es la verificación funcional más rápida: al levantar el pie desde 3000 RPM, la ECU corta la inyección y por el escape pasa **aire puro**. El sensor debe reportar λ muy alto ($I_p > +1.2$ mA). Si no lo hace, el sensor no puede medir el extremo pobre y está degradado.

3 · Rango de funcionamiento normal

Parámetro	Valor
Rango de medición de λ	0.65 hasta aire libre
Precisión típica	$\pm 0.01 \lambda$ cerca de la estequiometría
Temperatura de operación	750 - 800 °C (más alta que el circonio)
Tiempo de activación con calefactor	10 - 30 s
Potencia del calefactor	7.5 - 12 W en régimen
Voltaje de la celda de Nernst	450 mV siempre

4 · Síntomas de falla

Falla	Síntoma
Sensor degradado / envejecido	Lambda sesgada de forma constante → <i>fuel trims</i> desviados sin causa mecánica
Calefactor deficiente	El sensor no entra en operación; lazo abierto prolongado; consumo alto en frío Respuesta lenta, lambda sesgada
Contaminación (silicona, aceite, refrigerante)	
Choque térmico / grietas	Falla total, códigos de circuito
Resistencia de calibración dañada o conector cruzado	Lecturas desplazadas de forma permanente — ver punto 8
Fuga de escape antes del sensor	Reporta pobre; la ECU enriquece de más
Circuito de I_p abierto	Sin señal, código de circuito

Códigos:

Código	Significado
P0130 - P0134	Circuito y desempeño del sensor A/F banco 1 sensor 1
P0135	Calefactor del sensor A/F
P2195 / P2197	Señal atascada en pobre (banco 1 / banco 2)
P2196 / P2198	Señal atascada en rica (banco 1 / banco 2)
P2237 / P2238 / P2239	Circuito de corriente de bombeo, banco 1 sensor 1
P2240 - P2247	Circuito de corriente de bombeo, otros sensores
P2251 / P2252	Circuito de masa virtual del sensor A/F
P1130 / P1135 (Toyota)	Circuito y calefactor del sensor A/F

5 · Posibles soluciones y reparaciones

1. **Reparar fugas de escape antes del sensor.** Igual que en el circonio, es la primera causa de lecturas falsamente pobres.
2. **Verificar el circuito del calefactor** con Ley de Ohm y análisis de corriente. Un calefactor deficiente en un sensor de banda ancha es más grave que en un circonio, porque este trabaja a 750 - 800 °C y **su precisión depende directamente de mantener esa temperatura.**
3. **Nunca intercambiar conectores entre sensores** (ver punto 8).
4. **Eliminar la fuente de contaminación** antes de instalar el sensor nuevo.
5. **Respetar el par de apriete** y usar antiagarrotante libre de cobre.
6. Reemplazar el sensor cuando la prueba de aire libre o la de respuesta forzada lo confirmen.

6 · Estrategia de diagnóstico avanzado paso a paso

Advertencia previa: un sensor de banda ancha **no se diagnostica con multímetro sobre los pines de señal.** Los voltajes que se miden ahí (2.4 - 3.3 V de masa virtual, 450 mV de Nernst) son **valores internos del lazo de control**, no la medición de la mezcla. Intentar interpretarlos como lambda lleva a conclusiones sin sentido.

Fase A — Verificación del calefactor

Paso A1 — Resistencia. Sensor desconectado, óhmetro entre los dos pines del calefactor: **2.5 - 4.0 Ω** (mucho menor que en un circonio).

Paso A2 — Alimentación. 11.5 - 14.5 V en el pin de 12 V con el motor en marcha.

Paso A3 — Corriente y rampa. Pinza de baja corriente. Ver punto 14: la rampa progresiva es obligatoria en estos sensores.

Fase B — Verificación funcional por PIDs (el método principal)

Con el motor caliente y en lazo cerrado, registre simultáneamente: **lambda, STFT, LTFT, MAF (g/s), RPM y carga calculada.**

Prueba	Comportamiento esperado
Ralentí en lazo cerrado	$\lambda = 0.99 - 1.01$, estable
Desaceleración desde 3000 RPM	λ sube por encima de 1.5 en menos de 1 s
Aceleración a fondo	λ baja a 0.85 - 0.92 (atmosférico) o 0.78 - 0.85 (turbo)
Retorno a ralentí	λ regresa a 1.00 en menos de 1 s
Enriquecimiento con propano	λ baja de inmediato por debajo de 0.90

Criterio de aprobación de velocidad: las transiciones deben completarse en **menos de 1 segundo**. Un sensor que tarda 3 - 5 s en responder está degradado aunque los valores en régimen sean correctos.

Fase C — Prueba de aire libre (la verificación de banco definitiva)

1. Retire el sensor del escape.

- Manténgalo conectado eléctricamente y con el motor en marcha (o con el encendido puesto, según el sistema).
- Espere a que el calefactor lo lleve a temperatura (30 - 60 s).
- El sensor está midiendo aire atmosférico: **20.9 % de O₂**.

Lectura esperada	Sistema
$I_p = +2.3$ a $+3.0$ mA	Medición directa de corriente
λ máximo del rango	Escáner con PID de lambda
4.0 - 4.5 V	Toyota (voltaje simulado)

Si el sensor no alcanza el valor de aire libre, está degradado, sin discusión y sin necesidad de más pruebas. Es el equivalente al *snap test* del MAF: una prueba de un extremo conocido.

Fase D — Comparación entre bancos (motores en V)

Registre lambda de banco 1 y banco 2 simultáneamente en las mismas condiciones. Una diferencia sostenida mayor a **0.03 λ** indica:

- Un sensor sesgado, o
- Un problema real en un solo banco (inyector, fuga de escape, compresión).

Cómo separarlos: intercambie físicamente los dos sensores entre bancos. Si la desviación **se mueve con el sensor**, es el sensor. Si **se queda en el banco**, es un problema mecánico o de combustible de ese banco.

Fase E — Prueba de caída de voltaje

Circuito	Corriente	Límite de caída
Alimentación del calefactor	0.6 - 2.5 A	0.20 V
Masa / control del calefactor	0.6 - 2.5 A	0.10 V
Circuito de corriente de bombeo (I_p)	≤ 3 mA	0.02 V — crítico
Circuito de la celda de Nernst (V_s)	μ A	0.01 V — crítico
Masa virtual (V_{cent})	mA	0.02 V

Por qué los límites de I_p y V_s son extremos: la señal completa de corriente de bombeo es de apenas ± 2.3 mA, y la celda de Nernst se regula en 450 mV. Una caída de 0.05 V en el circuito de Nernst desplaza el punto de regulación un 11 % — **el sensor entero queda descalibrado** y reportará una lambda incorrecta de forma constante y sin ningún código.

7 · Valores comunes de resistencia

Medición	Valor	Utilidad
Calefactor	2.5 - 4.0 Ω	Sí, la medición más útil
Resistencia de calibración (en el conector)	30 - 300 Ω (varía por sensor individual)	Solo para verificar presencia
Celda de bombeo	NO MEDIR	Riesgo de daño
Celda de Nernst	NO MEDIR	Riesgo de daño
Continuidad del arnés	< 1 Ω	Sí

8 · Alimentaciones y tierras

Configuración de 6 pines (Bosch LSU 4.9, la más difundida):

Pin	Color Bosch	Función	Valor
1	Rojo	Corriente de bombeo (I_p)	-2.3 a +3.0 mA
2	Amarillo	Masa virtual (Vcent / Vm)	2.4 - 3.3 V
3	Blanco	Calefactor - (control PWM)	0 - 14 V
4	Gris	Calefactor + (12 V)	11.5 - 14.5 V
5	Verde	Celda de Nernst (U_n / V_s)	450 mV
6	—	Resistencia de calibración	30 - 300 Ω , en el conector

La resistencia de calibración: el detalle que arruina reparaciones

Cada sensor de banda ancha se calibra individualmente en fábrica. La desviación de ese sensor concreto se compensa con una **resistencia de precisión alojada dentro de su propio conector**.

