MANUAL DE ESTUDIO · MECATRÓNICA AUTOMOTRIZ

Control de estabilidad, ADAS y frenos by-wire

Capítulo 10 · En el video: **minuto 2:14:55** · Duración 14:24

Objetivo. Calcular la guiñada de referencia del ESP y decidir qué rueda frenar ante un subviraje o sobreviraje.

Ideas clave

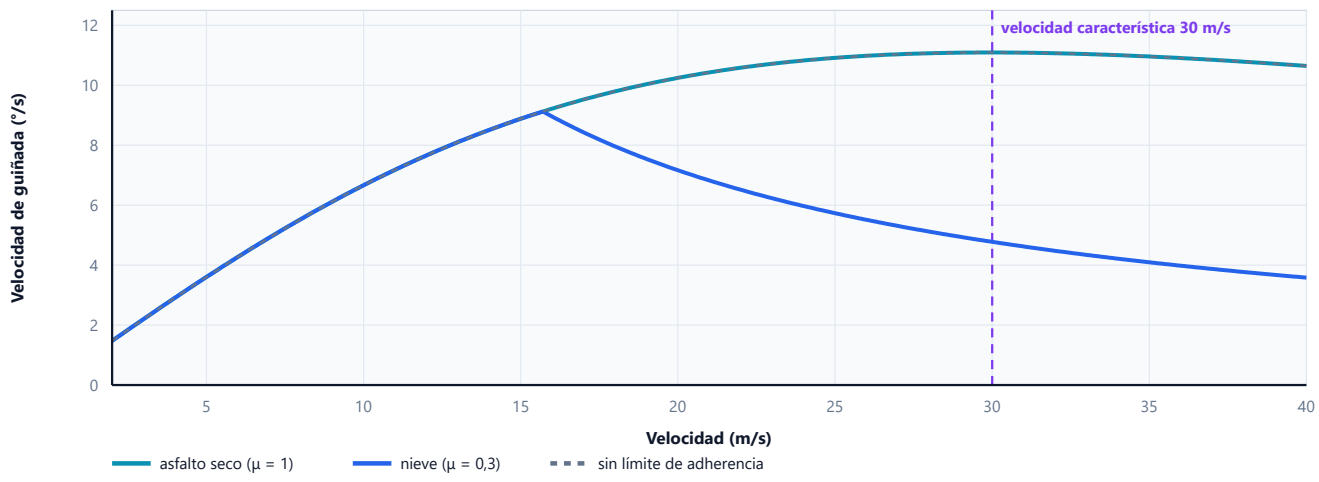
Subviraje y sobreviraje

En subviraje el auto gira menos de lo pedido (se va de frente); en sobreviraje gira más (la cola se abre). El ESP compara la guiñada medida con la de referencia y frena una sola rueda para crear un momento corrector.

Modelo de vía única

Junta las dos ruedas de cada eje en una. Con rigideces de deriva C_f y C_r, la guiñada estacionaria es $\psi = v \cdot \delta / [L(1 + K \cdot v^2)]$; K > 0 es un vehículo subvirador y $\sqrt{(1/K)}$ su velocidad característica.

Guiñada de referencia del ESP con 2° de ángulo en las ruedas cursosmecatronica.com

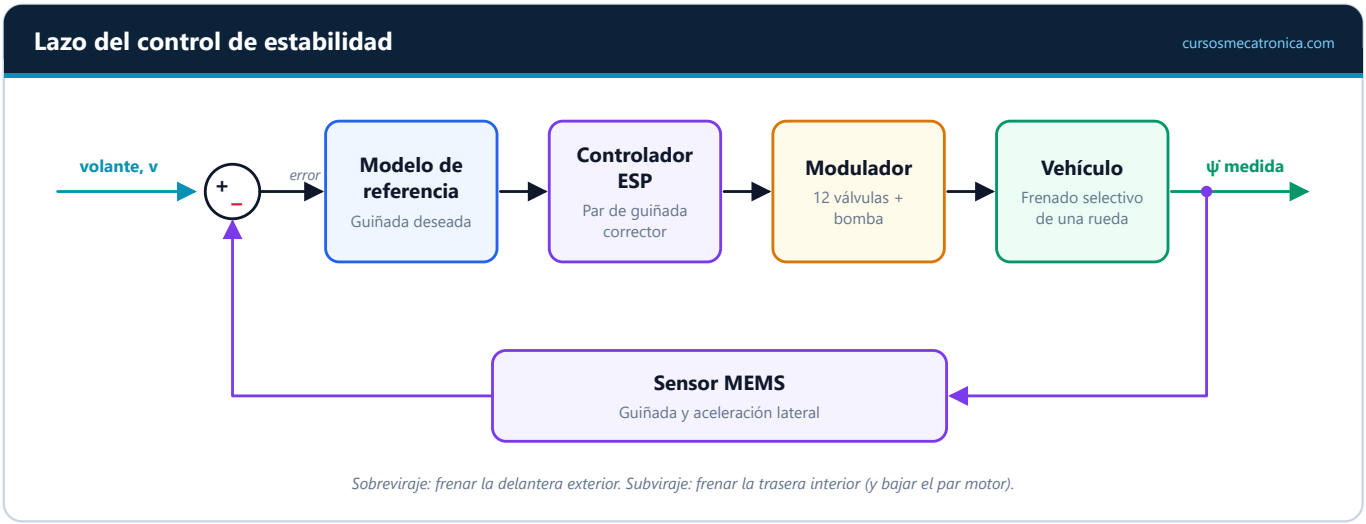


La referencia es la menor entre el modelo lineal y lo que permite la adherencia (0,85·μ·g/v). En nieve el auto no puede seguir la guiñada del modelo.

