MANUAL DE ESTUDIO · MECATRÓNICA AUTOMOTRIZ

Inyección diésel common rail: bombas e inyectores

Capítulo 11 · En el video: **minuto 2:29:19** · Duración 14:32

Objetivo. Relacionar la presión del riel con la masa inyectada y explicar cómo se logran inyecciones múltiples.

Ideas clave

Desacoplar presión e inyección

En el common rail la bomba mantiene un riel a presión (hasta 2500–3000 bar) independiente del régimen; la ECU decide cuándo y cuánto inyecta cada inyector.

Sistema common rail — cursosmecatronica.com



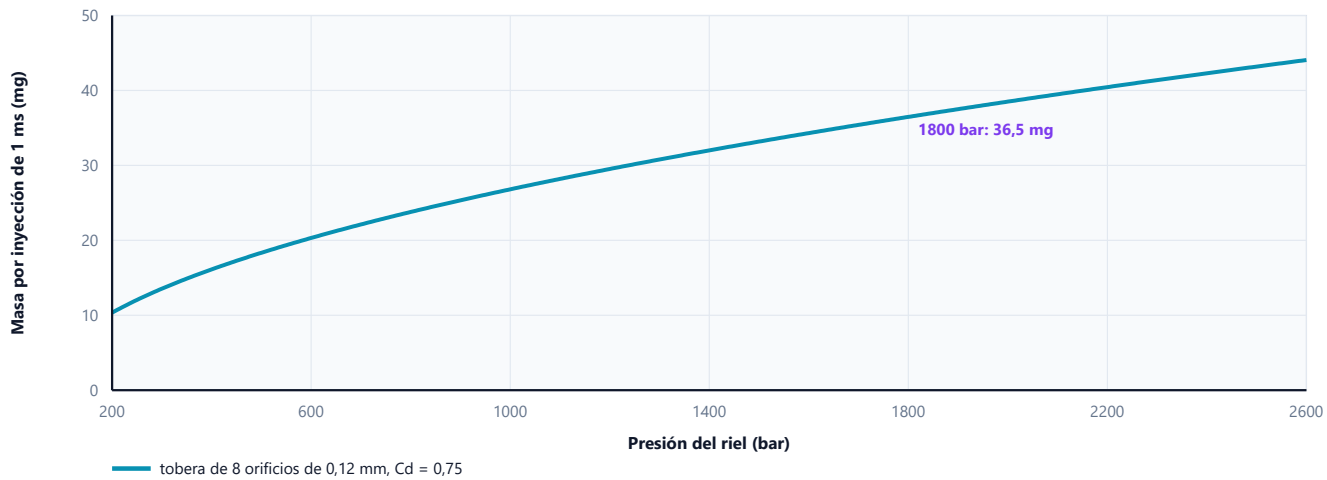
Generar la presión (bomba) y decidir la inyección (inyector) quedan desacoplados: la presión no depende del régimen.

Componentes del capítulo 11.

Presión y caudal

El riel es un acumulador: su presión sube con lo que entra y baja con lo que sale, según el módulo de compresibilidad del combustible. El caudal por la tobera crece con la raíz de la diferencia de presión.

Masa inyectada en 1 ms según la presión del riel — cursosmecatronica.com



El caudal crece con la raíz de la presión. Más presión atomiza mejor y permite inyectar lo mismo en menos tiempo.

Salida de riel_comun.py.

Inyección múltiple

La preinyección (1–2 mg) suaviza el ruido de combustión; la principal entrega el par; las postinyecciones queman hollín o calientan el catalizador y el filtro de partículas.

Bombas y riel

Generaciones CP1, CP3 y CP4 con dosificación en la entrada para no comprimir combustible que no se usa. El riel forjado lleva el sensor de presión (RDS) y una válvula reguladora. Una partícula de pocos micrómetros puede dañar un inyector: la limpieza es crítica.

Inyectores

En el de solenoide, una servoválvula descarga la cámara de control y la aguja sube por diferencia de presión. El piezoeléctrico mueve la servoválvula más rápido, con un acoplador hidráulico que amplifica la carrera; permite más inyecciones por ciclo y cantidades más pequeñas.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Presión del riel	$dp/dt = (E/V)\cdot(Q_{bomba} - Q_{iny} - Q_{fugas})$	E ≈ 1,6 GPa.
Caudal por la tobera	$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{(2\Delta p/\rho)}$	Bernoulli con pérdidas.
Masa inyectada	$m = \rho \cdot Q \cdot t_{iny}$	Aproximación de aguja abierta.
Energía del piezo	$E = ½ \cdot C \cdot V^2$	Por cada carga.

