



## FACULTAD DE INGENIERÍA ROBOTICA II

**10mo. Semestre de la carrera  
Ingeniería en Mecatrónica**



# ROBOTICA II

## UNIDAD 3

### Control Monoarticular - Multiarticular

**Ing. Roberto HAARTH**

**Ingeniería en Mecatrónica**

**Facultad de Ingeniería. UNCuyo**

**Mendoza. ARGENTINA**



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Monoarticular y Multiarticular de Robots

### **Importante:**

*Se recomienda el uso de bibliografía recomendada en el Programa de la Asignatura para el estudio de los temas. Al final del material se transcribe la bibliografía recomendada.*

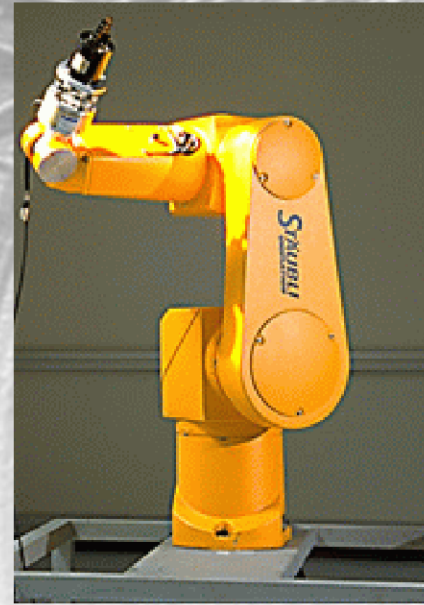




**ABB IRB2400 – (RAPID)  
RobotStudio**



**KUKA – (KRL)  
Kuka Sim Pro**



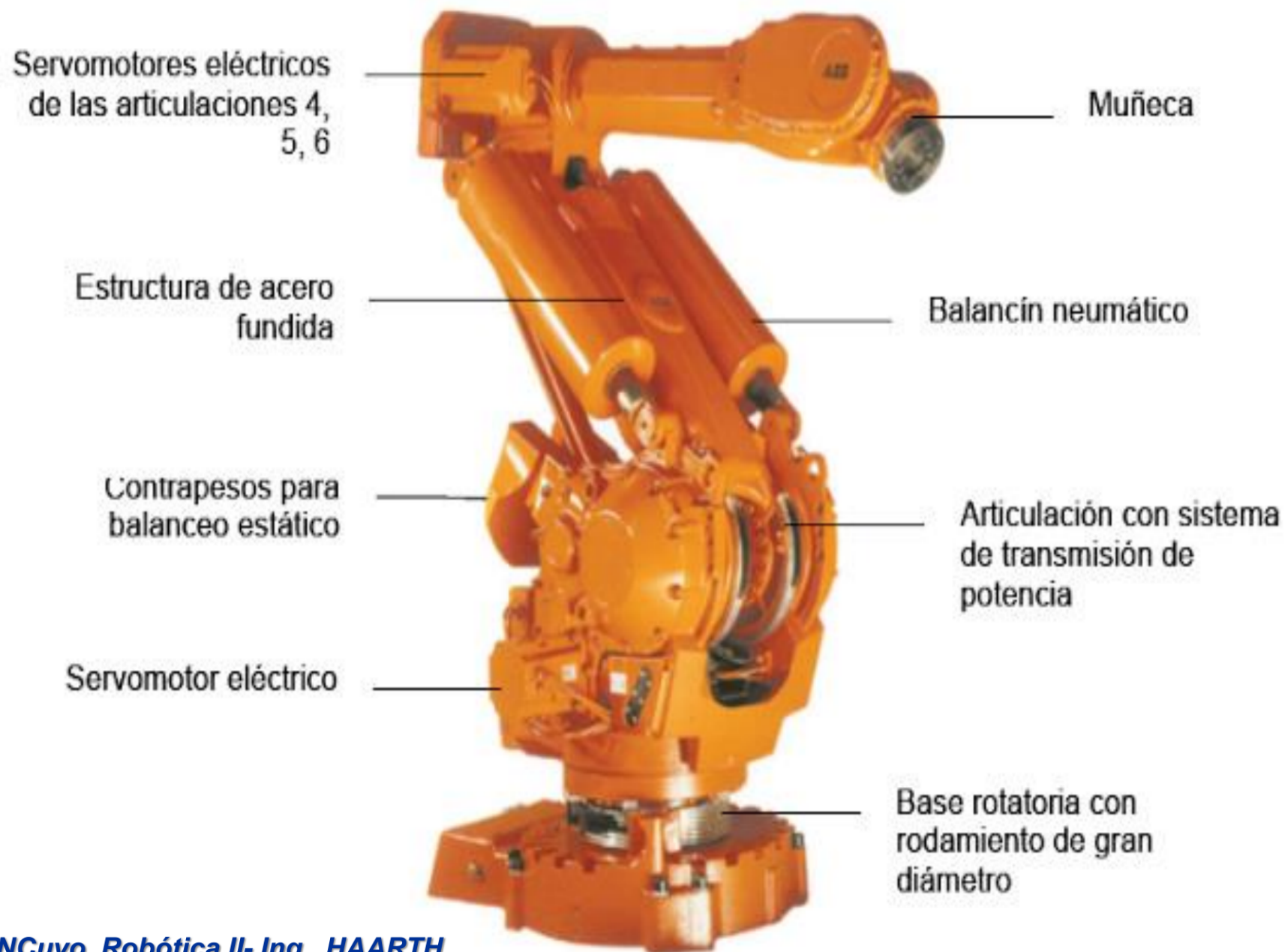
**STAUBLI – (V+)  
Staubli Robotics  
Suite**



**FANUC  
M900iB –(KAREL)  
Roboguide**

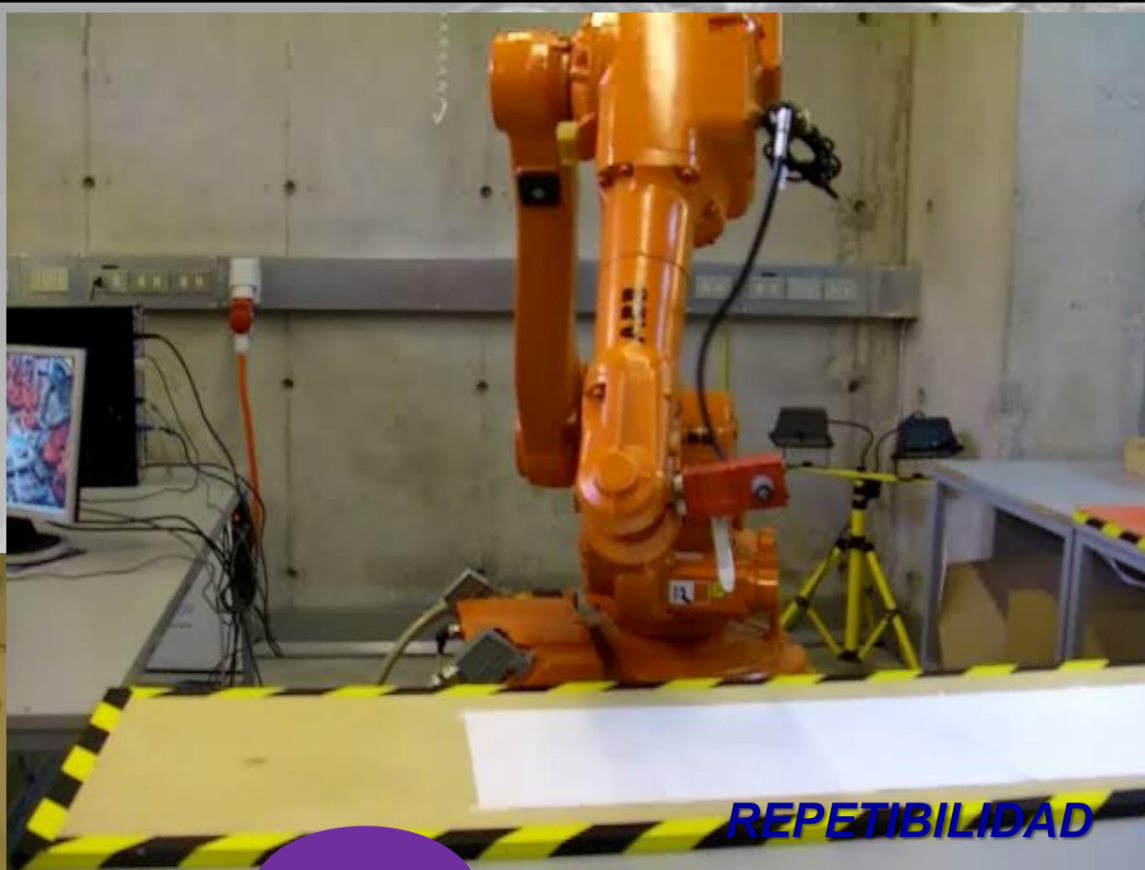
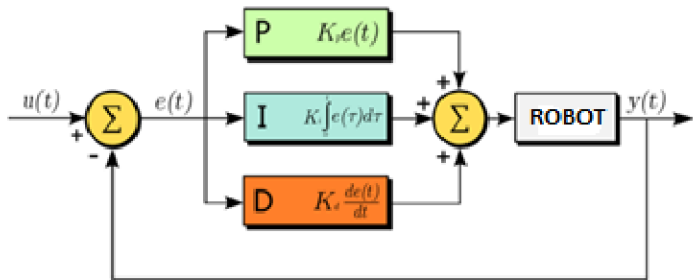






# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control de Robots



Video

**REPETIBILIDAD**

**SECUENCIA PROGRAMADA**





## Control Dinámico de Robots

### Planificación de trayectorias de robots

#### OBJETIVO

Determinar las trayectorias de robots que minimice algún parámetro funcional de costo de moverse entre dos configuraciones asignadas

- Evitando obstáculos presentes en el espacio de trabajo del robot,
- Evitando restricciones sobre la tarea a realizar (operar en contacto con la pieza)
- Aplicar una fuerza o moverse a una velocidad asignada durante una tarea.

#### FINALIDAD

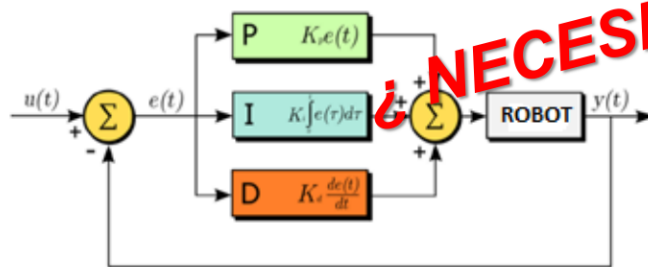
Reducir el tiempo de programación y operación de los robots para que Operen optimizando recursos

**Importante**



la energía consumida por el sistema.

un robot repite la operación indefinidamente



**NECESIDAD DE UN CONTROL ?**



## Clasificación según el tipo de control

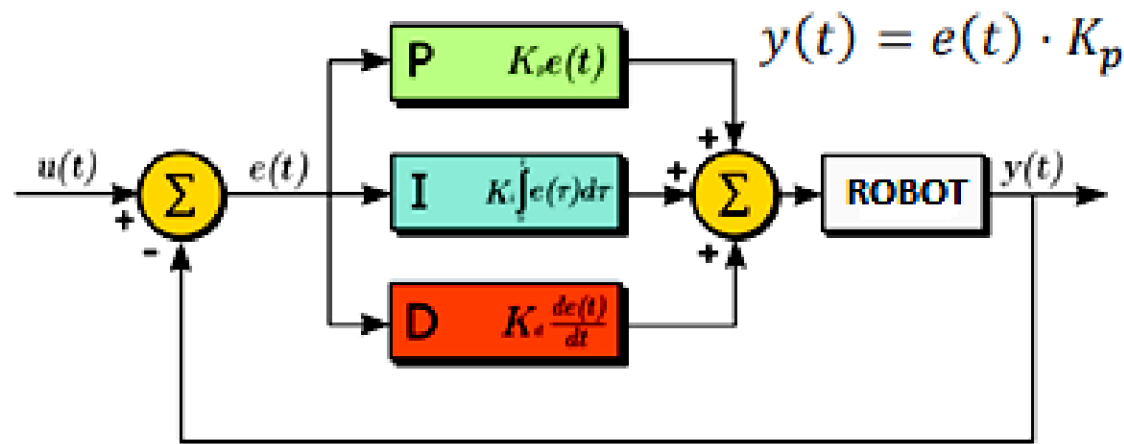
- Control a lazo abierto
- Control a lazo cerrado
- Regulación (set-point control)  
mantener algo constante
- Seguimiento de trayectorias (seguir algo a medida  
de que cambia, con un mínimo de error)



## Clasificación según el tipo de control

- Control lineal  
➡ (muy limitado, fácil de usar).
- Control No lineal  
➡ (para sistemas complejos, muy efectivo).
- Control óptimo  
➡ (busca la mejor solución sobre restricciones).
- Control robusto  
➡ (mejor desempeño ante perturbaciones).
- Control Adaptativo  
➡ (busca modelos de referencia )

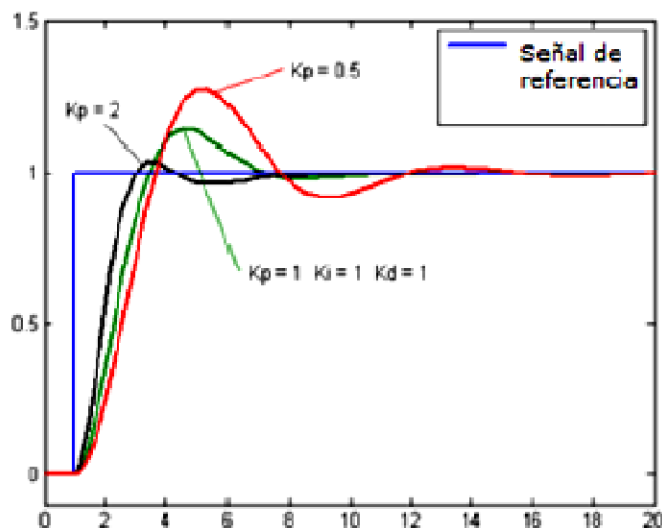
### Control Dinámico de Robots



Un controlador PID es un mecanismo de control por realimentación

**Acción PROPORCIONAL.** Es la acción mas importante. Existen controles PID cuya única acción es la proporcional (K proporcional)

