

MÓDULO 5 — SENSORES DE DETONACIÓN Y VIBRACIÓN

Sensor KS piezoeléctrico · Ventana angular · Retardo de chispa · Análisis FFT

Índice

PRESENTACIÓN DEL MÓDULO	3
Los dos escenarios que resuelve este módulo	3
Por qué el KS depende del Módulo 1	3
5.1 · SENSOR DE DETONACIÓN PIEZOELÉCTRICO (KS)	4
Principio de funcionamiento	4
Las dos arquitecturas	4
Frecuencia de detonación: el número que hay que conocer	5
1 · Valores en ralentí (~750 RPM, motor caliente)	6
2 · Valor aproximado a 2000 RPM	6
3 · Rango de funcionamiento normal	7
4 · Síntomas de falla	7
5 · Posibles soluciones y reparaciones	8
6 · Estrategia de diagnóstico avanzado paso a paso	8
7 · Valores comunes de resistencia	10
8 · Alimentaciones y tierras	11
9 · Aplicación de la Ley de Ohm	11
10 · Nomenclatura de cableado	13
11 · Simbología y diagrama de conexión	13
12 · Análisis de oscilogramas	14
13 · Señales PWM / ciclo de trabajo	15
14 · Análisis de corriente	16
15 · Preguntas de autoevaluación — Sensor de detonación	16
5.2 · VENTANA DE DETECCIÓN Y ESTRATEGIA DE RETARDO	18
Por qué existe la ventana angular	18
Asignación por cilindro	18
Motores con dos o más sensores	19
Umbral adaptativo: cómo decide la ECU	19
Estrategia de retardo de chispa	20
Estrategias asociadas	21
PIDs que hay que registrar	21
5.3 · DIAGNÓSTICO CON OSCILOSCOPIO Y ANÁLISIS FFT	22
Qué es la FFT y por qué es imprescindible aquí	22
Requisitos del instrumento	22

Procedimiento de captura FFT	22
Interpretación del espectro	23
Diferenciación: detonación real vs ruido mecánico	23
Procedimiento integral de diagnóstico de detonación	25
Preguntas de autoevaluación — Osciloscopio y FFT	25
CUESTIONARIO INTEGRADOR — MÓDULO 5	26
HOJA DE REFERENCIA RÁPIDA — MÓDULO 5	27

PRESENTACIÓN DEL MÓDULO

La detonación (*knock*, cascabeleo, picado de bielas) es la **autoignición espontánea** de la mezcla en las zonas del cilindro donde el frente de llama todavía no ha llegado. Esa combustión descontrolada genera ondas de presión que rebotan dentro de la cámara a una frecuencia característica y golpean el pistón como un martillo.

Lo que la detonación destruye, en orden de aparición:

Tiempo de exposición	Daño
Segundos a plena carga	Erosión del borde del pistón, picado de la culata
Minutos	Rotura de los aros, pistón perforado
Repetida en el tiempo	Cojinetes de biela, junta de culata

Por eso el sensor de detonación no es un sensor de confort: es un **dispositivo de protección**. Y por eso, cuando falla, la ECU no ignora el problema — aplica un retardo de chispa preventivo permanente que le cuesta al motor entre un 5 y un 15 % de su potencia.

Los dos escenarios que resuelve este módulo

1. **Motor con detonación real que el sensor no detecta** → daño mecánico progresivo, sin código.
2. **Motor sin detonación al que el sensor “oye” ruido mecánico** → retardo de chispa permanente, pérdida de potencia y consumo alto, **sin código**.

El segundo caso es mucho más frecuente y mucho peor diagnosticado.

Por qué el KS depende del Módulo 1

El sensor de detonación **no puede funcionar solo**. La ECU necesita saber en qué ángulo de cigüeñal está y qué cilindro está en combustión para abrir la ventana de escucha correcta. Sin CKP y CMP correctos, el sistema de detonación queda inhabilitado o retarda el cilindro equivocado.

Regla de precedencia: antes de diagnosticar un problema de detonación, verifique el sincronismo (Módulo 1). Un desfase de cadena produce detonación **real** que el sensor detecta correctamente. El sensor no es el culpable: es el mensajero.

5.1 · SENSOR DE DETONACIÓN PIEZOELÉCTRICO (KS)

SENSOR DE DETONACIÓN PIEZOELÉCTRICO — CONSTRUCCIÓN Y CIRCUITO

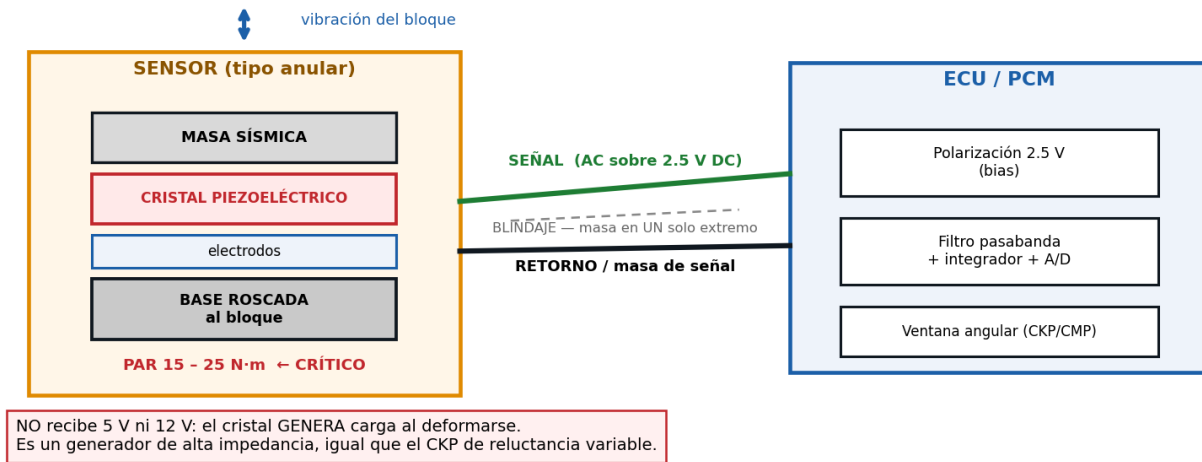


Figura 1: Construcción y circuito del sensor de detonación

Principio de funcionamiento

Un disco de cerámica piezoeléctrica está comprimido entre la base roscada al bloque y una **masa sísmica**. Cuando el bloque vibra, la inercia de la masa comprime y descomprime el cristal. El efecto piezoeléctrico convierte esa deformación en **carga eléctrica**:

$$Q = d_{33} \times F \quad V = \frac{Q}{C}$$

donde d_{33} es el coeficiente piezoeléctrico del material y C la capacidad del cristal (típicamente **800 - 2 000 pF**).

Consecuencias prácticas de esta física:

- El sensor **no recibe alimentación**: genera su propia señal, igual que el CKP de reluctancia variable (Módulo 1, §1.1).
- Es una fuente de **altísima impedancia** y muy baja energía. Es, con diferencia, el sensor más vulnerable del vehículo a la resistencia parásita y a la humedad.
- El **par de apriete** es parte del circuito de medición: si el sensor no está correctamente precargado contra el bloque, la transmisión mecánica de la vibración se pierde.

Las dos arquitecturas

Característica	Resonante (sintonizado)	Banda ancha (respuesta plana)
Construcción	Masa sísmica sintonizada mecánicamente	Anular, sin sintonía mecánica

Característica	Resonante (sintonizado)	Banda ancha (respuesta plana)
Respuesta	Pico agudo en una frecuencia (5 – 8 kHz)	Plana de 1 a 20 kHz
Filtrado	Mecánico, dentro del sensor	Digital, dentro de la ECU
Aspecto	Cilíndrico, tipo “tubo”	Toroidal, con orificio central
Hilos	1 (masa por la carcasa) o 2	2 con blindaje
Época	Motores hasta ~2000	Estándar actual
Intercambiabilidad	Específico del motor	Menos crítico, pero no universal

Advertencia sobre el sensor resonante: está sintonizado al diámetro del cilindro de **ese** motor. Montar uno de otro modelo, aunque encaje mecánicamente y tenga el mismo conector, deja el sistema sordo. En el sensor de banda ancha el filtrado lo hace la ECU, pero la calibración interna sigue siendo específica.

Frecuencia de detonación: el número que hay que conocer

La frecuencia del primer modo de resonancia de la cámara depende casi exclusivamente del **diámetro del cilindro**:

$$f_1 = \frac{\rho_{1,0} \times c}{\pi \times B}$$

donde $\rho_{1,0} = 1.841$ (primer modo circunferencial), $c \approx 900$ m/s (velocidad del sonido en los gases quemados) y B el diámetro en metros.

Forma práctica para el taller:

$$f \text{ (kHz)} \approx \frac{527}{B \text{ (mm)}}$$

Diámetro del cilindro	Frecuencia esperada	Motores típicos
70 mm	7.5 kHz	1.0 – 1.4 L urbanos
76 mm	6.9 kHz	1.4 – 1.6 L
80 mm	6.6 kHz	1.6 – 2.0 L
86 mm	6.1 kHz	2.0 – 2.5 L (el caso más común)
92 mm	5.7 kHz	V6 medios
96 mm	5.5 kHz	V6 / V8 grandes
105 mm	5.0 kHz	Diésel y motores pesados

Utilidad diagnóstica directa: al analizar el espectro FFT, usted **ya sabe dónde debe estar el pico** antes de capturar. Si el pico aparece a 2 kHz en un motor de 86 mm, **no es detonación**: es ruido mecánico.

