MANUAL DE ESTUDIO · MECATRÓNICA AUTOMOTRIZ

Frenos ABS, deslizamiento, frenado regenerativo y control de tracción

Capítulo 09 · En el video: **minuto 2:00:38** · Duración 14:17

Objetivo. Explicar el lazo de regulación del ABS y estimar su efecto en la distancia de frenado.

Ideas clave

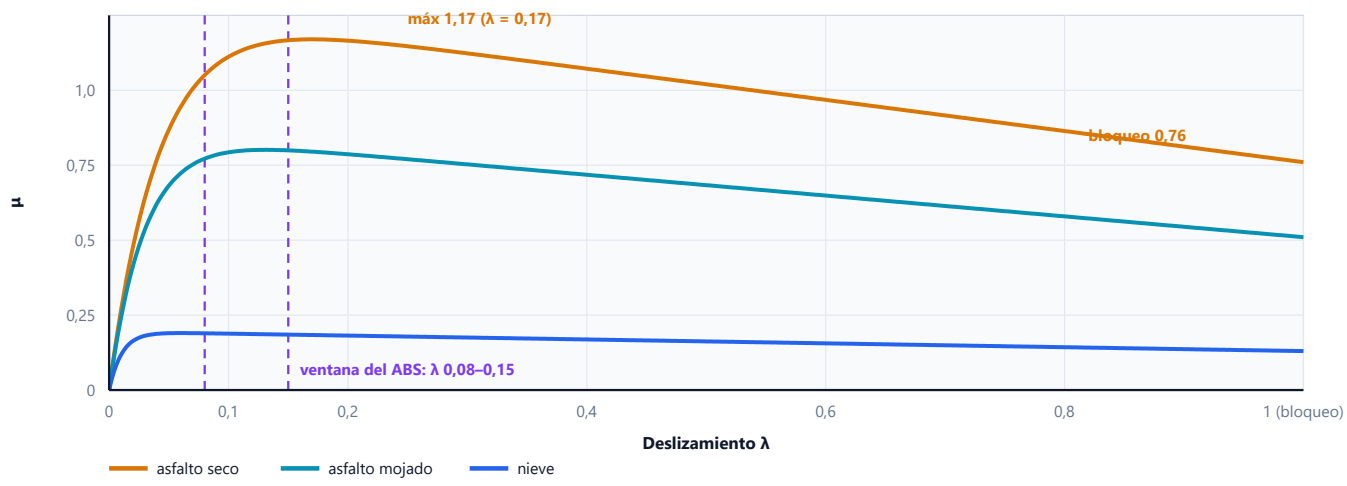
Arquitectura del ABS

Sensores de velocidad en cada rueda, una unidad hidráulica con válvulas de admisión y escape por rueda, una bomba de retorno y la ECU. Si el sistema falla, el freno convencional sigue funcionando.

Contacto neumático-calzada

La fuerza de frenado depende del deslizamiento $\lambda = (v - \omega \cdot r)/v$. La adherencia crece hasta un máximo ($\lambda \approx$ 0,1–0,2 en asfalto) y luego cae; con la rueda bloqueada además se pierde la capacidad de girar.

Coeficiente de adherencia según el deslizamiento (modelo de Burckhardt) cursosmecatronica.com



Al bloquear la rueda se pierde adherencia longitudinal y casi toda la lateral (no se puede girar). El ABS mantiene λ cerca del máximo.

Curvas usadas en abs_cuarto_de_vehiculo.py.

Ciclos de regulación

Si la rueda se desacelera demasiado o λ supera un umbral, la ECU mantiene y luego baja la presión; cuando la rueda recupera velocidad la vuelve a subir en escalones. En baja adherencia los ciclos son más lentos.

Calzada asimétrica

Con un lado en hielo y otro en asfalto, frenar a fondo crea un momento de guiñada. La atenuación (GMA) sube la presión del lado de alta adherencia de forma gradual para que el conductor alcance a corregir.

Frenado regenerativo

En eléctricos e híbridos el motor frena recuperando energía hasta su límite de potencia; el resto lo pone el freno hidráulico (brake blending) sin que el conductor note el cambio en el pedal.

Control de tracción

El TCS reduce el par motor y frena la rueda que patina; el diferencial electrónico (EDS) frena una rueda para pasar par a la otra.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Deslizamiento al frenar	$\lambda = (v - \omega \cdot r)/v$	0 libre, 1 bloqueada.
Burckhardt	$\mu(\lambda) = c_1(1 - e^{-c_2\lambda}) - c_3\lambda$	Parámetros según la calzada.
Rueda	$J \cdot \dot{\omega} = F_x \cdot r - T_{freno}$	$F_x = \mu \cdot N$.
Reparto regenerativo	$F_{hidr} = F_{total} - \min(F_{total}, F_{regen,máx})$	Brake blending.

