

Estructuras clásicas de control

CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE ROBOTS

Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica



Índice

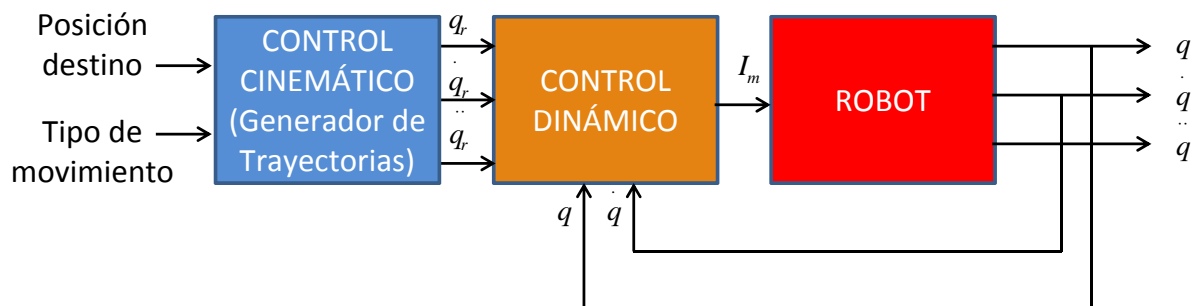
1. Introducción
2. Control monoarticular PD y PID
3. Control PD/PID con compensación de la gravedad
4. Control con precompensación dinámica
5. Control por par calculado (linealización por realimentación)
6. Conclusiones

Introducción

- **Control de movimiento de robots en función del criterio:**
 - **Control de posición:**
 - Solo importa la posición de destino, no la trayectoria hasta alcanzarlo.
 - La referencia para el control articular es: $q_r = cte, \dot{q}_r = 0, \ddot{q}_r = 0$
 - **Control de trayectoria continua:**
 - Importa la trayectoria a seguir hasta alcanzar la posición de destino.
 - Es necesario un generador de trayectorias.

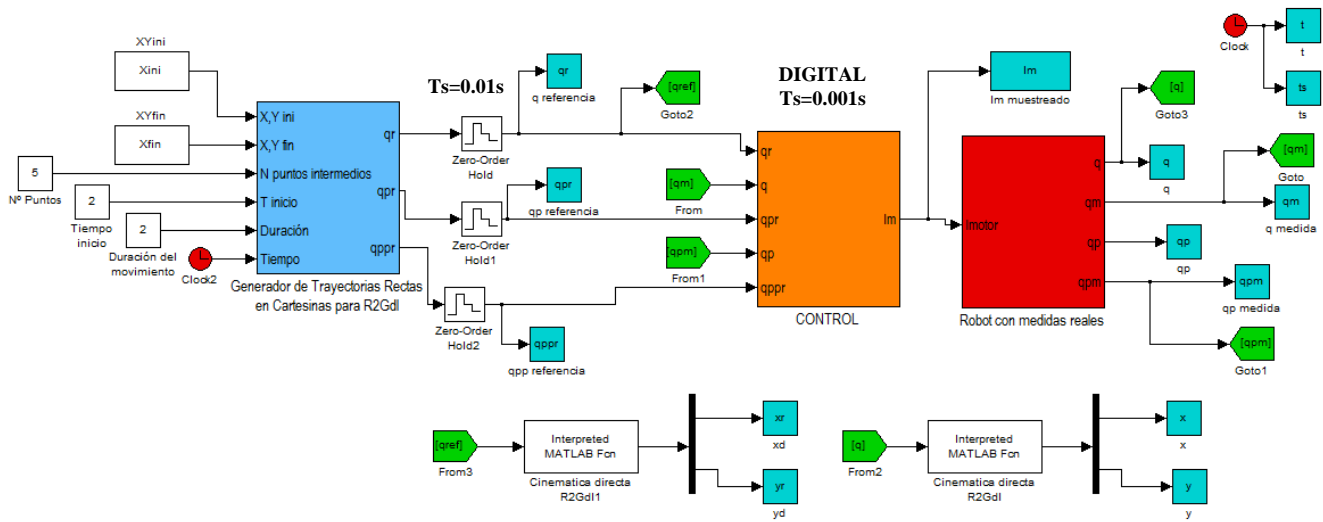
Introducción

- **Esquema general de control:**
 - **Simulación de comandos como MOVE, MOVEL, MOVES, ...**



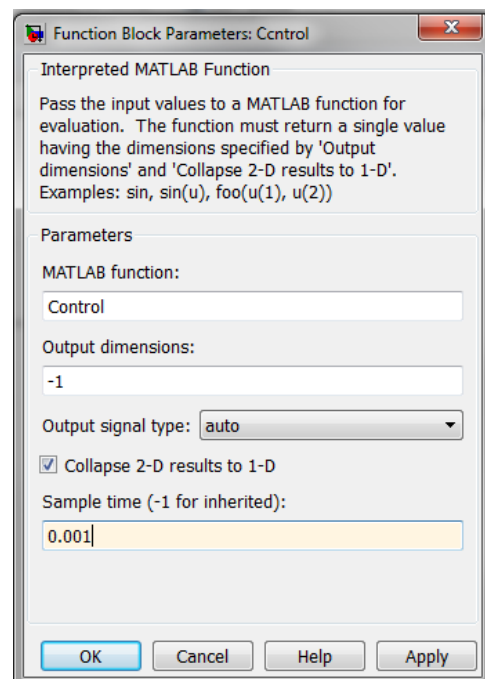
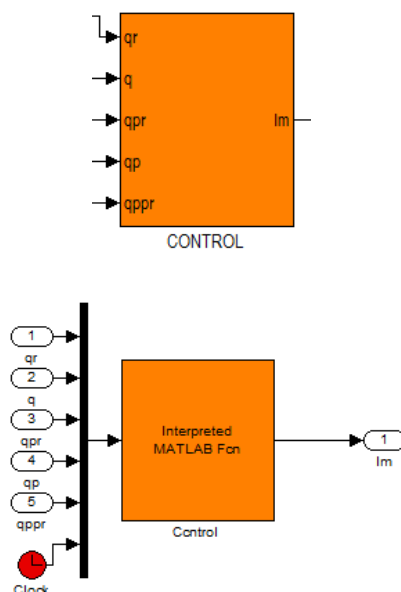
Introducción

