

MÓDULO 14 — SENSORES INTELIGENTES Y REDES

SENT · PSI5 · CAN-High / CAN-Low · LIN · Diagnóstico sin señal analógica

Índice

PRESENTACIÓN DEL MÓDULO	2
Por qué el voltaje dejó de ser el dato	2
Los cuatro protocolos del módulo	3
14.1 · SENSORES CON SALIDA SENT Y PSI5	4
14.1.1 · SENT (<i>Single Edge Nibble Transmission</i> , SAE J2716)	4
14.1.2 · PSI5 (<i>Peripheral Sensor Interface 5</i>)	10
14.2 · REDES CAN Y LIN APLICADAS AL DIAGNÓSTICO	13
14.2.1 · CAN (<i>Controller Area Network</i> , ISO 11898)	13
14.2.2 · LIN (<i>Local Interconnect Network</i> , ISO 17987)	17
14.3 · DIAGNÓSTICO DE SENSORES SIN SEÑAL ANALÓGICA	21
El cambio de mentalidad	21
Las seis verificaciones que SÍ se pueden hacer	21
Lo que NO se puede hacer	22
Árbol de decisión	22
La ventaja diagnóstica que nadie aprovecha	24
Preguntas de autoevaluación — Sensores digitales	24
CUESTIONARIO INTEGRADOR — MÓDULO 14	25
HOJA DE REFERENCIA RÁPIDA — MÓDULO 14	26

PRESENTACIÓN DEL MÓDULO

LAS CUATRO GENERACIONES DE SEÑAL — Y POR QUÉ EL MULTÍMETRO DEJÓ DE SERVIR

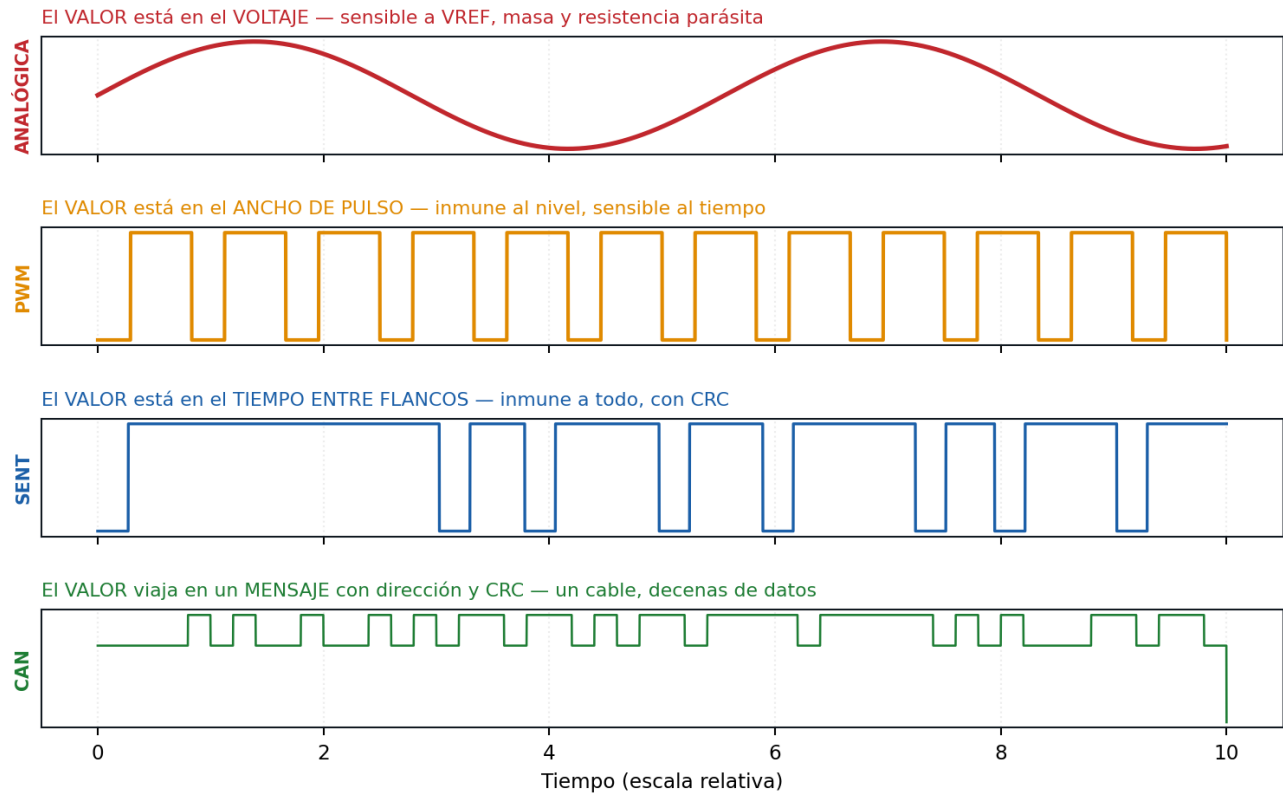


Figura 1: Las cuatro generaciones de señal

Durante trece módulos, la pregunta ha sido siempre la misma: **¿qué voltaje hay en el pin?** Este módulo trata los sensores en los que esa pregunta **ya no tiene respuesta útil**.

Por qué el voltaje dejó de ser el dato

Generación	Dónde está el valor	Vulnerabilidad
Analógica	En el voltaje	VREF, masa, resistencia parásita, ruido
PWM / frecuencia	En el ancho de pulso o la frecuencia	Tiempo, no nivel; mucho más robusta
SENT	En el tiempo entre flancos de bajada	Casi inmune; incluye CRC
CAN / LIN	En un mensaje digital con dirección y verificación	Integridad del bus

El problema que resolvieron los sensores digitales: un sensor analógico de presión de 2 500 bar pierde 31 bar de exactitud con solo 0.05 V de masa desplazada (Módulo 6, §6.2). Un sensor

SENT que mide la misma presión **entrega el número exacto**, porque la información no viaja en el voltaje.

Consecuencia para el taller: en estos sensores, **el multímetro no puede interpretar el valor**. El voltaje medio de una trama digital no significa nada. Pero el multímetro **sigue siendo imprescindible** para lo que sí importa: alimentación, masa y niveles lógicos.

Los cuatro protocolos del módulo

Protocolo	Hilos	Sentido	Velocidad	Uso típico
SENT (SAE J2716)	3	Sensor → ECU	~1 - 2 kHz de trama	MAF, presión de riel, TPS, APP
PSI5	2 (alimentación y datos juntos)	Sensor → ECU	125 kbit/s	Airbag, presión
CAN (ISO 11898)	2 (par trenzado)	Bidireccional, multi-nodo	125 kbit/s - 1 Mbit/s	Toda la red del vehículo
LIN (ISO 17987)	1 + masa	Maestro/esclavo	1 - 20 kbit/s	Ventiladores, alternador, GPCM, A/C

14.1 · SENSORES CON SALIDA SENT Y PSI5

14.1.1 · SENT (Single Edge Nibble Transmission, SAE J2716)

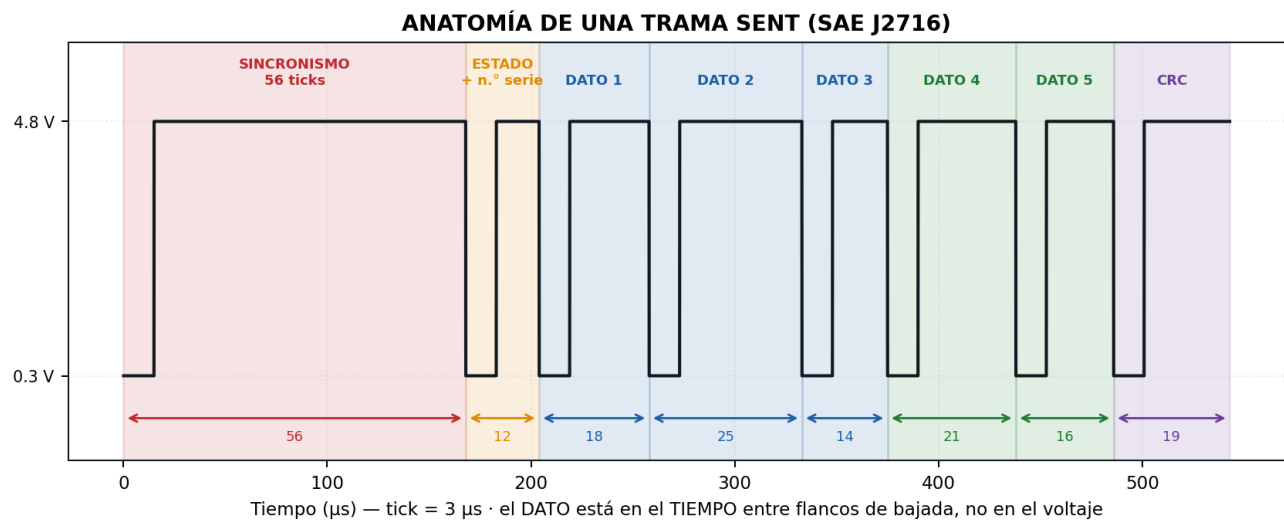


Figura 2: Anatomía de una trama SENT

Principio de funcionamiento

SENT transmite números codificando **el tiempo transcurrido entre flancos de bajada consecutivos**. La unidad de tiempo es el **tick**, típicamente de 3 μs.