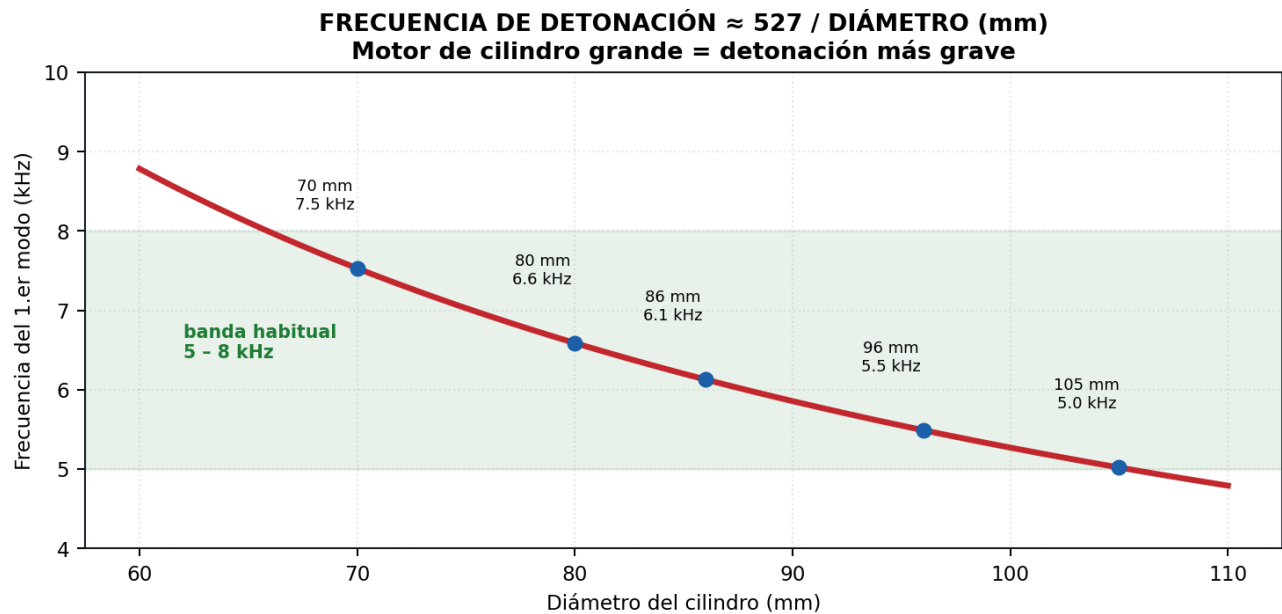


Figura 2: Frecuencia de detonación en función del diámetro

1 · Valores en ralentí (~750 RPM, motor caliente)

Parámetro	Valor esperado
Voltaje de polarización (bias) de la ECU	2.5 V DC (algunos 1.6 - 2.6 V)
Ruido de fondo, amplitud	0.10 - 0.35 V pico a pico (AC sobre el bias)
Frecuencia dominante del fondo	0.5 - 3 kHz (ruido mecánico normal)
Energía en la banda de 5 - 8 kHz	Prácticamente nula
PID de retardo por detonación	0.0°
Contador de eventos de knock	0

En ralentí sin carga la detonación es prácticamente imposible. No hay presión ni temperatura suficientes. Cualquier retardo por detonación con el motor en ralentí es **falsa detección** y debe investigarse como ruido mecánico.

2 · Valor aproximado a 2000 RPM

Condición	Amplitud de fondo	Retardo esperado
2000 RPM sin carga	0.20 - 0.60 V p-p	0.0°
2000 RPM con carga media	0.35 - 0.90 V p-p	0 - 3°
2000 RPM plena carga (motor sano)	0.5 - 1.2 V p-p	0 - 6°
2000 RPM plena carga con detonación	1.5 - 4.0 V p-p en ráfagas	6 - 20°

Comportamiento normal del ruido de fondo: la amplitud **crece de forma continua y proporcional con las RPM y la carga**, porque el motor genera más vibración. Lo que distingue

a la detonación no es la amplitud absoluta, sino la **ráfaga amortiguada a la frecuencia característica dentro de la ventana angular**.

3 · Rango de funcionamiento normal

Parámetro	Rango
Amplitud de salida	0.05 V p-p (ralentí) hasta 4 - 10 V p-p (detonación severa)
Banda de frecuencia útil	1 - 20 kHz (banda ancha) · pico único (resonante)
Capacidad interna del cristal	800 - 2 000 pF
Impedancia de fuente	> 1 MΩ
Temperatura de operación	-40 a +150 °C
Par de apriete	15 - 25 N·m (verificar especificación exacta)
Autoridad de retardo de la ECU	8 - 20° de cigüeñal

4 · Síntomas de falla

Falla	Síntoma en el vehículo
Sensor abierto o cable cortado	Retardo de chispa preventivo permanente → pérdida de potencia del 5-15 %, consumo alto, motor "apagado" bajo carga. P0325
Señal en corto a masa	Igual que el anterior; la ECU asume el peor caso. P0327
Sensor flojo (par insuficiente)	No detecta detonación real → daño mecánico progresivo sin código
Sensor sobreapretado	Cristal agrietado → señal errática o nula
Superficie de montaje sucia u oxidada	Acoplamiento mecánico deficiente; en sensores de 1 hilo, además pierde la masa
Blindaje abierto	Capta ruido de encendido → falsas detonaciones → retardo permanente
Humedad en el conector	Fuga de la carga piezoeléctrica → sensibilidad reducida, señal débil
Resistencia parásita en el circuito	Filtro pasabajo que borra la banda de 6.5 kHz (ver punto 9)
Ruido mecánico real (biela, pistón, distribución)	Retardo permanente con sensor sano

Códigos:

Código	Significado
P0324	Error del sistema de control de detonación
P0325	Circuito del sensor de detonación 1, banco 1
P0326	Rango / desempeño
P0327	Entrada baja (señal débil o abierta)
P0328	Entrada alta (señal excesiva o en corto)

Código	Significado
P0329	Intermitente
P0330 – P0334	Sensor 2 / banco 2
P1324 – P1336	Códigos de fabricante relacionados

La falla más costosa no genera código. Un sensor sano detectando ruido mecánico real (golpeteo de biela, pistón con juego, cadena floja) hace que la ECU retarde la chispa de forma permanente. El vehículo pierde potencia, consume más y **no enciende ninguna luz**. Solo el PID de retardo por detonación lo revela.

5 · Posibles soluciones y reparaciones

1. **Verificar y corregir el par de apriete.** Es la causa n.º 1 real. Limpie la superficie de montaje hasta metal desnudo. **Nunca use arandelas, antiagarrotante ni juntas** entre el sensor y el bloque: alteran la transmisión mecánica de la vibración.
2. **Reparar el blindaje del cable.** Debe medir $< 1 \Omega$ a masa y estar aterrizado **en un solo extremo** (normalmente el lado ECU).
3. **Secar y sellar el conector.** La humedad crea un camino de fuga para la carga piezoeléctrica. Verifique el aislamiento ($> 10 \text{ M}\Omega$) tras secarlo.
4. **Separar el arnés del KS de los cables de alta tensión** y de la bomba de combustible.
5. **Descartar la fuente mecánica del ruido** antes de reemplazar el sensor (§5.3).
6. **Verificar las causas reales de detonación** si la detección es genuina:
 - Combustible de octanaje insuficiente.
 - Depósitos de carbón en la cámara (aumentan la relación de compresión).
 - **Sobrecalentamiento** o refrigeración deficiente.
 - IAT sesgado bajo (Módulo 3) → la ECU avanza demasiado.
 - EGR inoperante (sin dilución, temperaturas de combustión más altas).
 - Mezcla pobre (Módulo 4) → combustión más caliente.
 - **Distribución desfasada** (Módulo 1).
 - Presión de sobrealimentación excesiva por wastegate defectuosa.
7. **Reemplazar el sensor** solo tras descartar todo lo anterior.

6 · Estrategia de diagnóstico avanzado paso a paso

Fase A — Verificación del voltaje de polarización (bias)

La mayoría de las ECU aplican una polarización de **2.5 V** al circuito de señal precisamente para poder detectar aperturas y cortos.

Medición (KOEO)	Resultado esperado	Interpretación si difiere
Señal ↔ masa, sensor conectado	2.5 V DC estables	0 V = corto a masa · 5 V = circuito abierto
Señal ↔ masa, sensor desconectado	2.5 V DC (o el valor de bias)	0 V = circuito de señal en corto

Este es el primer paso y el más rápido. Si el bias está presente y estable con el sensor conectado, el cableado y la etapa de entrada de la ECU están íntegros.

Fase B — Prueba de golpeteo (*tap test*)

Es la prueba funcional clásica y sigue siendo la más útil.

1. Motor en marcha a **2000 - 2500 RPM** estables (en ralentí muchas ECU desactivan el monitor de detonación).
2. Escáner mostrando el PID de **retardo por detonación** o **contador de knock**.
3. Con una llave o un martillo pequeño, **golpee suavemente el bloque a 5 - 10 cm del sensor**, con toques secos y espaciados.