Ejemplo resuelto: cuánto inyecta 1 ms a 1800 bar

1. Tobera de 8 orificios de 0,12 mm, C_d = 0,75, diésel de 830 kg/m³, cámara a 60 bar.
2. $Q = 0{,}75 \cdot 9{,}05 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{(2 \cdot 1{,}74 \cdot 10^{8}/830)} = 43{,}9\ cm^3/s$.
3. En 1 ms: 36,5 mg. A 300 bar solo 13,5 mg.
4. Preinyección de 0,05 ms: 1,8 mg; principal de 0,65 ms: 23,7 mg.

Subir el riel de 800 a 1800 bar con la bomba a pleno toma unos 44 ms. Un piezo de 3 µF a 160 V gasta 38,4 mJ por carga (riel_comun.py).

Inyectores de common rail

	Solenoide	Piezoeléctrico
Accionamiento	Electroimán sobre servoválvula	Apilamiento piezo + acoplador hidráulico
Velocidad	Rápida	Muy rápida
Inyecciones por ciclo	Hasta 5	Hasta 8 o más
Electrónica	Corriente pico y mantención	Carga y descarga de un condensador a ~150 V

Código del capítulo

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

riel_comun.py — caudal y masa inyectada según presión, subida de presión del riel y energía del piezo.

```
"""
riel_comun.py — Capítulo 11: dinámica de presión del riel, caudal por la tobera,
masa inyectada y carrera del actuador piezoeléctrico.
"""
import math

E_DIESEL = 1.6e9      # Pa, módulo de compresibilidad a alta presión
V_RIEL = 25e-6        # m³
RHO = 830.0           # kg/m³


def caudal_tobera(dp_pa, orificios=8, diametro_mm=0.12, cd=0.75):
    area = orificios * math.pi * (diametro_mm * 1e-3) ** 2 / 4
    return cd * area * math.sqrt(2 * dp_pa / RHO)


def masa_inyectada(p_riel_bar, t_ms, p_camara_bar=60):
    q = caudal_tobera((p_riel_bar - p_camara_bar) * 1e5)
    return RHO * q * t_ms * 1e-3 * 1e6              # mg


def subir_presion(p0_bar, p_obj_bar, q_bomba_cm3s=40.0, q_fugas_cm3s=4.0, dt=1e-4):
    p, t = p0_bar * 1e5, 0.0
    while p < p_obj_bar * 1e5:
        p += E_DIESEL / V_RIEL * (q_bomba_cm3s - q_fugas_cm3s) * 1e-6 * dt
        t += dt
    return t


if __name__ == '__main__':
    for p in (300, 1000, 1800, 2500):
        print(f'Riel {p:4d} bar: caudal {caudal_tobera((p - 60) * 1e5) * 1e6:5.1f} cm³/s,'
              f' 1 ms inyecta {masa_inyectada(p, 1.0):5.1f} mg')
    print(f'\nSubir de 800 a 1800 bar con la bomba a pleno: {1000 * subir_presion(800, 1800):.0f} ms')
    pre, principal = masa_inyectada(1800, 0.05), masa_inyectada(1800, 0.65)
    print(f'Preinyección 0,05 ms = {pre:.1f} mg; principal 0,65 ms = {principal:.1f} mg')
    c, v = 3.0e-6, 160.0
    e = 0.5 * c * v * v
    print(f'\nPiezo de 3 µF a 160 V: {1000 * e:.1f} mJ por carga; con 2 inyecciones por ciclo,'
          f' 4 cilindros y 3000 rpm (25 ciclos/s): {e * 2 * 4 * 25:.1f} W')
```

Errores frecuentes

- Abrir el circuito de alta presión con el motor recién detenido.
- Contaminar los inyectores al cambiar el filtro.
- Suponer que la masa inyectada es proporcional a la presión (es a su raíz).

Autoevaluación

1. ¿Qué separa el common rail?
2. ¿Para qué sirve la preinyección?
3. ¿Qué ventaja da el piezo?

Respuestas. 1. La generación de presión de la inyección. **2.** Para suavizar la combustión y bajar el ruido. **3.** Más rapidez y más inyecciones pequeñas por ciclo.