**Control Proporcional.** Los motores alcanzan el valor de referencia rápido!!!



Si  $K_p$  es Alta



### Desventaja

Sobre-amortiguamiento  
Motor gira a vel. elevada



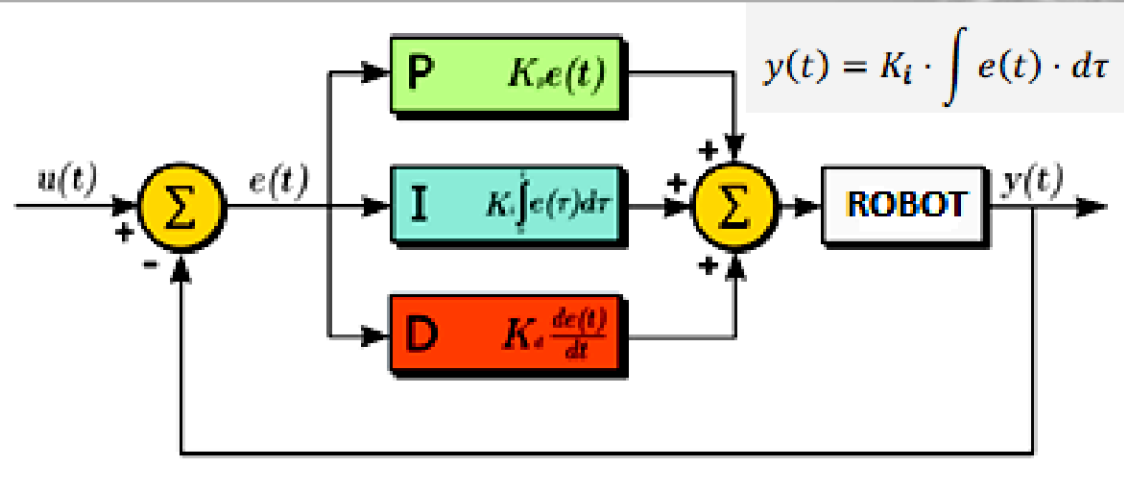


# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

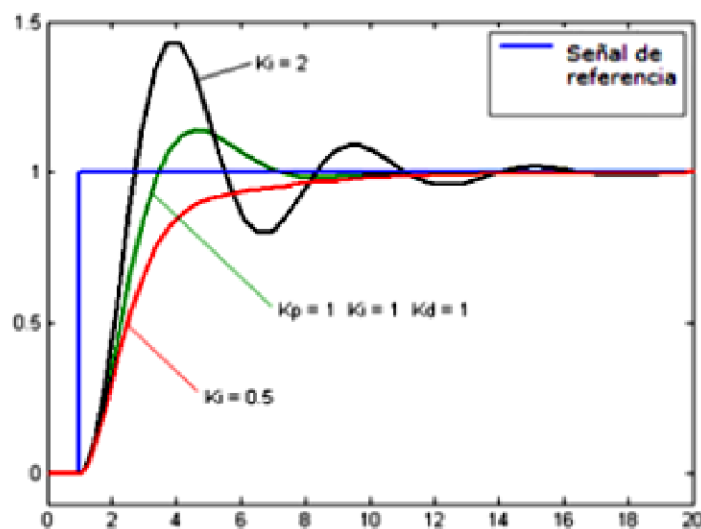
## CONTROL PID

### Control Dinámico de Robots

Un controlador PID es un mecanismo de control por realimentación



**Acción INTEGRAL** La salida es proporcional al error acumulado. El Resultado es la integral del valor del error durante un tiempo multiplicarlo por  $K_i$ .



La Respuesta es mas lenta y  
El periodo de oscilación aumenta.

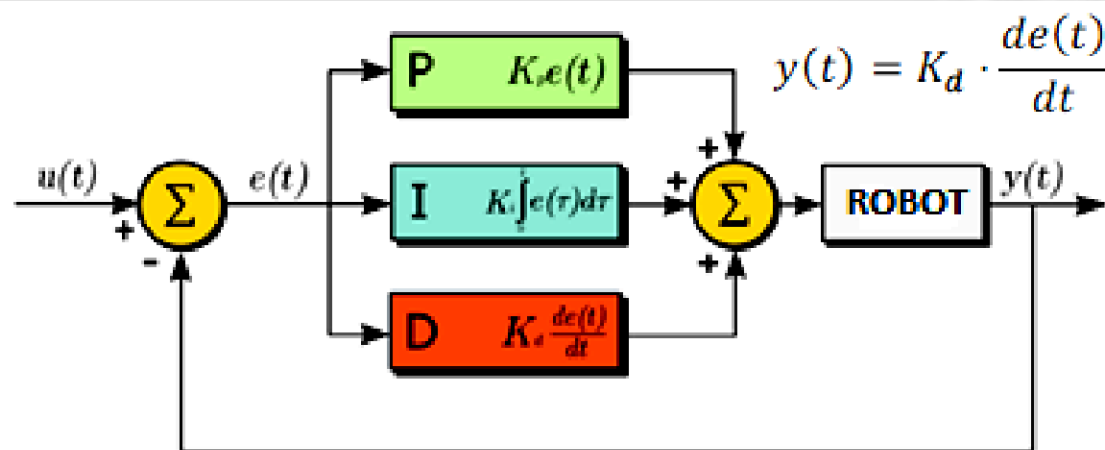


# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

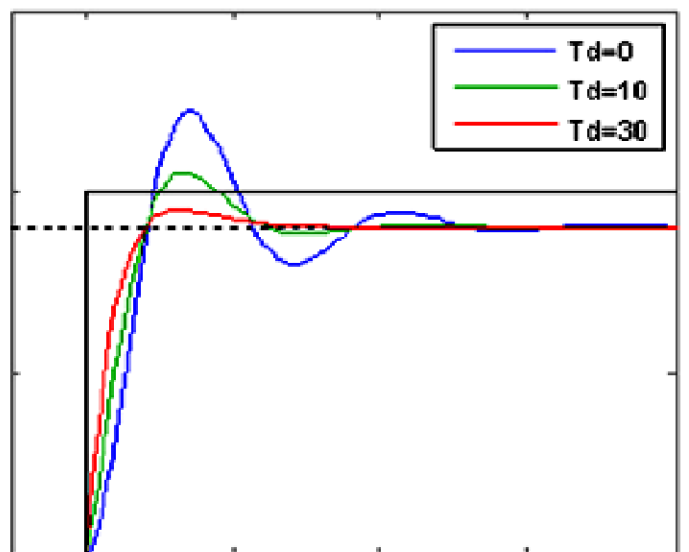
## Control Dinámico de Robots

### CONTROL PID

Un controlador PID es un mecanismo de control por realimentación



**Acción DERIVATIVA.** La salida es un valor proporcional a la derivada del error. La derivada representa la velocidad a la que cambia el error existente



#### Ventaja

Esta acción consigue amortiguar las oscilaciones producidas o Perturbaciones

#### Desventaja

Si  $K_d$  es Alta Control con Inestabilidad

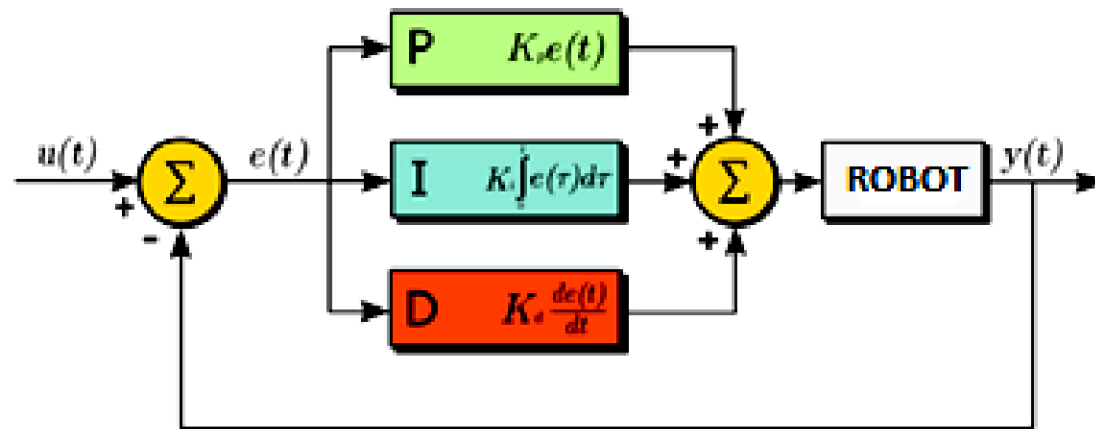




# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## CONTROL PID

### Control Dinámico de Robots



$$y(t) = e(t) \cdot K_p$$

$$y(t) = K_i \cdot \int e(t) \cdot d\tau$$

$$y(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

La combinación de todas estas acciones lograr el control de la velocidad de los motores o variable de un Proceso.

	Ventajas	Desventajas
Control proporcional	Error en estado estacionario disminuye. El proceso responde más rápidamente.	La sobre-amortiguación y las oscilaciones aumentan.
Control integral	Se elimina el error en estado estacionario.	Cuanto menor sea la constante, habrá más oscilaciones. Da inestabilidad.
Control derivativo	Amortiguación de las oscilaciones.	Gran sensibilidad al ruido.



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

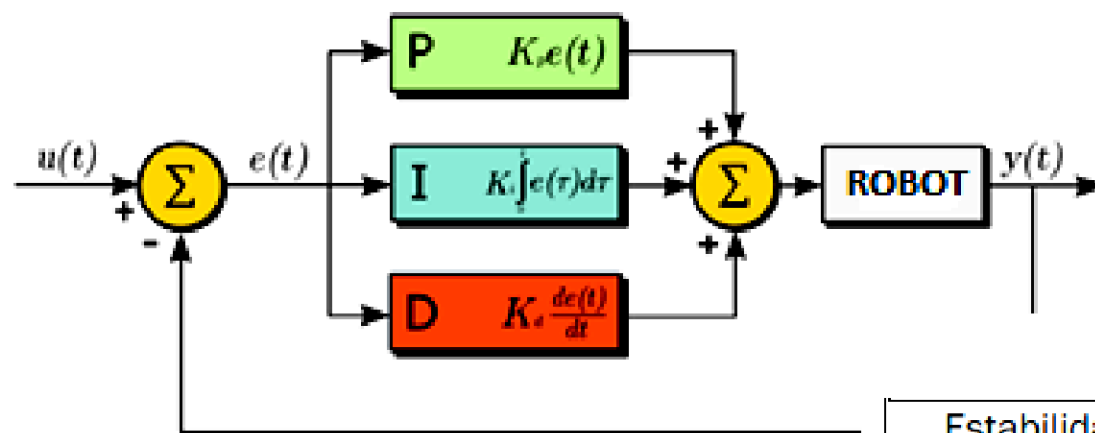
## Control Dinámico de Robots

### CONTROL PID

$$y(t) = e(t) \cdot K_p$$

$$y(t) = K_i \cdot \int e(t) \cdot d\tau$$

$$y(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$



	$K_p \uparrow$	$K_i \uparrow$	$K_d \uparrow$
Estabilidad	Disminuye	Disminuye	Aumenta
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Error en estado estacionario	No se elimina	Se elimina	No se elimina

	Ventajas	Desventajas
Control proporcional	Error en estado estacionario disminuye. El proceso responde más rápidamente.	La sobre-amortiguación y las oscilaciones aumentan.
Control integral	Se elimina el error en estado estacionario.	Cuanto menor sea la constante, habrá más oscilaciones. Da inestabilidad.
Control derivativo	Amortiguación de las oscilaciones.	Gran sensibilidad al ruido.





# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

ROBOT presenta elevadas prestaciones en Velocidad y Precisión de movimientos

### EL AVANCE TECNOLÓGICO GENERA

- ❑ Mejoras en los Materiales
- ❑ Sistemas de transmisión más Efectivos (Baja Inercia, Menor Tolerancia de contacto)
- ❑ Actuadores mas rápidos y precisos con sensores incorporados de alta resolución.
- ❑ Electrónica moderna de altas prestaciones.
- ❑ Microprocesadores y Microcontroladores de Tecnología moderna
- ❑ Mejores circuitos de potencias de comando de actuadores.
- ❑ Mejoras en programación. Algoritmos mas elaborados.

### EL MODELO CINEMATICO

Aporta información sobre las articulaciones del Robot y trayectorias que se ajusten la mejor posición deseada el extremo final del Robot.

### EL MODELO DINAMICO

Se ocupa de la relación de Fuerzas que actúan sobre el robot y el movimiento que en el se originan. Objetivo: Conocer la relación entre el Movimiento del Robot y las Fuerzas .



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

### CARACTERISTICAS DINAMICAS DEL ROBOT

Velocidades - Aceleraciones de las Articulaciones,  
Inercias, rozamientos, fuerzas de gravedad.

La Complejidad es mayor a medida que aumentan los grados de libertad  
Impiden que la trayectoria definida o deseada se cumpla o coincida  
con la real lograda.

### EL MODELO DINÁMICO

Establece una relación de:

- Posición del Robot definido por sus variables articulares o coordenadas del extremo final y las velocidades y aceleración.
- La Fuerzas y pares aplicados en las articulaciones .
- Parámetros dimensionales del Robot  
(Longitud, masas, inercias de los elementos)

### NECESIDAD DEL MODELO DINAMICO

- 1-Simulación de los movimientos del Robot.
- 2- Diseño y evaluación de la Estructura mecánica del Robot
- 3- Dimensionamiento de los Actuadores.
- 4- Diseño del Control Dinámico del Robot.





# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

### EL CONTROL DINAMICO

**OBJETIVO.** Lograr que las trayectorias ejecutadas por el Robot sean iguales o parecidas a las establecidas por el Modelo.

### CARACTERISTICAS

- ☐ Por la complejidad de las ecuaciones, el modelo es Fuertemente No lineal, Multivariable y de Parámetros Variantes.
- ☐ El Control se transforma en un Sistema complejo de desarrollar.
- ☐ En la Práctica se realizan simplificaciones en Robot Comerciales.
- ☐ Se facilita así el diseño a costo aceptable pero con menor calidad.

### TECNICAS DE CONTROL DINÁMICO

- 1- Se realiza en el Espacio Articular controlando las trayectorias articulares del robot
  - Control Monoarticular
  - Control Multiarticular
- 2- Se realizar el control en el Espacio de la Tarea o Cartesiano controlando La trayectoria del Extremo final del Robot.





### Control Dinámico de Robots

#### TECNICAS DE CONTROL DINÁMICO

1- CONTROL MONOARTICULAR. Se desprecia la interacción entre los grados de libertad del Robot. Es una aproximación aceptable cuando los factores de reducción son elevados. Las perturbaciones de articulaciones superiores no se reflejan en la articulación.

2- CONTROL MULTIARTICULAR. Considera la naturaleza del Sistema multivariable del Robot. Se utilizan Técnicas de Control basadas en Control PID y Control por Pre-alimentación.

#### TECNICAS DE CONTROL MAS POTENTES

Control adaptativo, Control por Lógica Difusa, Redes Neuronales. Control Robusto y Optimo



## Control Dinámico de Robots

**CONTROL AVANZADO** Requiere de modelos matemáticos que describan el proceso.  
(Fenomenología y Condiciones de operación). Restricciones.



## ESTRATEGIAS

### CONTROL AVANZADO

**CONTROL EXPERTO** Recopila el conocimiento del sistema  
**CONTROL DIFUSO / LOGICA DIFUSA.**

**CONTROL ROBUSTO** Minimiza las perturbaciones externas del sistema.  
**CONTROL POR MODELO INTERNO (IMC)**  
(Internal Model Control)

**CONTROL OPTIMO** Define una función que incluye el error y acción de control  
**CONTROL POR MODELO PREDICTIVO (MPC)**  
(Model predictive control)

**CONTROL ADAPTATIVO** Para sistemas variantes en el tiempo.  
**CONTROL ADAPTATIVO POR**  
**MODELO DE REFERENCIA (RMAC)**  
(Reference Model Adaptive Control)



### ESTRATEGIAS AVANZADAS DE CONTROL

#### CONTROL ROBUSTO

Minimiza las perturbaciones externas del sistema.

#### CONTROL POR MODELO INTERNO (IMC)

(Internal Model Control)

#### Referencias

- [1] Sanchez-Peña, Ricardo S. Robust Systems: Theory and Applications. 1998, Wiley & Sons. ISBN 0-471-17627-3.
- [2] Zhou, Kemin. Essentials of Robust Control. 1999, Prentice Hall. ISBN 0-13-525833-2.
- [3] Ogata, Katsuhiko. Modern Control Engineering. 2010, Prentice Hall.





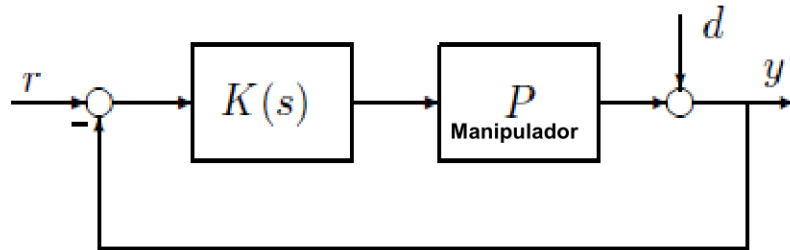
# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

Manipulador

## EL CONTROL ROBUSTO

Considera las Perturbaciones



P Proceso objeto de control (Robot Manipulador)

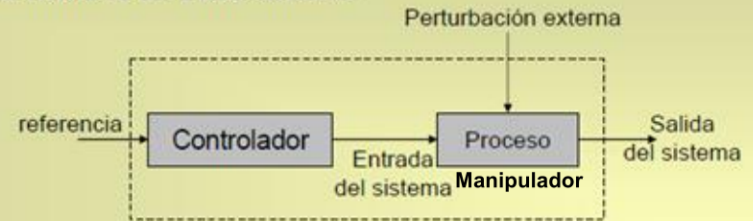
K (s). Modelo matemático del controlador

r. Señal de referencia

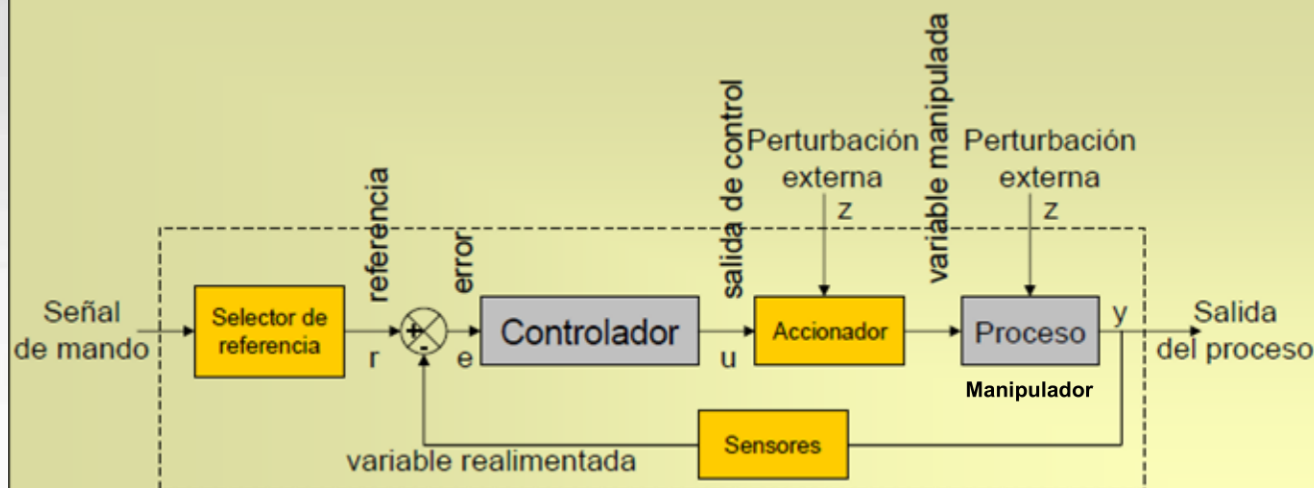
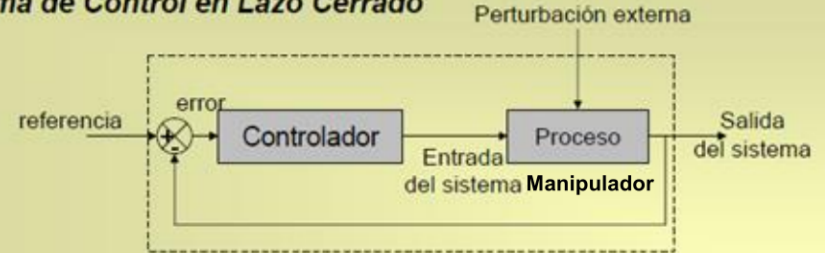
y. Variable controlada

d. Perturbación externa.

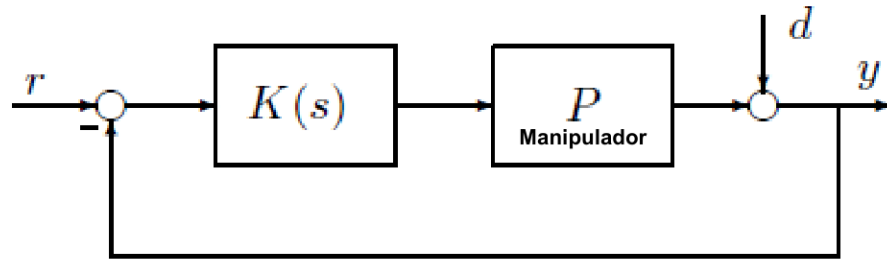
### Sistema de Control en Lazo Abierto



### Sistema de Control en Lazo Cerrado



#### CONTROL ROBUSTO POR MODELO INTERNO (IMC)



$$y(s) = d(s) + P \times u(s)$$

P. Proceso objeto de control (Robot Manipulador)

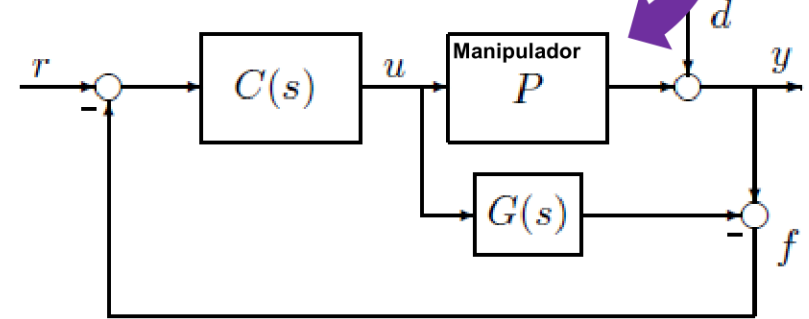
K (s). Modelo matemático del controlador

r. Señal de referencia

y. Variable controlada

d. Perturbación externa

**Control Robusto:** Se busca aproximar el modelo por uno lineal de coeficientes constantes, asumiendo un error de modelado. Este error es considerado como incertidumbre del modelo frente al real, y utiliza esta incertidumbre, que se modela y acota para cada problema, en el proceso de diseño del controlador.



$$f(s) = d(s) + [P - G(s)]u(s)$$

C(s) . Modelo matemático del Controlador

P. Proceso objeto de control (Robot Manipulador)

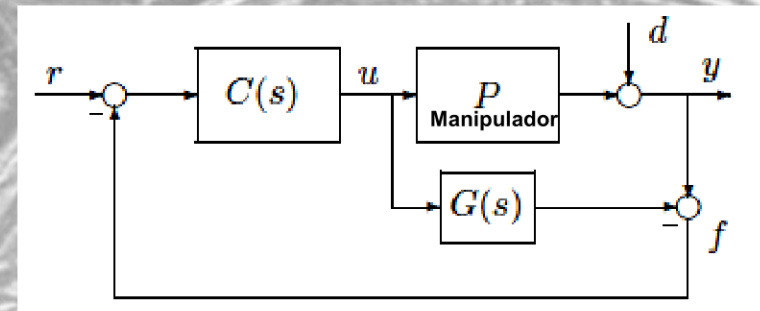
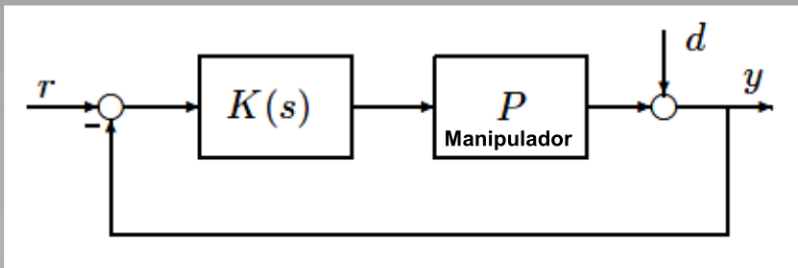
G(s). Modelo matemático del Proceso.

d. Perturbación externa

y. Variable controlada

f. Variable controlada resultante





$$f(s) = d(s) + [P - G(s)]u(s)$$

Hay 2 motivos para usar realimentación: {  
 Incertidumbre  
 Perturbaciones desconocidas

**Incertidumbre:** diferencias entre el modelo matemático y el sistema real.

**Robustez:** capacidad del sistema de control de satisfacer las especificaciones a pesar de la incertidumbre.

### Conclusión:

Si no existen perturbaciones  $d(s) = 0$  y el modelo matemático del sistema físico es exacto (los parámetros de la planta no varían).

$P - G(s) = 0$ , la señal de realimentación es 0.  
 Es decir, ante ausencia de perturbaciones y error de modelado no sería necesario realimentar.

Condición poco realista. Siempre van a existir perturbaciones y error de modelado, por esta razón es imprescindible realimentar.

### DESVENTAJA.

Estructura de un Modelo Lineal como lo es el modelo PID. Se Necesita resolver los problemas de no linealidad. (Técnicas Difusas y otras)



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

## EL CONTROL ROBUSTO

## Robot SCARA Control IMC

Investigación (Shinya AKAMATSU – KONISHI)  
Memoirs of the Faculty of Engineering,  
Okayama University,  
Vol. 43, pp. 49-54, January 2009.

$$Torque = D(q) * \ddot{q} + c(q, \dot{q}) + h(q)$$

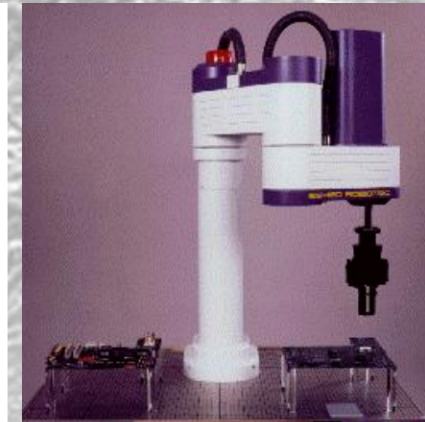
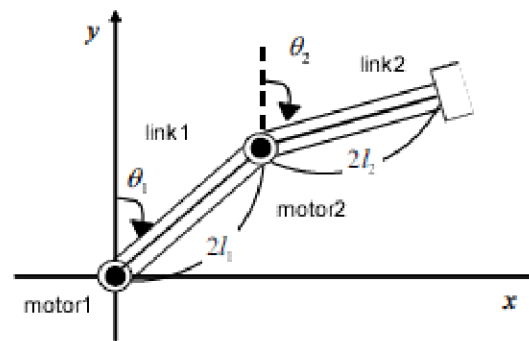
T (q) Vector de fuerzas o pares en articulación

D(q) Matriz de inercia de los elementos.