◦ Implementación de controladores:



Introducción

◦ Control digital en archivo **Control.m** de Matlab ejecutado con $T_s=0.001s$



Introducción

- Control digital en archivo **Control.m** de Matlab ejecutado con $T_s=0.001s$

```
function senalcontrol = Control(in)

q1rk = in(1);           % Posiciones articulares de referencia
q2rk = in(2);           % Posiciones articulares de referencia
q1k  = in(3);           % Posiciones articulares
q2k  = in(4);           % Posiciones articulares
qp1rk = in(5);          % Velocidades articulares de referencia
qp2rk = in(6);          % Velocidades articulares de referencia
q1k  = in(7);           % Velocidades articulares
q2k  = in(8);           % Velocidades articulares
qpp1rk = in(9);         % Aceleraciones articulares de referencia
qpp2rk = in(10);        % Aceleraciones articulares de referencia
t      = in(11);         % Tiempo

persistent Im1k_1 Im2k_1 e1k_1 e2k_1;
Ts=1e-3;

% Inicialización de variables (en caso necesario)
if (t<1e-8) e1k_1=0; e2k_1=0; end;

% Cálculo de errores
e1k=q1rk-q1k;
e2k=q2rk-q2k;
.....

senalcontrol= [Im1k Im2k];
```

Control monoarticular PD/PID

- Hipótesis de diseño:
 - La **señal de control** para el actuador de **cada articulación** se calcula solo en función de **valores** (errores, referencias, ...) de **dicha articulación**.
 - Para el diseño del controlador se supone que el **sistema está desacoplado** (matriz dinámica diagonal) **y linealizado**, considerando los **términos gravitatorios como perturbaciones** mantenidas.

$$\begin{aligned} \text{Modelo del sistema: } I_m &= \hat{M}_A(q)\ddot{q} + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q) \\ \hat{M}_A(q) &= (K_t R)^{-1} (\hat{M}(q) + \hat{J}_m R^2) \\ \hat{C}_A(q, \dot{q}) &= (K_t R)^{-1} (\hat{C}(q, \dot{q}) + \hat{B}_m R^2) \\ \hat{G}_A(q) &= (K_t R)^{-1} \hat{G}(q) \end{aligned}$$

Hipótesis para diseño:

**Términos gravitatorios
e interacciones**



Control monoarticular PD/PID

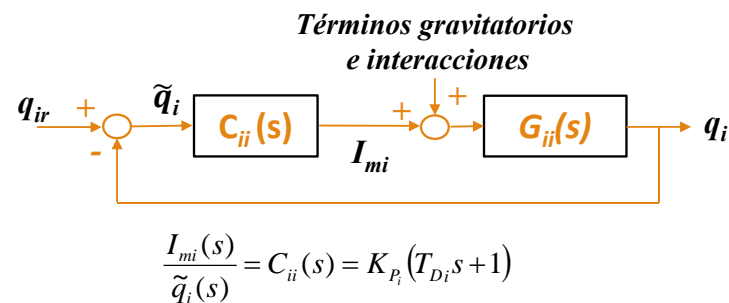
◦ Diseño de PD:

- Utilizar lugar de las raíces, con y sin cancelación de dinámica.

Modelo del sistema: $I_m = \hat{M}_A(q)\ddot{q} + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

Control: $I_m(t) = K_P \tilde{q}(t) + K_D \dot{\tilde{q}}(t) = K_P (\tilde{q}(t) + T_D \dot{\tilde{q}}(t))$

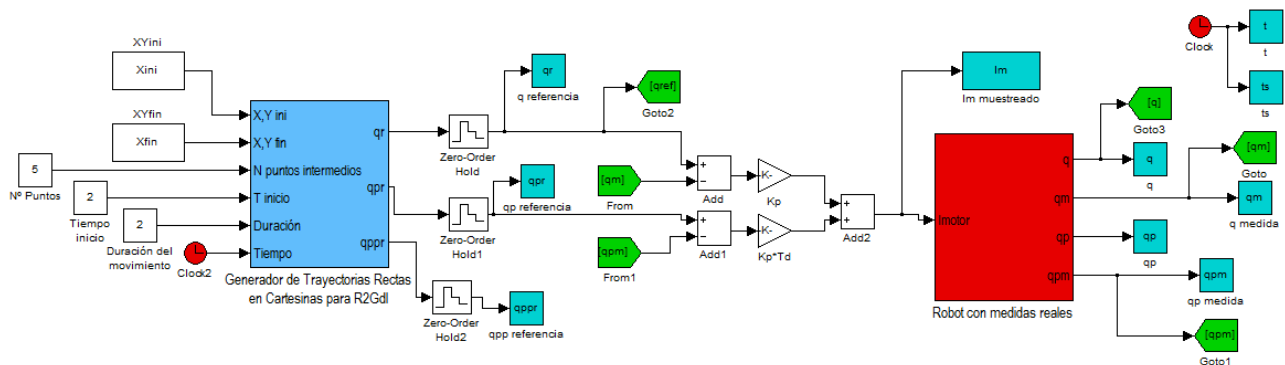
$$\tilde{q}(t) = q_r(t) - q(t) \quad K_P = \text{diag}(K_{P1}, \dots, K_{Pn}), \quad K_D = \text{diag}(K_{D1}, \dots, K_{Dn})$$