Resultado	Interpretación
El retardo aumenta con cada golpe No hay respuesta	Sensor y circuito funcionales Sensor, cableado o entrada de la ECU defectuosos
Responde con golpes muy suaves o solos	Sensibilidad excesiva o ventana mal configurada

NUNCA golpee el sensor directamente. El cristal piezoeléctrico es frágil y un golpe directo puede agrietarlo, convirtiendo una prueba en una avería. Golpee el bloque, no el sensor.

Fase C — Verificación con osciloscopio

Ver §5.3, que desarrolla los ajustes y la interpretación completa.

Fase D — Prueba de generación en banco

1. Retire el sensor.
2. Conecte el osciloscopio directamente a sus terminales (acoplamiento **AC**, 0.5 V/div, 1 ms/div).
3. Golpee suavemente la **superficie de montaje** del sensor contra la palma de la mano o con un destornillador de plástico.

Resultado	Diagnóstico
Genera 0.5 - 5 V de pico	Cristal sano
Genera menos de 0.1 V	Cristal degradado o agrietado
No genera nada	Sensor muerto, confirmado

Esta prueba aprueba o condena el sensor de forma definitiva, igual que la prueba del destornillador en el CKP de reluctancia variable.

Fase E — Prueba de aislamiento (la equivalente a la caída de voltaje)

La prueba clásica de caída de voltaje NO es aplicable a un sensor de detonación. El circuito transporta **nanoamperios**. Aplicando Ley de Ohm:

$$V_{drop} = 10 \text{ nA} \times 100\,000 \, \Omega = 0.001 \text{ V}$$

Un megaohmio de corrosión mostraría una caída indetectable y **pasaría la prueba** mientras destruye la señal (ver punto 9).

Lo que sí se debe medir, con el sensor desconectado y el circuito seco:

Medición	Valor esperado	Falla si
Aislamiento señal ↔ masa del arnés	> 10 MΩ	< 1 MΩ = humedad o contaminación derivando la carga
Aislamiento señal ↔ carcasa del sensor	> 10 MΩ	< 10 MΩ = cristal o encapsulado dañado
Continuidad del blindaje a masa	< 1 Ω , en un solo extremo	> 5 Ω = blindaje inoperante
Continuidad de cada conductor	< 1 Ω	> 5 Ω = resistencia parásita crítica

En este sensor, la resistencia de aislamiento sustituye a la caída de voltaje como prueba de integridad del circuito. Es el único módulo del curso donde esto ocurre.

Fase F — Prueba de resistencia parásita mediante el filtro

Si sospecha resistencia parásita pero el óhmetro no la revela con claridad, compare la amplitud de la señal a alta frecuencia:

1. Con el motor a 2500 RPM, capture la señal **en el conector del sensor**.
2. Capture la señal **en el conector de la ECU**.
3. Aplique FFT a ambas y compare la amplitud en la banda de 5 – 8 kHz.

Criterio: la pérdida entre ambos puntos no debe superar el 10 % (–1 dB). Una pérdida del 50 % (–6 dB) confirma un filtro pasabajo parásito, aunque el óhmetro mida “continuidad”.

7 · Valores comunes de resistencia

ADVERTENCIA — la medición de resistencia en este sensor es la más malinterpretada del oficio. El valor esperado depende completamente del diseño, y **una lectura de OL (infinito) es normal en muchos sensores.**

Tipo de sensor	Resistencia entre pines	Nota
Piezo puro, sin resistor interno	> 10 MΩ / OL	Normal. No indica falla
Con resistor interno de diagnóstico (GM y otros)	90 - 110 kΩ	Consultar manual
Con resistor interno de valor alto	3.3 - 5.6 MΩ (típico 4.87 MΩ)	Consultar manual
Resonante de 1 hilo	> 10 MΩ entre pin y carcasa	Masa por la rosca
Aislamiento pin ↔ carcasa	> 10 MΩ	Esta sí es diagnóstica siempre

Por qué existen los resistores internos: permiten que la ECU verifique la continuidad del circuito sin necesidad de una señal. Si el resistor está presente, el bias de 2.5 V se mantiene; si el circuito se abre, el bias sube a 5 V y se registra P0325.

Regla operativa: nunca condene un sensor de detonación por su lectura de resistencia sin haber verificado el valor especificado para ese número de parte concreto. Use la Fase D (prueba de generación) como criterio definitivo.

8 · Alimentaciones y tierras

Configuración	Pines	Valores
2 hilos con blindaje (banda ancha)	Señal + · Señal –	Bias 2.5 V DC · AC superpuesta
1 hilo (resonante antiguo)	Señal; masa por la carcasa roscada	Bias 2.5 V; la rosca ES el retorno
Blindaje (<i>drain wire</i>)	Malla exterior	< 1 Ω a masa, un solo extremo

Puntos críticos:

- El sensor **no recibe 5 V ni 12 V**. Cualquier voltaje distinto del bias en el conector con el sensor desconectado indica un problema de cableado.
- En los sensores de 1 hilo, **la superficie de montaje es el circuito de masa**. Óxido, pintura o suciedad en esa superficie producen exactamente los mismos síntomas que un cable de masa roto.
- El par de apriete afecta **simultáneamente** al acoplamiento mecánico y (en los de 1 hilo) a la calidad de la masa.

9 · Aplicación de la Ley de Ohm

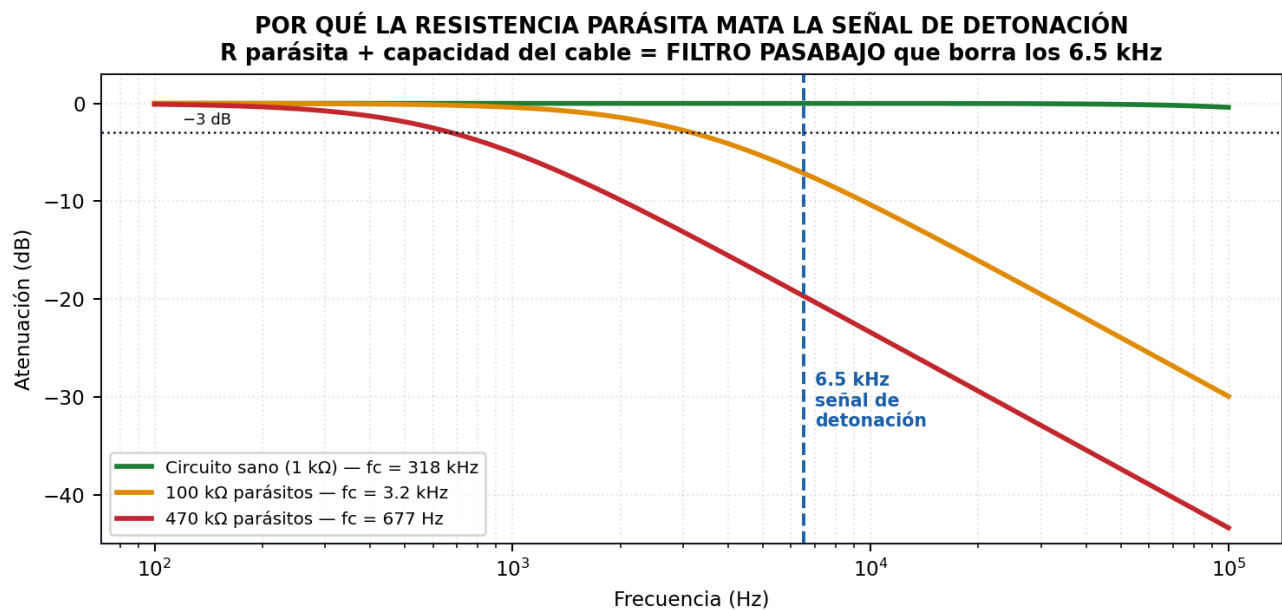


Figura 3: El filtro pasabajo parásito

Este es el punto técnicamente más importante del módulo.

Cálculo 1 — El sensor como divisor de tensión

El cristal es una fuente con impedancia superior a 1 MΩ. La entrada de la ECU presenta típicamente 100 kΩ - 1 MΩ. Con resistencia parásita R_p en serie:

$$V_{ECU} = V_{gen} \times \frac{R_{entrada}}{R_{fuente} + R_p + R_{entrada}}$$

Cálculo 2 — El filtro pasabajo que borra la detonación

Aquí está la clave. La resistencia parásita **en serie** con la **capacidad distribuida del cable** (típicamente 100 - 150 pF por metro, del orden de **500 pF** en un tramo completo) forma un **filtro RC pasabajo** con frecuencia de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_p C}$$

Resistencia parásita	Frecuencia de corte	Efecto sobre los 6.5 kHz
1 kΩ (circuito sano)	318 kHz	Ninguno
10 kΩ	31.8 kHz	Despreciable
100 kΩ	3.2 kHz	-7 dB: la señal cae a menos de la mitad
470 kΩ	677 Hz	-20 dB: la señal desaparece

Verificación numérica con 100 kΩ y 500 pF:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 100\,000 \times 500 \times 10^{-12}} = \frac{1}{3.1416 \times 10^{-4}} = 3\,183 \text{ Hz}$$

A 6.5 kHz, es decir a **2.04 veces** la frecuencia de corte, la atenuación es:

$$A = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2.04^2}} = 0.44$$

La señal de detonación llega a la ECU con el 44 % de su amplitud original.