C(q,q) Matriz de fuerza generado por efecto coriolis.

h(q) Matriz de fuerza de gravedad

n Número de grados de libertad

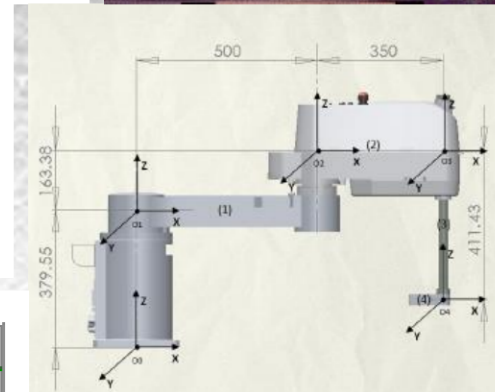


$$x_1 = l_1 \sin \theta_1$$

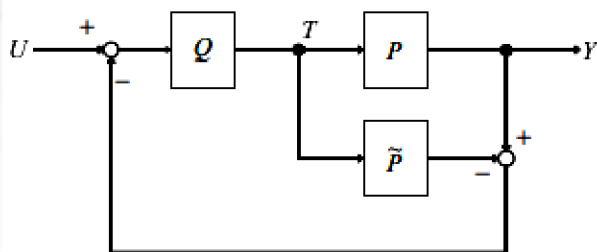
$$y_1 = l_1 \cos \theta_1$$

$$x_2 = 2l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2$$

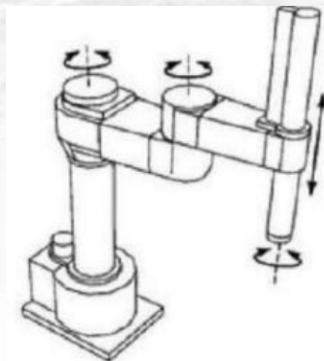
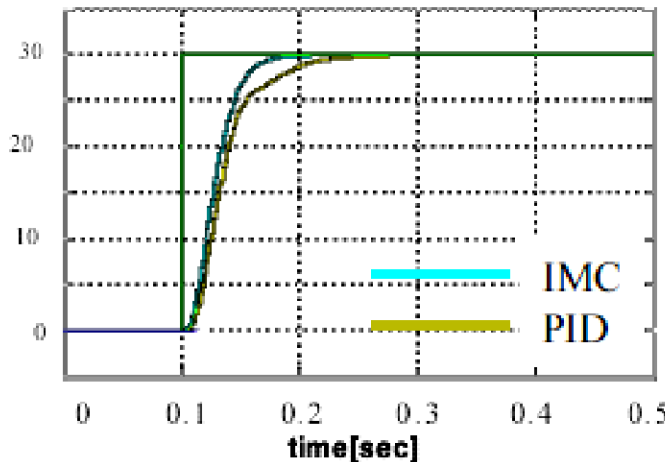
$$y_2 = 2l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2$$



### Control IMC



$\theta_1$  [deg]



### ESTRATEGIAS AVANZADAS DE CONTROL

#### CONTROL OPTIMO

Define una función que incluye el error y acción de control

**CONTROL POR MODELO PREDICTIVO (MPC)**  
(Model predictive control)



### El Problema del Control Óptimo requiere

- Definir el modelo matemático del sistema controlado
- Especificar el criterio de optimización
- Especificar las condiciones de contorno
- Describir las restricciones sobre el estado y los controles
- Describir las variables del problema.

***Los problemas de control óptimo No se pueden Resolver de forma analítica (solución por Métodos Numéricos)***

- ☐ Métodos numéricos directos...  
Discretizado (programación no lineal)
- ☐ Métodos numéricos indirectos...  
Se basan en condiciones de optimización





### Modelos Predictivos de Control MPC

Es un algoritmo o conjunto de algoritmos que permiten controlar cada una de las etapas del Robot en su movimiento

**Un MPC basa su funcionamiento en la predicción de cómo se encontrará el robot en un instante de tiempo determinado localizado en un futuro cercano.**

**MPC como un paradigma de control en donde**

- 1) Incorporación de un modelo explícito en el cálculo del control.
- 2) El algoritmo MPC considera el comportamiento en un horizonte de futuro temporal  
(los efectos de las perturbaciones se pueden prever y eliminar)
- 3) MPC considera las entradas, el estado y las limitaciones en el cálculo del control



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

## CONTROL OPTIMO MODELO PREDICTIVO -MPC

### VENTAJAS

Provee buenas respuestas en términos de rapidez, rechazo de perturbaciones y respuesta frente a errores en los parámetros del Proceso.

### DESVENTAJAS

Pocos resultados en el control de procesos no lineales y alta dinámica de robots manipuladores (Poignet, M. Gautier. "Nonlinear model predictive control of a robot manipulator". Workshop on Advanced Motion Control. 2000)

### Estrategia de Control

Dada una consigna deseada  $\hat{y}_p$  deberá alcanzar la consigna futura siguiendo una trayectoria de referencia  $y_R$

$\varepsilon(n) = c(n) - y_p(n)$  error de posición en el tiempo  $n$

$C$  consigna deseada

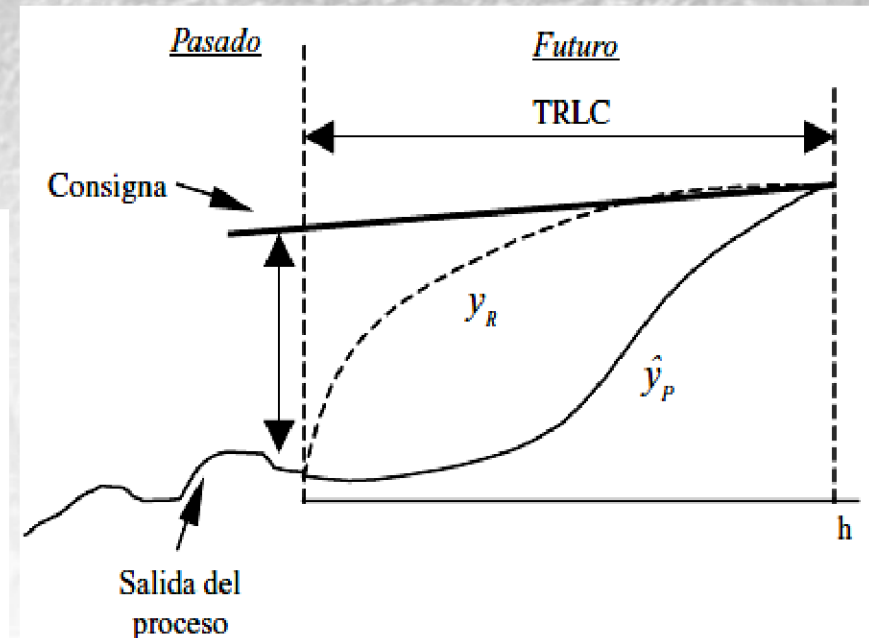
$y_p$  salida del proceso

$y_R$  trayectoria de referencia

TRLC tiempo de respuesta del sistema de lazo cerrado

$y_R \quad c(n+i) - y_R(n+i) = \alpha^i (c(n) - y_p(n)) \quad 0 \leq i \leq h$

$\alpha$  es un escalar depende del tiempo de respuesta deseado



**OBJETIVO.** Alcanzar la consigna deseada siguiendo la trayectoria de referencia.

Esta trayectoria de referencia se considera entonces como el comportamiento deseado en lazo cerrado.



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

## CONTROL OPTIMO MODELO PREDICTIVO -MPC

### Estrategia de Control

Esta predicción de la salida está definida como:

$$\hat{y}_p(n+i) = y_M(n+i) + \hat{e}(n+i) \quad 1 \leq i \leq h$$

donde  $y_M$  es la salida del modelo y  $\hat{e}$  es la predicción del error de salida futuro.

Asumiendo

que se puede predecir el error de salida futuro del sistema, éste se puede aproximar por el polinomio siguiente:

$$\hat{e}(n+i) = e(n) + \sum_{m=1}^{d_e} e_m(n) i^m \quad \text{para } 1 \leq i \leq h$$

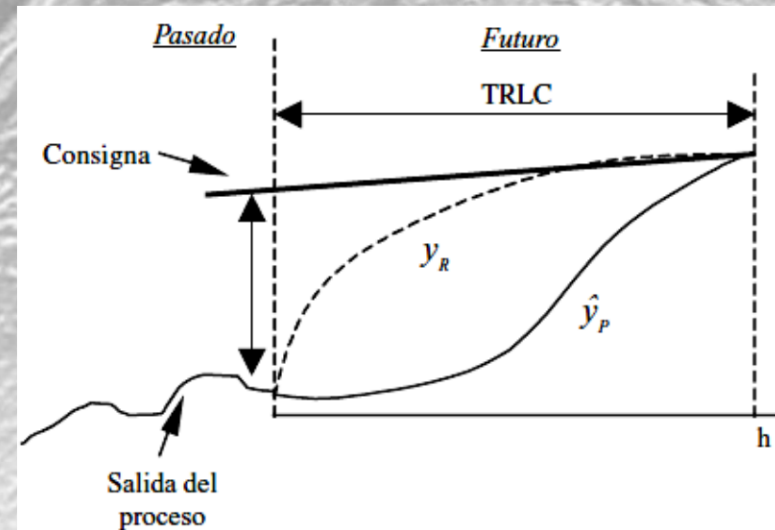
donde  $d_e$  es el grado del polinomio de aproximación del error y  $e_m$  son coeficientes que se calculan en línea conociendo el error pasado y presente.

$$u(n) = k_o \{c(n) - y_p(n)\} + \sum_{m=1}^{\max(d_c, d_e)} k_m \{c_m(n) - e_m(n)\} + V_X^T x_M(n)$$

compensación  
proporcional  
error de posición,

anticipación consigna  
del error

compensación  
modelo no se  
corresponde al real.



$$u(n+i) = \sum_{k=1}^{n_B} \mu_k(n) u_{BK}(i) \quad 0 \leq i \leq h$$

donde  $\mu_k$  son los coeficientes de optimización  
 $u_{BK}$  funciones de base de la secuencia de control  
 $n_B$  número de funciones de base.

la estrategia general del control predictivo, solo el primer término de control se aplica efectivamente

$$u(n) = \sum_{k=1}^{n_B} \mu_k(n) u_{BK}(0)$$

$d_c$  grado de la aproximación polinomial  
 $k_o$ ,  $k_m$  y  $V_X^T$  coeficientes que se calculan:



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

### PREDICTIVE CONTROL OF A SCARA ROBOT.

Oscar Andrés Vivas Albán

Ingeniare - Revista Chilena de Ingeniería,  
vol. 14 N° 2, 2006, pp. 135-145. 2006

El comportamiento de un brazo robot rígido de  $n$  grados

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$$

$\Gamma$  es el par aplicado;

$A(q)$  es la matriz de inercia,

$C(q, \dot{q})$  es la matriz fuerzas de Coriolis y centrífugas;

$g(q)$  es el vector de fuerzas gravitacionales.

$q$  posición articular

$\dot{q}$  velocidad

$\ddot{q}$  aceleración

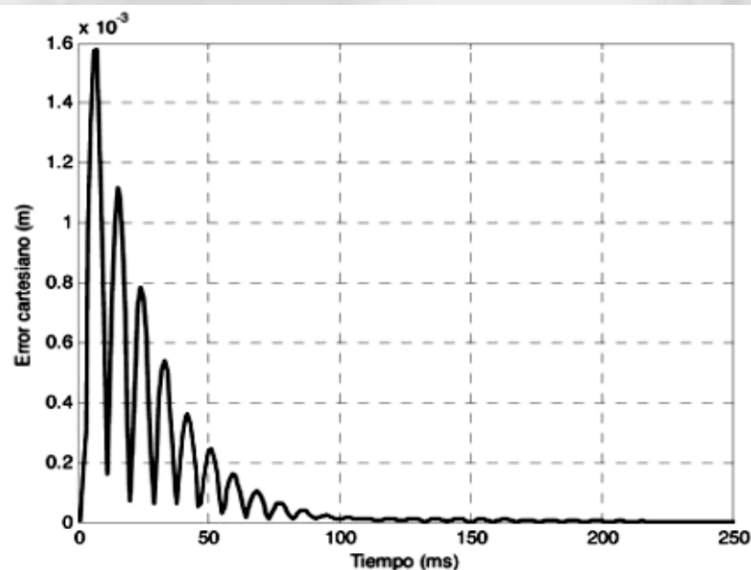


Figura 11. Respuesta transitoria de la consigna circular

## CONTROL OPTIMO MODELO PREDICTIVO -MPC

### Robot SCARA Control IMC



modelo dinámico inverso del robot términos de frotamientos secos y viscosos,  $F_{sj}$   $F_v$

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + F_v \dot{q} + F_s \text{sign}(\dot{q})$$

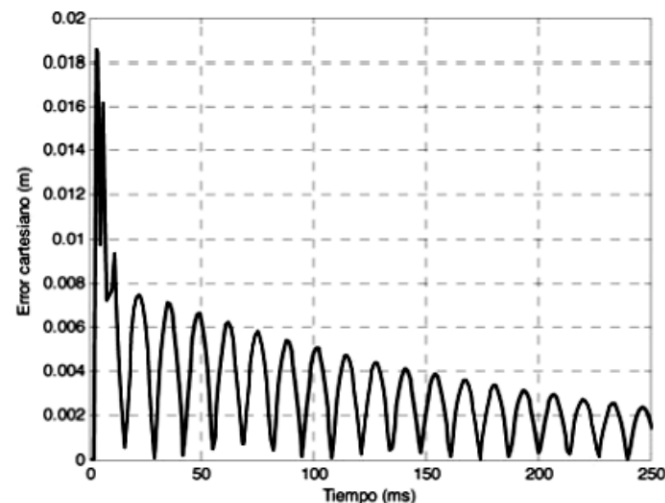


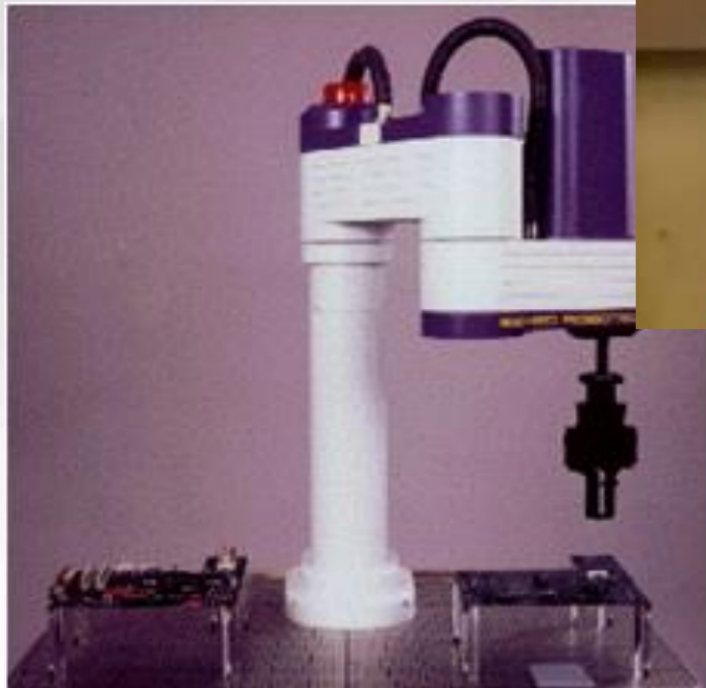
Figura 7. Respuesta transitoria de la consigna circular para el PID.

# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Dinámico de Robots

**RESULTADOS**

Video



**CONTROL ROBUSTO IMC**  
**CONTRL OPTIMO MPC**



### ESTRATEGIAS AVANZADAS DE CONTROL

#### ESQUEMAS DE CONTROL ADAPTATIVO

- ☐ Control Adaptativo Programado (Gain Scheduling) o Asignación de Ganancias
- ☐ Control Adaptativo de Modelo de Referencia (MRAC) (Reference Model Adaptive Control)
- ☐ Control Adaptativo Auto-ajustable (STR)

**CONTROL ADAPTATIVO** Para sistemas variantes en el tiempo.





#### ESTRATEGIAS AVANZADAS DE CONTROL

**Consideran la existencia de un modelo dinámico.**

❑ En la realidad, los parámetros del robot (masas de elementos, momentos de inercia) que aparecen en el modelo dinámico no resultan totalmente conocidos o incluso pueden llegar a variar  **aparecen errores en el control realizado**

#### CONTROL ADAPTATIVO

Las técnicas de Control Adaptivo minimizan los errores mediante el cambio de valores de las ganancias u otros parámetros.

En este sentido, el controlador "aprende" un conjunto de parámetros durante el proceso de operación del robot.

***Los Errores que siempre existirán se logran minimizar.***

#### CONTROL ADAPTATIVO

*Un controlador Adaptativo es un controlador con parámetros ajustables y un mecanismo de ajuste de parámetros*

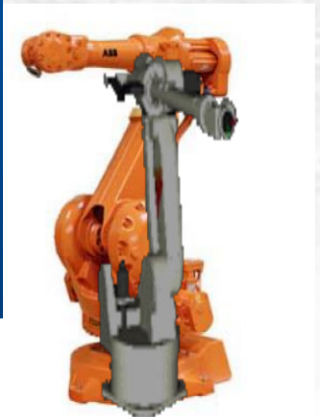


#### CONTROL ADAPTATIVO

*Un controlador Adaptativo es un controlador con parámetros ajustables y un mecanismo de ajuste de parámetros*

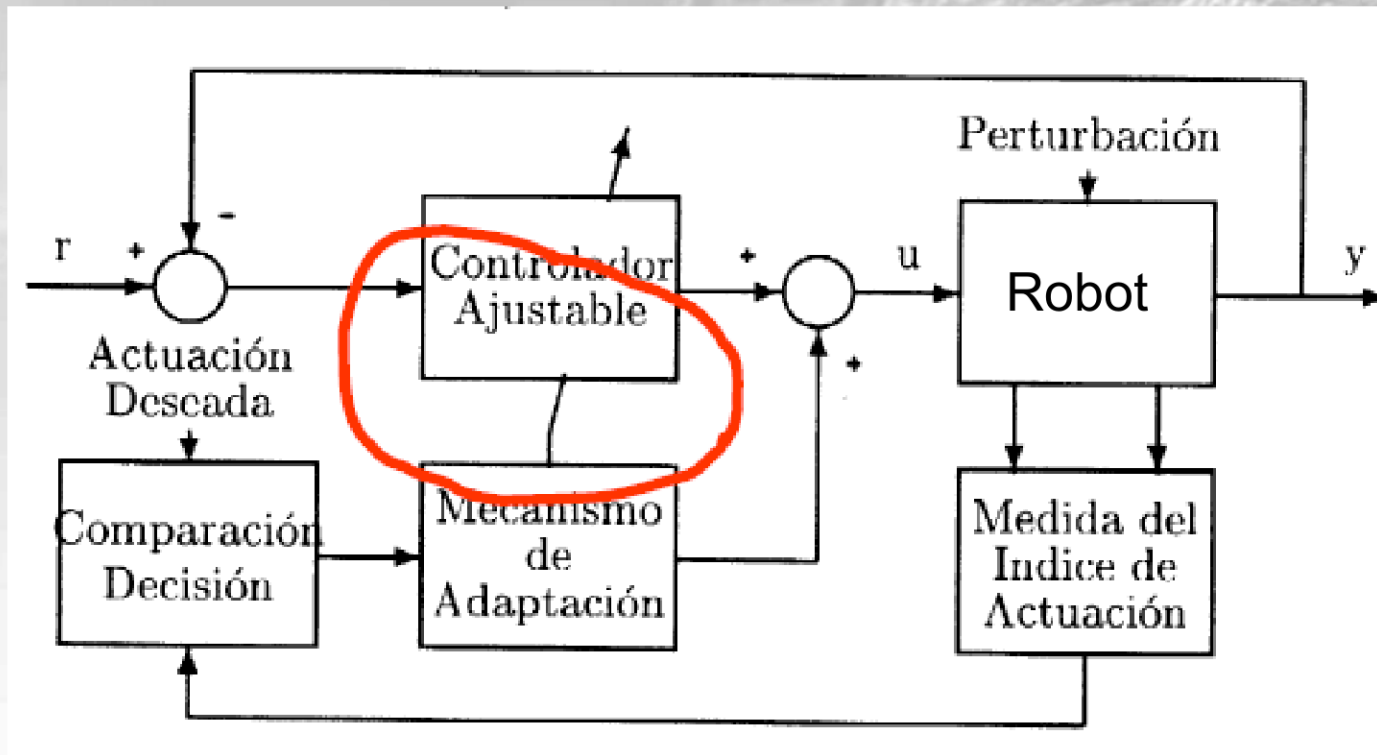
¿ PORQUÉ CONTROL ADAPTATIVO ?

- **Controlador convencional**
  - sistemas con parámetros constantes
- **Control adaptativo**
  - punto de funcionamiento cambia



#### CONTROL ADAPTATIVO

Modifica el comportamiento en Respuesta a los Cambios en la Dinámica del Sistema y a las Perturbaciones.

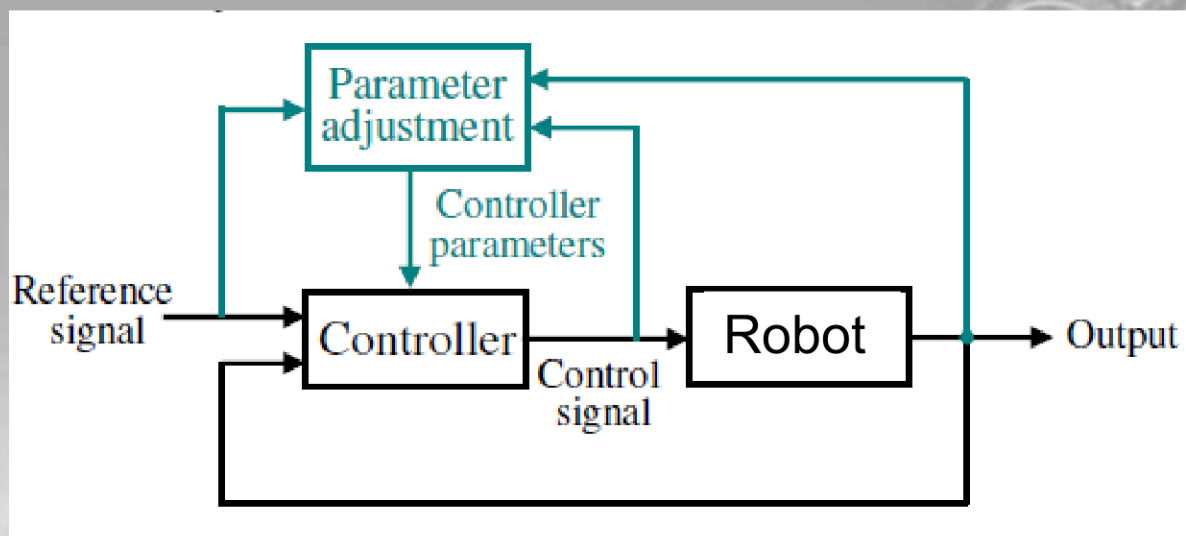




# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## CONTROL ADAPTATIVO

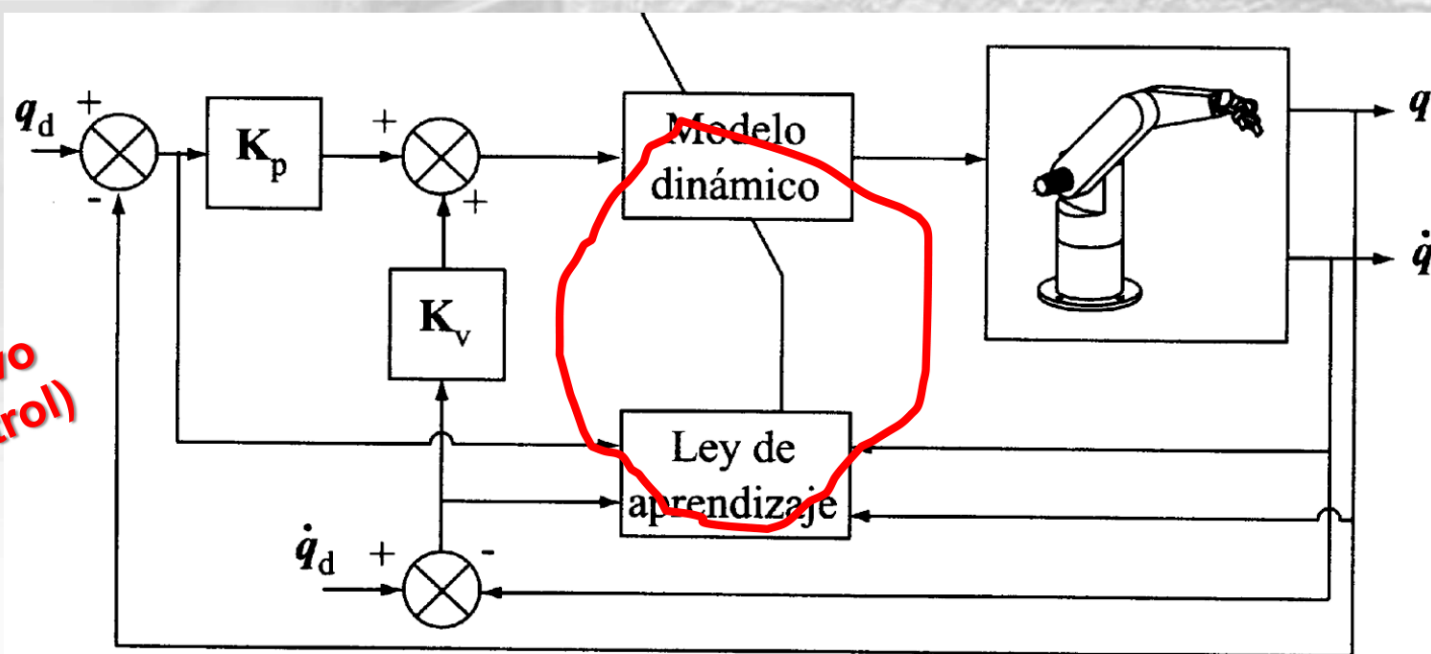
### Control Dinámico de Robots



### Control Adaptivo (Adaptive Control)

Este control es apropiado para sistemas que sean variantes en el tiempo

Control Adaptivo  
(Adaptive Control)