$$\text{Duración del pulso (ticks)} = 12 + \text{valor del nibble}$$

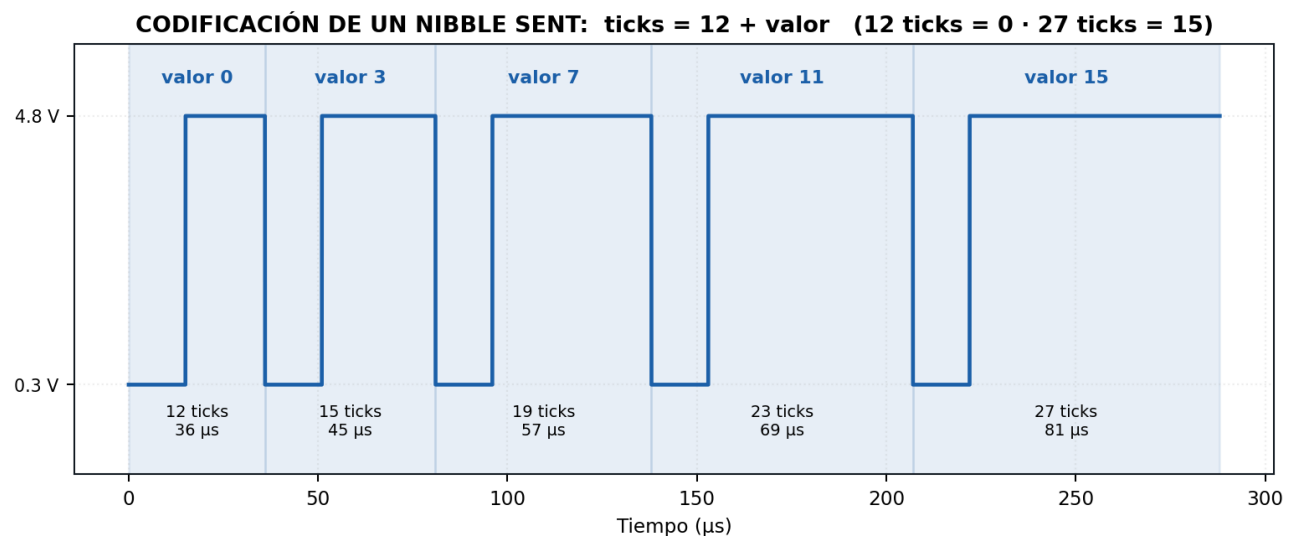


Figura 3: Codificación de un nibble SENT

Valor del nibble	Ticks	Duración con tick de 3 μ s
0	12	36 μ s
5	17	51 μ s
10	22	66 μ s
15	27	81 μs

Los 12 ticks mínimos garantizan que siempre haya un pulso reconocible; el valor se suma encima. Un nibble representa 4 bits (0 - 15).

Estructura de la trama

Elemento	Ticks	Función
Pulso de sincronismo	56 exactos	Permite al receptor calibrar el tick real del sensor
Nibble de estado	12 - 27	Bits de diagnóstico y número de serie
Nibbles de datos	6 $\times$ (12 - 27)	Dos canales de 12 bits, o uno de 12 y uno de 8 + temperatura
Nibble de CRC	12 - 27	Verificación de integridad (CRC-4)
Pausa opcional	Variable	Ajusta la trama a una duración fija

Duración de la trama:

$$t_{trama} = (56 + 8 \times n_{ticks}) \times 3 \mu s$$

Caso	Ticks totales	Duración
Todos los nibbles en 0	56 + 96 = 152	456 μs
Todos los nibbles en 15	56 + 216 = 272	816 μs
Típico	$\approx$ 200	$\approx$ 600 μ s

La genialidad del pulso de sincronismo: el receptor mide cuánto duró el pulso de 56 ticks y con eso calcula el tick real de **ese** sensor en **ese** instante. Si el oscilador del sensor deriva con la temperatura, la deriva afecta por igual al sincronismo y a los datos, **y se cancela**. Por eso SENT no necesita componentes de precisión ni calibración.

1 · Valores en ralentí

Parámetro	Valor esperado
Alimentación	4.90 - 5.10 V
Masa (SIG RTN)	< 0.05 V

Parámetro	Valor esperado
Nivel lógico bajo	0 - 0.5 V
Nivel lógico alto	4.4 - 5.0 V
Tick	3 µs (rango 0.5 - 90 µs según aplicación)
Duración de la trama	450 - 850 µs
Frecuencia de repetición de tramas	1.2 - 2.2 kHz
Tiempo de flanco	< 5 µs
Consumo del sensor	10 - 25 mA

2 · Valor aproximado a 2000 RPM

Los parámetros eléctricos no cambian con las RPM. Lo que cambia es el **contenido numérico** de los nibbles de datos. La duración de la trama varía ligeramente porque los nibbles tienen valores distintos.

Criterio diagnóstico: si la trama SENT **no cambia de forma** al variar la magnitud medida, el sensor está congelado. Es el equivalente digital de una señal analógica plana.

3 · Rango de funcionamiento normal

Parámetro	Rango
Nibbles de datos	6 (típico) · hasta 8 en tramas extendidas
Resolución	12 bits por canal (4 096 pasos)
Canales por trama	1 ó 2
Tolerancia del tick	±20 % (el sincronismo lo compensa)
CRC	4 bits, detecta errores de transmisión

4 · Síntomas de falla

Falla	Síntoma
Sin alimentación o masa	Sin trama; el módulo receptor reporta "sin señal"
Trama presente pero con CRC erróneo	El receptor descarta la trama → PID congelado o sustituido por defecto
Niveles lógicos degradados	Tramas intermitentes, códigos esporádicos
Flancos lentos	El receptor mide mal los ticks → valores erróneos con CRC válido
Trama congelada	Sensor internamente degradado
Ruido inducido	Errores de CRC intermitentes

Códigos: los específicos del sensor de que se trate (P0101 si es un MAF, P0192 si es un sensor de presión de riel), más los de comunicación del módulo receptor. **No existe un "código SENT" genérico.**

5 · Posibles soluciones y reparaciones

1. **Verificar alimentación y masa en el conector del sensor** (límites 0.10 V y 0.05 V de caída).
2. **Verificar el blindaje** y el enrutamiento del cable de señal — los flancos rápidos son sensibles a la capacidad parásita.
3. **Reparar conectores** — un contacto marginal que en un sensor analógico solo desplazaría la lectura, en SENT **corrompe la trama entera**.
4. Reemplazar el sensor cuando la trama esté congelada o ausente con alimentación y masa correctas.

6 · Estrategia de diagnóstico avanzado

Paso 1 — Alimentación y masa en el conector del sensor.

Paso 2 — Presencia de actividad. Osciloscopio en la línea de señal:

Ajuste	Valor
Acoplamiento	DC
V/div	1 V/div
Time/div	50 - 100 μs/div
Trigger	Flanco de bajada, nivel 2.5 V
Muestreo	≥ 5 MS/s (el tick es de 3 μ s)

Paso 3 — Verificación del pulso de sincronismo. Mida con cursores la duración del primer pulso largo de la trama:

$$t_{sync} = 56 \times 3 \mu s = 168 \mu s$$

Resultado	Diagnóstico
$\approx 168 \mu s$	Tick de 3 μs , sensor operando normalmente
Otro valor, pero constante	Tick distinto (aplicación de tick largo); no es falla
Variable entre tramas	Oscilador del sensor inestable → reemplazar

Paso 4 — Verificación de niveles y flancos.

Criterio	Correcto	Falla
Nivel bajo	0 - 0.5 V	> 1.0 V = resistencia parásita
Nivel alto	4.4 - 5.0 V	< 4.0 V = alimentación o carga excesiva
Flancos	< 5 μs , verticales	Redondeados = capacidad parásita o blindaje

Paso 5 — Verificación funcional por PID. El escáner muestra el valor decodificado por el módulo receptor. **Es la única forma de leer el número sin un decodificador.**

Paso 6 — Decodificación (si el osciloscopio la soporta): muestra el valor de cada canal y el estado del CRC.

Paso 7 — Caída de voltaje.