Ésta es la razón física por la que un circuito de detonación con corrosión “pasa” todas las pruebas convencionales y aun así el sistema está sordo. El óhmetro mide continuidad, la caída de voltaje da 0.001 V, no hay código — y el motor detona sin protección. **La única prueba válida es comparar la amplitud en la banda de 6.5 kHz entre el sensor y la ECU (Fase F).**

Cálculo 3 — Efecto de la humedad como resistencia de fuga en paralelo

La humedad en el conector crea una resistencia R_{fuga} **en paralelo** con la señal. Con el cristal (capacidad 1 500 pF) y una fuga de 100 kΩ, la constante de tiempo del circuito es:

$$\tau = R_{fuga} \times C = 100\,000 \times 1.5 \times 10^{-9} = 150 \mu s$$

$$f_{corte,inf} = \frac{1}{2\pi\tau} = 1\,061\text{ Hz}$$

En este caso se forma un **filtro pasaalto**: las frecuencias por debajo de 1 kHz se pierden. Como la detonación está en 6.5 kHz, todavía pasa — pero la carga generada se drena parcialmente y **la amplitud cae**. Con una fuga de 10 kΩ la pérdida ya es severa.

Cálculo 4 — Sensibilidad y par de apriete

La fuerza que el cristal recibe es proporcional a la aceleración de la masa sísmica, pero solo si la precarga es suficiente para que el conjunto se comporte como un cuerpo rígido con el bloque:

$$F = m \times a$$

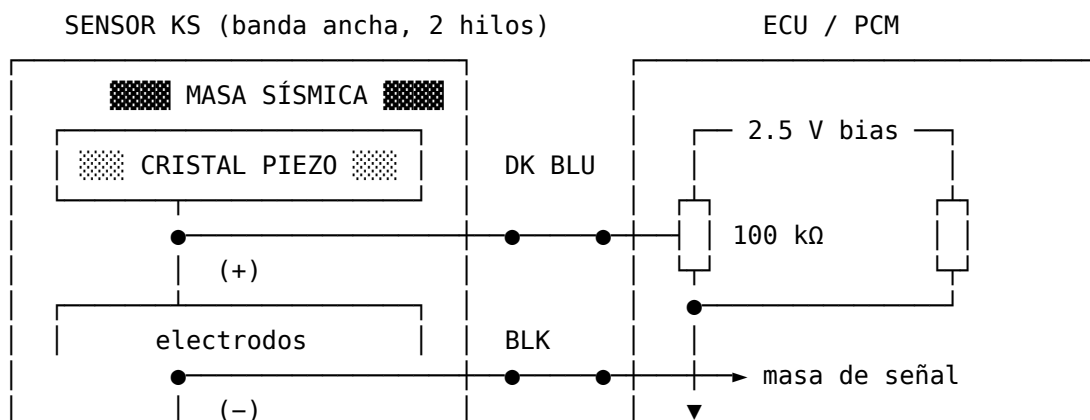
Con precarga insuficiente, la base “rebota” y parte de la aceleración no se transmite. Con un apriete de 8 N·m en lugar de 20 N·m, las mediciones de banco muestran pérdidas de sensibilidad del orden del **30 - 50 %** en la banda de interés. **El par de apriete no es una recomendación de montaje: es un parámetro de calibración del sensor.**

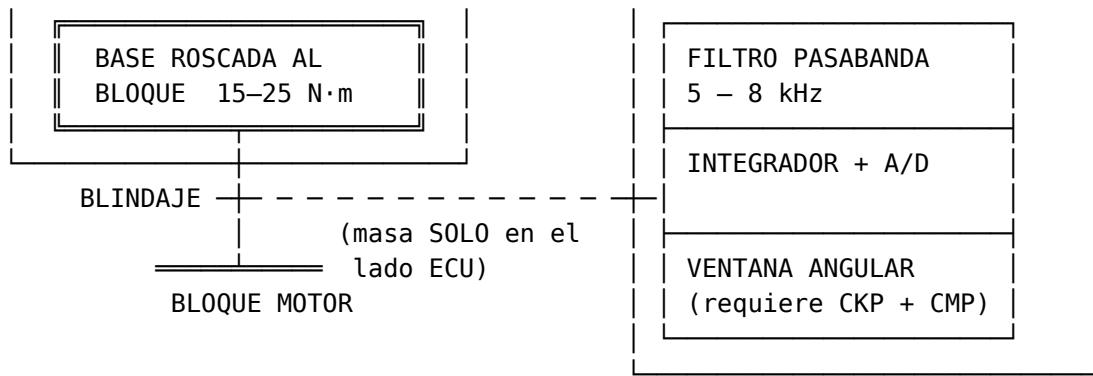
10 · Nomenclatura de cableado

Marca	Señal	Retorno / masa	Blindaje
GM	DK BLU, BLU/WHT	BLK, BLK/WHT	Cable desnudo (<i>drain</i>)
Ford	DK BLU/WHT, GRY/RED	BLK/WHT, ORN	BLK
Chrysler	DK BLU/YEL	BLK/LT BLU	—
Toyota / Denso	KNK1, KNK2 (B, W)	EKNK (BR)	Malla a E1
Honda	BLU, RED/BLU	GRN/WHT	Malla
VW / Audi	gn/ws, gr/bl	br	Malla
Nissan	W/B	B	Malla

Abreviaturas Toyota: KNK1 y KNK2 identifican los sensores 1 y 2; EKNK es el retorno específico del circuito de detonación (no es la masa general E2).

11 · Simbología y diagrama de conexión





SÍMBOLO PIEZOELÉCTRICO:



(dos placas con material activo y flecha de vibración)

NO HAY 5 V NI 12 V. El bias de 2.5 V es una referencia de diagnóstico, no una alimentación. El cristal genera su propia carga.

12 · Análisis de oscilogramas

SEÑAL DEL SENSOR DE DETONACIÓN — ACOPLAMIENTO DC, BIAS DE 2.5 V VISIBLE

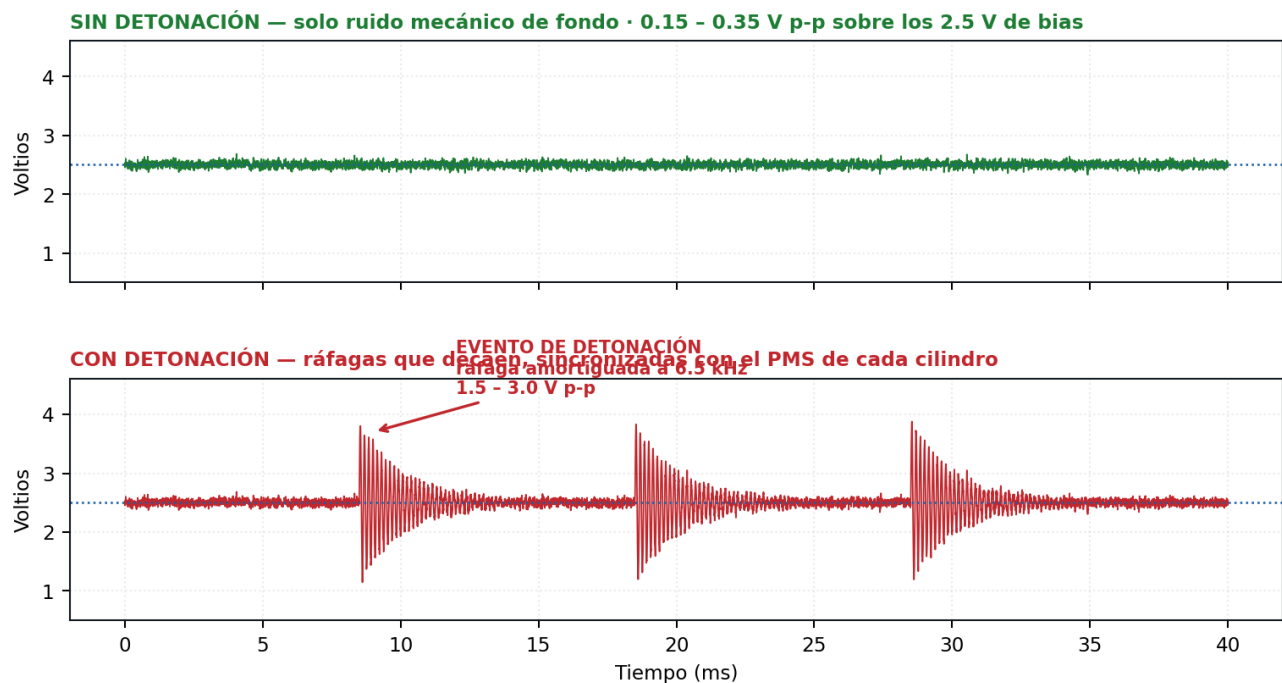


Figura 4: Señal de fondo y evento de detonación

Criterios de inspección

Criterio	Correcto	Falla que indica
Nivel de reposo (bias)	2.5 V DC estables	0 V = corto · 5 V = abierto
Ruido de fondo en ralentí	0.10 - 0.35 V p-p	> 0.8 V = ruido mecánico excesivo
Forma del evento de knock	Ráfaga que decae exponencialmente	Oscilación continua = no es detonación
Sincronización	Ráfaga dentro de la ventana angular	Fuera de la ventana = ruido mecánico
Repetibilidad	Mismo cilindro, misma condición de carga	Aleatorio = ruido o falla eléctrica
Picos sincronizados con la chispa	Ausentes	Presentes = blindaje abierto, ruido de encendido

Configuración del osciloscopio

Ajuste	Valor	Justificación
Frecuencia de muestreo	≥ 50 kS/s (ideal 100 - 200 kS/s)	Mínimo 10× los 6.5 kHz para reproducir la forma , no solo la frecuencia
Acoplamiento	DC para ver el bias · AC para analizar la señal	El bias confirma la integridad del circuito
V/div	0.5 V/div (DC, con bias) · 0.2 V/div (AC)	—
Time/div	1 - 5 ms/div para ver ráfagas individuales · 50 ms/div para ver el ciclo	—
Trigger	Nivel, en el 60 % de la amplitud de fondo	Para capturar solo eventos significativos
Modo	<i>Single shot</i> bajo carga	La detonación aparece bajo carga, no en vacío
Referencia	Pin de retorno del sensor	No usar chasis
Canal adicional	CKP	Imprescindible para verificar la sincronización angular

El error de configuración más frecuente: capturar a 5 kS/s. A esa velocidad, una señal de 6.5 kHz queda **por debajo del límite de Nyquist** y aparece como una onda de baja frecuencia completamente falsa (*aliasing*). El técnico ve “ruido” donde hay detonación, o al revés.