CONSECUENCIA OPERATIVA:

- **Nunca intercambie el conector de un sensor con el de otro**, aunque sean del mismo número de parte. La resistencia de calibración pertenece a ese sensor individual.
- **Nunca corte y empalme el conector** de un sensor de banda ancha para “reparar” un arnés.
- Si el conector se daña, **se reemplaza el sensor completo**.
- Un conector cruzado produce una lambda sesgada de forma permanente, **sin ningún código**, y es prácticamente imposible de diagnosticar si no se sabe que existe.

Configuración de 5 pines (LSU 4.2 y algunos Denso): sin resistencia de calibración separada; el resto de las funciones son equivalentes.

9 · Aplicación de la Ley de Ohm

Cálculo 1 — Circuito del calefactor

Calefactor de 3.2 Ω a 13.8 V, duty cycle del 100 %:

$$I = \frac{13.8}{3.2} = 4.31 \text{ A} \quad P = 59.5 \text{ W}$$

En régimen, con duty cycle del 20 %:

$$P_{media} = 59.5 \times 0.20 = 11.9 \text{ W}$$

Coincide con la potencia especificada de 7.5 - 12 W. **La verificación cruzada resistencia-corriente-duty cycle valida el circuito completo.**

Cálculo 2 — Efecto de 1.0 Ω de resistencia parásita en el calefactor

$$I = \frac{13.8}{3.2 + 1.0} = 3.29 \text{ A} \quad P_{calefactor} = 3.29^2 \times 3.2 = 34.6 \text{ W}$$

Frente a los 59.5 W nominales, es una pérdida del **42 %**. Como este sensor necesita 750 - 800 °C para ser preciso, la consecuencia no es solo un arranque lento: **el sensor opera por debajo de su temperatura de calibración y reporta lambda con error permanente**. Y la ECU, al verlo “activo”, entra en lazo cerrado y corrige la mezcla siguiendo un dato falso.

Cálculo 3 — Por qué 0.05 V en el circuito de Nernst descalibran el sensor

El lazo de control mantiene la celda de Nernst en 450 mV. Con 0.05 V de caída en el cableado, la ECU regula para ver 450 mV **en su propio pin**, lo que significa que la celda real está en:

$$V_{celda} = 450 - 50 = 400 \text{ mV}$$

400 mV en una celda de circonio corresponden aproximadamente a $\lambda = 1.02$ (ligeramente pobre). El sistema mantendrá la cámara de difusión en $\lambda = 1.02$ creyendo que está en 1.00, y **el escape real quedará permanentemente pobre en un 2 %** — con LTFT positivo que ningún componente justifica.

Cálculo 4 — Sensibilidad del circuito de I_p

Con $I_p = 0.50 \text{ mA}$ y 40 Ω de resistencia parásita:

$$V_{error} = 0.0005 \times 40 = 0.02 \text{ V}$$

En un circuito donde el módulo mide corriente a través de una resistencia patrón de, por ejemplo, 100 Ω , ese error equivale a:

$$I_{error} = \frac{0.02}{100} = 0.2 \text{ mA}$$

0.2 mA sobre un rango total de 2.3 mA es casi un 9 % de error de escala — el equivalente a 0.1 λ . Por eso los límites de caída de voltaje de este sensor son los más estrictos de todo el curso.

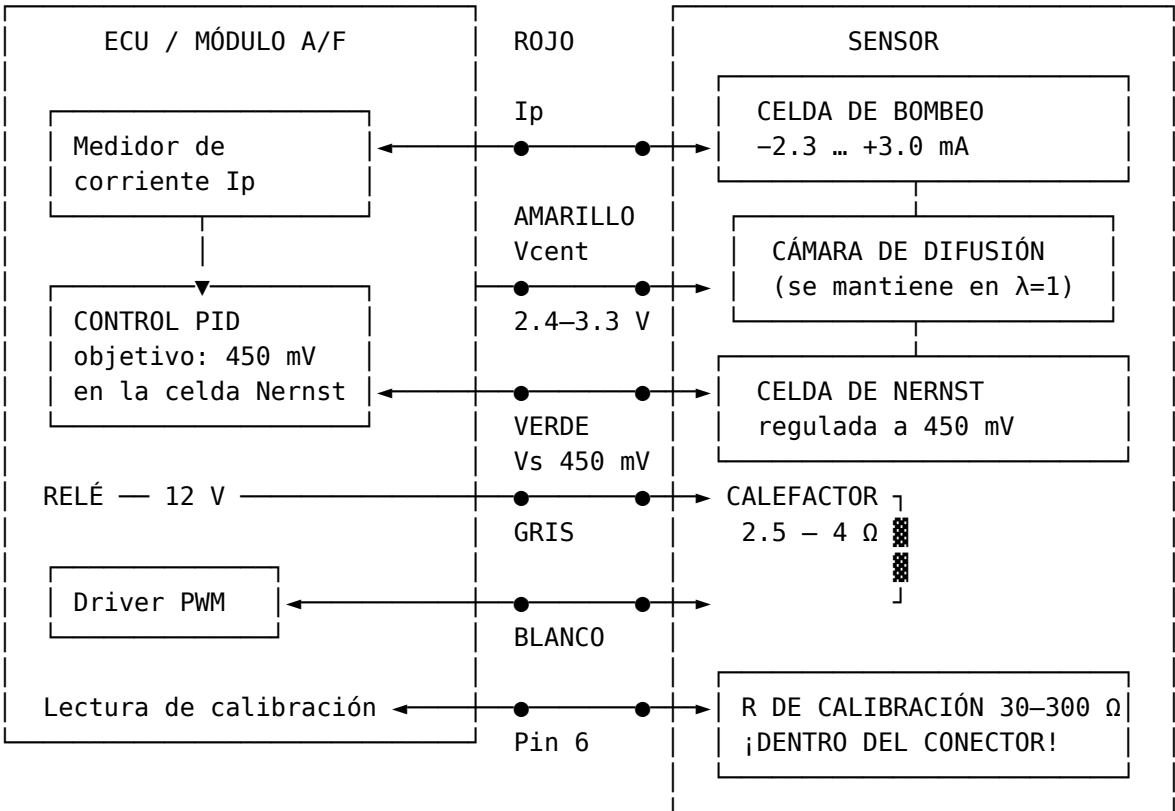
10 · Nomenclatura de cableado

Marca	I_p	Vs / Nernst	Vcent	Calefactor +	Calefactor -
Bosch LSU 4.9	ROJO	VERDE	AMARILLO	GRIS	BLANCO
Toyota / Denso	A+	A-	—	HA1	HT
Honda	WHT/RED	RED/YEL	BLK/WHT	BLK/YEL	WHT/BLK

Marca	I_p	V_s / Nernst	V_{cent}	Calefactor +	Calefactor -
GM	— (según diagrama)	—	—	PNK	BLK/WHT
Ford	GRY, LT BLU	BRN	—	WHT	BLK/WHT
VW / Audi	rt	gn	ge	gr	ws

11 · Simbología y diagrama de conexión

SENSOR A/F DE BANDA ANCHA – 6 HILOS (Bosch LSU 4.9)



△ LA RESISTENCIA DE CALIBRACIÓN PERTENECE A ESE SENSOR INDIVIDUAL.
NUNCA intercambie conectores entre sensores ni empalme el arnés del sensor.