Circuito	Corriente	Límite
Alimentación	10 - 25 mA	0.10 V
Masa	10 - 25 mA	0.05 V
Señal	μA (entrada de alta impedancia)	No aplica — verificar niveles lógicos

7 · Valores comunes de resistencia

NO APLICA. El sensor SENT contiene un circuito integrado con oscilador, convertidor y lógica de trama. **El óhmetro no tiene ningún valor diagnóstico** entre sus pines.

Medición útil	Valor
Continuidad de cada conductor	< 1 Ω
Aislamiento entre conductores	> 10 MΩ
Aislamiento a carcasa	> 10 MΩ

8 · Alimentaciones y tierras

Pin	Función	Valor
1	Alimentación	4.90 - 5.10 V (algunos sensores usan 12 V)
2	Masa	< 0.05 V
3	Señal SENT	0 - 0.5 V ↔ 4.4 - 5.0 V

Solo tres hilos, aunque el sensor transmita cuatro magnitudes distintas. Ésa es la ventaja de peso y coste que impulsó la adopción de SENT (Módulo 2, §2.8).

9 · Aplicación de la Ley de Ohm

Cálculo 1 — Nivel bajo con resistencia parásita

El receptor presenta una resistencia de *pull-up* de 10 kΩ. Con la salida del sensor saturada a 50 Ω y 2 kΩ de corrosión:

$$V_{low} = 5 \times \frac{50 + 2000}{10000 + 50 + 2000} = 5 \times \frac{2050}{12050} = 0.851 \text{ V}$$

Todavía por debajo del umbral de 1.5 V: **la trama sigue siendo válida.** Con 6 kΩ parásitos:

$$V_{low} = 5 \times \frac{6050}{16050} = 1.885 \text{ V}$$

Por encima del umbral: el receptor deja de reconocer los flancos. La trama se corrompe por completo — no se degrada, desaparece.

Diferencia esencial con la señal analógica: un sensor analógico con esa misma corrosión daría un valor ligeramente desplazado y el motor seguiría funcionando degradado. Un sensor digital **pasa de correcto a nada**. La falla es abrupta, no progresiva.

Cálculo 2 — Efecto de la capacidad parásita sobre los flancos

La resistencia parásita y la capacidad del cable forman un filtro pasabajo, igual que en el sensor de detonación (Módulo 5, §5.1):

$$\tau = R \times C = 2000 \times 300 \times 10^{-12} = 0.6 \mu s$$

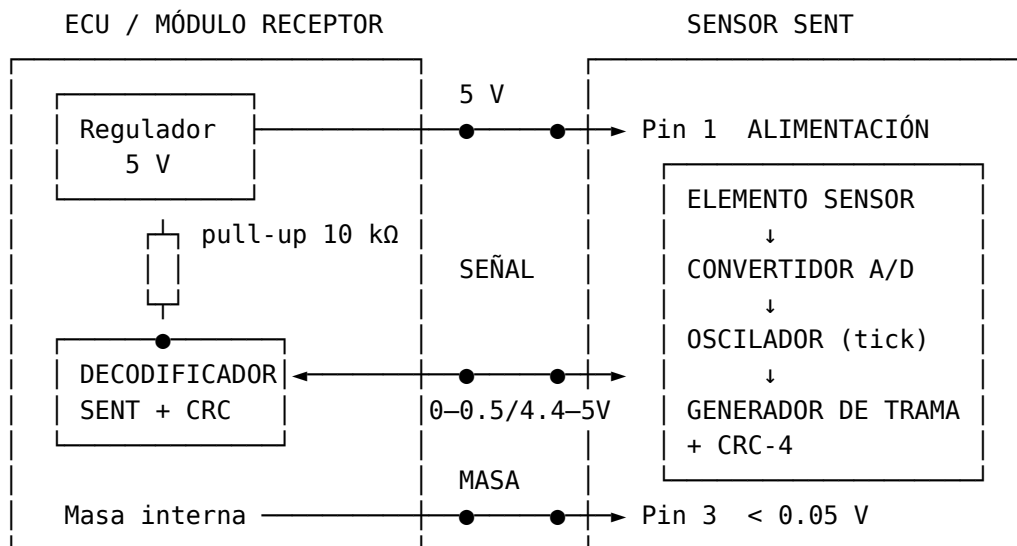
El tiempo de subida es de aproximadamente $2.2\tau = 1.32 \mu s$. Frente a un tick de $3 \mu s$, eso consume el **44 % del tiempo del tick** — el receptor puede medir mal el flanco y decodificar un valor equivocado.

Con 10 kΩ parásitos: $\tau = 3 \mu s$, tiempo de subida $6.6 \mu s$ — **mayor que un tick completo**. La trama es indescifrable.

10 · Nomenclatura de cableado

Marca	Alimentación	Señal	Masa
Bosch (VAG, BMW)	rt/ge	gn/ws	br/ws
Continental	5V (rojo)	SIG (blanco)	GND (marrón)
Ford	GRY/RED	BRN/WHT	BLK/WHT
GM	GRY	LT GRN	BLK/WHT

11 · Simbología y diagrama de conexión



3 HILOS · hasta 4 magnitudes transmitidas

El VALOR está en el TIEMPO entre flancos de bajada, NO en el voltaje.

Pulso de sincronismo = 56 ticks = $168 \mu s$ con tick de $3 \mu s$.

△ El multímetro NO puede interpretar el valor. Solo niveles y actividad.

12 · Análisis de oscilogramas

Criterio	Correcto	Falla
Pulso de sincronismo	168 μ s constante (tick 3 μ s)	Variable = oscilador inestable
Nivel bajo	0 - 0.5 V	> 1.0 V = resistencia parásita
Nivel alto	4.4 - 5.0 V	Bajo = alimentación
Flancos	< 5 μ s	Redondeados = capacidad parásita
Repetición de tramas	Continua, 1.2 - 2.2 kHz	Interrumpida = conexión intermitente
Variación de los nibbles	Cambian con la magnitud medida	Congelados = sensor muerto

13 · Señales PWM / ciclo de trabajo

El concepto de duty cycle no aplica de forma útil. SENT modula el **tiempo entre flancos**, no la proporción alto/bajo. Un multímetro en modo *Duty Cycle* sobre una línea SENT dará un valor que **fluctúa con el contenido de los datos** y que no tiene ninguna interpretación diagnóstica.

La magnitud a medir es el tiempo, con cursores del osciloscopio.

14 · Análisis de corriente

Medición	Valor
Consumo del sensor	10 - 25 mA
Corriente de la línea de señal	μ A (entrada de alta impedancia)

Sin utilidad diagnóstica directa. Se mide solo para descartar un sensor en corto que degrade la línea de alimentación compartida.

15 · Preguntas de autoevaluación — SENT

P1. Un sensor SENT presenta un pulso de sincronismo de 168 μ s constante, niveles de 0.4 V y 4.8 V y flancos verticales, pero el PID del escáner está congelado en un valor fijo. Interprete el hallazgo y determine dónde está la falla.

P2. Calcule la duración de un nibble que codifica el valor 9 con un tick de 3 μ s, y la duración total de una trama cuyos ocho nibbles valen todos 9.

P3. Un circuito SENT presenta 5 k Ω de resistencia parásita. Con una pull-up de 10 k Ω y una resistencia de saturación de 50 Ω , calcule el nivel bajo resultante y determine si el receptor podrá decodificar la trama, sabiendo que el umbral es de 1.5 V.

14.1.2 · PSI5 (*Peripheral Sensor Interface 5*)