13 · Señales PWM / ciclo de trabajo

No aplica. El sensor de detonación entrega una señal analógica de AC generada por el cristal. No existe ciclo de trabajo ni portadora modulada.

Excepciones modernas a conocer:

Variante	Descripción
Circuito integrado de procesamiento (<i>knock IC</i>)	El acondicionamiento y la FFT se hacen en un chip dedicado dentro de la ECU; la señal en el conector sigue siendo analógica
Sensores con salida digital integrada	Muy poco frecuentes; el dato viaja por bus y no hay señal analógica que medir
Detección por ionización de la bujía	Algunos motores (Saab, ciertos BMW) prescinden del sensor KS y detectan la detonación midiendo la corriente de ionización a través de la bujía después de la chispa. En estos motores no hay sensor de detonación que diagnosticar

14 · Análisis de corriente

No es medible con instrumental de taller. El cristal piezoeléctrico es un generador de **carga**, no de corriente. La corriente que circula es del orden de **nanoamperios a microamperios**, entre seis y nueve órdenes de magnitud por debajo de la resolución de una pinza amperimétrica automotriz.

Magnitud	Valor aproximado
Carga generada por evento	10 - 500 pC
Corriente equivalente	1 - 100 nA
Corriente de polarización (bias) de la ECU	25 - 50 μ A
Resolución de una pinza de baja corriente	10 mA

Lo único medible en la práctica: la corriente de polarización, calculable de forma indirecta si se conocen el voltaje de bias y el valor de las resistencias internas de la ECU:

$$I_{bias} = \frac{5 - 2.5}{R_{superior}} = \frac{2.5}{100\,000} = 25\,\mu A$$

Conclusión operativa: en este sensor, **el análisis de corriente se sustituye por el análisis espectral (FFT)**. La energía en la banda de detonación es la magnitud diagnóstica equivalente.

15 · Preguntas de autoevaluación — Sensor de detonación

P1. Un motor de 2.0 L con diámetro de cilindro de 86 mm presenta pérdida de potencia y el PID de retardo por detonación marca 11° de forma permanente, incluso en ralentí. Calcule la frecuencia de detonación esperada, explique por qué un retardo en ralentí es diagnósticamente imposible como detonación real, y describa las dos causas más probables.

P2. Un circuito de sensor de detonación presenta 120 k Ω de resistencia parásita en un conector corroído. La capacidad distribuida del cable es de 500 pF. Calcule la frecuencia de corte del filtro parásito resultante y determine qué porcentaje de la amplitud original llega a la ECU si la detonación ocurre a 6.1 kHz. Explique por qué la prueba de caída de voltaje no detectaría esta falla.

P3. Un técnico mide $4.85 \text{ M}\Omega$ entre los pines de un sensor de detonación y lo declara defectuoso porque “un piezoeléctrico debe medir infinito”. Explique el error, indique qué función cumple ese valor y describa la prueba que sí determina si el cristal está sano.

5.2 · VENTANA DE DETECCIÓN Y ESTRATEGIA DE RETARDO

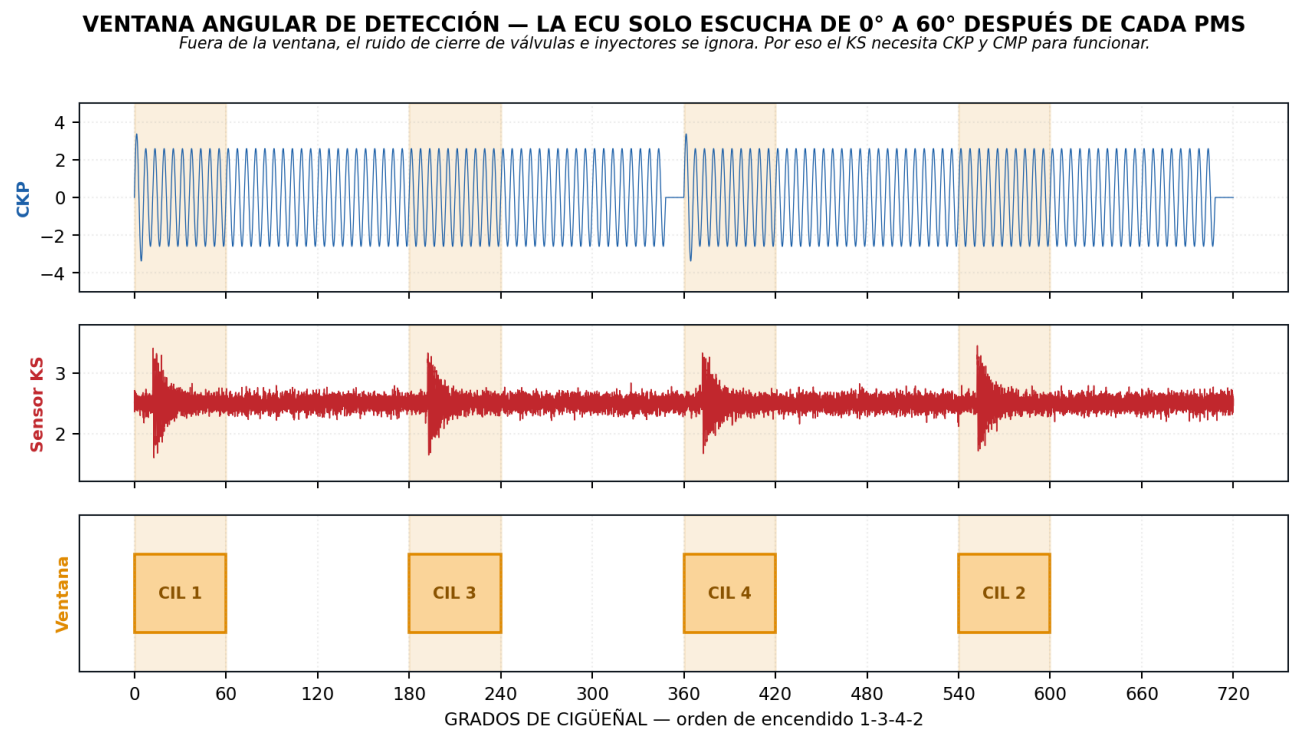


Figura 5: Ventana angular de detección

Por qué existe la ventana angular

Un motor genera una enorme cantidad de ruido mecánico: cierre de válvulas, disparo de inyectores, empuje lateral del pistón, holgura de los cojinetes, funcionamiento de la bomba de alta presión. Si la ECU escuchara continuamente, interpretaría cualquiera de esos ruidos como detonación.

Solución: la ECU **solo abre el canal de escucha durante los grados de cigüeñal en que la detonación es físicamente posible**, y lo hace de forma independiente para cada cilindro.

Parámetro de la ventana	Valor típico
Apertura	0° a 10° después del PMS del cilindro en combustión
Cierre	50° a 70° después del PMS
Duración	50 - 70° de cigüeñal
Ventanas por ciclo de 720°	Una por cilindro
Referencia angular	CKP + CMP (Módulo 1)

Por qué la ventana empieza después del PMS: la detonación ocurre cuando la presión y la temperatura son máximas, es decir, poco después del PMS, en la fase inicial de la expansión. Antes del PMS la mezcla todavía no ha alcanzado las condiciones críticas.

Asignación por cilindro

En un motor de 4 cilindros con orden de encendido 1-3-4-2, las ventanas se distribuyen cada 180°:

Ventana	Grados de cigüeñal	Cilindro evaluado
1	0° - 60°	1
2	180° - 240°	3
3	360° - 420°	4
4	540° - 600°	2

Consecuencia diagnóstica de primer orden: si el CKP o el CMP están desfasados, la ECU atribuye la detonación al cilindro equivocado y retarda un cilindro sano mientras deja detonar al que realmente lo hace.

Este es el vínculo directo con el Módulo 1. Un P0016 no resuelto puede presentarse como un problema de detonación aparentemente inexplicable.