12 · Análisis de oscilogramas

Qué se puede y qué no se puede ver con osciloscopio:

Señal	¿Medible con osciloscopio?	Qué muestra
Corriente de bombeo I_p	Indirectamente	Requiere resistencia patrón en serie o módulo con salida analógica
Celda de Nernst (V_s)	Sí	Debe estar fija en 450 mV ; variación = lazo de control inestable

Señal	¿Medible con osciloscopio?	Qué muestra
Masa virtual (Vcent)	Sí	Debe estar estable en su valor nominal
Calefactor (PWM)	Sí — la captura más útil	Rampa progresiva y regulación
Lambda	No directamente	Solo por PID del escáner

Método práctico para visualizar I_p : inserte una resistencia patrón de **100 Ω** en serie con el circuito de bombeo y mida el voltaje sobre ella con el osciloscopio en escala de mV:

$$V_{medido} = I_p \times 100 \Omega$$

I_p	Voltaje sobre 100 Ω
-2.25 mA (λ 0.65)	-225 mV
-0.50 mA (λ 0.90)	-50 mV
0.00 mA (λ 1.00)	0 mV
+0.96 mA (λ 1.43)	+96 mV
+2.30 mA (aire libre)	+230 mV

Precaución: este método altera el circuito de medición y solo debe usarse para diagnóstico puntual, nunca de forma permanente. Con muchos módulos modernos activará un código de circuito.

Configuración del osciloscopio para el calefactor:

Ajuste	Valor
Acoplamiento	DC
V/div	5 V/div
Time/div	5 - 10 s/div en modo <i>roll</i> (para ver la rampa completa)
Canal adicional	Pinza de corriente sobre el cable del calefactor
Duración	60 s desde el arranque en frío

13 · Señales PWM / ciclo de trabajo

La señal de medición no es PWM. El calefactor sí, y en la banda ancha su control es más elaborado que en el circonio:

Parámetro	Valor
Tipo de control	Low side (masa conmutada)
Frecuencia	10 - 100 Hz
Fase 1 — Espera del punto de rocío	Duty cycle 0 % durante 10 - 60 s tras el arranque
Fase 2 — Rampa de precalentamiento	Sube progresivamente hasta 80 - 95 % en 10 - 20 s
Fase 3 — Regulación	15 - 50 % según la temperatura del escape

Parámetro	Valor
Criterio de regulación	La ECU mide la impedancia interna de la celda de Nernst y ajusta el duty cycle para mantener 750 – 800 °C

La fase 1 explica un comportamiento que muchos técnicos interpretan como falla: durante el primer minuto tras un arranque en frío, **el calefactor permanece apagado a propósito**. La ECU espera a que el condensado del escape se evapore; si calentara antes, una gota de agua sobre la cerámica a 700 °C la agrietaría. Un duty cycle de 0 % durante el primer minuto es **correcto**.

14 · Análisis de corriente

Medición	Valor esperado	Método
Calefactor, fase de rampa	1.5 – 4.0 A creciente	Pinza de baja corriente
Calefactor en régimen	0.6 - 1.5 A	Igual
Corriente de bombeo I_p	-2.3 a +3.0 mA	Resistencia patrón + osciloscopio, o PID del escáner

Interpretación de la corriente del calefactor:

Hallazgo	Diagnóstico
Rampa progresiva y regulación estable	Sistema sano
Salto inmediato al máximo sin rampa	Estrategia incorrecta o módulo dañado; riesgo de agrietar el sensor
Corriente menor a la calculada por Ley de Ohm	Resistencia parásita — el sensor operará frío y descalibrado
Corriente nula con duty cycle presente	Calefactor abierto
Corriente correcta pero lambda sesgada	El problema no es térmico: sensor degradado o conector cruzado

Verificación cruzada:

$$R_{par} = \frac{V_{sistema}}{I_{medida \text{ al } 100\%}} - R_{calefactor}$$

15 · Preguntas de autoevaluación — Banda ancha

P1. Un técnico conecta el osciloscopio a un sensor A/F de Toyota y mide 3.02 V entre dos pines. El escáner muestra 3.30 V. Concluye que el sensor está sesgado. Explique por qué la comparación no tiene sentido, qué está midiendo realmente en cada caso y cuál es el procedimiento correcto de verificación.

P2. El calefactor de un sensor de banda ancha mide 3.4 Ω. Con duty cycle del 100 % y 14.0 V de sistema, la pinza lee 3.18 A. Calcule la resistencia parásita, la potencia real entregada al

calefactor frente a la nominal, y explique por qué la consecuencia va más allá de un simple retraso en la activación.

P3. Un vehículo presenta LTFT de +8 % en ambos bancos, constante en todo el rango de carga. El MAF, la presión de combustible y la compresión están verificados y correctos. La lambda reportada es 1.00 en todo momento. Explique cómo el propio sensor A/F puede ser la causa, qué mecanismo eléctrico lo produce y qué prueba lo confirma.

4.4 · SONDA POST-CATALIZADOR Y EFICIENCIA DEL CATALIZADOR

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL CATALIZADOR POR COMPARACIÓN DE SONDAS

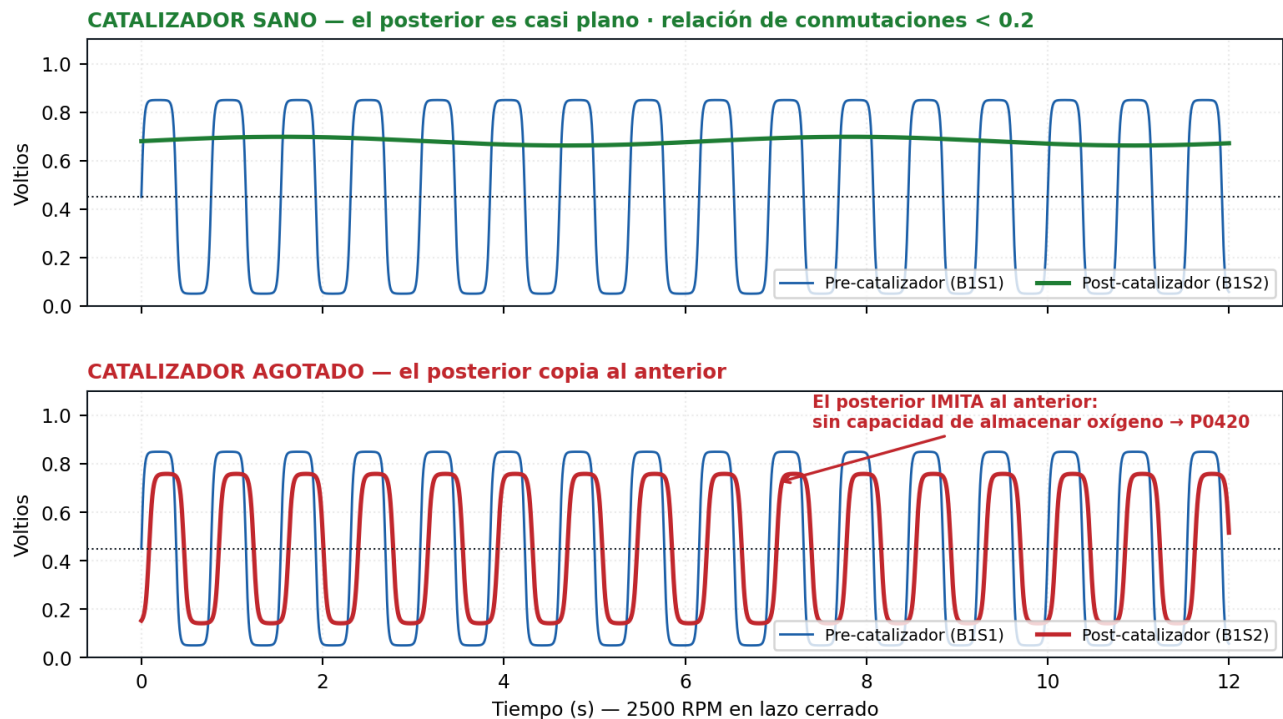


Figura 8: Evaluación de la eficiencia del catalizador

Función de la sonda posterior

La sonda post-catalizador (**B1S2**, *downstream*) tiene dos funciones y **ninguna de ellas es controlar la mezcla de forma primaria**:

1. **Evaluar la eficiencia del catalizador** comparando su señal con la de la sonda anterior.
2. **Corregir lentamente el control de la sonda anterior** (*fuel trim secundario*), compensando el envejecimiento de la sonda pre-catalizador.