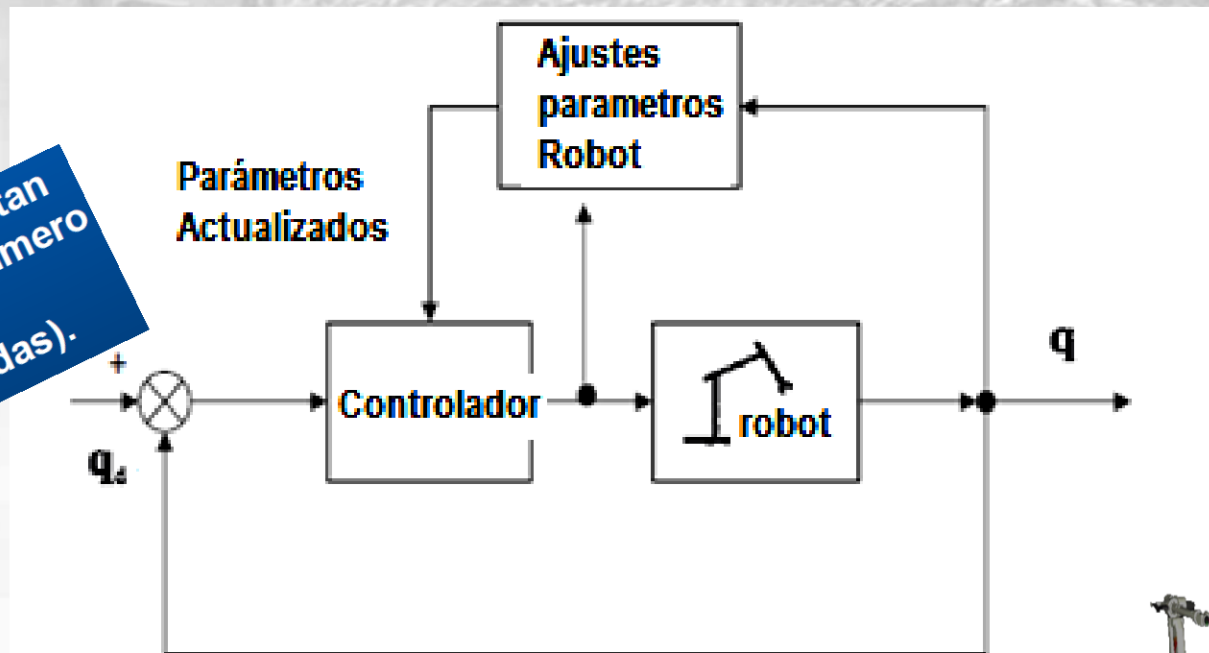
#### ESQUEMAS DE CONTROL ADAPTATIVO

##### ❑ Control Adaptativo Programado (Gain Scheduling) Asignación de Ganancias

- Trabaja calculando las ganancias más adecuadas para cada espacio de trabajo
- El ajuste de las ganancias son las variables articulares y la de carga.
- El ajuste de los parámetros de los controladores PID de las articulares  
Es muy complejo dado que se ajustan  $3n$  parámetros ( $n$  es el número de articulaciones)

**Control Adaptativo  
Asignación de  
Ganancias**

Una vez elegido el controlador se ajustan los parámetros del mismo para un número determinado de condiciones de funcionamiento (carga y coordenadas).



#### ESQUEMAS DE CONTROL ADAPTATIVO

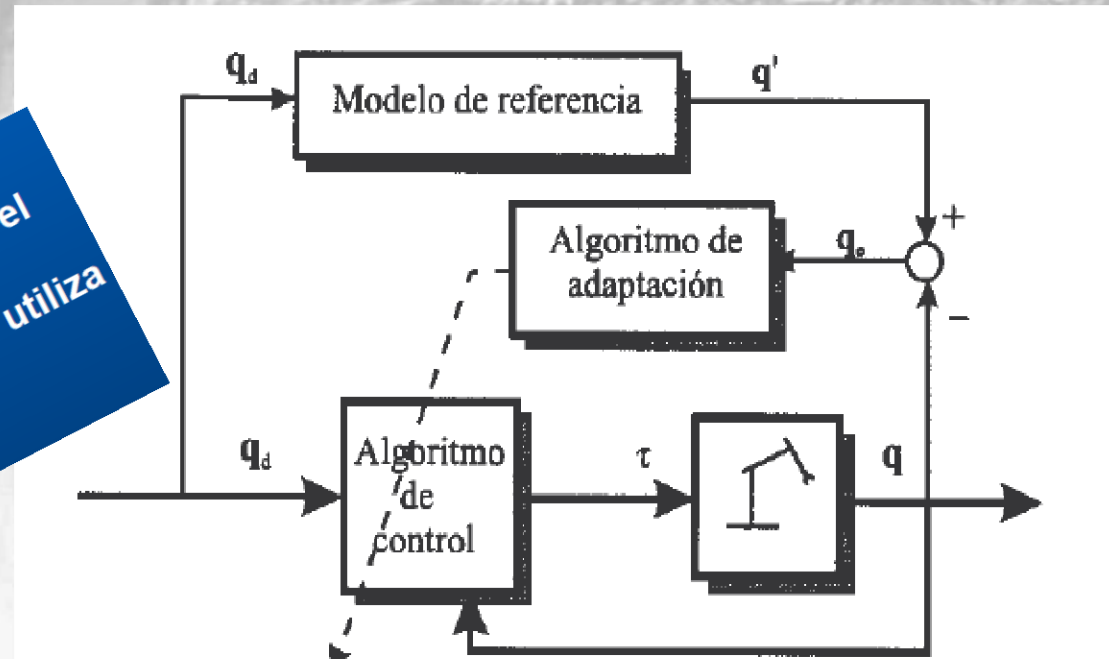
##### ❑ Control Adaptativo de Modelo de Referencia (MRAC)

- La diferencia instante a instante entre el comportamiento real de la articulación  $q$  y el valor deseado  $q_d$  se utiliza para calcular los parámetros del controlador
- El algoritmo del **Modelo de Referencia** puede ser un modelo genérico PID
- *DESVENTAJA: Algoritmo de Adaptación que asegure la estabilidad*

#### Control Adaptativo Modelo de Referencia

**Modelo de referencia:**

- Realiza una comparación en línea entre el comportamiento del sistema real y el comportamiento deseado. El error se utiliza para modificar los parámetros del regulador.



Se selecciona una ecuación diferencial lineal invariante en el tiempo de segundo orden como el modelo de referencia para cada grado de libertad del robot.





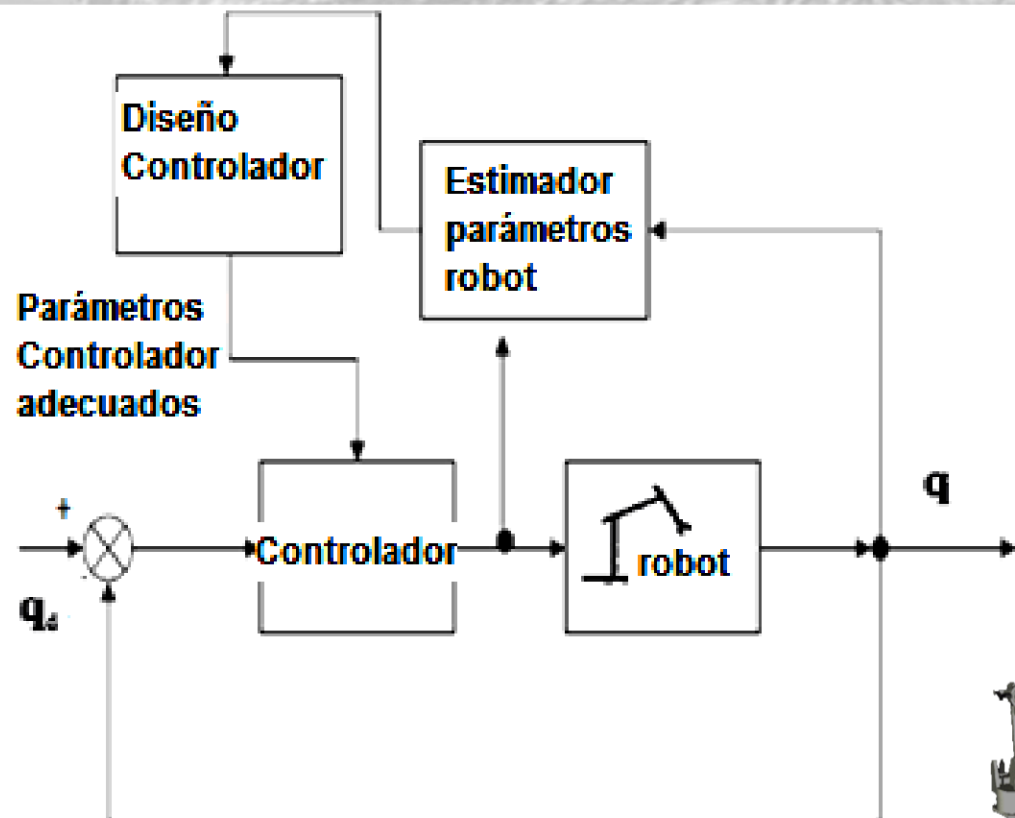
#### ESQUEMAS DE CONTROL ADAPTATIVO

□ Control Adaptativo Auto-ajustable (STR)

#### Regulador autoajustable:

- Identifica continuamente el modelo del sistema y utiliza un algoritmo para ajustar los parámetros del regulador.

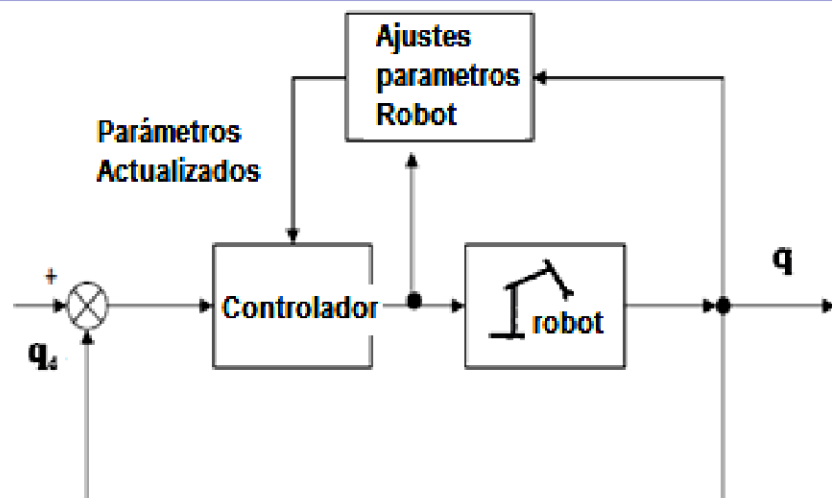
Control Adaptativo  
Auto-ajuste (STR)



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

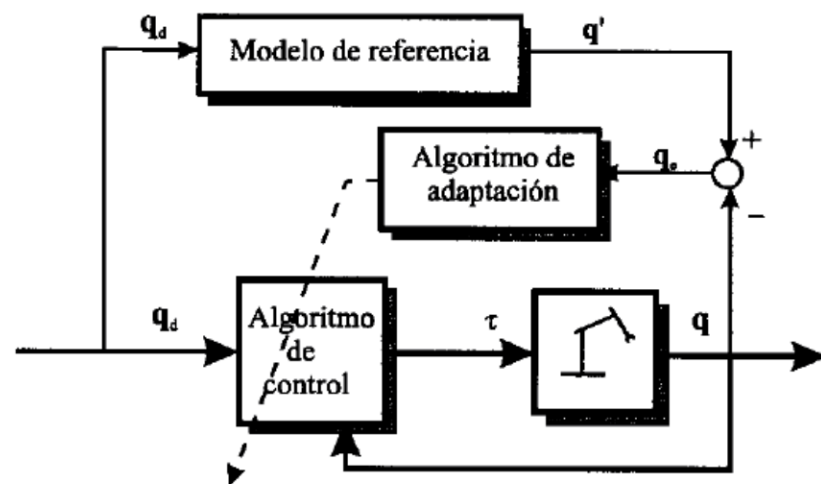
## CONTROL ADAPTATIVO

### Control Dinámico de Robots

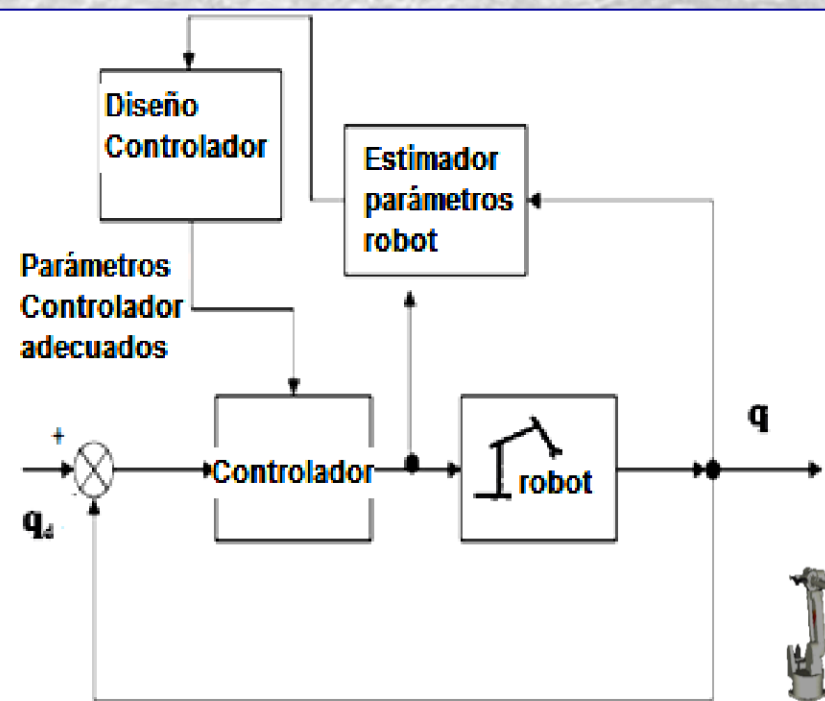


**Control Adaptativo Programado**  
**Asignación de Ganancias**

**Control Adaptativo Auto-ajuste (STR)**

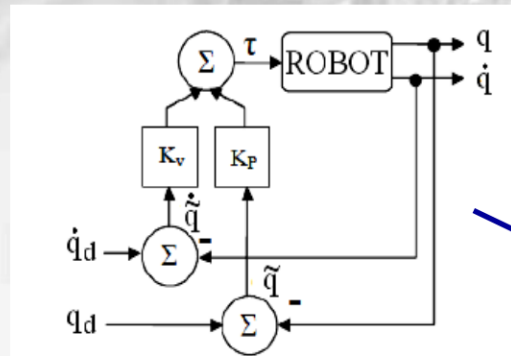
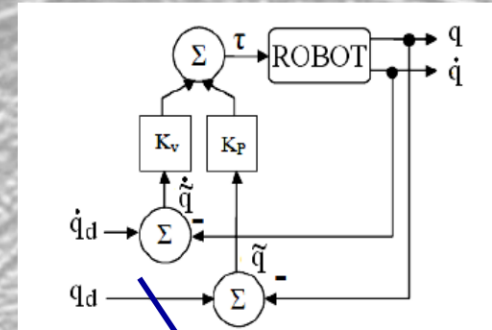
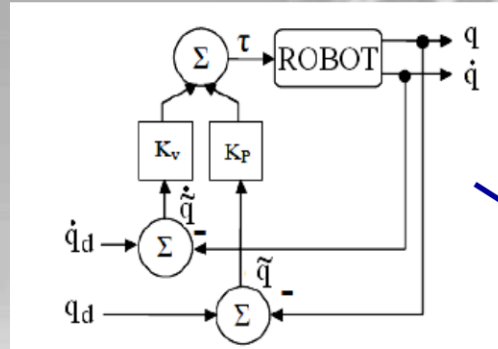


**Control Adaptativo Modelo de Referencia**



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Monoarticular de Robots



### Importante:

Se recomienda el uso de bibliografía recomendada en el Programa de la Asignatura para el estudio de los temas. Al final del material se transcribe la bibliografía recomendada.