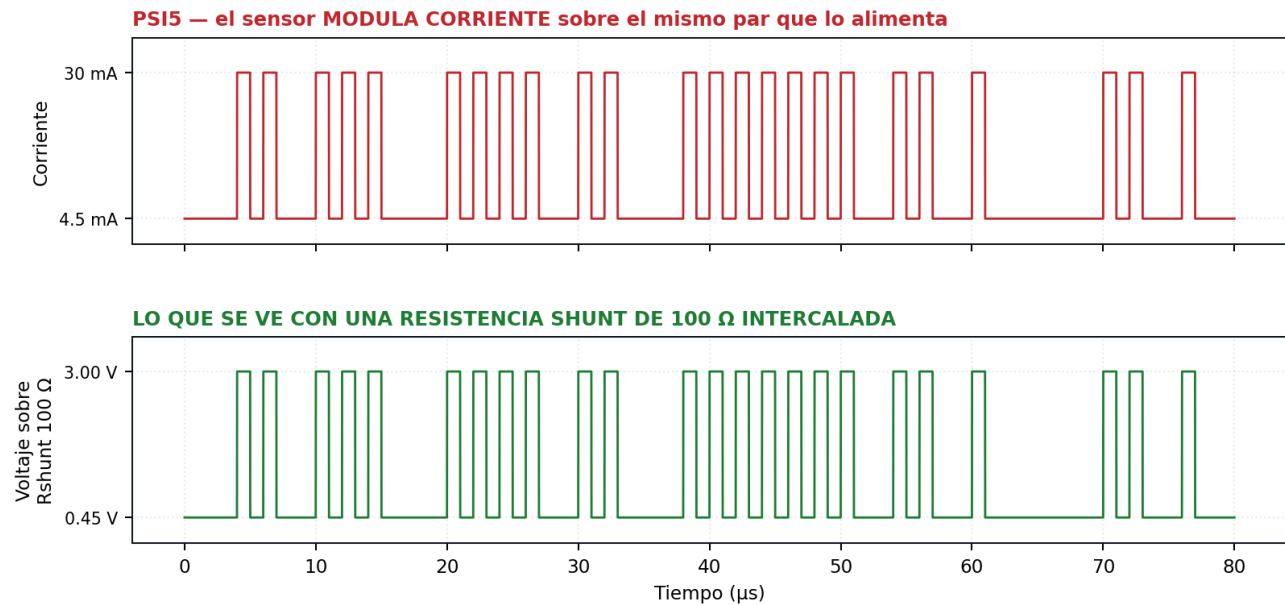


Figura 4: Modulación de corriente en PSI5

Principio

PSI5 lleva **alimentación y datos por el mismo par de hilos**. El sensor se alimenta de la línea y transmite **modulando la corriente que consume**, igual que el sensor ABS activo del Módulo 7, §7.2 — pero a mucha mayor velocidad y con datos digitales.

Parámetro	Valor
Hilos	2
Voltaje de la línea	5 - 11 V
Corriente de reposo	4 - 6 mA
Corriente durante un bit	+26 mA (total ≈ 30 mA)
Velocidad	125 kbit/s
Aplicaciones	Sensores de airbag, presión, aceleración

Diagnóstico

Un sensor PSI5 modula CORRIENTE. Conectar el osciloscopio directamente entre sus dos terminales muestra el voltaje de alimentación con un rizado mínimo. **Hay que convertir la corriente en voltaje.**

Método de la resistencia shunt (idéntico al del Módulo 7, §7.2, Fase C):

1. Intercale una **resistencia de 100 Ω** en serie con uno de los conductores.
2. Conecte el osciloscopio en paralelo con la resistencia.

$$V_{\text{reposo}} = 0.005 \times 100 = 0.50 \text{ V} \quad V_{\text{bit}} = 0.030 \times 100 = 3.00 \text{ V}$$

Resultado	Diagnóstico
Escalón nítido de 2.5 V entre niveles	Sensor transmitiendo correctamente
Corriente fija en 5 mA	Sensor alimentado pero sin transmitir
Sin corriente	Sensor abierto o sin alimentación
Escalón reducido	Sensor degradado

Advertencia de seguridad: los sensores PSI5 se usan mayoritariamente en **sistemas de airbag**. Antes de intervenir cualquier circuito de retención, desconecte la batería y espere el tiempo de descarga especificado por el fabricante (típicamente 1 - 15 minutos). Un despliegue accidental causa lesiones graves.

Puntos 1 - 15 aplicados a PSI5

Punto	Contenido
1 · Ralentí	Línea 5 - 11 V · corriente de reposo 4 - 6 mA
2 · En operación	Alternancia 5/30 mA a 125 kbit/s
3 · Rango	Escalón nominal 26 mA · con shunt de 100 Ω: 0.5 ↔ 3.0 V
4 · Síntomas	Luz de airbag, código del módulo de retención, sistema desactivado
5 · Soluciones	Reparar cableado y conectores; nunca reparar cableado de airbag con empalmes
6 · Diagnóstico	Voltaje de línea + método del shunt + códigos del módulo
7 · Resistencia	No medir — un óhmetro puede desplegar un airbag
8 · Alimentaciones	2 hilos: alimentación y datos combinados; polaridad crítica
9 · Ley de Ohm	$V_{shunt} = I \times R_{shunt}$ · con 100 Ω: 0.5 V y 3.0 V
10 · Cableado	Cables de airbag: amarillo por norma internacional
11 · Simbología	Par trenzado con conectores de bloqueo y cortocircuitador
12 · Oscilograma	Con shunt: escalón de 2.5 V nítido y repetitivo
13 · PWM	No aplica; es modulación de corriente digital
14 · Corriente	Es la magnitud diagnóstica: 4 - 6 mA / 30 mA
15 · Preguntas	Ver el cuestionario integrador

14.2 · REDES CAN Y LIN APLICADAS AL DIAGNÓSTICO

14.2.1 · CAN (Controller Area Network, ISO 11898)

CAN DE ALTA VELOCIDAD (ISO 11898-2) — LAS DOS LÍNEAS SON ESPEJO

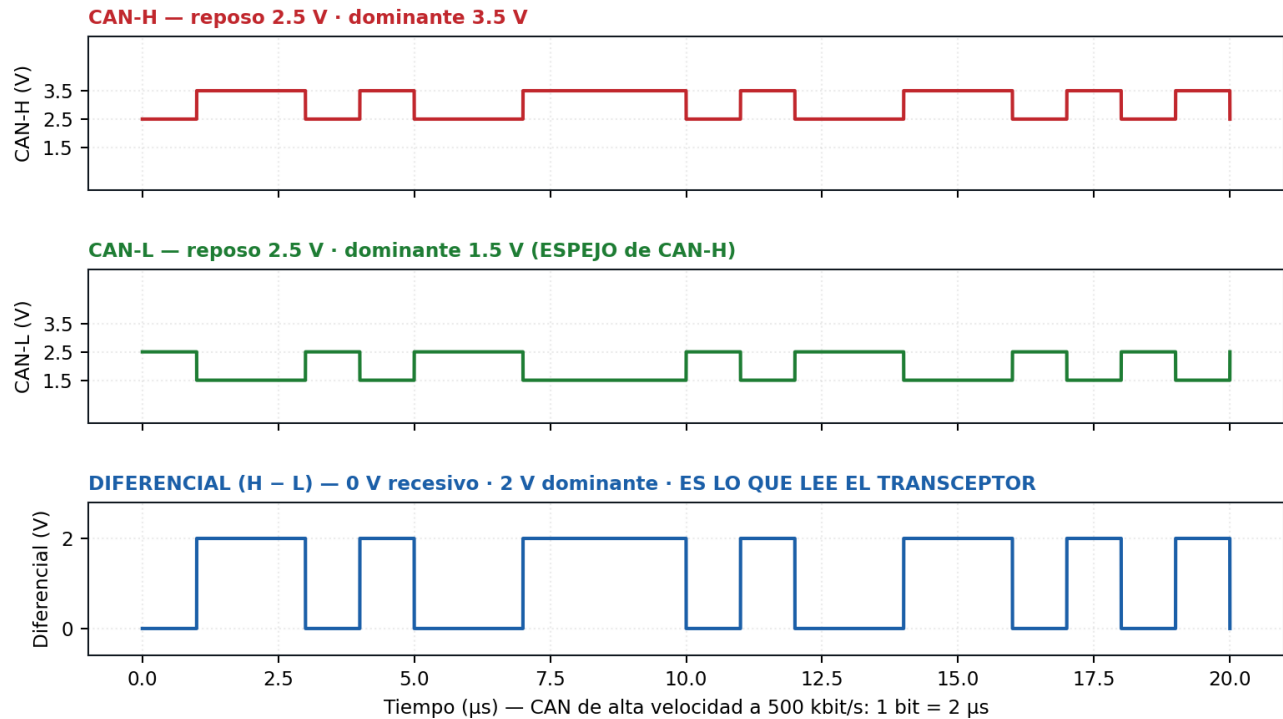


Figura 5: Niveles del bus CAN de alta velocidad

Principio

Dos hilos trenzados transportan la **misma información en espejo**. El receptor no lee el voltaje absoluto de cada línea, sino **la diferencia entre ambas**:

$$V_{diferencial} = V_{CAN-H} - V_{CAN-L}$$

Por qué esto lo hace inmune al ruido: cualquier interferencia que incida sobre el par afecta a los dos conductores por igual, y al restarlos **se cancela**. Es el mismo principio de la entrada diferencial del CKP de reluctancia variable (Módulo 1, §1.1), llevado al dominio digital.

