MANUAL DE ESTUDIO · SISTEMAS ROBÓTICOS

Actuadores, transmisiones armónicas y dimensionamiento

Capítulo 06 · En el video: **minuto 1:16:17** · Duración 15:01

Objetivo. Elegir el actuador y el reductor de una articulación y verificar el motor por par pico y par eficaz.

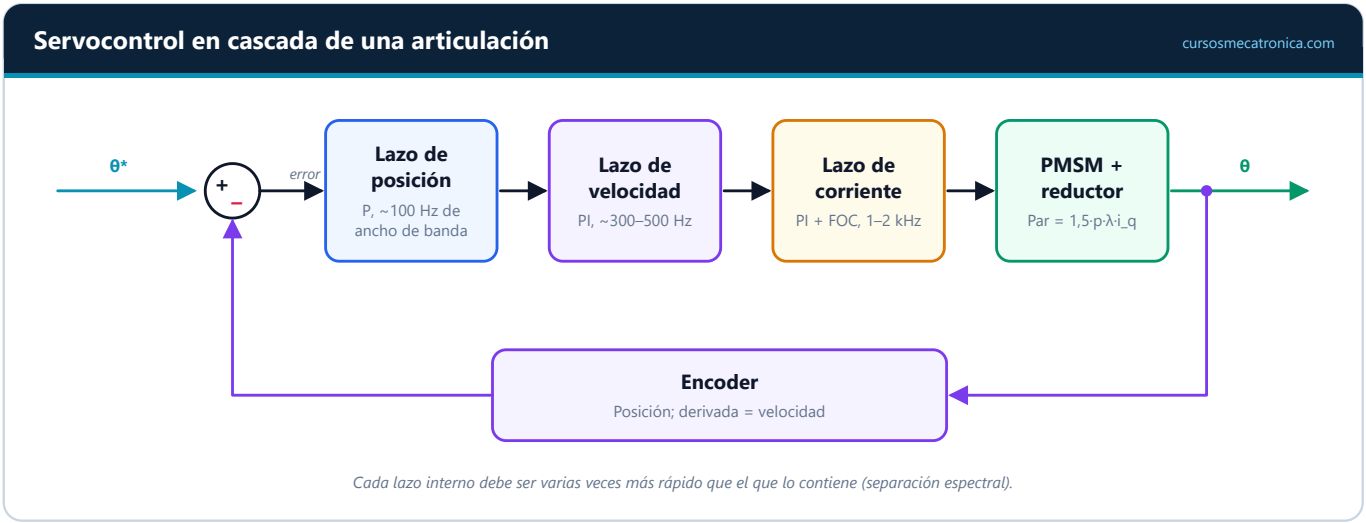
Ideas clave

Tres familias de actuadores

El servomotor eléctrico domina por precisión, limpieza y control; la neumática es barata y rápida en movimientos de todo o nada (garras); la hidráulica entrega la mayor fuerza por volumen en robots pesados.

PMSM y control de campo orientado

El servomotor síncrono de imanes de neodimio se controla con FOC: las transformadas de Clarke y Park pasan las corrientes de fase a un marco que gira con el rotor, donde i_q produce par y i_d se mantiene en cero.



Lazos de corriente, velocidad y posición.

Reductores sin juego

El reductor armónico deforma una corona flexible con un generador elíptico: con 200 dientes contra 202 logra 100:1 en una etapa y sin holgura. El cicloidal (RV) es más rígido y soporta choques: va en las primeras articulaciones de robots grandes.

Inercia reflejada

A través de una reducción i, la inercia de la carga se ve en el motor dividida por i^2. La relación que reparte la inercia por igual es $i_{ópt} = \sqrt{(J_{carga}/J_{motor})}$.