Control monoarticular PD/PID

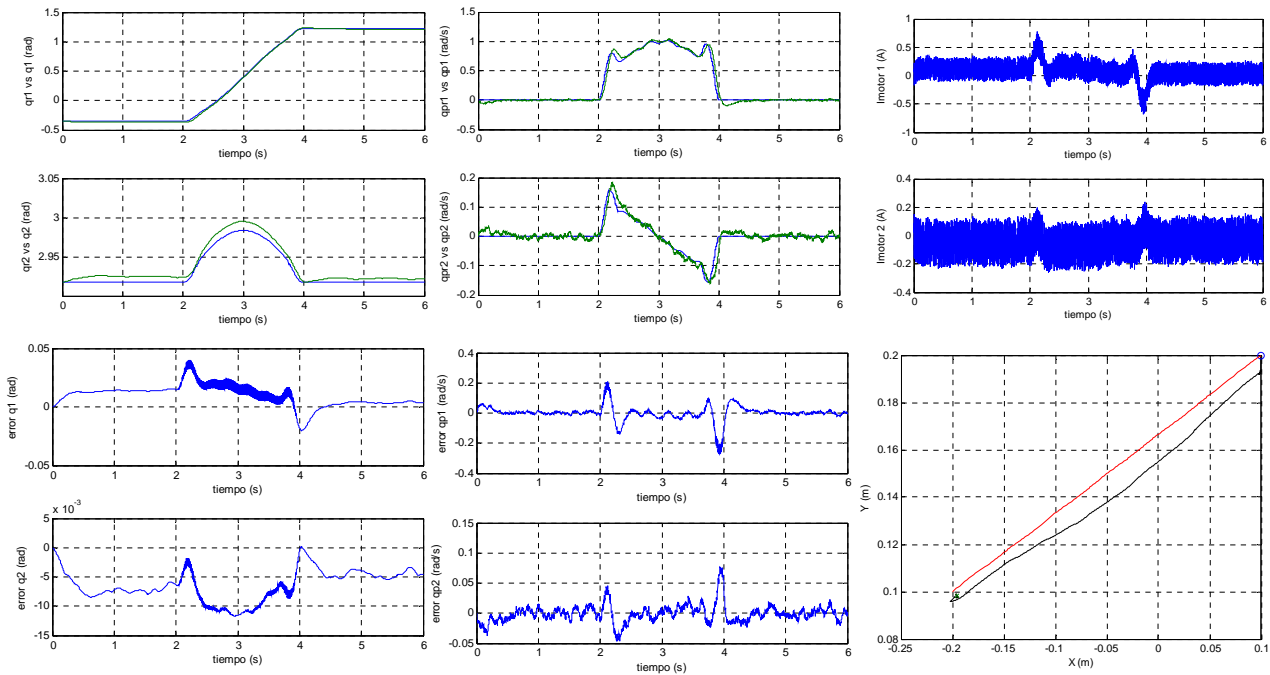
◦ Diseño de PD:

- Esquema de implementación:



Control monoarticular PD/PID

◦ PD sin cancelación: Resultados R=25



Control monoarticular PD/PID

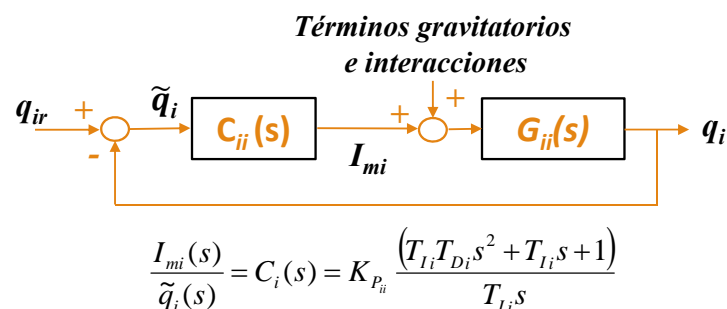
◦ Diseño de PID:

- Utilizar lugar de las raíces, con y sin cancelación de dinámica (posibilidad de utilizar raíz triple).

Modelo del sistema: $I_m = \hat{M}_A(q)\ddot{q} + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

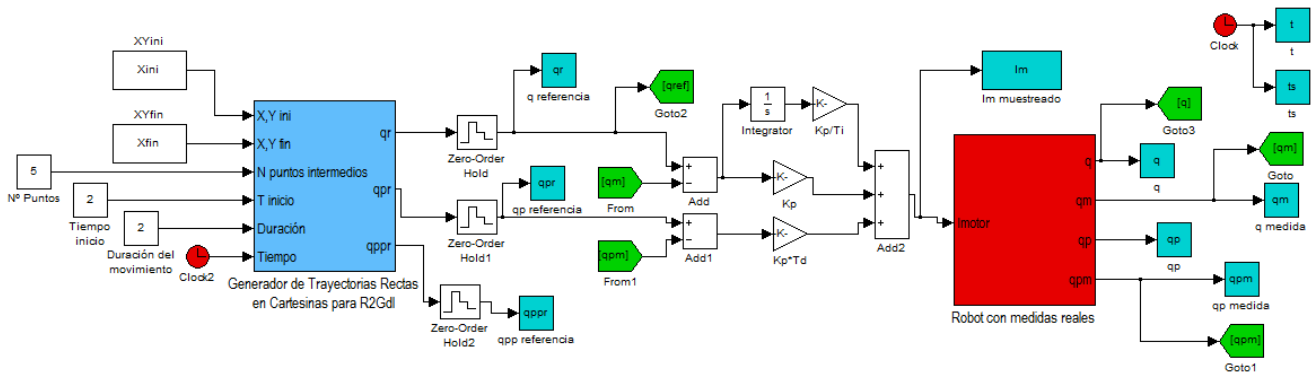
Control: $I_m(t) = K_p \tilde{q}(t) + K_D \dot{\tilde{q}}(t) + K_I \int_0^t \tilde{q}(\tau) d\tau = K_p \left(\tilde{q} + T_D \dot{\tilde{q}} + T_I^{-1} \int_0^t \tilde{q}(\tau) d\tau \right)$

$$\tilde{q}(t) = q_r(t) - q(t) \quad K_p = \text{diag}(K_{p1}, \dots, K_{pn}), \quad K_D = \text{diag}(K_{D1}, \dots, K_{Dn}), \quad K_I = \text{diag}(K_{I1}, \dots, K_{In})$$