1 · Valores de referencia

CAN de alta velocidad (ISO 11898-2) — el más común:

Estado	CAN-H	CAN-L	Diferencial
Recesivo (bit 1)	2.5 V	2.5 V	0 V
Dominante (bit 0)	3.5 V	1.5 V	2.0 V

Parámetro	Valor
Velocidad típica	500 kbit/s (rango 125 kbit/s – 1 Mbit/s)
Duración de 1 bit a 500 kbit/s	2 μs
Resistencia entre CAN-H y CAN-L (red apagada)	$\approx 60 \Omega$
Terminación por extremo	120 Ω
Voltaje medio en el multímetro	CAN-H 2.5 – 3.0 V · CAN-L 2.0 – 2.5 V
Pines del conector OBD	6 = CAN-H · 14 = CAN-L

CAN de baja velocidad / tolerante a fallos (ISO 11898-3):

Estado	CAN-H	CAN-L
Recesivo	0 V	5 V
Dominante	3.6 V	1.4 V

Parámetro	Valor
Velocidad	125 kbit/s
Terminación	500 Ω – 16 k Ω por nodo (no 120 Ω)
Característica	Sigue funcionando con un hilo cortado o en corto

Identifique el tipo antes de interpretar. Un CAN de baja velocidad medido con los criterios del de alta velocidad parecerá completamente averiado, y al revés.

2 · La prueba de los 60 Ω

PRUEBA DE LOS 60 Ω – LA VERIFICACIÓN MÁS RÁPIDA DEL BUS CAN

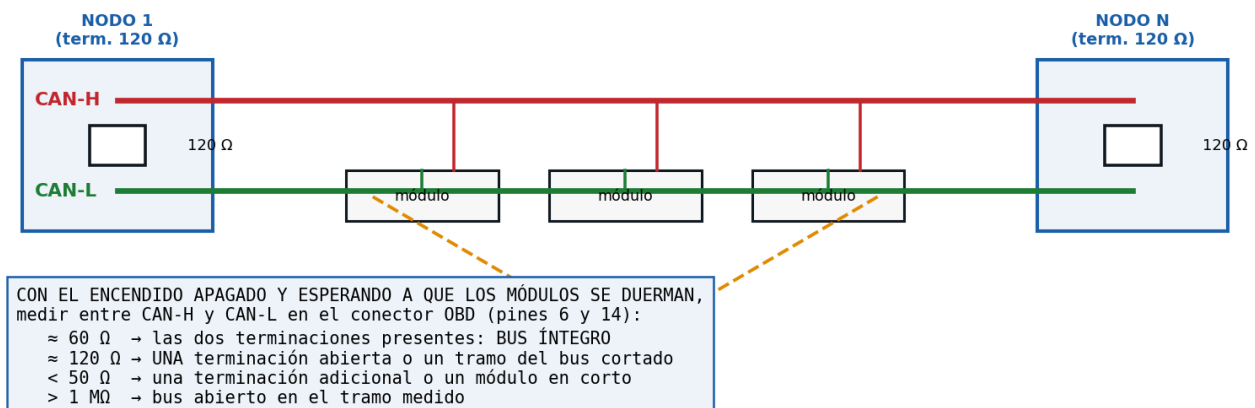


Figura 6: Prueba de los 60 ohmios

Es la verificación más rápida y concluyente del bus CAN de alta velocidad.

Procedimiento:

1. Encendido **apagado** y módulos **dormidos** (espere 5 – 15 minutos).
2. Óhmetro entre los pines **6 y 14** del conector OBD.

Lectura	Diagnóstico
$\approx 60 \Omega$ (55 – 70)	Las dos terminaciones presentes: bus íntegro
$\approx 120 \Omega$	Una terminación abierta , o el bus está cortado entre ambas
40 – 50 Ω	Una terminación adicional (módulo mal instalado) o un módulo en corto
$> 1 \text{ M}\Omega$	Bus abierto en el tramo medido
$< 10 \Omega$	CAN-H y CAN-L en corto entre sí

Fundamento (Ley de Ohm, resistencias en paralelo):

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

3 · Síntomas de falla

PATOLOGÍAS DEL BUS CAN — RECONOCIBLES A SIMPLE VISTA

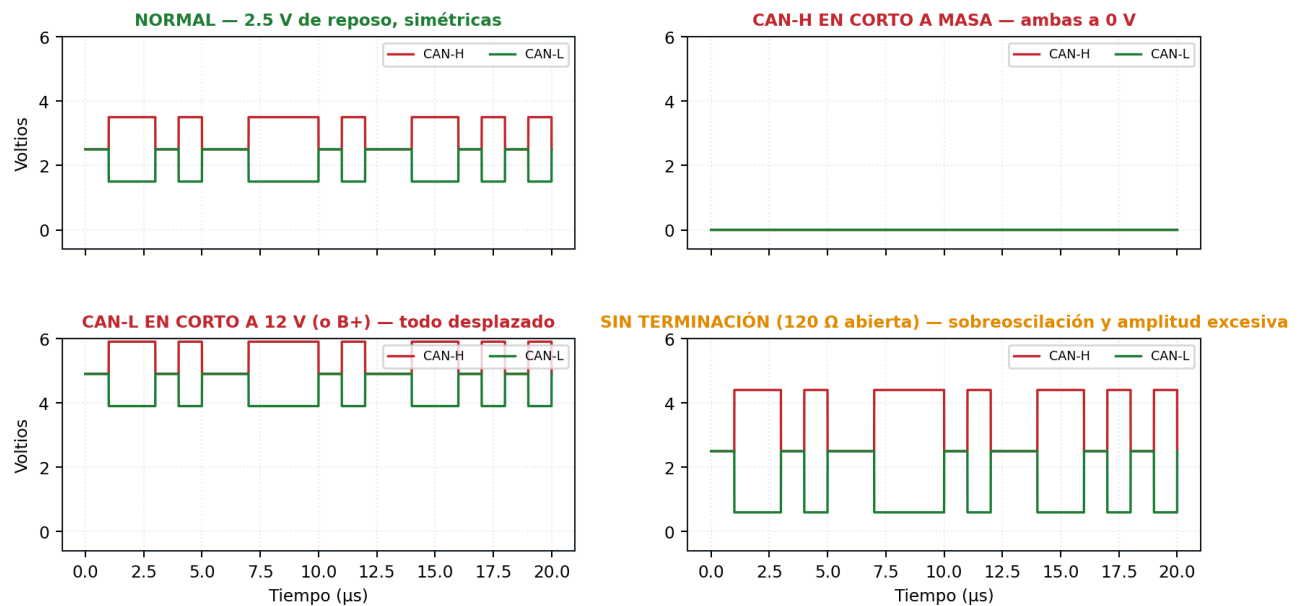


Figura 7: Patologías del bus CAN

Falla	Aspecto en el osciloscopio	Síntoma
CAN-H en corto a masa	Ambas líneas planas en 0 V	Red muerta , múltiples códigos U
CAN-L en corto a B+	Ambas desplazadas hacia arriba	Red muerta o errática

Falla	Aspecto en el osciloscopio	Síntoma
CAN-H y CAN-L en corto entre sí	Una sola línea plana en 2.5 V	Red muerta
Terminación abierta	Amplitud excesiva y sobreoscilación	Errores intermitentes, códigos U esporádicos
Un hilo cortado	La línea sana sigue conmutando, la otra no	Comunicación degradada o nula
Módulo defectuoso saturando el bus	Actividad continua sin pausas	Red saturada

Códigos: **U0001** (bus CAN de alta velocidad), **U0100 - U0199** (pérdida de comunicación con un módulo concreto), U0073 (bus desactivado), U0300 (versiones de software incompatibles). Los códigos **U** son siempre de red.

Regla de oro de los códigos U: un código U0121 (pérdida de comunicación con el módulo ABS) **no significa que el módulo ABS esté averiado**. Significa que el módulo que reporta no está recibiendo sus mensajes. El culpable puede ser el ABS, el bus, o la alimentación del ABS.

4 · Estrategia de diagnóstico avanzado

Paso 1 — Prueba de los 60 Ω. Rápida, barata y decisiva.

Paso 2 — Voltajes de reposo con multímetro.

Medición (KOEO, contra masa)	Valor esperado
CAN-H	2.5 - 3.0 V
CAN-L	2.0 - 2.5 V
CAN-H ↔ CAN-L	0.3 - 0.8 V (promedio de la actividad)

Paso 3 — Captura con osciloscopio de 2 canales.

Ajuste	Valor
Canales	2 — obligatorio (CAN-H y CAN-L)
Acoplamiento	DC
V/div	1 V/div
Time/div	2 - 10 μs/div
Muestreo	≥ 10 MS/s
Trigger	Flanco, en CAN-H a 3.0 V

Verificar: simetría perfecta entre las dos líneas, amplitud de 1 V por línea, flancos limpios, sin sobreoscilación.

Paso 4 — Aislamiento por desconexión. Si la resistencia o los voltajes son anómalos, desconecte módulos **uno a uno** hasta que los valores se normalicen. El último desconectado es el culpable.

Paso 5 — Verificación de alimentación y masa de cada módulo. Un módulo sin alimentación no comunica y genera un código U que parece un problema de red.