Ejemplo resuelto: frenado de emergencia desde 100 km/h

1. Cuarto de vehículo de 400 kg, rueda de 0,30 m, par de freno hasta 2500 N·m.
2. Sin ABS la rueda se bloquea y trabaja con μ = 0,76 (seco): 51,5 m.
3. Con ABS (λ entre 0,08 y 0,15) se aprovecha cerca del máximo de 1,17: 36,8 m.
4. En mojado: 76,5 m sin ABS y 50,9 m con ABS.

Además de acortar la distancia, el ABS conserva la dirección. Un frenado de 4 m/s² en un eléctrico de 1600 kg se reparte en 4,0 kN regenerativos y 2,4 kN hidráulicos (abs_cuarto_de_vehiculo.py).

Funciones de dinámica longitudinal

Función	Actúa sobre	Objetivo
ABS	Presión de freno por rueda	Evitar el bloqueo
GMA	Subida de presión asimétrica	Limitar la guiñada en μ partido
Brake blending	Motor eléctrico + hidráulica	Recuperar energía
TCS	Par motor + freno	Evitar el patinamiento
EDS	Freno de una rueda	Pasar par a la otra rueda

Código del capítulo

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

abs_cuarto_de_vehiculo.py — curvas μ–λ, simulación de frenado con y sin ABS y reparto regenerativo.

```
"""
abs_cuarto_de_vehiculo.py — Capítulo 09: curvas μ-deslizamiento (Burckhardt), frenado de un
cuarto de vehículo con y sin ABS y reparto de frenado regenerativo.
"""
import math

SUPERFICIES = {'asfalto seco': (1.2801, 23.99, 0.52), 'asfalto mojado': (0.857, 33.822, 0.347),
               'nieve': (0.1946, 94.129, 0.0646)}
M, J, R, G = 400.0, 1.2, 0.30, 9.81
```

```
def mu(lam, sup):
    c1, c2, c3 = SUPERFICIES[sup]
    return c1 * (1 - math.exp(-c2 * lam)) - c3 * lam


def optimo(sup):
    mejor = max(range(1, 1001), key=lambda k: mu(k / 1000, sup))
    return mejor / 1000, mu(mejor / 1000, sup)


def frenar(sup, abs_activo, v0=27.78, dt=1e-4):
    v, w, x, par = v0, v0 / R, 0.0, 0.0
    while v > 0.5:
        lam = max(0.0, (v - w * R) / v)
        if abs_activo:
            if lam > 0.15:
                par = max(0.0, par - 30000 * dt)       # baja la presión
            elif lam < 0.08:
                par = min(2500.0, par + 15000 * dt)   # sube la presión
        else:
            par = min(2500.0, par + 15000 * dt)
        fx = mu(lam, sup) * M * G
        v -= fx / M * dt
        w = max(0.0, w + (fx * R - par) / J * dt)
        x += v * dt
    return x


if __name__ == '__main__':
    for s in SUPERFICIES:
        lo, mo = optimo(s)
        print(f'{s:<15s}: μ máx {mo:.3f} con λ = {lo:.3f}; rueda bloqueada μ = {mu(1.0, s):.3f}')
    print('\nFrenado desde 100 km/h (cuarto de vehículo de 400 kg)')
    for s in ('asfalto seco', 'asfalto mojado'):
        print(f'  {s:<15s}: sin ABS {frenar(s, False):5.1f} m, con ABS {frenar(s, True):5.1f} m')

    pedido = 4.0                                       # m/s² pedidos por el conductor
    regen_max = 1600 * 2.5                             # N que admite el motor (≈ 2,5 m/s²)
    f_total = 1600 * pedido
    print(f'\nFrenado de 4 m/s²: regenerativo {min(f_total, regen_max) / 1000:.1f} kN,'
          f' hidráulico {max(0, f_total - regen_max) / 1000:.1f} kN')
```

Errores frecuentes

- Creer que el ABS siempre acorta la distancia: en grava suelta puede alargarla.
- Olvidar que la rueda bloqueada no genera fuerza lateral.
- Repartir el frenado regenerativo sin considerar el estado de carga de la batería.

Autoevaluación

1. ¿Qué deslizamiento da la máxima adherencia en asfalto seco según el modelo?
2. ¿Qué hace la GMA?
3. ¿Qué es el brake blending?

Respuestas. 1. $\lambda \approx 0{,}17$. **2.** Sube gradualmente la presión del lado de alta adherencia. **3.** El reparto entre freno regenerativo e hidráulico.