Cómo funciona el catalizador y por qué la sonda posterior es plana

El catalizador de tres vías contiene **óxido de cerio**, un material capaz de **almacenar y liberar oxígeno**. Cuando la mezcla se va pobre, el cerio captura el oxígeno excedente; cuando se va rica, lo libera para oxidar los hidrocarburos.

El resultado es un amortiguador químico: aunque la sonda anterior conmute 1 - 5 veces por segundo, el catalizador absorbe esas variaciones y los gases que salen tienen un contenido de oxígeno casi constante.

Catalizador sano $\Rightarrow$ sonda posterior PLANA

Catalizador agotado $\Rightarrow$ sonda posterior IMITA a la anterior

1 · Valores en ralentí (catalizador sano)

Parámetro	Valor esperado
Voltaje	0.55 - 0.80 V , estable
Variación pico a pico	< 0.10 V
Frecuencia de conmutación	< 0.2 Hz (casi nula)
Resistencia del calefactor	3 - 15 Ω
Relación de conmutaciones posterior/anterior	< 0.2

2 · Valor aproximado a 2000 - 2500 RPM

Parámetro	Catalizador sano	Catalizador agotado
Voltaje	0.60 - 0.80 V estable	Oscila 0.15 - 0.80 V
Variación pico a pico	< 0.10 V	> 0.40 V
Conmutaciones en 10 s	0 - 2	8 - 14 (igual que la anterior)
Relación posterior/anterior	< 0.2	> 0.7

3 · Rango de funcionamiento normal

Condición	Voltaje de la sonda posterior
Ralentí, catalizador sano	0.55 - 0.80 V
Crucero, catalizador sano	0.60 - 0.80 V
Desaceleración con corte (DFCO)	Cae a 0.0 - 0.2 V — normal, pasa aire puro
Tras el corte, al volver a inyectar	Regresa a 0.6 - 0.8 V en 2 - 10 s
Motor en lazo abierto (frío)	Sigue a la sonda anterior; normal
Plana en 0.45 V	Sonda muerta (polarización de la ECU)
Plana por debajo de 0.30 V	Fuga de escape después del catalizador, o sonda sesgada

La caída durante el corte en desaceleración es normal y diagnósticamente útil: confirma que la sonda posterior **sí puede responder**. Una sonda que ni siquiera cae durante el DFCO está muerta.

4 · Síntomas de falla

Falla	Síntoma
Catalizador agotado	P0420 / P0430 , MIL encendida, sin síntomas de conducción
Catalizador tapado	Falta de potencia progresiva, MAP alto (Módulo 2, §2.1 punto 12)
Sonda posterior muerta	P0136 / P0140; el monitor del catalizador no se completa

Falla	Síntoma
Sonda posterior perezosa	P0420 falso — la sonda no responde y la ECU interpreta actividad anómala
Fuga de escape entre el catalizador y la sonda	P0420 falso; la sonda ve aire y reporta pobre
Calefactor abierto	P0141; la sonda tarda en activarse, monitor incompleto

Códigos:

Código	Significado
P0420	Eficiencia del catalizador por debajo del umbral, banco 1
P0430	Igual, banco 2
P0136 – P0140	Circuito y actividad de la sonda B1S2
P0141	Calefactor de la sonda B1S2
P0037 / P0038	Control del calefactor de la sonda 2

La verdad incómoda del P0420: el código **no dice que el catalizador esté malo**. Dice que **la sonda posterior se está pareciendo demasiado a la anterior**. Las causas reales, en orden de frecuencia:

1. Catalizador realmente agotado
2. **Fuga de escape** antes o entre las sondas
3. **Sonda posterior perezosa** (no el catalizador)
4. Mezcla crónicamente desviada que envenenó el catalizador — **hay que corregir la causa o el catalizador nuevo durará semanas**
5. Consumo de aceite o refrigerante que contamina el sustrato
6. Sonda anterior perezosa que hace fluctuar demasiado la mezcla

5 · Posibles soluciones y reparaciones

1. **Verificar fugas de escape con máquina de humo** antes de considerar cualquier reparación. Es la causa evitable más frecuente de P0420.
2. **Verificar la sonda anterior y la posterior** con la prueba de respuesta forzada (§4.1 Fase C) — una sonda posterior perezosa produce P0420 con un catalizador perfecto.
3. **Corregir la causa raíz de la mezcla desviada** (fuel trims, consumo de aceite, misfires) antes de reemplazar el catalizador.
4. **Verificar la contrapresión de escape** para descartar catalizador tapado (que es un problema distinto al de eficiencia).
5. Reemplazar el catalizador solo tras confirmar la prueba de capacidad de almacenamiento de oxígeno (punto 6, Fase B).

6 · Estrategia de diagnóstico avanzado

Fase A — Verificación de la propia sonda posterior

Antes de evaluar el catalizador, **hay que aprobar la sonda**. Aplique la prueba de respuesta forzada del §4.1 Fase C:

- Con enriquecimiento (propano): la sonda posterior debe superar 0.85 V.
- Durante el corte en desaceleración: debe caer por debajo de 0.20 V.

Si la sonda posterior no alcanza ambos extremos, no se puede evaluar el catalizador con ella. Reemplace la sonda y vuelva a evaluar.

Fase B — Prueba de capacidad de almacenamiento de oxígeno

Es la prueba directa de la función del catalizador.

1. Motor caliente, 2500 RPM sostenidas.
2. Capture ambas sondas simultáneamente (2 canales).
3. **Fuerce mezcla rica** con propano durante 5 s y retírelo.
4. Mida cuánto tarda la sonda posterior en responder al cambio.

Retardo de la sonda posterior	Diagnóstico
> 3 - 5 s	Buena capacidad de almacenamiento — catalizador sano
1 - 3 s	Capacidad reducida — catalizador envejecido
< 1 s	Sin capacidad de almacenamiento — catalizador agotado

Fase C — Cálculo de la relación de conmutaciones

Con ambas sondas capturadas durante 60 s a 2500 RPM:

$$\text{Relación} = \frac{\text{Conmutaciones de la sonda POSTERIOR}}{\text{Conmutaciones de la sonda ANTERIOR}}$$

Relación	Interpretación
< 0.2	Catalizador con excelente eficiencia
0.2 - 0.5	Aceptable; vigilar
0.5 - 0.7	Deteriorado
> 0.7	Agotado — P0420 justificado

Ejemplo: 42 conmutaciones en la sonda anterior y 4 en la posterior:

$$\text{Relación} = \frac{4}{42} = 0.095 \Rightarrow \text{catalizador sano}$$

Si en ese mismo vehículo hay P0420, **el catalizador no es la causa**: busque fuga de escape o sonda perezosa.

Fase D — Prueba de temperatura diferencial

Con termómetro infrarrojo o pirómetro, con el motor a 2500 RPM durante 2 minutos:

$$\Delta T = T_{\text{salida}} - T_{\text{entrada}}$$

Resultado	Diagnóstico
Salida 30 - 100 °C más caliente que la entrada	Catalizador trabajando (la reacción es exotérmica)
Salida igual o más fría que la entrada	Catalizador inactivo
Diferencia enorme (> 200 °C)	Combustión excesiva: hay misfires o mezcla muy rica llegando al catalizador

Precaución de método: mida sobre el cuerpo metálico del catalizador, use cinta mate si la superficie es brillante (Módulo 3, §3.5) y asegúrese de que el motor haya funcionado el tiempo suficiente para estabilizar.