# INTRODUCCION

- ¿ Qué es la Dinámica ?  
Fuerzas → Movimientos
- Exigencias Robot : precisión y elevadas prestaciones de velocidad
- Características del modelo dinámico:  
No Lineal, multivariable y parámetros dependientes del tiempo y posición de los eslabones



# INTRODUCCION

## CONTROL MONOARTICULAR

- El control cinemático genera las trayectorias que idealmente deberá seguir el robot  $q_d(t)$ .
- Sin embargo, inercias, rozamientos, holguras, ..., etc, hacen que la trayectoria deseada  $q_d(t)$  y la trayectoria real  $q(t)$  del robot no coincidan.



# INTRODUCCION

## CONTROL MONOARTICULAR

- El control dinámico tiene como misión procurar que la trayectoria real  $q(t)$  del robot sea lo mas parecida a la generada por el control cinemático  $q_d(t)$ .

$$q(t) \equiv q_d(t).$$

- Para ello, el control dinámico utiliza:
  - El modelo dinámico del robot
  - La teoría de control





# INTRODUCCION

## CONTROL MONOARTICULAR

- En la practica :  
simplificaciones → resultados  
aceptables
- Uso técnicas mas complejas →  
mejores resultados a cambio de  
mayor complejidad y mayor coste  
computacional



# CONTROL MONOARTICULAR

- Controlan individualmente cada eje
- No tienen en cuenta la acción de los demás ejes (sin acoplamiento).
- Los modelos matemáticos son sencillos.



# CONTROL MONOARTICULAR INCONVENIENTES

- Los robots industriales son altamente no lineales: las inercias y los acoplamientos entre articulaciones son dependientes de la posición y la velocidad
- No es un control adecuado para velocidad y cargas variables





# CONTROL MONOARTICULAR INCONVENIENTES

- Inconveniente de los modelos dinámicos:
  - No-lineales
  - Multivariantes
  - Acoplados
  - Parámetros variantes en el tiempo
- Reductores: si la articulación presenta reductores (o engranajes) se reduce la velocidad del movimiento y se disminuye el acoplamiento entre ejes.



## CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducción

- **Reductores:** si la articulación presenta reductores (o engranajes) se reduce la velocidad del movimiento y se disminuye el acoplamiento entre ejes.
- Con reductores, la posición de las articulaciones  $[q(t)]$  está relacionada con la posición del actuador:  $[q_a(t)]$ :

$$q_a = K q$$

- y  $K$  es una matriz diagonal con los factores de reducción  
 $k_{ij} \gg 1$



## CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducción

- Consecuentemente se cumple que:

$$\dot{q}_a = K\dot{q} \quad \ddot{q}_a = K\ddot{q} \quad \tau_a = K^{-1}\tau$$

- El modelo dinámico del robot (Langrange-Euler) en presencia de reductores:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q)$$

$$\tau_a = K^{-1}DK^{-1}\ddot{q}_a + K^{-1}h + K^{-1}c$$

- Si se separa en  $D_1$  los términos constantes de  $D$  en la diagonal y en  $D_2$  el resto de los términos:

$$\tau_a = K^{-1}D_1K^{-1}\ddot{q}_a + \underbrace{K^{-1}D_2K^{-1}\ddot{q}_a + K^{-1}h + K^{-1}c}_{\tau_p}$$

- Con  $\tau_p$  es el par perturbador (el generado por el movimiento del resto de las articulaciones).

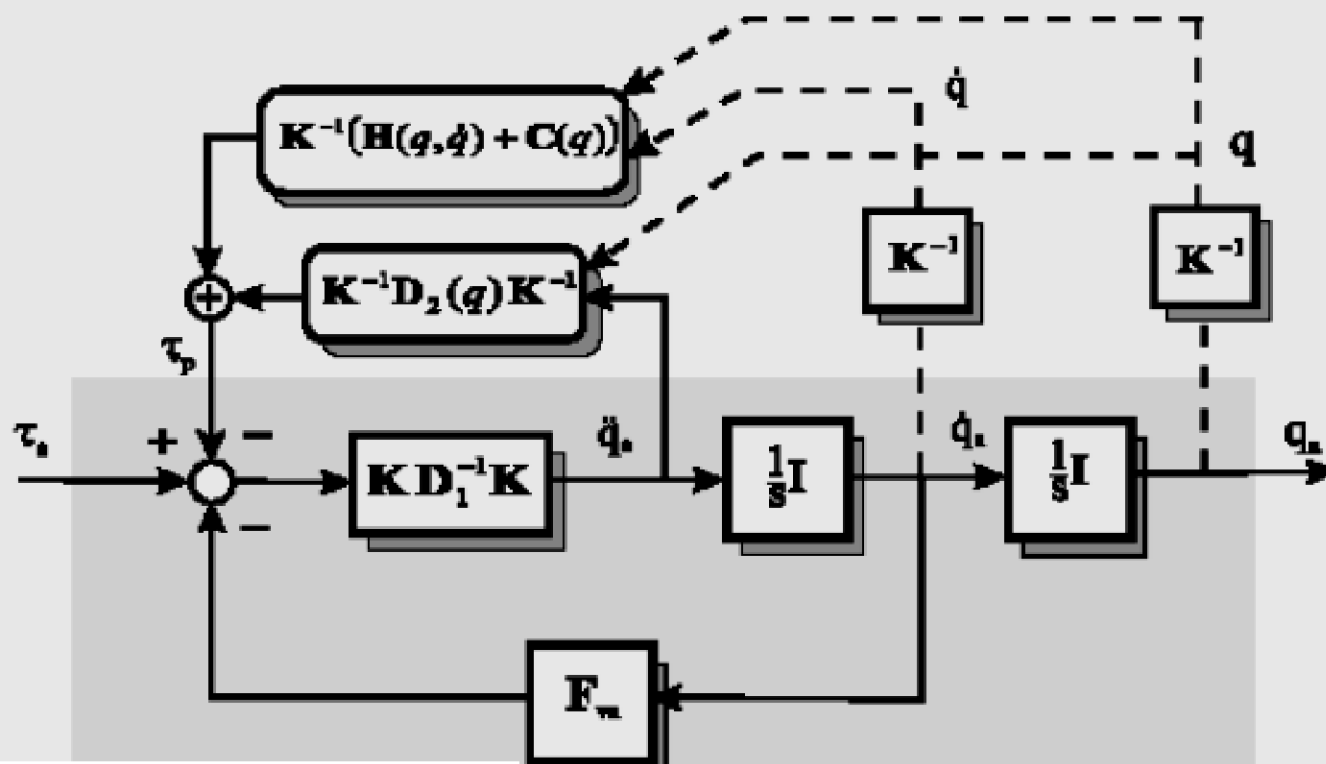




# CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducción

$$q_a = K q$$

$K$  = matriz diagonal de los factores de reducción,  $k_{ii} > 1$

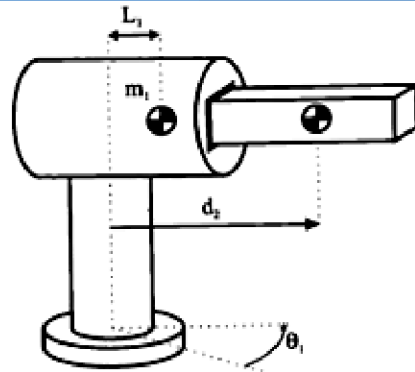


$$\tau_a = K^{-1}D_1K^{-1}\ddot{q}_a + \underbrace{K^{-1}D_2K^{-1}\dot{q}_a + K^{-1}h + K^{-1}c}_{\tau_p}$$

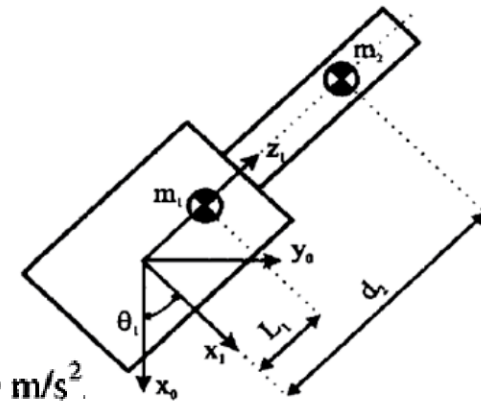
Si los factores de reducción son suficientemente grandes:  
 $\tau_p \ll \tau_a$ , con lo que puede considerarse el movimiento de cada articulación **desacoplado** del movimiento del resto de las articulaciones

### CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducci3n

#### UN EJEMPLO



- Ejemplo:
- $K_{11} = k_{22} = 100$
- $m_1=10, m_2=1$
- $L_1=0.1$
- $g=10$



$$m_1 = 10 \text{ kg} , m_2 = 1 \text{ kg} , L_1 = 0.1 \text{ m} , g = 10 \text{ m/s}^2$$

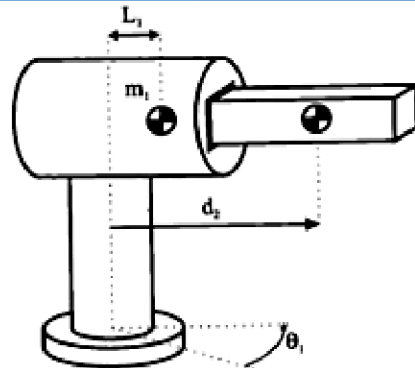
$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} m_1 L_1^2 + m_2 d_2^2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 + d_2^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 2d_2 m_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ -d_2 m_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2d_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ -d_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} m_1 g L_1 C_1 + m_2 g d_2 C_1 \\ m_2 g S_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + d_2) 10 C_1 \\ 10 S_1 \end{bmatrix}$$



# CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducci3n

## UN EJEMPLO



$m_1 = 10 \text{ kg}$  ,  $m_2 = 1 \text{ kg}$  ,  $L_1 = 0.1 \text{ m}$  ,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ .

- Ejemplo:
- $K_{11} = k_{22} = 100$
- $m_1=10, m_2=1$
- $L_1=0.1$
- $g=10$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_{a1} \\ d_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-2} \theta_{a1} \\ 10^{-2} d_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0.1 + d_2^2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{D}_1 \mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 \\ 0 & 10^4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} 10^{-4} d_2^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-8} d_{a2}^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tau_a = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{D}_1 \mathbf{K}^{-1} \ddot{\mathbf{q}}_a + \underbrace{\mathbf{K}^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{K}^{-1} \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h} + \mathbf{K}^{-1} \mathbf{c}}_{\tau_p}$$

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} d_2^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

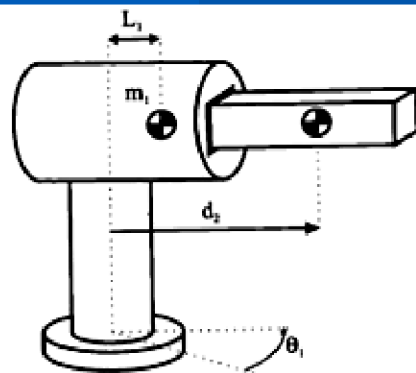




# CONTROL MONOARTICULAR:

## Influencia del factor de reducción

### UN EJEMPLO



$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \mathbf{K}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_{a1} \\ d_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-2} \theta_{a1} \\ 10^{-2} d_{a2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} d_2^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} \mathbf{D}_1^{-1} \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 \\ 0 & 10^4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} 10^{-4} d_2^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-8} d_{a2}^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 2 \cdot 10^{-2} d_2 \dot{\theta}_1 \dot{d}_2 \\ -10^2 d_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cdot 10^{-8} d_{a2} \dot{\theta}_{a1} \dot{d}_{a2} \\ -10^{-8} d_{a2} \dot{\theta}_{a1}^2 \end{bmatrix}$$