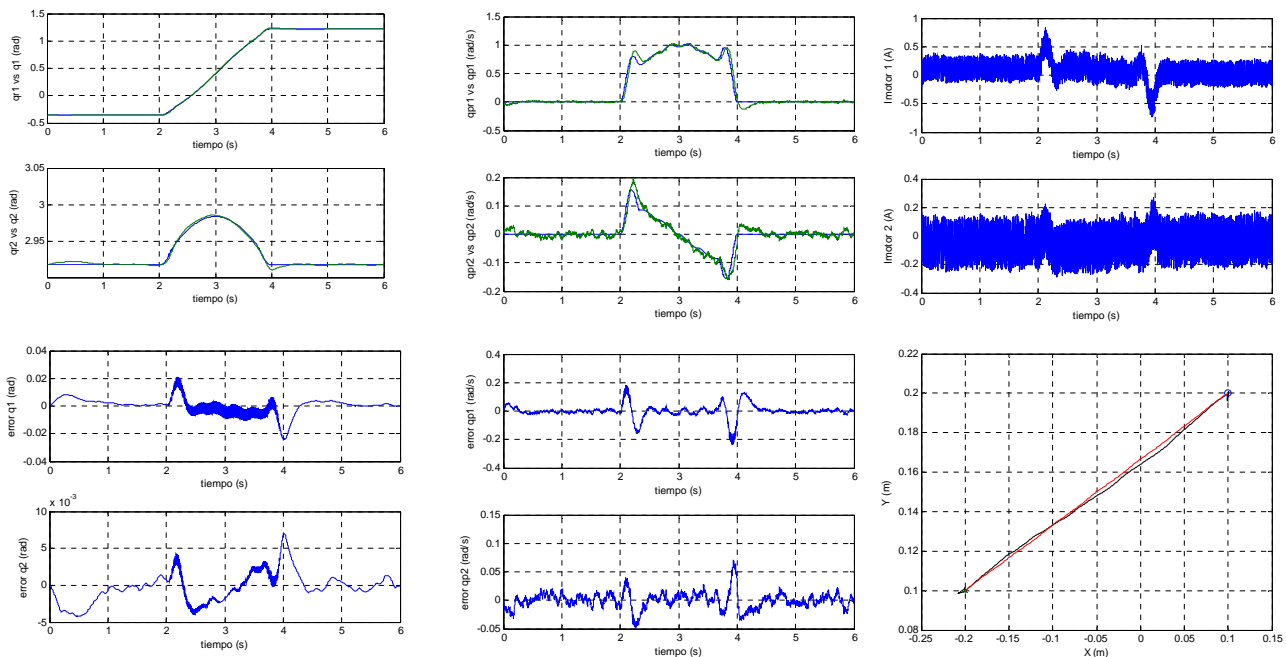
Control monoarticular PD/PID

- Diseño de PID:
 - Esquema de implementación:



Control monoarticular PD/PID

- PID sin cancelación: Resultados R=25



Control PD/PID con compensación de la gravedad

- Se pretende compensar la gravedad para atenuar las perturbaciones.
- Es necesario un modelo (parcial) del robot.
- Diseño de PD/PID como en apartados anteriores.

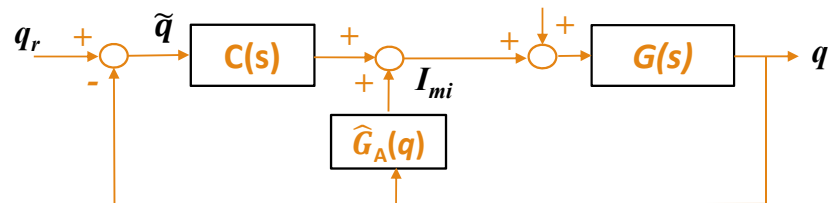
Modelo del sistema: $I_m = \hat{M}_A(q)\ddot{q} + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