Paso 6 — Caída de voltaje. El bus CAN transporta **miliamperios**, por lo que la prueba clásica **no aplica**. La degradación se manifiesta como **reflexiones y sobreoscilación**, no como caída. Se diagnostica por la forma de onda.

5 · Aplicación de la Ley de Ohm

Cálculo 1 — Las terminaciones en paralelo

$$R = \left(\frac{1}{120} + \frac{1}{120} \right)^{-1} = 60 \, \Omega$$

Cálculo 2 — Corriente del bus en estado dominante

Con 2 V de diferencial sobre 60 Ω :

$$I = \frac{2.0}{60} = 33 \, \text{mA}$$

Ésa es la corriente que el transceptor del nodo transmisor debe entregar. **Con una terminación abierta (120 Ω), la corriente cae a 16.7 mA** y la señal sobreoscila porque falta la carga que amortigua las reflexiones.

Cálculo 3 — Por qué la caída de voltaje no aplica

Con 33 mA y 2 Ω de resistencia parásita:

$$V_{drop} = 0.033 \times 2 = 0.066 \, \text{V}$$

Despreciable frente a los 2 V de diferencial. **En CAN, el enemigo no es la resistencia: es la reflexión.** Un empalme mal hecho o un ramal demasiado largo produce ecos que corrompen los bits, sin producir ninguna caída medible.

14.2.2 · LIN (*Local Interconnect Network*, ISO 17987)

Principio

Un solo hilo más la masa del vehículo. Un **maestro** (habitualmente una ECU) interroga a hasta 16 **esclavos** (ventilador, alternador, módulo de bujías incandescentes, sensor de lluvia, actuadores de climatización).

Es más lento y más barato que CAN, y suficiente para componentes que no necesitan respuesta en milisegundos.

1 · Valores de referencia

Parámetro	Valor
Hilos	1 + masa del chasis

Parámetro	Valor
Nivel recesivo	≈ voltaje de batería (12 - 14 V)
Nivel dominante	< 20 % de Vbat (típico 0.5 - 2.0 V)
Velocidad	1 - 20 kbit/s (típico 9.6 ó 19.2 kbit/s)
Duración de 1 bit a 19.2 kbit/s	52 μs
Resistencia de <i>pull-up</i> del maestro	1 kΩ
Resistencia de <i>pull-up</i> del esclavo	30 kΩ
Esclavos por bus	hasta 16

2 · Estructura de la trama

Elemento	Descripción
Break	≥ 13 bits dominantes consecutivos — marca el inicio
Sync	Byte 0x55 (alternancia perfecta 01010101) para calibrar la velocidad
PID	Identificador con 2 bits de paridad
Datos	1 a 8 bytes
Checksum	Verificación

El campo de sincronismo 0x55 cumple la misma función que el pulso de sincronismo de SENT: permite al esclavo calibrar la velocidad real del maestro sin necesidad de un oscilador de precisión.

3 · Síntomas de falla

Falla	Síntoma
Línea en corto a masa	Todos los esclavos del bus dejan de responder
Línea en corto a B+	Igual
Línea abierta	Los esclavos aguas abajo no responden
Esclavo defectuoso que satura la línea	Todo el bus LIN cae
Masa deficiente del esclavo	Ese esclavo no responde o responde erráticamente

Códigos: U0xxx específicos del componente, más los códigos funcionales del sistema afectado (por ejemplo P0480 si el ventilador LIN no responde).

4 · Estrategia de diagnóstico

Paso 1 — Voltaje de reposo. Con el encendido puesto y el bus inactivo, la línea debe estar en **nivel recesivo, cercano al voltaje de batería.**

Lectura	Diagnóstico
≈ Vbat	Línea íntegra

Lectura	Diagnóstico
0 V	Corto a masa o maestro manteniéndola dominante
Valor intermedio estable	Resistencia parásita o esclavo cargando la línea

Paso 2 — Captura con osciloscopio.

Ajuste	Valor
Acoplamiento	DC
V/div	5 V/div
Time/div	200 μs - 1 ms/div
Trigger	Flanco de bajada, nivel 6 V

Verificar: el *break* de 13 bits dominantes, el byte de sincronismo con su alternancia perfecta, y niveles limpios.

Paso 3 — Aislamiento por desconexión. Desconecte esclavos uno a uno hasta que la línea recupere el nivel recesivo.

Paso 4 — Caída de voltaje.

Circuito	Corriente	Límite
Alimentación del esclavo	Según componente	0.20 V
Masa del esclavo	Según componente	0.10 V
Línea LIN en estado dominante	≈ 12 mA	0.10 V

5 · Aplicación de la Ley de Ohm

Cálculo — Corriente de la línea LIN en estado dominante

La pull-up del maestro es de 1 k Ω desde 12.6 V. Cuando un nodo impone el estado dominante:

$$I = \frac{12.6 - 1.0}{1000} = 11.6 \text{ mA}$$

Con 5 Ω de resistencia parásita en la línea:

$$V_{drop} = 0.0116 \times 5 = 0.058 \text{ V}$$

Despreciable. **Pero si un esclavo defectuoso presenta 200 Ω a masa**, la línea no puede volver al estado recesivo:

$$V_{recesivo} = 12.6 \times \frac{200}{1000 + 200} = 2.10 \text{ V}$$

2.1 V está por debajo del umbral recesivo (20 % de 12.6 = 2.52 V). El bus queda permanentemente dominante y **ningún nodo puede comunicar**. Éste es el mecanismo por el que un solo esclavo defectuoso tumba toda la red LIN.

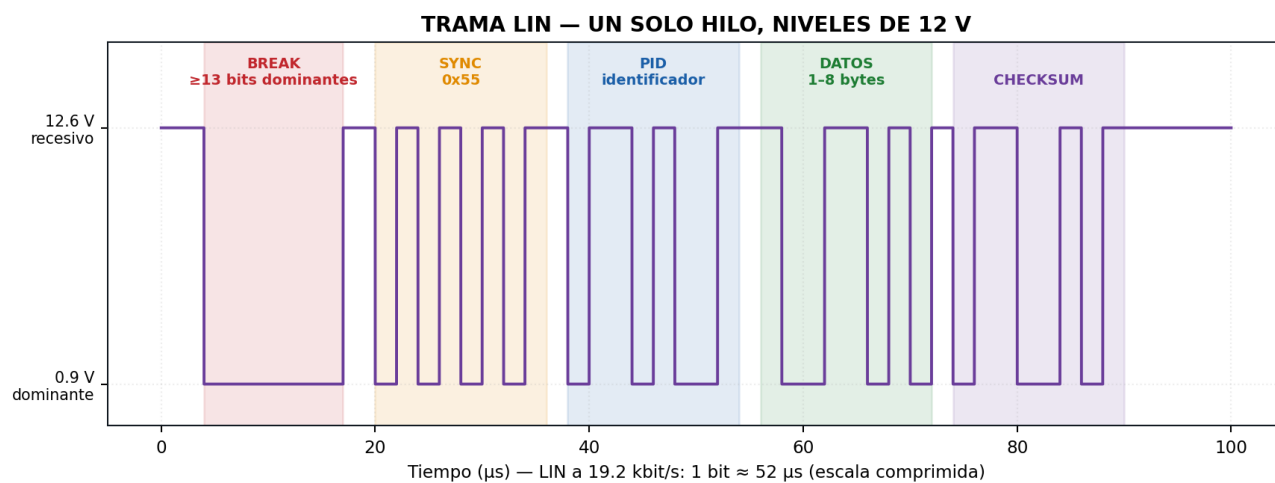


Figura 8: Estructura de una trama LIN

14.3 · DIAGNÓSTICO DE SENSORES SIN SEÑAL ANALÓGICA

SENSOR DIGITAL SIN DECODIFICADOR — LO QUE SÍ SE PUEDE VERIFICAR

1 · ALIMENTACIÓN 4.90 – 5.10 V ó 11.5 – 14.5 V medidos EN EL CONECTOR DEL SENSOR
2 · MASA Caída máxima 0.05 V contra el negativo de batería
3 · PRESENCIA DE ACTIVIDAD ¿Hay tren de pulsos continuo? Sin actividad = sensor muerto o sin alimentación
4 · NIVELES LÓGICOS Bajo < 0.5 V · Alto > 4.5 V (SENT) ó 2.5/3.5 V (CAN) ó 0.9/12.6 V (LIN)
5 · CALIDAD DE FLANCOS Verticales, sin redondeo. Flancos lentos = capacidad parásita o blindaje
6 · PID DEL ESCÁNER El valor decodificado por el módulo receptor: la verificación funcional

LO QUE NO SE PUEDE HACER: interpretar el VALOR con un multímetro. El voltaje medio de una trama digital NO SIGNIFICA NADA.

Figura 9: Qué se puede verificar sin decodificador

El cambio de mentalidad

Con un sensor analógico, usted verifica el VALOR. Con un sensor digital, usted verifica el CANAL — y el valor lo lee el escáner.