Fase E — Prueba de contrapresión (descartar catalizador tapado)

Un catalizador **tapado** es un problema distinto de uno **agotado**. Verifique con:

- Manómetro de contrapresión roscado en el lugar de la sonda anterior: máximo **1.5 - 3 psi (10 - 20 kPa)** a 2500 RPM.
- O con la prueba del MAP del Módulo 2, §2.1 punto 12 (el MAP no regresa a la línea base tras la aceleración).

Fase F — Prueba de caída de voltaje

Idéntica al §4.1 Fase D. Los límites son los mismos: calefactor 0.20 V / 0.10 V; masa de señal 0.02 V.

7 - 11 · Resistencia, alimentaciones, Ley de Ohm, cableado y simbología

Idénticos a la sonda de circonio pre-catalizador (§4.1, puntos 7 a 11). La sonda posterior es físicamente el mismo componente; solo cambia su ubicación y la interpretación de su señal.

Punto	Particularidad de la sonda posterior
7 · Resistencia	Calefactor 3 - 15 Ω. Mismos valores
8 · Alimentaciones	En muchos vehículos el calefactor de la posterior tiene su propio driver, separado del de la anterior
9 · Ley de Ohm	Mismos cálculos. El calefactor de la posterior trabaja más , porque el escape está más frío en esa posición
10 · Cableado	Identificado como H02S12, 02S B1S2, 0X2, HT2
11 · Simbología	Idéntica

12 · Análisis de oscilogramas

La captura obligatoria es de dos canales: sonda anterior y sonda posterior simultáneamente. Una sola sonda no permite evaluar el catalizador.

Criterio	Catalizador sano	Catalizador agotado
Forma de la posterior	Casi plana, deriva lenta	Copia la forma de la anterior
Amplitud pico a pico posterior	< 0.10 V	> 0.40 V
Desfase entre ambas	Irrelevante (la posterior no responde)	Pequeño y constante
Respuesta al propano	Retardo > 3 s	Retardo < 1 s

Configuración: DC · 0.2 V/div en ambos canales · 1 – 2 s/div en modo *roll* · captura de 60 s a 2500 RPM · masas de ambas sondas al mismo punto.

13 · Señales PWM

Idéntico al §4.1 punto 13. El calefactor de la sonda posterior suele trabajar con **duty cycle más alto** que el de la anterior, porque el escape está más frío en esa posición. Un duty cycle del 60 – 80 % en la posterior mientras la anterior está al 25 % es **normal**, no una falla.

14 · Análisis de corriente

Medición	Valor	Nota
Calefactor de la sonda posterior, pico	1.0 – 2.0 A	Igual que la anterior
Calefactor en régimen	0.5 – 1.5 A	Habitualmente mayor que en la anterior

15 · Preguntas de autoevaluación — Post-catalizador

P1. Un vehículo presenta P0420. En la captura de 60 s a 2500 RPM, la sonda anterior conmuta 38 veces y la posterior 5 veces. La prueba de propano muestra un retardo de 4 segundos en la posterior. ¿Es el catalizador la causa? Justifique con el cálculo y enumere las dos causas que investigaría a continuación.

P2. La sonda posterior de un vehículo muestra una línea plana en 0.450 V con el motor caliente. Explique por qué esto **no** significa que la mezcla sea perfecta, qué está ocurriendo realmente y por qué el monitor del catalizador nunca se completará.

P3. Explique por qué el calefactor de una sonda post-catalizador trabaja con un duty cycle mayor que el de la sonda anterior, y por qué esa diferencia no debe interpretarse como una falla.

4.5 · SENSOR DE NO_x

Principio de funcionamiento

El sensor de NO_x es el más complejo del vehículo. Utiliza **dos cámaras de difusión en serie**:

1. **Primera cámara:** una celda de bombeo extrae **todo el oxígeno libre** (funciona exactamente como un sensor de banda ancha). Esta corriente proporciona además una **medición de lambda / O₂**.
2. **Segunda cámara:** un electrodo catalítico de rodio **descompone los óxidos de nitrógeno** (NO y NO₂) en nitrógeno y oxígeno. Una segunda celda de bombeo extrae ese oxígeno liberado, y **esa corriente es proporcional a la concentración de NO_x**.

El sensor incorpora su propio módulo de control y transmite el resultado por CAN. No existe una señal analógica de NO_x que medir en el conector.

Ubicaciones y funciones

Posición	Función
Antes del catalizador SCR	Medir el NO _x crudo del motor; dosificar la urea (AdBlue / DEF)
Después del catalizador SCR	Verificar la eficiencia de la conversión y cerrar el lazo de dosificación
En sistemas LNT (trampa de NO _x)	Detectar la saturación de la trampa y comandar la regeneración

1 · Valores en ralentí

Parámetro	Valor típico
NO _x antes del SCR (diésel, ralentí)	50 - 200 ppm
NO _x después del SCR (sistema sano)	< 30 ppm
Lambda reportada (diésel en ralentí)	3.0 - 6.0 (muy pobre)
O ₂ reportado	15 - 19 %
Alimentación del módulo	11.5 - 14.5 V
Consumo del conjunto (módulo + calefactor)	0.8 - 2.0 A

2 · Valor aproximado a 2000 RPM

Condición	NO _x antes del SCR	NO _x después del SCR
2000 RPM sin carga	100 - 300 ppm	< 40 ppm
2000 RPM con carga media	300 - 700 ppm	< 60 ppm
2000 RPM plena carga	600 - 1 500 ppm	< 100 ppm
Con EGR desactivada	Aumenta 2 - 4 veces	—

3 · Rango de funcionamiento normal

Parámetro	Valor
Rango de medición de NOx	0 - 1 500 ppm (algunos hasta 3 000)
Rango de medición de O ₂	0 - 21 %
Rango de lambda	0.75 hasta aire libre
Temperatura de operación	700 - 800 °C
Tiempo hasta lectura válida	2 - 10 minutos tras el arranque
Eficiencia de conversión del SCR esperada	> 80 % (frecuentemente > 90 %)

$$\text{Eficiencia SCR (\%)} = \left(1 - \frac{NOx_{\text{salida}}}{NOx_{\text{entrada}}} \right) \times 100$$

Ejemplo: 620 ppm a la entrada y 48 ppm a la salida:

$$\eta = \left(1 - \frac{48}{620} \right) \times 100 = 92.3 \%$$

Por qué el sensor tarda minutos en dar lectura: igual que el sensor de banda ancha, el módulo espera a que se libere el **punto de rocío del escape** antes de energizar el calefactor. Sobre un sensor a 750 °C, una gota de condensado lo agrieta. **Un sensor de NOx que no reporta durante los primeros minutos está funcionando correctamente.**

4 · Síntomas de falla

Falla	Síntoma
Sensor de entrada sesgado alto	Sobredosificación de urea → cristalización de AdBlue, obstrucción del inyector, olor a amoníaco
Sensor de entrada sesgado bajo	Subdosificación → P20EE (eficiencia del SCR), emisiones altas
Sensor de salida sesgado alto	La ECU cree que el SCR no funciona → P20EE, cuenta regresiva de inmovilización
Sensor de salida sesgado bajo	La ECU cree que todo va bien mientras las emisiones son altas
Pérdida de comunicación CAN	Códigos de comunicación, modo de emergencia
Calefactor deficiente	El sensor nunca alcanza temperatura; sin lecturas
Contaminación por azufre o aceite	Deriva progresiva

Códigos: P2200 - P2203 (circuito y desempeño del sensor de NOx), P229F (sensor de NOx banco 1 sensor 2), **P20EE (eficiencia del catalizador SCR por debajo del umbral)**, P204F, P2BAC (emisiones de NOx excedidas), U-códigos de comunicación con el módulo del sensor.