Salida de esp_modelo_de_bicicleta.py.

Lazo en cascada

Sensores MEMS de guiñada y aceleración lateral, ángulo de volante y velocidades de rueda alimentan un controlador que pide un par de guiñada; el modulador lo convierte en presiones por rueda y en una reducción del par motor.



Estructura del ESP del capítulo 10.

Reparto de frenado (EBD)

Al frenar, la carga se traslada al eje delantero. El EBD limita la presión trasera para que esas ruedas no se bloqueen primero.

Asistencias y ADAS

Asistente de frenado de emergencia, frenado autónomo (AEB) con radar y cámara, retención en pendiente y prellenado de los frenos. El modulador ESP de 12 válvulas y bomba autoaspirante permite frenar sin que el conductor pise.

Brake-by-wire

Servofrenos electromecánicos (iBooster) y sistemas "one-box" integran servo, ABS y ESP; con el pedal desacoplado, el frenado regenerativo y la conducción automatizada se coordinan mejor. La redundancia es obligatoria.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Guiñada estacionaria	$\dot{\psi} = v \cdot \delta \,/\, [L(1 + K \cdot v^2)]$	$L = l_f + l_r$.
Gradiente de subviraje	$K = m/L^2 \cdot (l_r/C_f - l_f/C_r)$	s^2/m^2.
Límite por adherencia	$\dot{\psi} \leq 0{,}85 \cdot \mu \cdot g \,/\, v$	$a_y = v \cdot \dot{\psi}$.
Transferencia de carga	$\Delta N = m \cdot a \cdot h \,/\, L$	h: altura del centro de gravedad.

Ejemplo resuelto: qué rueda frenar a 25 m/s

1. m = 1500 kg, l_f = 1,2 m, l_r = 1,5 m, C_f = 80 kN/rad, C_r = 90 kN/rad: K = 0,00111 s^2/m^2 (velocidad característica 30 m/s).
2. Con δ = 2° a 25 m/s: $\psi_{ref} = 10{,}92$ °/s.
3. Medida 12,6 °/s (más de 10 % sobre la referencia): sobreviraje → frenar la delantera exterior.
4. Medida 7,6 °/s: subviraje → frenar la trasera interior; 10,5 °/s: estable.

En nieve (μ = 0,3) la referencia se recorta a 4,78 °/s a 30 m/s: el ESP no pide lo imposible (esp_modelo_de_bicicleta.py).

Sistemas de freno electrónico

Sistema	Qué hace	Ejemplo de uso
ESP	Frena ruedas por separado y baja el par	Esquivar un obstáculo
EBD	Limita la presión trasera	Frenado fuerte cargado
AEB	Frena solo ante un choque inminente	Peatón que cruza
iBooster	Servo electromecánico	Brake blending, ADAS
One-box	Servo + ABS + ESP integrados	Vehículos eléctricos

Código del capítulo

Los archivos completos vienen en el paquete ZIP del capítulo (carpeta `codigo/`).

esp_modelo_de_bicicleta.py — gradiente de subviraje, guiñada de referencia con límite de adherencia y decisión de frenado.

```
"""
esp_modelo_de_bicicleta.py — Capítulo 10: guiñada de referencia del modelo lineal de vía
única, límite por adherencia y decisión de frenado selectivo del ESP.
"""
import math

M, LF, LR, CF, CR = 1500.0, 1.2, 1.5, 80000.0, 90000.0
L = LF + LR
K = M / L ** 2 * (LR / CF - LF / CR)        # gradiente de subviraje (s²/m²)


def guinada_ref(v, delta_rad, mu=1.0):
    estacionaria = v * delta_rad / (L * (1 + K * v * v))
    limite = 0.85 * mu * 9.81 / v
    return math.copysign(min(abs(estacionaria), limite), delta_rad)


def decidir(medida, referencia, banda=0.1):
    if abs(medida) > abs(referencia) * (1 + banda):
        return 'SOBREVIRAJE: frenar la rueda delantera exterior'
    if abs(medida) < abs(referencia) * (1 - banda):
        return 'SUBVIRAJE: frenar la rueda trasera interior'
    return 'estable: sin intervención'


if __name__ == '__main__':
    print(f'K = {K:.5f} s²/m² -> velocidad característica {math.sqrt(1 / K):.1f} m/s'
```

```
          f' ({3.6 * math.sqrt(1 / K):.0f} km/h)')
d = math.radians(2.0)
print('\nVolante con 2° en la rueda: guiñada de referencia (°/s)')
for v in (10, 20, 30, 40):
    print(f'  {v:2d} m/s: seco {math.degrees(guinada_ref(v, d)):5.2f}'
          f'   nieve (μ = 0,3) {math.degrees(guinada_ref(v, d, 0.3)):5.2f}')
ref = guinada_ref(25, d)
print(f'\nA 25 m/s la referencia es {math.degrees(ref):.2f} °/s')
for medida in (12.6, 10.5, 7.6):
    print(f'  medida {medida:4.1f} °/s -> {decidir(math.radians(medida), ref)}')
```

Errores frecuentes

- Frenar la rueda equivocada: en sobreviraje es la delantera exterior.
- Usar la guiñada del modelo sin limitarla por la adherencia.
- Olvidar la transferencia de carga al repartir el frenado.

Autoevaluación

1. ¿Qué rueda frena el ESP en subviraje?
2. ¿Qué indica K > 0?
3. ¿Qué limita el EBD?

Respuestas. 1. La trasera interior. **2.** Un vehículo subvirador. **3.** La presión de las ruedas traseras.