Esta distinción reordena por completo la metodología:

	Sensor analógico	Sensor digital
¿Puedo leer el valor con el multímetro?	Sí	No
¿Puedo verificar el circuito?	Sí	Sí
¿Cómo obtengo el valor?	Multímetro u osciloscopio	PID del escáner
¿Cómo se manifiesta la degradación?	Progresiva (valor desplazado)	Abrupta (dato válido o nada)
¿El sensor detecta sus propios errores?	No	Sí (CRC)

Las seis verificaciones que SÍ se pueden hacer

#	Verificación	Herramienta	Criterio
1	Alimentación	Multímetro	4.90 – 5.10 V ó 11.5 – 14.5 V en el conector del sensor

#	Verificación	Herramienta	Criterio
2	Masa	Multímetro en mV	Caída máxima 0.05 V contra el negativo de batería
3	Presencia de actividad	Osciloscopio	Tren de pulsos continuo y repetitivo
4	Niveles lógicos	Osciloscopio	Según protocolo (ver tabla)
5	Calidad de flancos	Osciloscopio	Verticales, sin redondeo
6	Valor funcional	Escáner	PID coherente con la magnitud física real

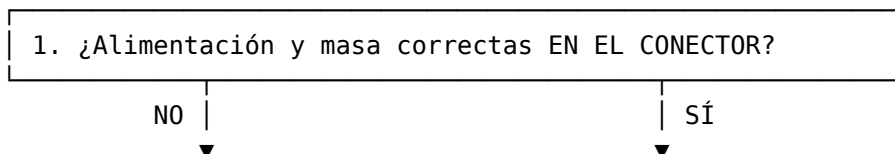
Tabla de niveles lógicos por protocolo:

Protocolo	Nivel bajo	Nivel alto
SENT	0 – 0.5 V	4.4 – 5.0 V
CAN-H (alta velocidad)	2.5 V (recesivo)	3.5 V (dominante)
CAN-L (alta velocidad)	1.5 V (dominante)	2.5 V (recesivo)
CAN diferencial	0 V (recesivo)	2.0 V (dominante)
LIN	< 2.5 V (dominante)	≈ Vbat (recesivo)
PSI5 (con shunt de 100 Ω)	0.50 V (4 – 6 mA)	3.00 V (30 mA)

Lo que NO se puede hacer

Error frecuente	Por qué está mal
Medir el “voltaje” de una línea SENT con el multímetro	El promedio de una trama digital no significa nada
Medir el duty cycle de una línea SENT	Fluctúa con los datos; no es una magnitud de control
Medir resistencia entre los pines de un sensor digital	Es un circuito integrado; el valor no está especificado
Aplicar los límites de caída de voltaje a una línea de datos	Circulan µA o mA; la falla se manifiesta como reflexión, no como caída
Condenar un módulo por un código U	El código indica pérdida de comunicación , no avería del módulo
Medir resistencia en un circuito de airbag (PSI5)	Puede desplegarlo. Nunca use un óhmetro ahí

Árbol de decisión



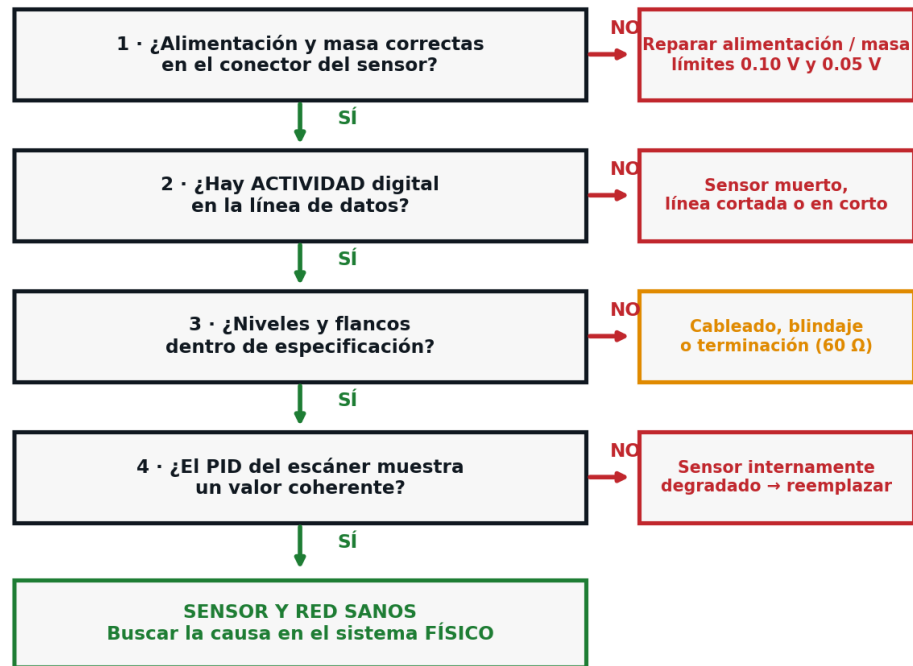
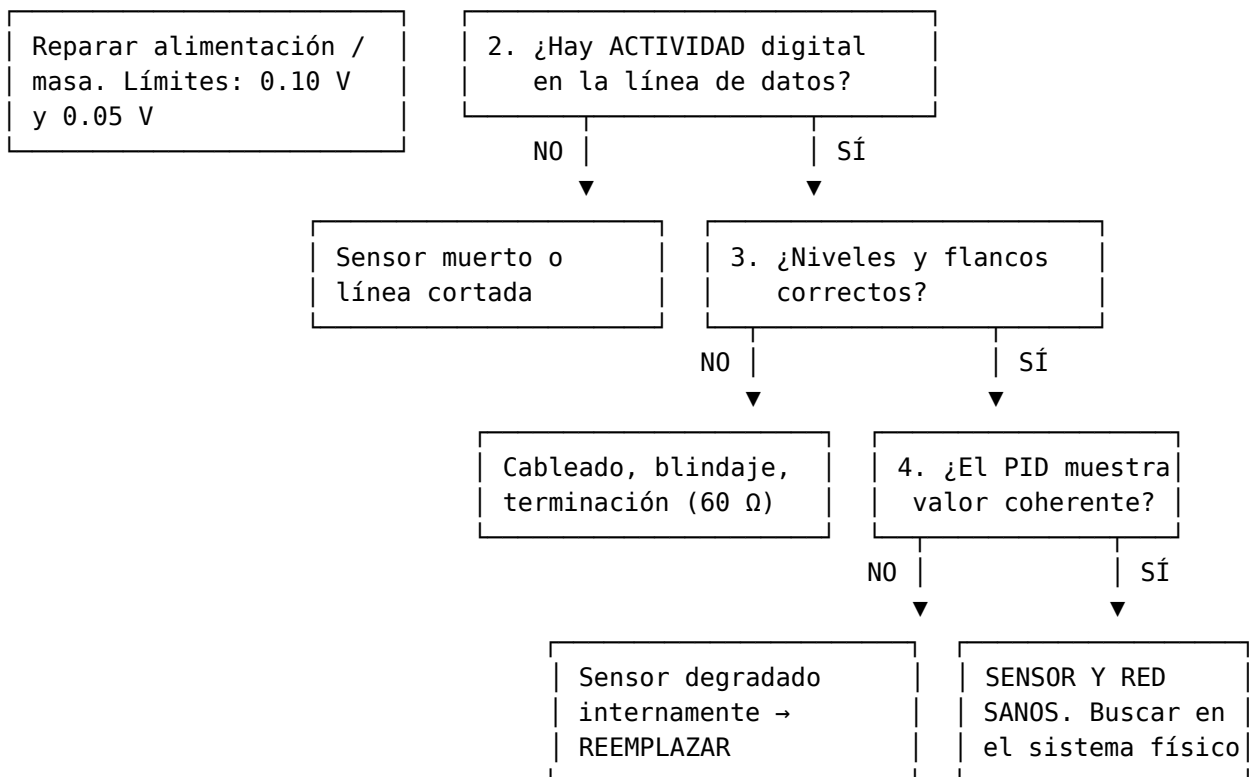
ÁRBOL DE DECISIÓN — SENSOR CON SALIDA DIGITAL (SENT · PSI5 · CAN · LIN)

Figura 10: Árbol de decisión para sensores digitales



La ventaja diagnóstica que nadie aprovecha

Los sensores digitales incluyen **bits de estado y CRC**. Cuando el módulo receptor detecta una trama corrupta, **lo registra**. Muchos escáneres muestran esos contadores en los datos ampliados del módulo:

PID de diagnóstico	Qué indica
Contador de errores de CRC	Tramas corrompidas: problema de cableado o ruido
Contador de tramas perdidas	Sensor intermitente
Bit de estado del sensor	El propio sensor reporta su condición interna
Contador de errores del bus CAN	Calidad general de la red

Un contador de errores de CRC que crece con el motor en marcha, con niveles lógicos correctos, apunta a ruido inducido: blindaje abierto, enrutamiento del arnés junto a cables de encendido, o masa deficiente. Es el mismo diagnóstico del Módulo 5, §5.3, aplicado al dominio digital.