La consecuencia legal: en muchos mercados, un P20EE o un P2BAC activan una **cuenta regresiva de inmovilización** (reducción progresiva de par y limitación de velocidad hasta la inmovilización del vehículo). El diagnóstico correcto y rápido de estos sensores no es opcional.

5 · Posibles soluciones y reparaciones

1. **Verificar la calidad y el nivel del AdBlue/DEF** antes que nada: concentración de urea 32.5 %, sin contaminación, sin cristalización. Un DEF degradado produce todos los síntomas de un sensor defectuoso.
2. **Verificar el sistema de dosificación:** inyector de urea obstruido, bomba, calefactores del depósito y de las líneas.
3. **Verificar el circuito de EGR** — un EGR inoperante dispara el NOx crudo y satura la capacidad del SCR.
4. **Verificar la alimentación y la masa del módulo del sensor** con caída de voltaje.
5. **Verificar la comunicación CAN** con el módulo del sensor.
6. Reemplazar el sensor cuando la prueba de correlación en frío (§3.5) o la de coherencia entre sensores lo confirmen.

6 · Estrategia de diagnóstico avanzado

Paso 1 — Prueba de correlación en frío. Con el vehículo frío, **ambos sensores de NOx deben reportar 0 ppm y una lambda de aire libre**. Además, su sección de temperatura (si la reportan) debe coincidir con el ambiente. Un sensor que reporta NOx con el motor apagado está defectuoso.

Paso 2 — Verificación de la coherencia entre entrada y salida. Con el SCR desactivado (o antes de que la dosificación comience), **ambos sensores deben reportar valores similares**. Una diferencia grande sin dosificación activa indica un sensor sesgado.

Paso 3 — Verificación de la lambda reportada. Ambos sensores de NOx reportan también lambda. **Compárela con la del sensor de banda ancha del motor** (si existe) y entre ellos: deben coincidir dentro de ± 0.1 en estado estacionario. Es la forma más rápida de detectar un sensor de NOx sesgado.

Paso 4 — Prueba dinámica de dosificación. Con el escáner, observe la dosificación de urea y el NOx de salida. Al aumentar la dosificación, el NOx de salida debe caer. Si no responde, el problema está en la dosificación o en el catalizador SCR, no necesariamente en el sensor.

Paso 5 — Prueba de caída de voltaje.

Circuito	Límite
Alimentación del módulo del sensor	0.20 V
Masa del módulo del sensor	0.10 V
Líneas CAN	No aplica caída; verificar terminación (60 Ω) y niveles

7 · Valores comunes de resistencia

Medición	Valor
Calefactor interno	Habitualmente no accesible — está gobernado por el módulo del sensor

Medición	Valor
Alimentación ↔ masa del módulo	No es una medición diagnóstica
Resistencia de terminación del bus CAN	60 Ω con el bus en reposo (dos resistencias de 120 Ω en paralelo)

No existe una prueba de resistencia útil sobre un sensor de NOx. El diagnóstico es por PIDs y por comunicación.

8 · Alimentaciones y tierras

Pin	Función	Valor
1	12 V (relé o alimentación conmutada)	11.5 - 14.5 V
2	Masa de potencia	< 0.10 V
3	CAN High	2.5 → 3.5 V
4	CAN Low	2.5 → 1.5 V

El sensor de NOx es un nodo de la red CAN. Si su módulo falla en corto, **puede derribar todo el bus** y producir decenas de códigos de comunicación en módulos que no tienen ningún problema. Método de aislamiento: desconectar el sensor de NOx y verificar si el bus se recupera.

9 · Aplicación de la Ley de Ohm

Cálculo 1 — Consumo del conjunto

Con 1.4 A a 13.8 V:

$$P = 13.8 \times 1.4 = 19.3 \text{ W}$$

Con 0.8 Ω de resistencia parásita en la alimentación:

$$V_{drop} = 1.4 \times 0.8 = 1.12 \text{ V}$$

El módulo recibe 12.68 V. Muchos módulos de sensor de NOx tienen un umbral mínimo de operación en torno a **10.5 - 11 V**: con la batería descargada o el motor en ralentí con muchas cargas, ese margen puede perderse y el sensor **dejará de reportar de forma intermitente**, generando códigos de comunicación que parecen problemas de red.

Cálculo 2 — Verificación del bus CAN

Con el encendido apagado, la resistencia entre CAN-H y CAN-L debe ser de **60 Ω** (dos terminaciones de 120 Ω en paralelo):

$$R_{total} = \frac{120 \times 120}{120 + 120} = 60 \text{ Ω}$$

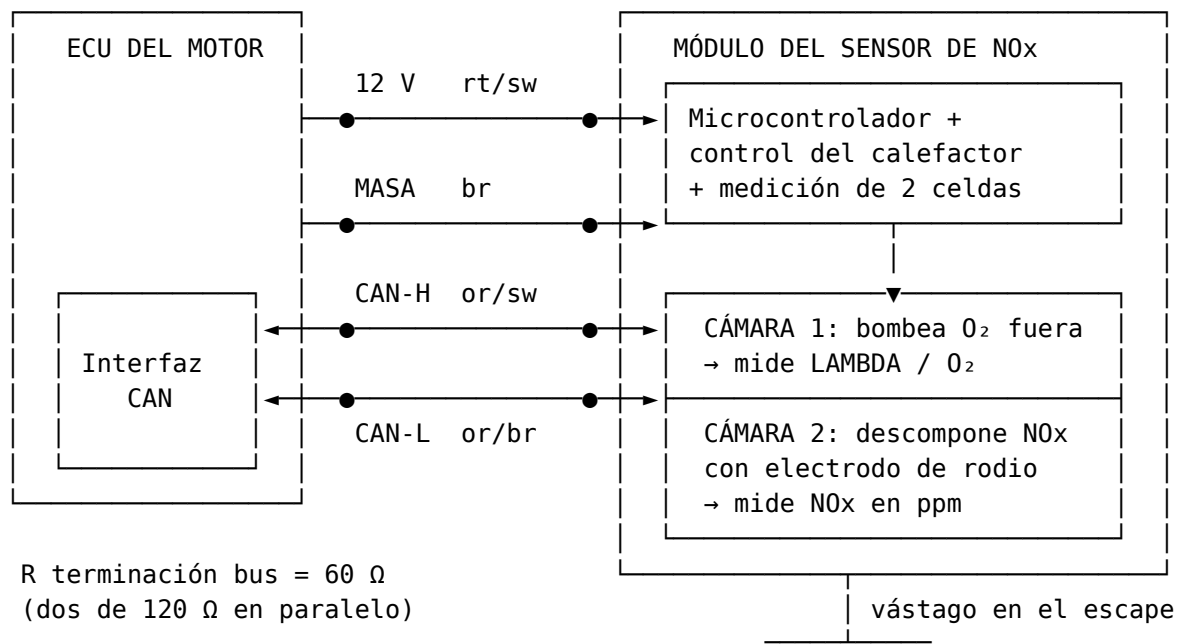
Lectura	Diagnóstico
60 Ω	Bus correcto
120 Ω	Una terminación perdida
< 60 Ω	Terminación adicional o corto
Infinito	Bus abierto

10 · Nomenclatura de cableado

Marca	12 V	Masa	CAN-H	CAN-L
VW / Audi (Continental)	rt/sw	br	or/sw	or/br
Mercedes	rt	br	—	—
Ford diésel	RED/BLK	BLK/WHT	GRY/RED	VIO/WHT
Convención CAN habitual	—	—	naranja/negro	naranja/marrón

11 · Simbología y diagrama de conexión

SENSOR DE NOx – NODO DE RED CAN



NO HAY SEÑAL ANALÓGICA DE NOx. El dato viaja por CAN.
Un módulo en corto puede derribar TODO EL BUS.