Control: $I_m = K_p \tilde{q} + K_D \dot{\tilde{q}} + \hat{G}_A(q)$

$G(s) = \text{diag}(G_{11}(s), \dots, G_{nn}(s))$

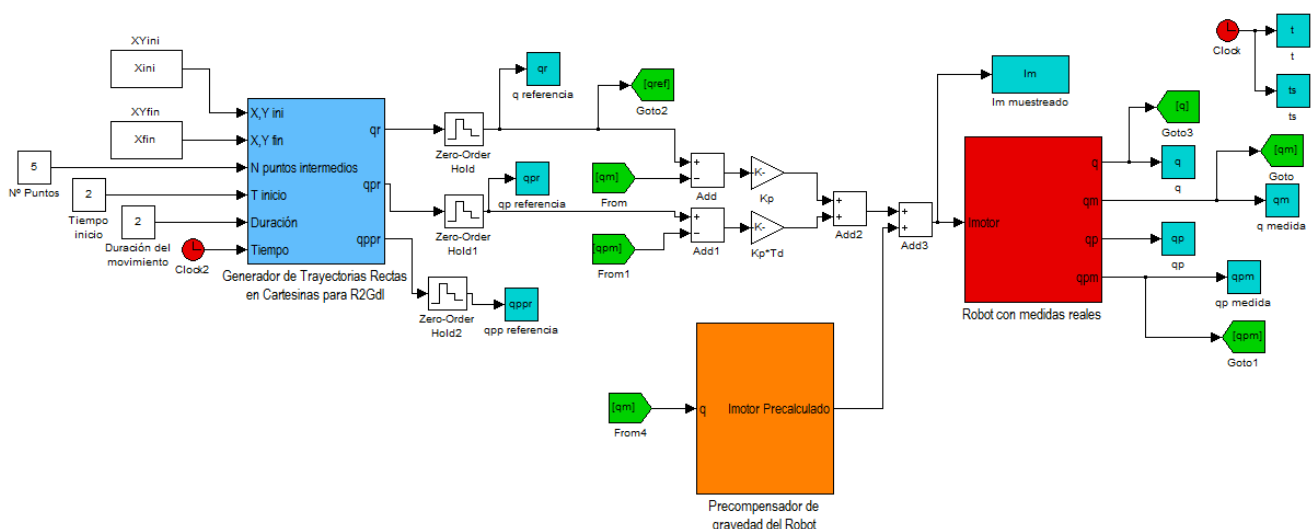
$C(s) = \text{diag}(C_{11}(s), \dots, C_{nn}(s))$

*Interacciones y
efectos gravitatorios
no compensados*



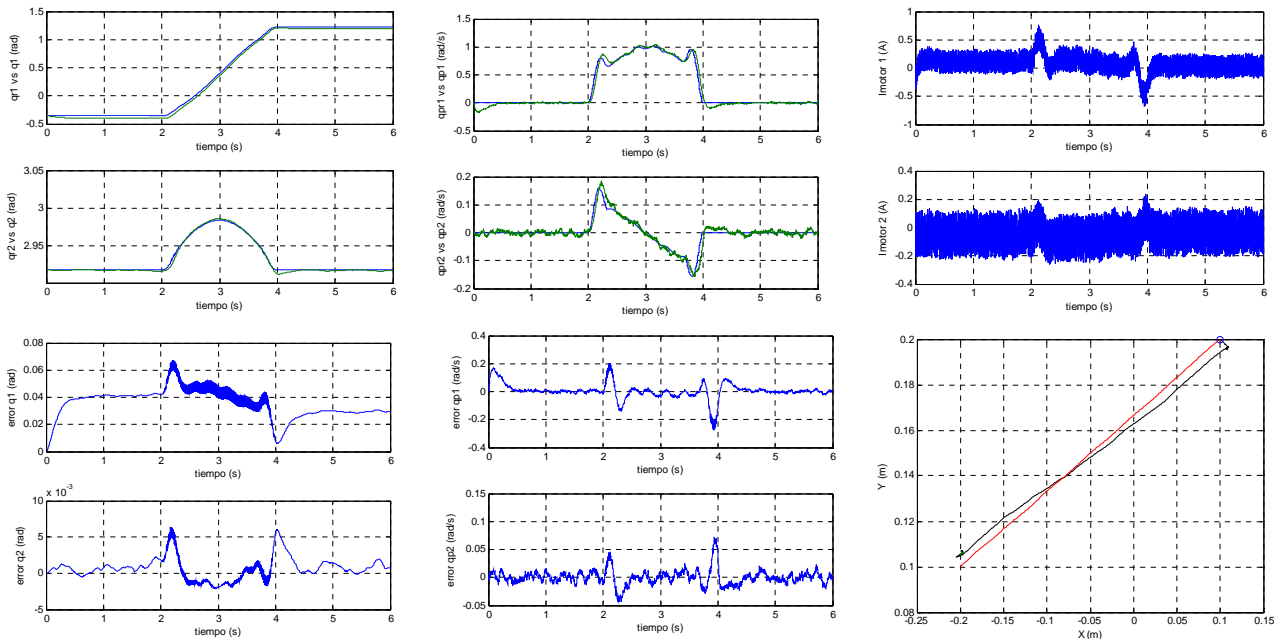
Control PD/PID con compensación de la gravedad

- Esquema de implementación con PD:



Control PD/PID con compensación de la gravedad

◦ Con PD sin cancelación: Resultados R=25



Control PD/PID con compensación de la gravedad con referencia

- La misma filosofía anterior, pero **utilizando las referencias** en lugar de las medidas para calcular la compensación de gravedad.
- **Ventajas:** sin ruidos, se puede calcular fuera de línea
- **Inconvenientes:** puede empeorar el comportamiento si el control no es suficientemente bueno.

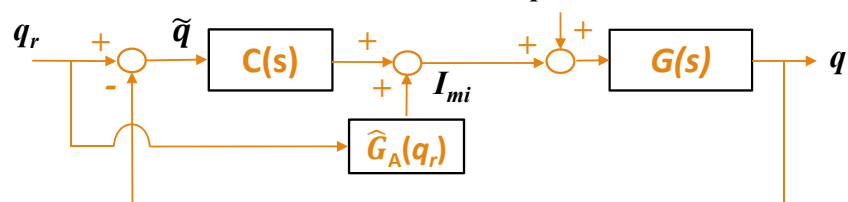
Modelo del sistema: $I_m = \hat{M}_A(q)\ddot{q} + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