Preguntas de autoevaluación — Sensores digitales

P1. Un técnico mide con el multímetro la línea de señal de un sensor SENT y obtiene 3.7 V. Concluye que el sensor está “a mitad de escala”. Explique por qué la conclusión no tiene sentido y describa qué debió medir.

P2. Un bus CAN de alta velocidad mide 121 Ω entre los pines 6 y 14 del conector OBD con los módulos dormidos. Interprete el hallazgo, calcule qué resistencia debería medir un bus íntegro y describa el procedimiento de aislamiento.

P3. Un esclavo LIN defectuoso presenta 180 Ω a masa. Con una pull-up de 1 k Ω y 12.8 V de batería, calcule el voltaje de la línea en estado recesivo y determine si el bus podrá comunicar, sabiendo que el umbral recesivo está en el 20 % de Vbat.

CUESTIONARIO INTEGRADOR — MÓDULO 14

1. Calcule la duración en microsegundos de un nibble SENT que codifica el valor 12 con un tick de 3 μ s, y la duración total de una trama de sincronismo más ocho nibbles cuyos valores son 3, 9, 14, 0, 11, 6, 15 y 8.
 2. Explique el mecanismo por el que el pulso de sincronismo de 56 ticks hace que SENT sea inmune a la deriva térmica del oscilador del sensor, y relacione la idea con el campo de sincronismo 0x55 del protocolo LIN.
 3. Un circuito SENT presenta 4 k Ω de resistencia parásita, con pull-up de 10 k Ω y resistencia de saturación de 50 Ω . Calcule el nivel bajo resultante, compárelo con el umbral de 1.5 V y explique por qué la falla de un sensor digital es abrupta mientras la de uno analógico es progresiva.
 4. Calcule la constante de tiempo y el tiempo de subida de un circuito SENT con 3 k Ω de resistencia parásita y 300 pF de capacidad de cable. Compare el resultado con el tick de 3 μ s y determine si la trama será decodificable.
 5. Un bus CAN de alta velocidad mide 58 Ω entre CAN-H y CAN-L con los módulos dormidos, y los voltajes de reposo son de 2.51 V y 2.49 V. Sin embargo, hay códigos U esporádicos. ¿Qué descarta con estos hallazgos y qué verificaría a continuación?
 6. Calcule la corriente que circula por el bus CAN en estado dominante con 2.0 V de diferencial y las dos terminaciones presentes. Repita el cálculo con una terminación abierta y explique por qué aparece sobreoscilación.
 7. Un sensor PSI5 medido con una resistencia shunt de 100 Ω muestra un escalón entre 0.48 V y 1.85 V. Calcule las corrientes correspondientes, compárelas con la especificación de 5 y 30 mA, y emita un diagnóstico.
 8. Explique por qué la prueba de caída de voltaje del Módulo 0 no es aplicable a una línea CAN, calculando la caída que produciría 3 Ω de resistencia parásita con 33 mA, e indique cómo se manifiesta realmente la degradación de un bus.
 9. Un vehículo presenta los códigos U0100, U0121 y U0140 simultáneamente. Interprete el hallazgo, explique por qué reemplazar los tres módulos sería un error y describa la primera prueba que realizaría.
 10. Compare las cuatro generaciones de señal (analógica, PWM, SENT y CAN) indicando, para cada una, dónde reside el valor, cuál es su principal vulnerabilidad y con qué herramienta se verifica.
-

HOJA DE REFERENCIA RÁPIDA — MÓDULO 14

DÓNDE ESTÁ EL VALOR EN CADA GENERACIÓN

ANALÓGICA en el VOLTAJE vulnerable a VREF, masa, R par

PWM en el ANCHO DE PULSO .. vulnerable al tiempo

SENT en el TIEMPO ENTRE casi inmune · incluye CRC

FLANCOS DE BAJADA

CAN / LIN en un MENSAJE digital .. vulnerable a la integridad
con dirección y CRC del bus (reflexiones)

SENT (SAE J2716) – 3 hilos

Alimentación 4.90 – 5.10 V

Nivel bajo / alto 0 – 0.5 V / 4.4 – 5.0 V

TICK 3 μ s (rango 0.5 – 90 μ s)

SINCRONISMO 56 ticks = 168 μ s ← medir con cursores

Nibble ticks = 12 + valor (12 = 0 · 27 = 15)

Trama 450 – 850 μ s · 1.2 – 2.2 kHz

Resolución 12 bits por canal (4096 pasos)

Osciloscopio 1 V/div · 50–100 μ s/div · $\geq$ 5 MS/s

Caída máx.: alimentación 0.10 V · masa 0.05 V

△ NO medir resistencia · NO medir duty cycle · NO interpretar el voltaje

PSI5 – 2 hilos (alimentación y datos juntos)

Voltaje de línea 5 – 11 V

Corriente de reposo 4 – 6 mA

Corriente de bit 30 mA (escalón de 26 mA)

CON SHUNT DE 100 Ω 0.50 V ↔ 3.00 V

Velocidad 125 kbit/s

△ AIRBAG: desconectar batería y esperar. NUNCA usar óhmetro.

CAN ALTA VELOCIDAD (ISO 11898-2)

CAN-H CAN-L DIFERENCIAL

Recesivo (1) 2.5 V 2.5 V 0 V

Dominante (0) 3.5 V 1.5 V 2.0 V

Velocidad típica 500 kbit/s (1 bit = 2 μ s)

OBD: pin 6 = CAN-H · pin 14 = CAN-L

★ PRUEBA DE LOS 60 Ω (encendido apagado, módulos dormidos):

≈ 60 Ω bus íntegro (dos terminaciones de 120 Ω en paralelo)

≈ 120 Ω ... UNA terminación abierta o bus cortado

40–50 Ω ... terminación extra o módulo en corto

> 1 M Ω bus abierto

< 10 Ω CAN-H y CAN-L en corto entre sí

Corriente en dominante: $I = 2.0 \text{ V} / 60 \Omega = 33 \text{ mA}$

Osciloscopio: 2 canales · 1 V/div · 2–10 μ s/div · $\geq$ 10 MS/s

△ La caída de voltaje NO aplica ($33 \text{ mA} \times 3 \Omega = 0.1 \text{ V}$, despreciable).

La degradación se manifiesta como REFLEXIÓN y SOBREOSCILACIÓN.

CAN BAJA VELOCIDAD (ISO 11898-3, tolerante a fallos)

Recesivo CAN-H 0 V · CAN-L 5 V
 Dominante CAN-H 3.6 V · CAN-L 1.4 V
 Terminación .. 500 Ω – 16 k Ω POR NODO (no 120 Ω)
 △ Identifique el tipo ANTES de interpretar cualquier medición.

LIN (ISO 17987) – 1 hilo + masa
 Recesivo $\approx$ Vbat (12 – 14 V)
 Dominante < 20 % de Vbat (0.5 – 2.0 V)
 Velocidad 1 – 20 kbit/s (1 bit $\approx$ 52 μ s a 19.2k)
 Pull-up maestro / esclavo 1 k Ω / 30 k Ω
 Trama: BREAK ($\geq$ 13 bits dominantes) + SYNC 0x55 + PID + DATOS + CHECKSUM
 Osciloscopio: 5 V/div · 200 μ s – 1 ms/div
 Un esclavo con 180 Ω a masa deja el bus permanentemente DOMINANTE
 y tumba toda la red.

LAS SEIS VERIFICACIONES SIN DECODIFICADOR

1. Alimentación en el conector 4.90–5.10 V ó 11.5–14.5 V
2. Masa caída máx. 0.05 V
3. Presencia de actividad tren de pulsos continuo
4. Niveles lógicos según protocolo
5. Calidad de flancos verticales, sin redondeo
6. PID del escáner valor coherente con la física

DEGRADACIÓN: analógica = PROGRESIVA · digital = ABRUPTA

CÓDIGOS U – SIEMPRE SON DE RED

U0001 bus CAN de alta velocidad
 U0100–U0199 pérdida de comunicación con un módulo concreto
 U0073 bus desactivado · U0300 versiones incompatibles
 △ Un código U NO significa que el módulo nombrado esté averiado:
 significa que sus mensajes no están llegando.

Fin del Módulo 14. El Módulo 15 cierra el curso con el árbol de decisión universal, diez casos de estudio resueltos con oscilogramas, la tabla maestra de referencia rápida de todos los módulos y el examen final de 60 preguntas.