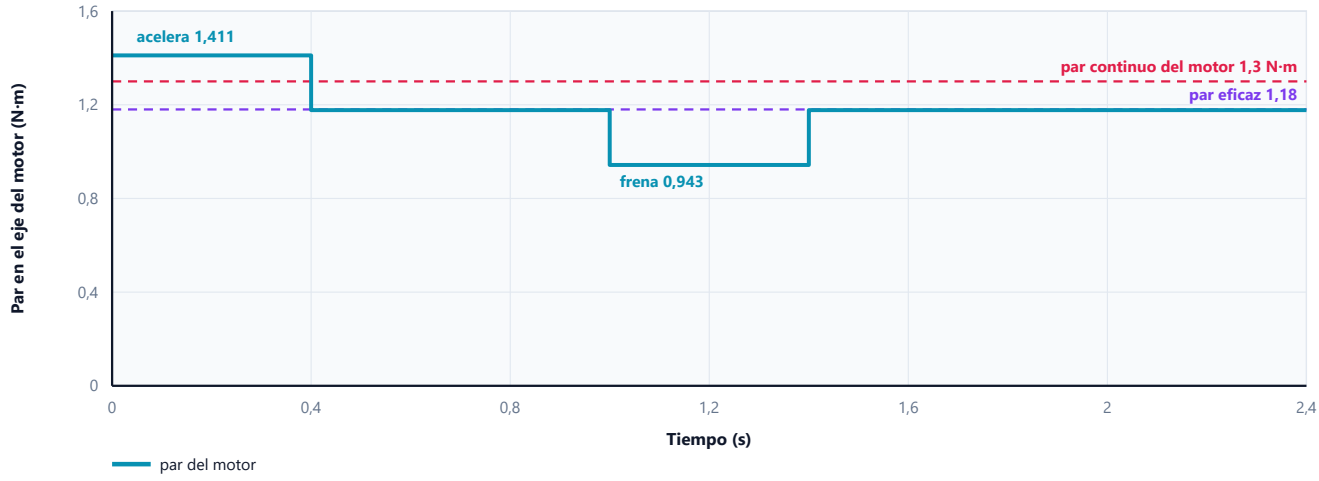
Actuación colaborativa

Los actuadores cuasi directos (reducción baja) y los elásticos en serie (SEA) permiten medir y limitar la fuerza de contacto.

Par pico y par eficaz

El pico debe caber en el par máximo del motor; el calentamiento depende del par eficaz $T_{RMS} = \sqrt{(\Sigma T_k^2 \cdot t_k / \Sigma t_k)}$, que debe quedar bajo el par continuo.

Par del motor del hombro durante un ciclo de 2,4 s cursosmecatronica.com



El pico (1,41 N·m) está lejos del límite de 3,8 N·m, pero el par eficaz deja solo 9 % de margen térmico: la gravedad domina.

Salida de dimensionamiento_eje.py.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Par del PMSM	$T = 1{,}5 \cdot p \cdot \lambda_{PM} \cdot i_q$	p pares de polos.
Reductor armónico	$i = Z_{flex} / (Z_{circ} - Z_{flex})$	200/(202 − 200) = 100.
Par en el motor	$T_m = J_m \cdot \alpha \cdot i + (J_L \cdot \alpha + T_{grav})/(i \cdot \eta)$	α: aceleración de la articulación.
Par eficaz	$T_{RMS} = \sqrt{(\Sigma T_k^2 \cdot t_k / \Sigma t_k)}$	Incluye las pausas.
Relación óptima	$i_{ópt} = \sqrt{(J_L/J_m)}$	Igual inercia a ambos lados.

Ejemplo resuelto: el motor del hombro

1. Pieza de 10 kg a 0,6 m y brazo de 12 kg (barra de 0,6 m): $T_{grav} = 9{,}81 \cdot (6 + 3{,}6) = 94{,}2$ N·m.
2. Inercia: 10·0,36 + 12·0,36/3 = 5,04 kg·m²; reductor 100:1 con η = 0,8; $J_m = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ kg·m².
3. Acelerando a 3 rad/s²: $T_m = 0{,}045 + (15{,}12 + 94{,}2)/80 = 1{,}41$ N·m.
4. Ciclo de 2,4 s (acelera, crucero, frena, sostiene): T_{RMS} = 1,18 N·m.

Pico 1,41 N·m contra 3,8 N·m disponibles; par eficaz 1,18 N·m contra 1,3 N·m continuos (9 % de margen). Lo limita la gravedad, no la aceleración: un contrapeso o un resorte compensador ayudaría (dimensionamiento_eje.py).