Control: $I_m = K_P \tilde{q} + K_D \dot{\tilde{q}} + \hat{G}_A(q_r)$

$G(s) = \text{diag}(G_{11}(s), \dots, G_{nn}(s))$

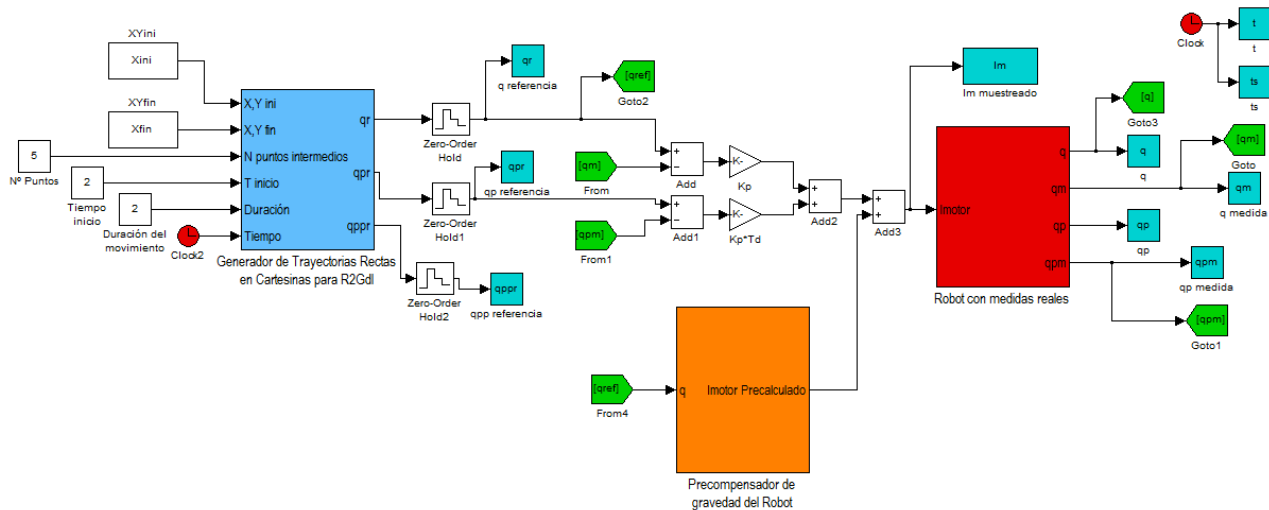
$C(s) = \text{diag}(C_{11}(s), \dots, C_{nn}(s))$

Interacciones y efectos gravitatorios no compensados



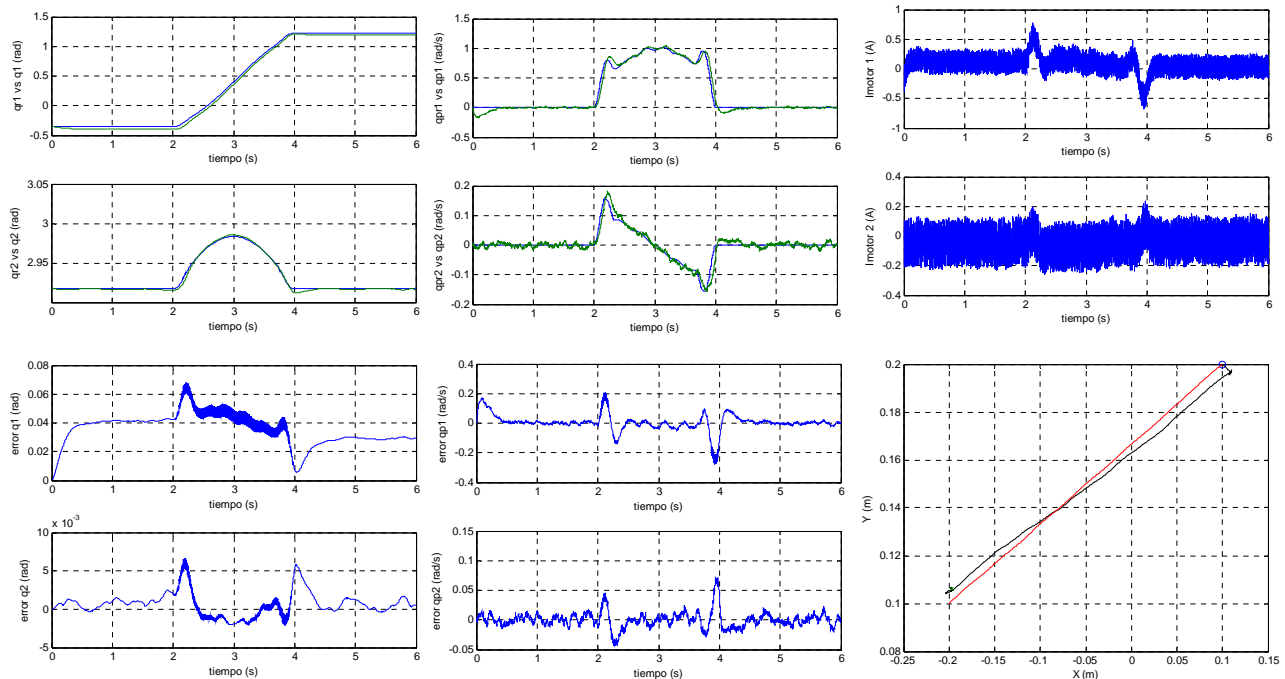
Control PD/PID con compensación de la gravedad con referencia

◦ Esquema de implementación con PD:



Control PD/PID con compensación de la gravedad con referencia

◦ Con PD sin cancelación: Resultados R=25



Control con precompensación dinámica

- Control Feedforward+PD/PID
- Se pretende precompensar los efectos del modelo dinámico completo del robot (no solo la gravedad).
- Es necesario un modelo completo del robot.
- Diseño de PD/PID como control externo para bucle interno resultante.