Motores con dos o más sensores

En motores en V y en motores de 6 cilindros en línea es habitual encontrar dos sensores:

Configuración	Asignación
V6 / V8 con 2 sensores	Sensor 1 → banco 1 · Sensor 2 → banco 2
6 en línea con 2 sensores	Sensor 1 → cilindros 1-3 · Sensor 2 → cilindros 4-6
4 cilindros con 2 sensores (alta potencia)	Sensor 1 → cilindros 1-2 · Sensor 2 → cilindros 3-4

Ventaja diagnóstica: con dos sensores, si uno reporta actividad y el otro no bajo las mismas condiciones, la comparación identifica de inmediato si el problema es del sensor o del motor.

Umbral adaptativo: cómo decide la ECU

La ECU **no usa un umbral fijo**. Aprende continuamente el nivel de ruido de fondo para cada combinación de RPM y carga, y define el umbral de detonación como un múltiplo de ese fondo:

$$\text{Umbral} = K \times \text{Nivel de fondo aprendido}$$

donde K vale típicamente **1.5 - 3.0**.

Implicaciones prácticas de esta adaptación:

Situación	Consecuencia
Motor con ruido mecánico creciente y lento (desgaste)	La ECU eleva el umbral y se vuelve progresivamente sorda a la detonación real
Ruido mecánico repentino (biela golpeando)	La ECU lo interpreta como detonación → retardo permanente
Tras reemplazar el sensor	El umbral aprendido puede quedar mal calibrado → borrar la memoria adaptativa
Tras un trabajo de motor	Igual: reiniciar los valores adaptativos

Paso de reparación que se omite con frecuencia: después de reemplazar un sensor de detonación o de intervenir el motor, **borre los valores adaptativos de detonación** (memoria de la ECU). Sin ese paso, el sistema sigue trabajando con un umbral aprendido en condiciones que ya no existen.

Estrategia de retardo de chispa

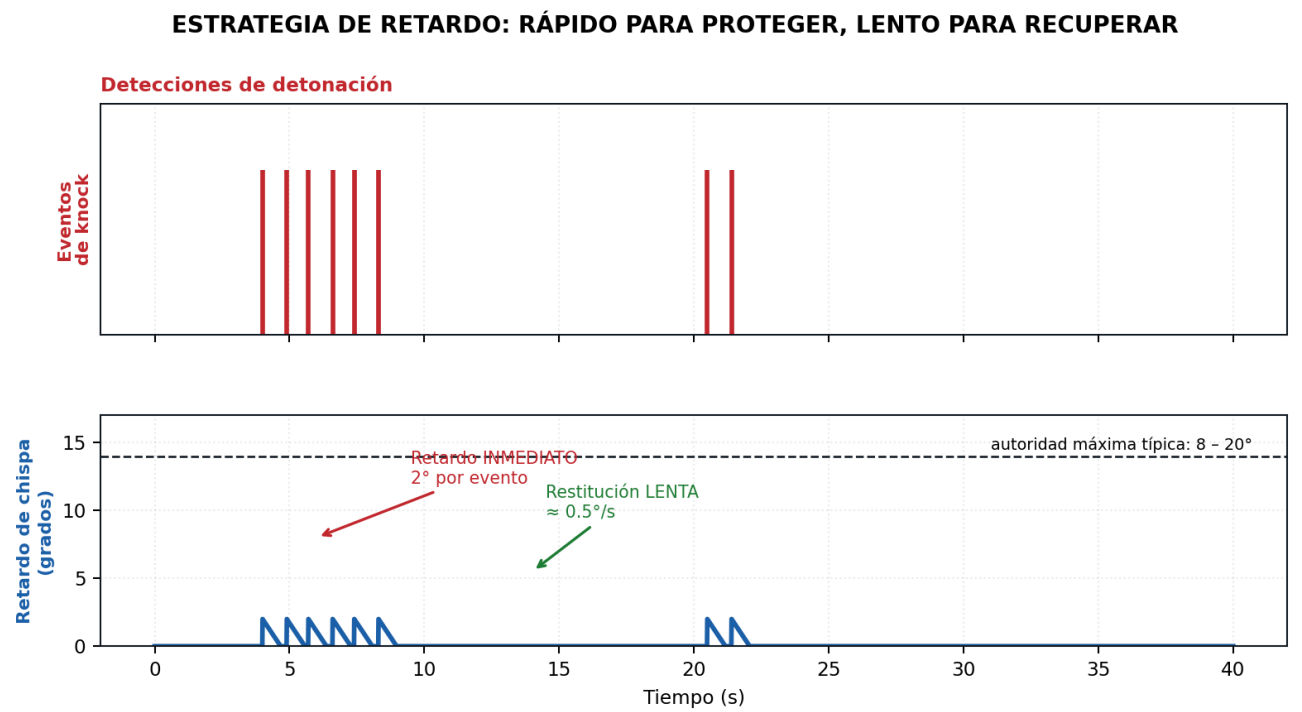


Figura 6: Estrategia de retardo y restitución

La estrategia es deliberadamente **asimétrica**: retarda rápido para proteger y recupera lento para no volver a detonar.

Parámetro	Valor típico
Retardo por evento detectado	1 - 3° de cigüeñal
Autoridad máxima de retardo	8 - 20° (según fabricante y carga)
Velocidad de restitución	0.3 - 1.0° por segundo (algunos: 0.5° cada 2 s)
Retardo aplicado	Por cilindro individual (motores modernos) o global
Memoria adaptativa	Almacenada por celda de RPM/carga

Ejemplo numérico de la asimetría: con 6 eventos de detonación consecutivos a 2° cada uno, el retardo alcanza 12° en menos de 3 segundos. Restituirlo a 0.5°/s toma **24 segundos**. Por eso el retardo por detonación se ve en el escáner mucho después de que la condición que lo causó haya desaparecido.

Estrategias asociadas

Cuando el retardo no basta para controlar la detonación, la ECU escala:

Nivel	Acción
1	Retardo de chispa
2	Enriquecimiento de la mezcla (el combustible extra enfría la cámara)
3	Reducción de la presión de sobrealimentación (motores turbo)
4	Limitación de par / apertura reducida del ETC
5	Corte de combustible en el cilindro afectado (casos extremos)

Consecuencia diagnóstica: un motor turbo que “no da presión” puede estar detonando sin que el conductor lo perciba. **Verifique el PID de retardo por detonación antes de diagnosticar el turbo o la wastegate.**

PIDs que hay que registrar

PID	Qué muestra	Valor normal
Knock Retard / Spark Retard	Grados de retardo aplicados	0° sin carga · 0 – 6° bajo carga
Knock Sensor Activity	Nivel de señal detectado	Sube con RPM de forma proporcional
Knock Count / Knock Events	Contador acumulado	Se incrementa solo bajo carga
Knock Retard por cilindro	Retardo individual	Todos similares
Adaptive Knock Retard	Valor aprendido y memorizado	Cercano a 0 en motor sano

La prueba de 60 segundos: conduzca en tercera o cuarta, con carga sostenida, y registre el retardo por detonación. En un motor sano con combustible adecuado, **debe mantenerse por debajo de 6°**. Valores sostenidos de 10 – 20° indican una condición real que exige investigación.

5.3 · DIAGNÓSTICO CON OSCILOSCOPIO Y ANÁLISIS FFT

ANÁLISIS FFT — LA DETONACIÓN REAL APARECE COMO UN PICO ESTRECHO Y REPETIBLE

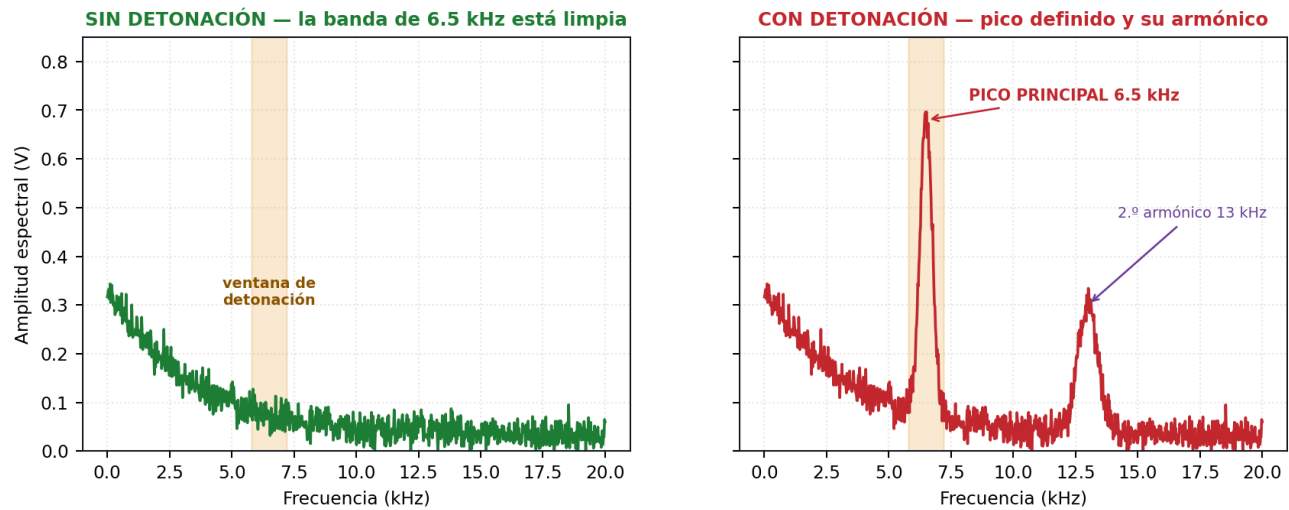


Figura 7: Análisis FFT de la señal de detonación

Qué es la FFT y por qué es imprescindible aquí

La **Transformada Rápida de Fourier** descompone una señal en el tiempo en sus componentes de frecuencia. En lugar de ver “una señal ruidosa”, el técnico ve **cuánta energía hay en cada frecuencia**.