Actuadores para robótica

	Eléctrico	Neumático	Hidráulico
Densidad de potencia	Media	Baja	Muy alta
Control de posición	Excelente	Difícil (aire compresible)	Bueno
Ancho de banda	Alto	Bajo	Alto
Mantención	Baja	Media (aire seco)	Alta (fugas, filtros)

Código del capítulo

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

dimensionamiento_eje.py — reductor armónico, par gravitacional, inercia reflejada, par pico y par eficaz de un eje.

```
"""
dimensionamiento_eje.py — Capítulo 06: par pico, par eficaz (RMS) y relación de reducción
del eje de hombro de un robot con reductor armónico.
"""
import math

G = 9.81
# Carga: pieza de 10 kg a 0,6 m y brazo de 12 kg (barra uniforme de 0,6 m)
M_PIEZA, R_PIEZA = 10.0, 0.60
M_BRAZO, L_BRAZO = 12.0, 0.60
J_MOTOR = 1.5e-4          # kg·m²
I_RED, ETA = 100, 0.80    # reductor armónico 100:1
ALFA = 3.0                # rad/s² en la articulación
T_CONT, T_PICO = 1.3, 3.8 # N·m del servomotor (catálogo)


def armonico(z_flex, z_circular):
    """Relación con la corona circular fija: i = Z_flex / (Z_circ − Z_flex)."""
    return z_flex / (z_circular - z_flex)


def par_motor(alfa_carga, t_grav, j_carga):
    alfa_motor = alfa_carga * I_RED
    return J_MOTOR * alfa_motor + (j_carga * alfa_carga + t_grav) / (I_RED * ETA)


if __name__ == '__main__':
    print(f'Reductor armónico 200/202 dientes: i = {armonico(200, 202):.0f}:1')

    t_grav = G * (M_PIEZA * R_PIEZA + M_BRAZO * L_BRAZO / 2)
    j_carga = M_PIEZA * R_PIEZA ** 2 + M_BRAZO * L_BRAZO ** 2 / 3
    print(f'Par gravitacional (brazo horizontal): {t_grav:.1f} N·m')
    print(f'Inercia de la carga: {j_carga:.2f} kg·m²  -> reflejada {j_carga / I_RED ** 2 * 1e4:.2f}e-4 kg·m²')
    print(f'Relación óptima sqrt(J_carga/J_motor) = {math.sqrt(j_carga / J_MOTOR):.0f}:1')

    tramos = [  # nombre, duración s, aceleración de la carga rad/s²
        ('acelera', 0.4, +ALFA), ('velocidad cte', 0.6, 0.0),
        ('frena', 0.4, -ALFA), ('sostiene', 1.0, 0.0)]
    suma, total = 0.0, 0.0
    print('\nTramo          t (s)   par motor (N·m)')
    for nombre, t, a in tramos:
        tm = par_motor(a, t_grav, j_carga)
        suma += tm ** 2 * t
        total += t
        print(f'  {nombre:<13s} {t:4.1f}    {tm:6.3f}')
    t_rms = math.sqrt(suma / total)
```

```
    t_max = par_motor(ALFA, t_grav, j_carga)
    print(f'\nPar pico {t_max:.2f} N·m (límite {T_PICO}) -> {"OK" if t_max <= T_PICO else "EXCEDE"}')
    print(f'Par eficaz {t_rms:.2f} N·m (continuo {T_CONT}) -> margen {100 * (1 - t_rms / T_CONT):.0f} %')
```

Errores frecuentes

- Dimensionar solo por el par pico y quemar el motor por calentamiento.
- Olvidar dividir la inercia de la carga por i^2.
- No considerar el rendimiento del reductor.

Autoevaluación

1. ¿Qué corriente produce par en un PMSM con FOC?
2. ¿Qué relación da un armónico de 160 y 162 dientes?
3. ¿Qué limita el calentamiento del motor?

Respuestas. 1. i_q. **2.** 80:1. **3.** El par eficaz (RMS) del ciclo.