Modelo del sistema: $I_m = \hat{M}_A(q)\ddot{q} + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

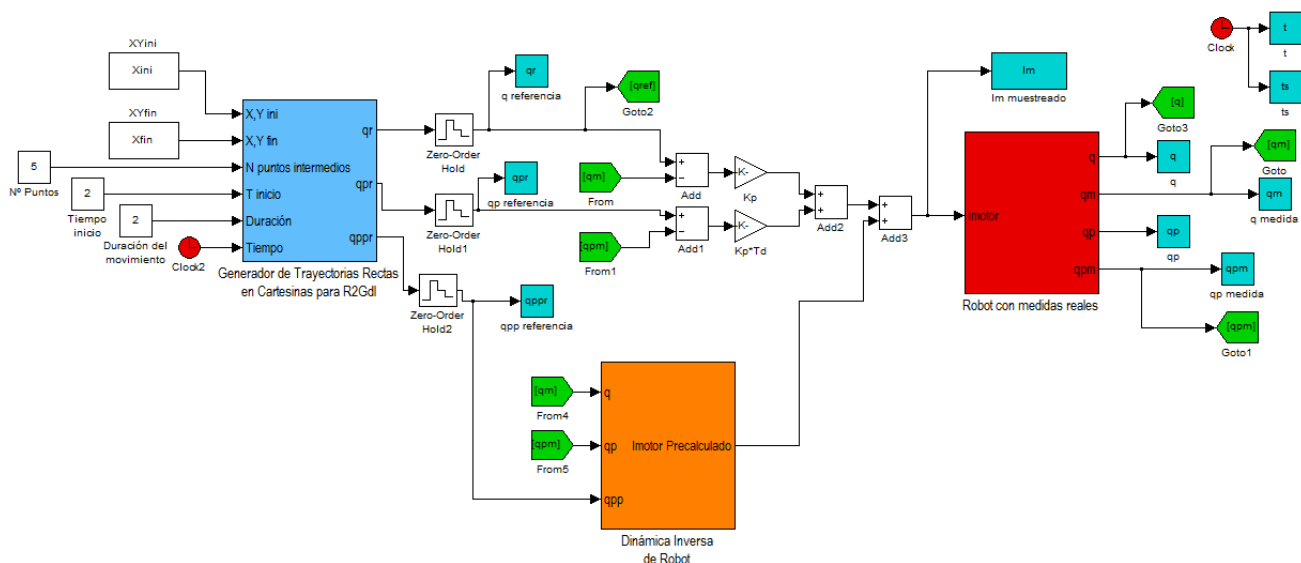
Control: $I_m = \hat{M}_A(q)\ddot{q}_r + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q) + u$

Bucle cerrado interno: $\hat{M}_A(q)\ddot{\tilde{q}} = u$ (Dinámica del error)

Control de bucle interno: $u = K_p\tilde{q} + K_d\dot{\tilde{q}}$ (Diseño de PD/PID para linealización de $\hat{M}_A(q)\ddot{\tilde{q}}=u$)

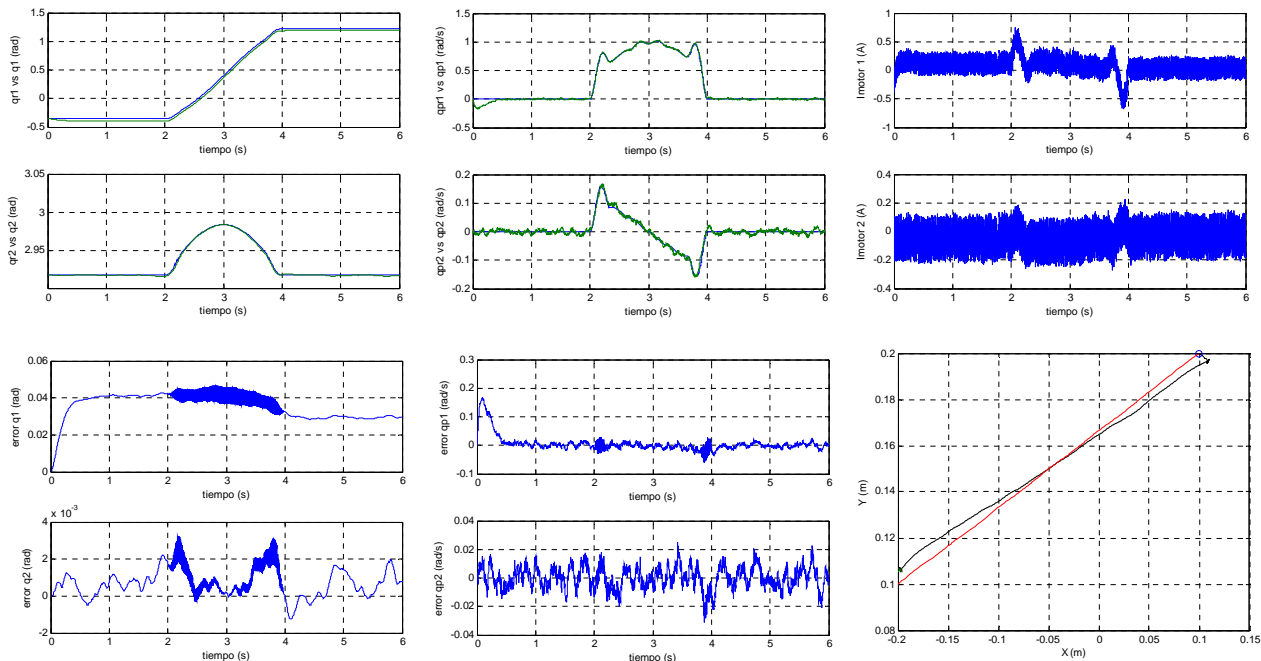
Control con precompensación dinámica

- Esquema de implementación con PD:



Control con precompensación dinámica

◦ Con PD sin cancelación: Resultados R=25



Control con precompensación dinámica con referencia

- La misma filosofía anterior, pero **utilizando las referencias** en lugar de las medidas para calcular la compensación de gravedad.
- **Ventajas:** sin ruidos, se puede calcular fuera de línea
- **Inconvenientes:** puede empeorar el comportamiento si el control no es suficientemente bueno.