12 · Análisis de oscilogramas

Qué se puede capturar	Qué muestra
Líneas CAN-H y CAN-L	Actividad del bus: CAN-H 2.5 → 3.5 V, CAN-L 2.5 → 1.5 V, tramas simétricas
Alimentación del módulo	Estabilidad y ausencia de caídas bajo carga
Señal de NOx	No existe como señal analógica

Configuración para el bus CAN: DC · 1 V/div · 10 – 50 μ s/div · trigger en flanco de CAN-H. Las dos líneas deben ser **espejo** una de la otra respecto a 2.5 V. Una línea plana o asimétrica indica bus dañado.

13 · Señales PWM

No aplica. El calefactor lo gobierna el módulo interno del sensor y no es accesible desde el exterior. La comunicación es digital por CAN.

14 · Análisis de corriente

Medición	Valor	Método
Consumo total del conjunto	0.8 - 2.0 A	Pinza de baja corriente sobre el cable de 12 V
Consumo en fase de calentamiento	Hasta 2.5 A	Igual
Consumo en reposo (tras apagar)	Puede mantenerse varios minutos	Normal: enfriamiento controlado

Interpretación:

Hallazgo	Diagnóstico
Consumo normal, sin datos en CAN	Módulo alimentado pero con falla de comunicación
Sin consumo	Alimentación, masa o módulo interno
Consumo excesivo (> 3 A)	Módulo en corto — desconéctelo y verifique si el bus se recupera

El consumo tras apagar el motor es normal. El módulo mantiene un enfriamiento controlado para evitar el choque térmico. Un consumo residual durante 5 – 10 minutos no es una fuga parásita.

15 · Preguntas de autoevaluación — NOx

P1. Un vehículo diésel presenta P20EE y una cuenta regresiva de inmovilización. El sensor de NOx de entrada reporta 610 ppm y el de salida 520 ppm a 2000 RPM con dosificación activa. Calcule la eficiencia del SCR, determine si está dentro de especificación y enumere las tres causas que investigaría en orden.

P2. Al desconectar el sensor de NOx, decenas de códigos de comunicación de otros módulos desaparecen. Explique el mecanismo, indique qué medición realiza a continuación y cuál es el valor esperado.

P3. Un técnico afirma que el sensor de NOx está defectuoso porque no reporta ningún valor durante los primeros 4 minutos tras el arranque en frío. Explique por qué probablemente se equivoca y cuál es el fundamento físico del comportamiento.

4.6 · FUEL TRIMS: CÁLCULO E INTERPRETACIÓN

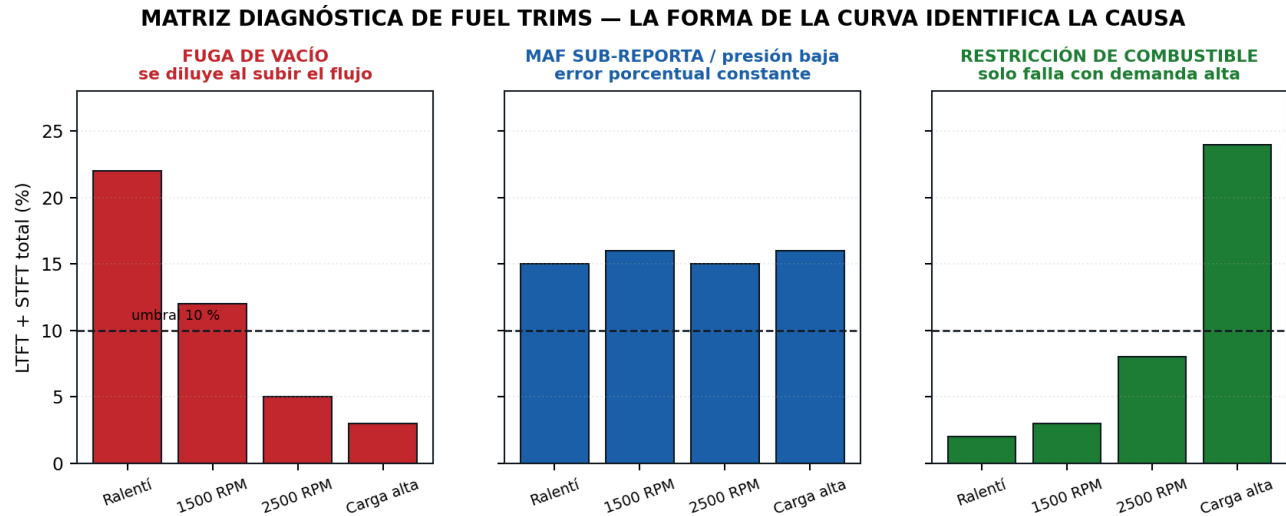


Figura 9: Matriz diagnóstica de fuel trims

Qué son exactamente

Los *fuel trims* son la **corrección porcentual** que la ECU aplica a su cálculo base de combustible para llevar la mezcla a $\lambda = 1.00$.

Tipo	Descripción	Rango de autoridad
STFT (<i>Short Term Fuel Trim</i>)	Corrección inmediata , responde a la sonda en tiempo real. Oscila constantemente. No se memoriza	± 25 % (algunos ± 30 %)
LTFT (<i>Long Term Fuel Trim</i>)	Corrección aprendida y memorizada por celdas de RPM/carga. Absorbe la desviación media del STFT	± 25 % (algunos ± 35 %)

$$\text{Corrección total (\%)} = STFT + LTFT$$

$$\text{Combustible entregado} = \text{Cálculo base} \times \left(1 + \frac{STFT + LTFT}{100} \right)$$

Interpretación del signo

Signo	Significado	Qué está pasando
POSITIVO (+)	La ECU AÑADE combustible	El motor está funcionando POBRE : falta combustible o entra aire no medido
NEGATIVO (-)	La ECU QUITA combustible	El motor está funcionando RICO : sobra combustible o se sub-reporta el aire

Umbrales de interpretación

Corrección total	Interpretación
±0 a ±5 %	Normal
±5 a ±10 %	Aceptable; vigilar si hay síntomas
±10 a ±20 %	Desviación significativa — hay una falla
±20 a ±25 %	Falla importante; el código está por activarse
> ±25 %	P0171 / P0172 (banco 1) o P0174 / P0175 (banco 2)

Estimación de la mezcla real sin corrección

Si la ECU está corrigiendo un +18 % total, significa que **sin esa corrección** la mezcla estaría un 18 % pobre:

$$AFR_{sin\ corregir} \approx 14.7 \times \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 17.3 : 1$$

$$\lambda_{sin\ corregir} \approx 1 + \frac{18}{100} = 1.18$$

Este cálculo convierte un porcentaje abstracto en una magnitud física y permite verificar si la desviación es coherente con la causa sospechada.