En el diagnóstico de detonación esto es decisivo, porque la detonación tiene una **firma de frecuencia conocida y calculable** (§5.1). El ruido mecánico, no.

Requisitos del instrumento

Requisito	Valor mínimo	Justificación
Frecuencia de muestreo	≥ 50 kS/s	Nyquist exige $2 \times$ (13 kHz), pero reproducir la forma exige $10 \times$
Ancho de banda del canal	≥ 20 kHz	Para capturar el segundo armónico
Memoria	Profunda (≥ 1 MS)	Para capturar varios ciclos completos
Función FFT	Nativa o por exportación	La mayoría de los osciloscopios automotrices modernos la incluyen
Ventana FFT	Hanning o Hamming	Reduce la fuga espectral

Procedimiento de captura FFT

1. **Calcule la frecuencia esperada** con $f = 527/B$. Anótela antes de capturar.

2. Conecte el canal 1 al pin de señal del sensor (referencia en su retorno) y el canal 2 al CKP.
3. Configure: **DC, 0.5 V/div, 5 ms/div, 100 kS/s.**
4. **Capture bajo carga real** — en banco de rodillos, en subida, o con el freno aplicado y el vehículo en marcha (con las precauciones de seguridad correspondientes). La detonación **no aparece en vacío.**
5. Capture también una referencia **sin carga**, para comparar.
6. Aplique FFT a ambas capturas y compare la banda de 5 – 8 kHz.

Interpretación del espectro

Hallazgo en el espectro	Diagnóstico
Pico estrecho en la frecuencia calculada, solo bajo carga	Detonación real
Pico en la frecuencia calculada + segundo armónico al doble	Detonación real confirmada
Energía distribuida en 1 – 3 kHz, presente también en vacío	Ruido mecánico
Picos a la frecuencia de encendido y sus armónicos	Interferencia eléctrica; verificar blindaje
Espectro plano sin picos, con carga real	Sensor sordo: verificar par, cableado y filtro parásito
Pico presente en el conector del sensor pero atenuado en el de la ECU	Filtro pasabajo parásito (§5.1, punto 9)

Diferenciación: detonación real vs ruido mecánico

Esta es la distinción que evita reparaciones equivocadas costosas.

Criterio	Detonación real	Ruido mecánico
Frecuencia	5 – 8 kHz (la calculada)	1 - 3 kHz , más grave
Forma de la ráfaga	Decae exponencialmente en 1 – 3 ms	Golpe seco, o continuo
Sincronización con el PMS	Sí , siempre dentro de la ventana	No sincroniza, o lo hace en otra fase
Dependencia de la carga	Solo bajo carga	Presente también en vacío
Dependencia del octanaje	Mejora con combustible de mayor octanaje	Sin cambio
Dependencia de la temperatura	Empeora con motor caliente	Suele empeorar en frío (juegos)
Efecto del retardo de chispa	Desaparece al retardar	Persiste aunque se retarde
Audible con estetoscopio	Difícil de localizar	Localizable en un punto concreto

La prueba decisiva: retardar la chispa manualmente

Si el escáner permite comandar el avance de encendido (o si el motor tiene distribuidor ajustable):

1. Reproduzca la condición en que aparece el ruido.

LA DISTINCIÓN QUE EVITA CAMBIAR PIEZAS: DETONACIÓN vs GOLPETEO MECÁNICO

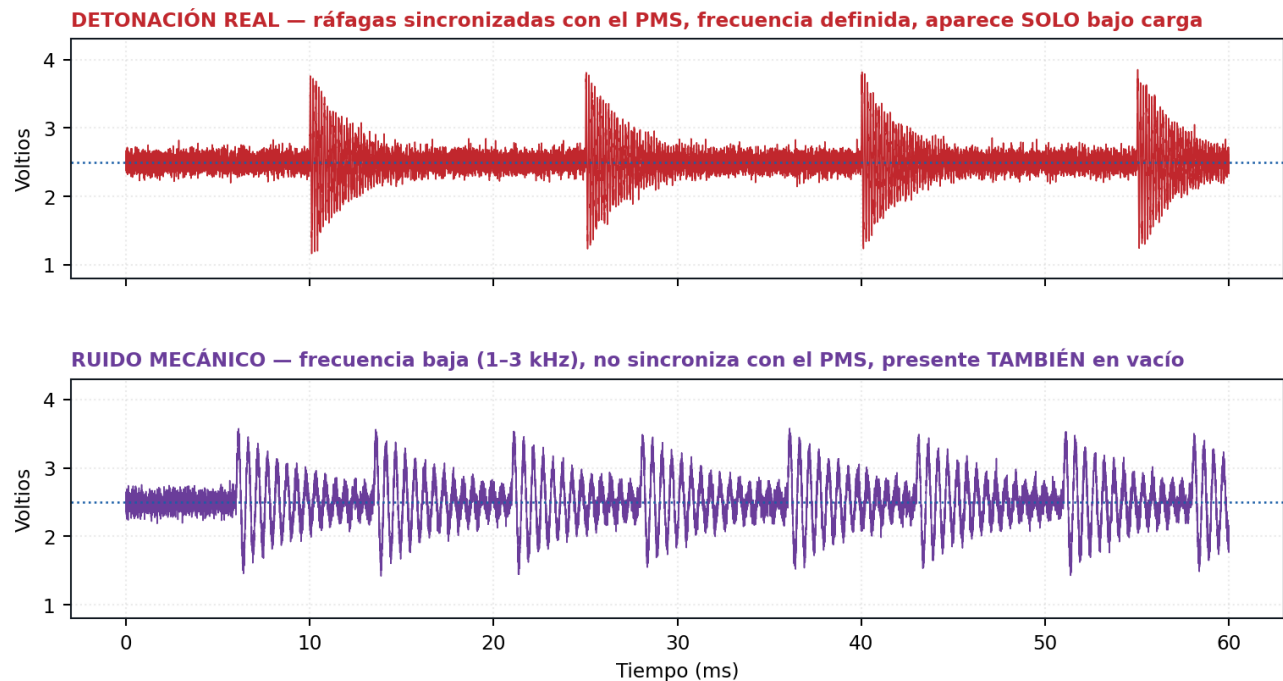


Figura 8: Detonación real comparada con ruido mecánico

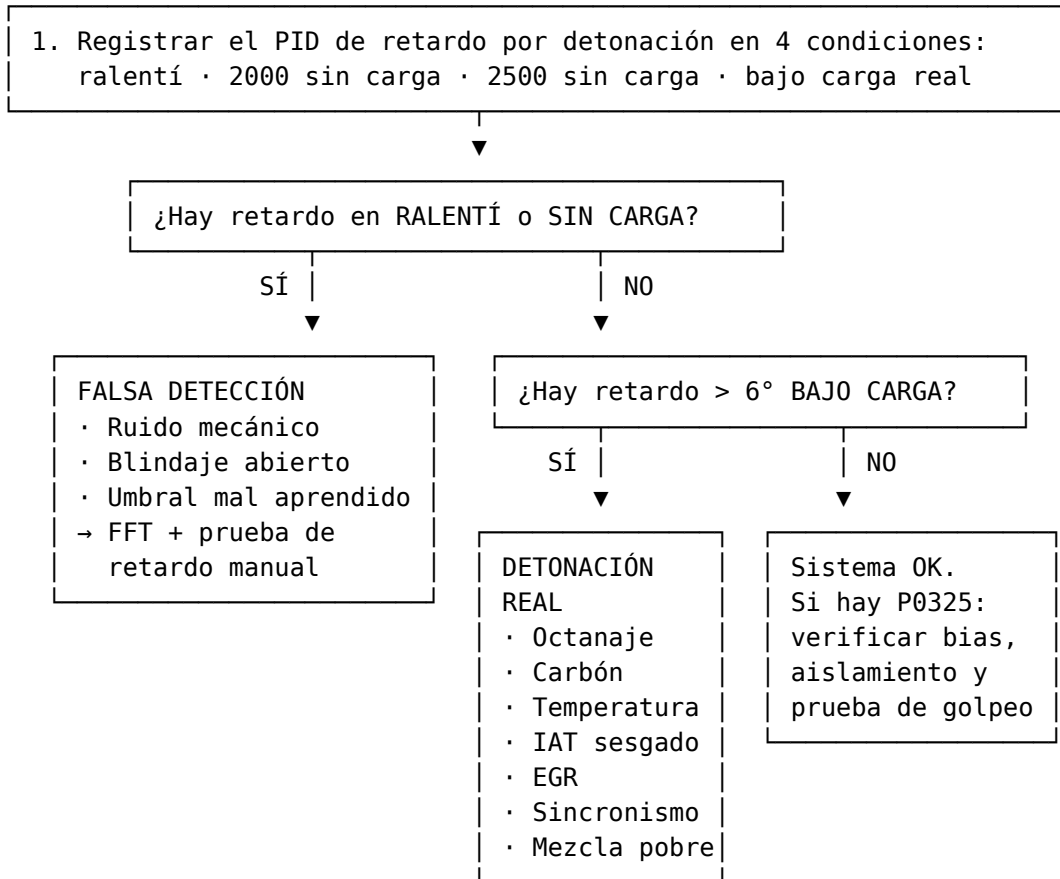
2. Retarde el encendido 10°.