Modelo del sistema: $I_m = \hat{M}_A(q)\ddot{q} + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

Control: $I_m = \hat{M}_A(q_r)\ddot{q}_r + \hat{C}_A(q_r, \dot{q}_r)\dot{q}_r + \hat{G}_A(q_r) + u$

Bucle cerrado interno: $\hat{M}_A(q)\ddot{\tilde{q}} \approx u$ (Dinámica teórica del error)

Control de bucle interno: $u = K_p\tilde{q} + K_D\dot{\tilde{q}}$

(Diseño de PD/PID para linealización de $\hat{M}_A(q)\ddot{\tilde{q}} \approx u$)

Control con par calculado

- Se pretende realizar una **linealización por realimentación**.
- El objetivo es desacoplar totalmente las interacciones del robot, resultando en **dobles integradores desacoplados** para cada articulación.
- Es necesario un modelo completo del robot.
- Diseño de PD/PID como control externo para el doble integrador del bucle interno resultante.

Modelo del sistema: $I_m = \hat{M}_A(q)\ddot{q} + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

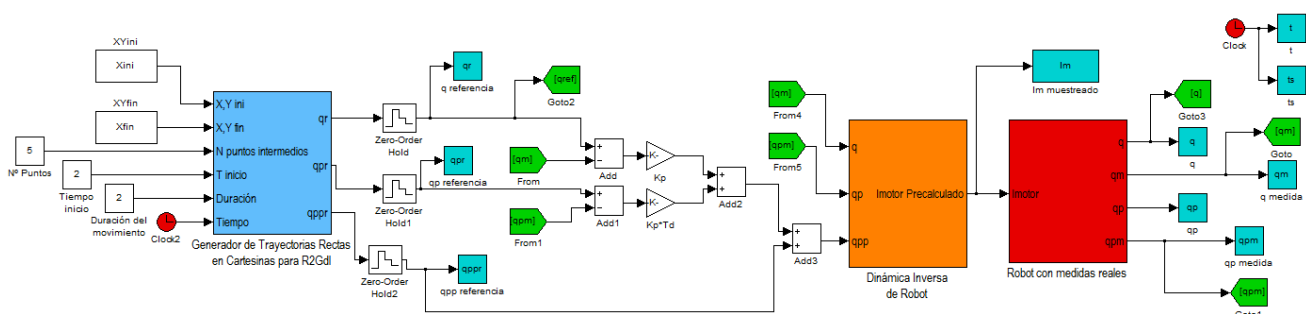
Control: $I_m = \hat{M}_A(q)(\ddot{q}_r + u) + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

Bucle cerrado interno: $\ddot{q} = u$ (Dinámica del error: **DOBLE INTEGRADOR DESACOPLADO**)

Control de bucle interno: $u = K_p \tilde{q} + K_D \dot{\tilde{q}}$ (Diseño de **PD/PID** para $\ddot{q}=u$)

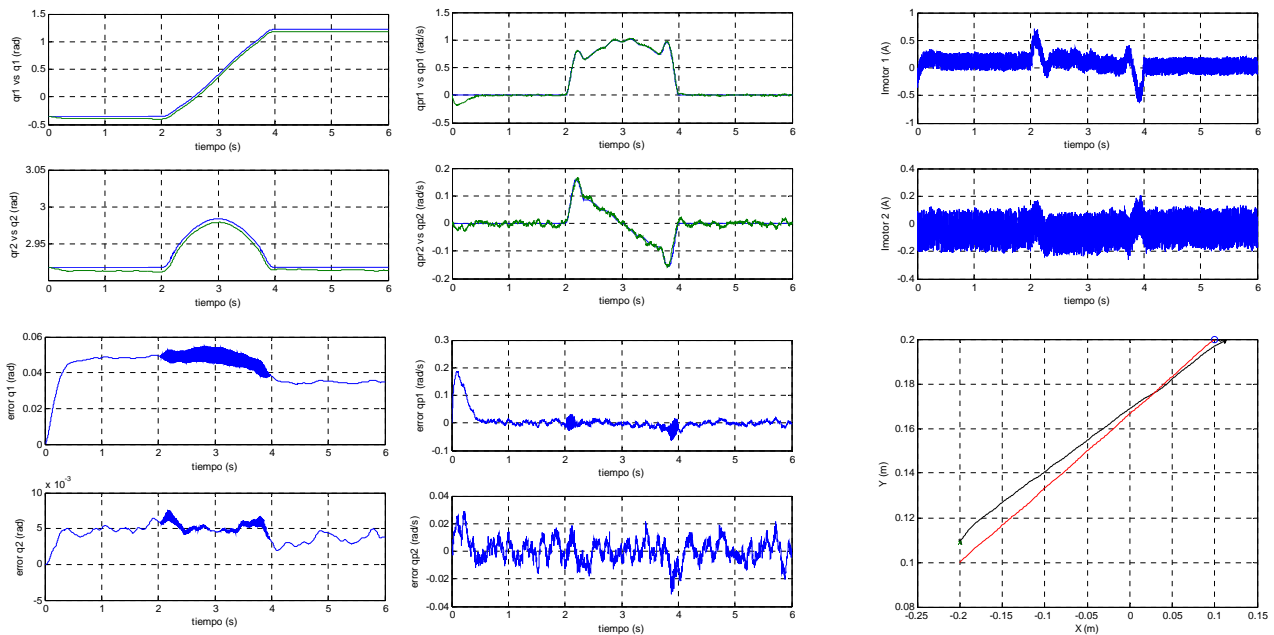
Control por par calculado

- Esquema de implementación con PD:



Control por par calculado

◦ Con PD sin cancelación: Resultados R=25



Conclusiones

- Respecto a las distintas estrategias de control
- Respecto a distintas trayectorias
 - Velocidad
 - ...
- Respecto al factor de reducción
- Respecto a implementación física
- Respecto a incertidumbres del modelo
- ...