MATRIZ DIAGNÓSTICA POR RÉGIMEN — el método central

Registre la corrección total en **cuatro condiciones**: ralentí, 1500 RPM, 2500 RPM y carga alta. **La forma de la curva identifica la causa.**

Patrón	Ralentí	1500	2500	Carga	Causa
Descendente	+22 %	+12 %	+5 %	+3 %	FUGA DE VACÍO — el caudal fijo se diluye al aumentar el flujo

Patrón	Ralentí	1500	2500	Carga	Causa
Plano	+15 %	+16 %	+15 %	+16 %	MAF sub-reportando · presión de combustible baja · inyectores obstruidos por igual RESTRICCIÓN DE COMBUSTIBLE — filtro, bomba débil, regulador Presión de combustible alta · MAF sobre-reportando · inyectores goteando Inyector goteando · purga EVAP pegada abierta
Ascendente	+2 %	+3 %	+8 %	+24 %	
Plano negativo	−14 %	−13 %	−14 %	−15 %	
Negativo en ralentí	−18 %	−8 %	−3 %	−2 %	

El fundamento físico de la matriz

Fuga de vacío: deja entrar un caudal **fijo** de aire. En ralentí, 1 g/s sobre un total de 4 g/s es un **25 %**. A 2500 RPM, ese mismo 1 g/s sobre 15 g/s es solo un **6.7 %**. **El error se diluye porque el numerador no cambia.**

MAF sesgado: se equivoca en el mismo **porcentaje** en todo el rango. Si sub-reporta un 15 %, lo hace tanto a 4 g/s como a 90 g/s. **El error es plano.**

Restricción de combustible: el sistema puede suministrar el caudal necesario en ralentí, pero no a alta demanda. **El error solo aparece con carga.**

Comparación entre bancos (motores en V)

Observación	Diagnóstico
Ambos bancos desviados por igual	Causa común : MAF, presión de combustible, PCV, EVAP, BARO, admisión
Un solo banco desviado	Causa local de ese banco: inyector, fuga de escape, fuga de vacío del colector de ese lado, sonda, compresión

Observación	Diagnóstico
Bancos desviados en sentidos opuestos	Sondas cruzadas al instalar, o problema mecánico severo en un banco

Procedimiento completo de diagnóstico por fuel trims

Paso 1 — Confirmar que el sistema está en lazo cerrado y a temperatura de operación. Los trims en lazo abierto no tienen significado diagnóstico.

Paso 2 — Registrar la matriz de las cuatro condiciones, en ambos bancos.

Paso 3 — Verificar la sonda antes de crear los trims. Una sonda sesgada produce trims desviados sin que exista ningún problema de mezcla. Aplique la prueba de respuesta forzada (§4.1 Fase C) o la de aire libre (§4.3 Fase C).

Paso 4 — Aplicar la matriz para identificar la familia de causas.

Paso 5 — Confirmar con la prueba específica:

Sospecha	Prueba confirmatoria
Fuga de vacío	Máquina de humo · propano alrededor de las juntas (los trims deben caer)
MAF sub-reportando	<i>Snap test</i> y cálculo de eficiencia volumétrica (Módulo 2, §2.3)
Presión de combustible	Manómetro mecánico bajo carga, no solo en ralentí
Inyectores obstruidos	Prueba de caída de presión por cilindro · balance de inyectores
Fuga de escape	Máquina de humo en el escape
Inyector goteando	Prueba de retención de presión con el motor apagado
Purga EVAP pegada	Pinzar la manguera de purga y observar si los trims se normalizan

Paso 6 — Verificar el reaprendizaje. Tras la reparación, **borre los códigos y las adaptaciones** y realice un ciclo de conducción completo. Un LTFT que no se normaliza indica que la causa persiste.

Errores frecuentes de interpretación

Error	Realidad
“El LTFT positivo significa que el motor está rico”	Al revés. Positivo = la ECU añade combustible = el motor está pobre
“Los trims están bien porque el STFT es 0 %”	Hay que sumar STFT y LTFT. Un STFT de 0 % con LTFT de +22 % es una falla grave
“El código P0171 significa fuga de vacío”	Significa mezcla pobre . Puede ser fuga, MAF, combustible, sonda o escape
“Los trims en ralentí bastan”	La forma de la curva en los cuatro regímenes es lo que identifica la causa

Error	Realidad
“Cambio la sonda porque los trims están mal”	La sonda es el instrumento de medida . Verifíquela, pero rara vez es la causa
“El motor no tiene síntomas, los trims no importan”	Un +18 % sostenido daña el catalizador y precede a una falla mayor

Preguntas de autoevaluación — Fuel trims

P1. Registra los siguientes valores en el banco 1: ralentí STFT +4 %, LTFT +19 %; a 2500 RPM STFT +2 %, LTFT +18 %; con carga alta STFT +3 %, LTFT +17 %. El banco 2 muestra valores prácticamente idénticos. Calcule la corrección total en cada condición, identifique el patrón, determine la familia de causas y estime la relación aire/combustible sin corregir.

P2. Un motor V6 presenta LTFT de +21 % en el banco 1 y +2 % en el banco 2, en todos los regímenes. Enumere, en orden de probabilidad, las cuatro causas posibles y describa la prueba que descarta cada una.

P3. Explique con números por qué una fuga de vacío que admite 1.2 g/s de aire produce un trim del +24 % en un motor 2.0 L en ralentí (5 g/s) y solo del +7 % a 2500 RPM (17 g/s).

CUESTIONARIO INTEGRADOR — MÓDULO 4

1. Un sensor de 4 hilos muestra una señal plana en 0.45 V y otro de 6 hilos muestra una señal plana en $\lambda = 1.00$. Explique por qué el primero indica una falla y el segundo indica funcionamiento normal.
 2. Calcule la corriente y la potencia de un calefactor de sonda de 5.8Ω a 14.0 V con duty cycle del 100 %, y después con el duty cycle real del 35 %. Determine si la potencia resultante es coherente con los 7 – 12 W esperados.
 3. Convierta a λ y a AFR una corriente de bombeo de -1.08 mA usando la tabla maestra del §4.3, e indique en qué condición de funcionamiento esperaría encontrar ese valor.
 4. Un vehículo presenta P0420. La relación de conmutaciones posterior/anterior calculada es de 0.14 y la prueba de propano muestra un retardo de 5 s. ¿Es el catalizador la causa? Enumere las dos causas más probables y la prueba que realizaría para cada una.
 5. Explique por qué una caída de 0.05 V en el circuito de la celda de Nernst de un sensor de banda ancha descalibra permanentemente la medición, y calcule a qué λ quedaría regulado el sistema.
 6. Un motor con sonda de 3 hilos presenta *fuel trims* que se desvían cada vez que se activa una carga eléctrica importante. La sonda es nueva. Describa el mecanismo, la prueba y el límite aplicable.
 7. Registra en el banco 1: ralentí +23 %, 1500 RPM +11 %, 2500 RPM +6 %, carga alta +4 %. Identifique el patrón, determine la causa y describa la prueba confirmatoria.
 8. Un sensor de banda ancha se retira del escape y, alimentado y caliente, reporta una corriente de bombeo de +1.4 mA. Determine si el sensor está en condiciones de seguir en servicio y justifique.
 9. Explique por qué **nunca** debe intercambiarse el conector entre dos sensores de banda ancha del mismo número de parte, qué componente lo impide y qué síntoma produciría el error.
 10. Un sistema SCR reporta 780 ppm de NOx a la entrada y 340 ppm a la salida con dosificación activa. Calcule la eficiencia de conversión, determine si cumple el umbral esperado, y enumere las tres verificaciones que realizaría antes de condenar el catalizador SCR.
-

Descendente	+22 %	+5 %	+3 %	FUGA DE VACÍO
Plano	+15 %	+15 %	+16 %	MAF / presión / inyectores
Ascendente	+2 %	+8 %	+24 %	RESTRICCIÓN COMBUSTIBLE
Plano negativo	-14 %	-14 %	-15 %	Presión alta / MAF alto
Negativo ralentí ..	-18 %	-3 %	-2 %	Inyector gotea / EVAP
Ambos bancos → causa COMÚN · Un solo banco → causa LOCAL				
λ sin corregir $\approx 1 + (\text{total}/100)$ AFR $\approx 14.7 \times \lambda$				
CONVERSIONES				
AFR = $\lambda \times 14.7$ (gasolina) · diésel 14.5 · E85 9.8 · GLP 15.7				
Eficiencia SCR (%) = $(1 - \text{NOx_salida} / \text{NOx_entrada}) \times 100 \rightarrow > 80 \%$				
Terminación del bus CAN 60 Ω (dos de 120 Ω en paralelo)				

Fin del Módulo 4. El Módulo 5 (Sensores de Detonación y Vibración) desarrolla el sensor de golpeteo piezoeléctrico, la ventana de detección, la estrategia de retardo de chispa y el análisis FFT de la señal.