Resultado	Diagnóstico
El ruido desaparece	Detonación real
El ruido persiste sin cambios	Ruido mecánico — busque la fuente

Fuentes habituales de ruido mecánico confundido con detonación

Fuente	Cómo se distingue
Golpeteo de biela	Grave, presente en vacío, aumenta al acelerar y soltar
Juego de pistón (<i>piston slap</i>)	Peor en frío, disminuye al calentar
Cadena o guías de distribución	Se oye en la tapa de distribución; empeora al acelerar
Volante bimasa deteriorado	Se percibe en ralentí y al soltar el embrague
Bomba de alta presión (GDI/diésel)	Sincronizado con la bomba, no con el PMS de combustión
Inyectores GDI	Chasquido regular, presente también en vacío
Tren de válvulas / taqués hidráulicos	Frecuencia de árbol de levas (mitad de la del cigüeñal)
Escudo térmico o soporte suelto	Cambia al tocar la pieza con el motor en marcha

Procedimiento integral de diagnóstico de detonación



Preguntas de autoevaluación — Osciloscopio y FFT

P1. Captura la señal de un sensor de detonación con el osciloscopio ajustado a 5 kS/s en un motor de 86 mm de diámetro. Observa una onda de aproximadamente 1.5 kHz y concluye que hay ruido mecánico. Explique por qué la conclusión puede ser completamente errónea, qué fenómeno se ha producido y cuál es el ajuste mínimo correcto.

P2. Un motor presenta un golpeteo audible bajo carga. Al retardar el encendido 10° con el escáner, el ruido no cambia en absoluto. En la FFT, la energía se concentra entre 1.8 y 2.4 kHz y está presente también en ralentí sin carga. Determine el diagnóstico y enumere tres fuentes probables.

P3. Compara el espectro FFT medido en el conector del sensor con el medido en el conector de la ECU. En el sensor, el pico a 6.1 kHz mide 0.62 V; en la ECU mide 0.27 V. Calcule la atenuación en dB, determine la frecuencia de corte del filtro parásito implicado (suponiendo 500 pF de capacidad de cable) y estime la resistencia parásita presente.

CUESTIONARIO INTEGRADOR — MÓDULO 5

- 1.** Un motor V6 con diámetro de cilindro de 94 mm requiere análisis de detonación. Calcule la frecuencia esperada del primer modo, la del segundo armónico, y determine la frecuencia de muestreo mínima que debe configurar en el osciloscopio para reproducir fielmente ambas.
 - 2.** Explique por qué la prueba de caída de voltaje no tiene ninguna validez en el circuito de un sensor de detonación, calcule la caída que produciría 200 k Ω de resistencia parásita con una corriente de 50 nA, y describa qué prueba la sustituye.
 - 3.** Un vehículo entra al taller con 14° de retardo por detonación permanente, incluso con el motor en ralentí en punto muerto. Describa el razonamiento completo que descarta la detonación real y enumere las tres causas posibles en orden de probabilidad.
 - 4.** Un sensor de detonación fue reemplazado y apretado a 8 N·m en lugar de los 20 N·m especificados. Explique el efecto sobre la sensibilidad, el mecanismo físico implicado y qué le ocurrirá al motor a medio plazo.
 - 5.** Calcule la frecuencia de corte de un filtro parásito formado por 47 k Ω de resistencia y 500 pF de capacidad de cable. Determine el porcentaje de amplitud que llega a la ECU si la detonación ocurre a 6.6 kHz, y decida si el circuito debe repararse.
 - 6.** Un motor turbo no alcanza la presión de sobrealimentación especificada. La wastegate y el actuador funcionan correctamente y no hay fugas. ¿Qué PID debe verificar antes de continuar con el diagnóstico del turbo, y qué explicaría el comportamiento?
 - 7.** Explique cómo un desfase de cadena de distribución de 8° de cigüeñal puede producir simultáneamente detonación real y retardo aplicado al cilindro equivocado. Relacione la respuesta con el Módulo 1.
 - 8.** Un sensor de detonación mide OL (infinito) entre sus dos pines. Otro, del mismo motor pero de distinto número de parte, mide 100 k Ω . Explique si alguno de los dos está defectuoso y describa la prueba que determina el estado real del cristal en ambos casos.
 - 9.** Un motor con desgaste avanzado ha ido aumentando su ruido mecánico de fondo a lo largo de 100 000 km. Explique qué le ocurre al umbral adaptativo de la ECU y por qué ese motor puede quedar sin protección efectiva contra la detonación sin generar ningún código.
 - 10.** Describa el procedimiento completo, paso a paso, para determinar si un golpeteo audible bajo carga es detonación o ruido mecánico, usando únicamente un escáner con capacidad de comandar el avance de encendido y un osciloscopio con FFT.
-

HOJA DE REFERENCIA RÁPIDA — MÓDULO 5

FÓRMULAS

Frecuencia de detonación: $f \text{ (kHz)} \approx 527 / \text{diámetro (mm)}$
 Filtro parásito: $f_c = 1 / (2\pi \cdot R_p \cdot C)$
 Atenuación del filtro: $A = 1 / \sqrt{1 + (f/f_c)^2}$
 Atenuación en dB: $\text{dB} = 20 \cdot \log_{10}(A)$
 Carga piezoeléctrica: $Q = d_{33} \cdot F$ $V = Q / C$

FRECUENCIAS POR DIÁMETRO

70 mm → 7.5 kHz · 80 mm → 6.6 kHz · 86 mm → 6.1 kHz
 92 mm → 5.7 kHz · 96 mm → 5.5 kHz · 105 mm → 5.0 kHz
 Banda habitual de trabajo: 5 – 8 kHz

VALORES ELÉCTRICOS

Voltaje de polarización (bias) 2.5 V DC
 Ruido de fondo en ralentí 0.10 – 0.35 V p-p
 Ruido de fondo a 2000 RPM 0.20 – 0.60 V p-p
 Evento de detonación 1.5 – 4.0 V p-p en ráfagas
 Capacidad interna del cristal 800 – 2 000 pF
 Resistencia entre pines 0L, ó 100 kΩ, ó 4.87 MΩ
 → DEPENDE DEL MODELO. NUNCA condene por este valor.
 Aislamiento pin ↔ carcasa > 10 MΩ ← SÍ es diagnóstico
 Blindaje a masa < 1 Ω, UN SOLO extremo
 PAR DE APRIETE 15 – 25 N·m ← CRÍTICO
 Sin arandelas · sin antiagarrotante · superficie a metal desnudo

CAÍDA DE VOLTAJE: NO APLICABLE

El circuito transporta nanoamperios: $50 \text{ nA} \times 200 \text{ k}\Omega = 0.010 \text{ V}$ ||

SUSTITÚYALA POR:

- Aislamiento señal ↔ masa > 10 MΩ
- Comparación FFT sensor vs ECU pérdida < 10 % (–1 dB)

EFFECTO DEL FILTRO PARÁSITO (con 500 pF de cable)

1 kΩ → f_c 318 kHz sin efecto
 10 kΩ → f_c 31.8 kHz despreciable
 100 kΩ → f_c 3.2 kHz la señal cae al 44 % (–7 dB)
 470 kΩ → f_c 677 Hz la señal desaparece (–20 dB)

VENTANA Y ESTRATEGIA

Ventana angular 0–10° APMS hasta 50–70° APMS, por cilindro
 Requiere CKP + CMP correctos (Módulo 1)
 Umbral ADAPTATIVO = $K \times \text{ruido de fondo}$ (K 1.5–3)
 Retardo por evento 1 – 3°
 Autoridad máxima 8 – 20°
 Restitución 0.3 – 1.0° por segundo (LENTA)
 Tras reemplazar el sensor . BORRAR la memoria adaptativa

OSCILOSCOPIO

Muestreo MÍNIMO 50 kS/s (ideal 100 – 200 kS/s)

A 5 kS/s se produce ALIASING: verá 1.5 kHz falsos	
Acoplamiento	DC (ver bias) · AC (analizar señal)
V/div	0.5 V/div DC · 0.2 V/div AC
Time/div	1 – 5 ms/div
Canal 2	CKP, obligatorio para verificar la ventana
Capturar	BAJO CARGA. En vacío no hay detonación.
DETONACIÓN REAL vs RUIDO MECÁNICO	
Frecuencia	5–8 kHz 1–3 kHz
Carga	solo bajo carga también en vacío
Sincroniza con PMS	sí no
Al retardar 10° ...	DESAPARECE PERSISTE ← prueba decisiva
Octanaje mayor	mejora sin cambio
CÓDIGOS	
P0324 sistema · P0325 circuito B1 · P0326 rango	
P0327 entrada baja · P0328 entrada alta · P0329 intermitente	
P0330 – P0334 sensor 2 / banco 2	
ADVERTENCIA: la falla más costosa (falsa detección por ruido mecánico) NO GENERA NINGÚN CÓDIGO. Solo el PID de retardo la revela.	

Fin del Módulo 5. El Módulo 6 (Sensores de Presión) desarrolla los sensores de riel de baja y alta presión, presión de aceite, FTP del sistema EVAP, DPFE, presión diferencial del DPF y transductores de A/C.