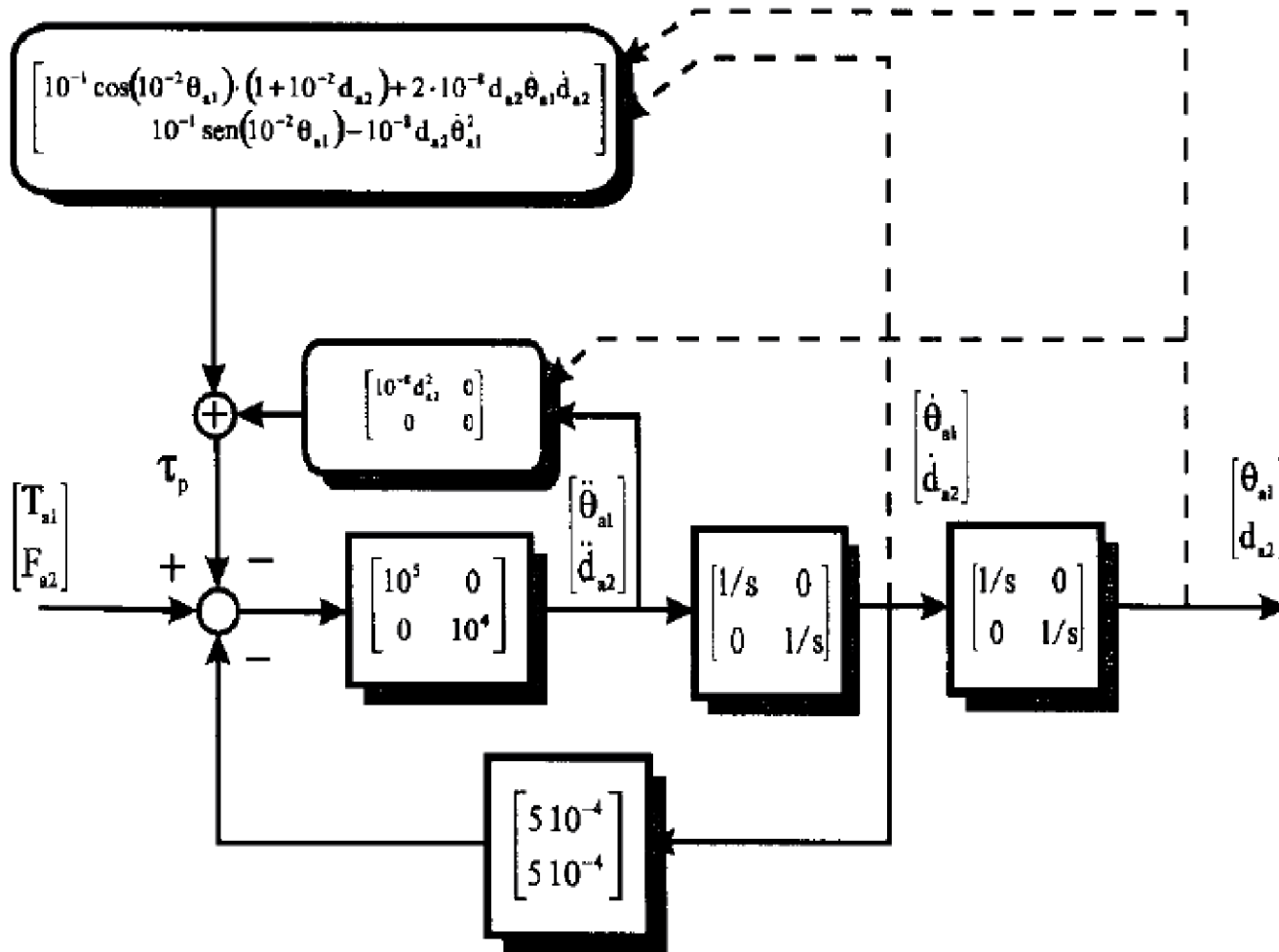
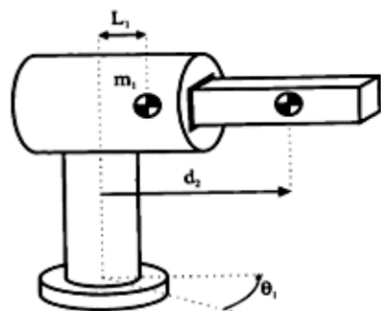
$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 10^{-1} C_1 (1 + d_2) \\ 10^{-1} S_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-1} \cos(10^{-2} \theta_{a1}) (1 + 10^{-2} d_{a2}) \\ 10^{-1} \sin(10^{-2} \theta_{a1}) \end{bmatrix}$$

$$\tau_a = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{D}_1 \mathbf{K}^{-1} \ddot{\mathbf{q}}_a + \underbrace{\mathbf{K}^{-1} \mathbf{D}_2 \mathbf{K}^{-1} \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{K}^{-1} \mathbf{h} + \mathbf{K}^{-1} \mathbf{c}}_{\tau_p}$$

$$\mathbf{F}_{va} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{F}_v \mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} 10^{-4} f_{v1} \\ 10^{-4} f_{v2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 \cdot 10^{-4} \\ 5 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$



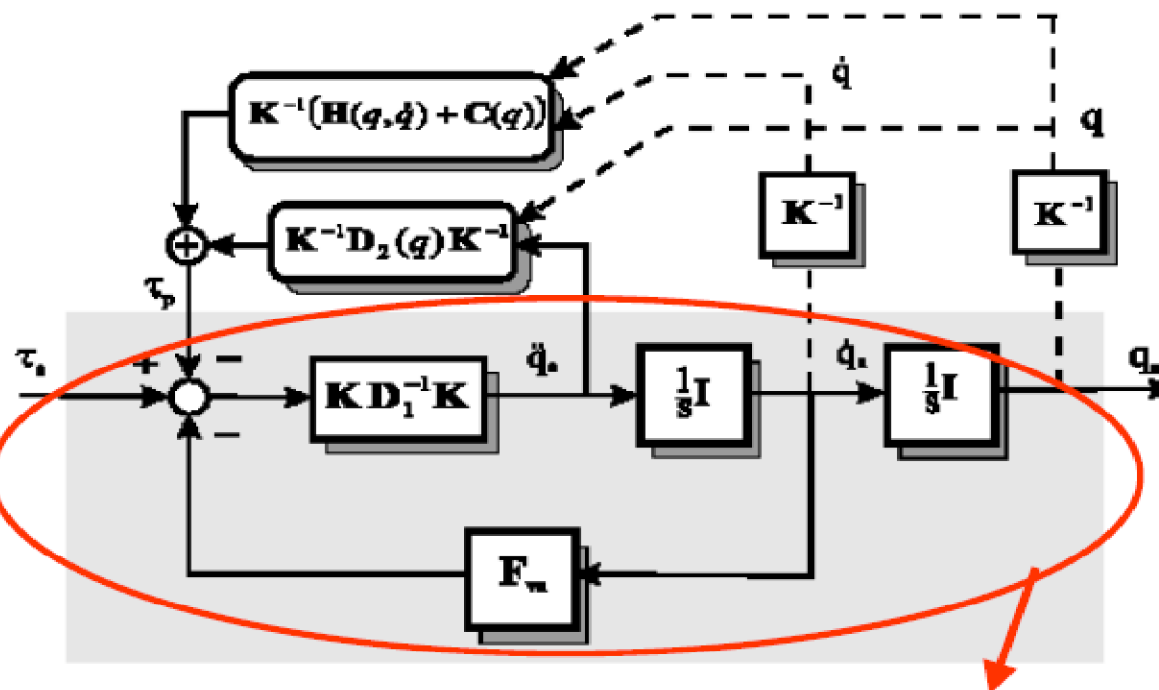
### CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducción



# CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducci3n

$$q_a = K q$$

$K$  = matriz diagonal de los factores de reducci3n,  $k_{ii} > 1$



Efecto sobre la articulaci3n “i” debido al par proporcionado por el propio actuador “i”

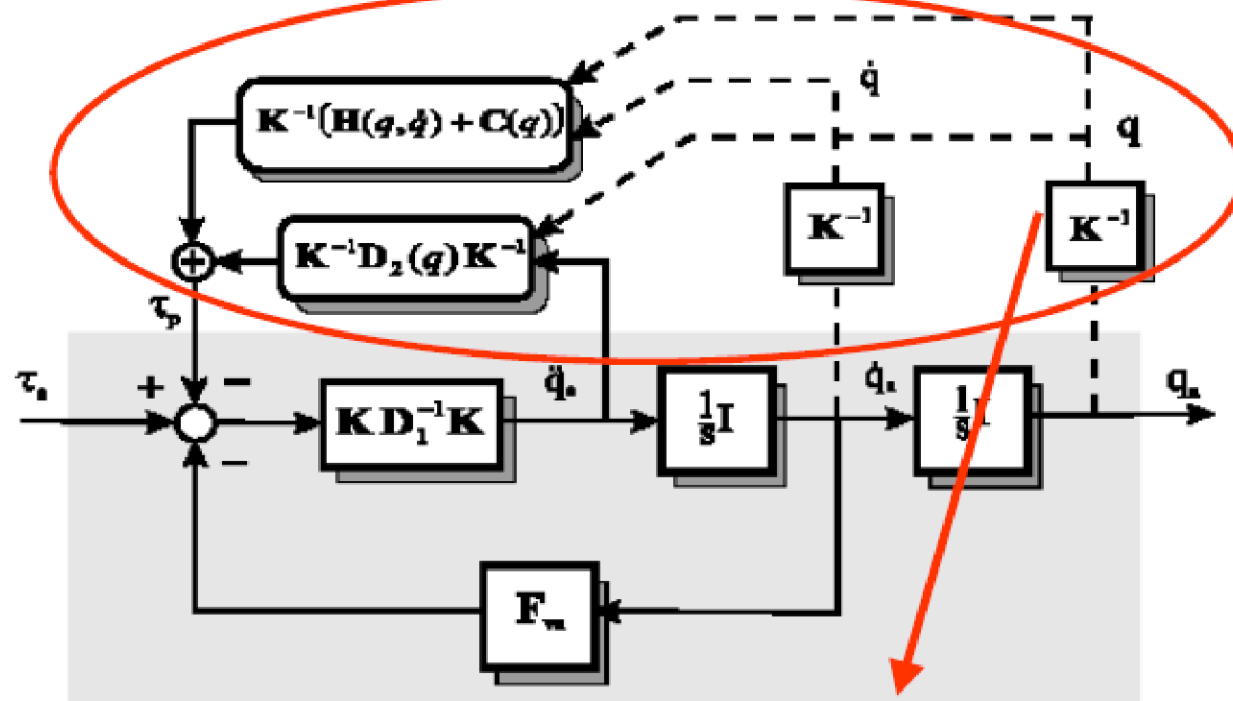




# CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducción

$$q_a = K q$$

$K$  = matriz diagonal de los factores de reducción,  $k_{ii} > 1$



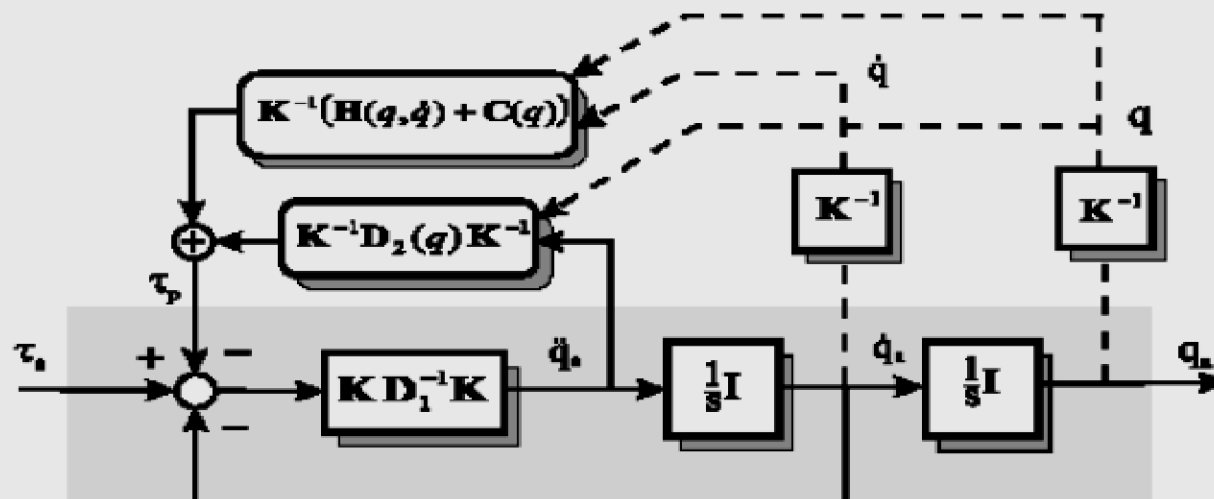
Par perturbador  $\tau_p$  sobre la articulación "i" debido al movimiento de los demás ejes



# CONTROL MONOARTICULAR: Influencia del factor de reducción

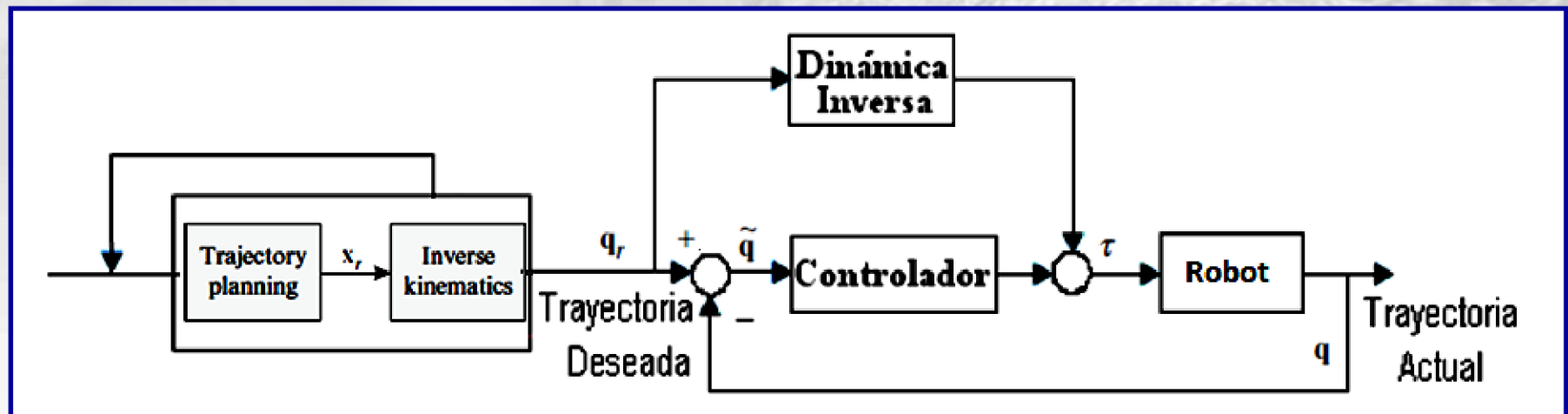
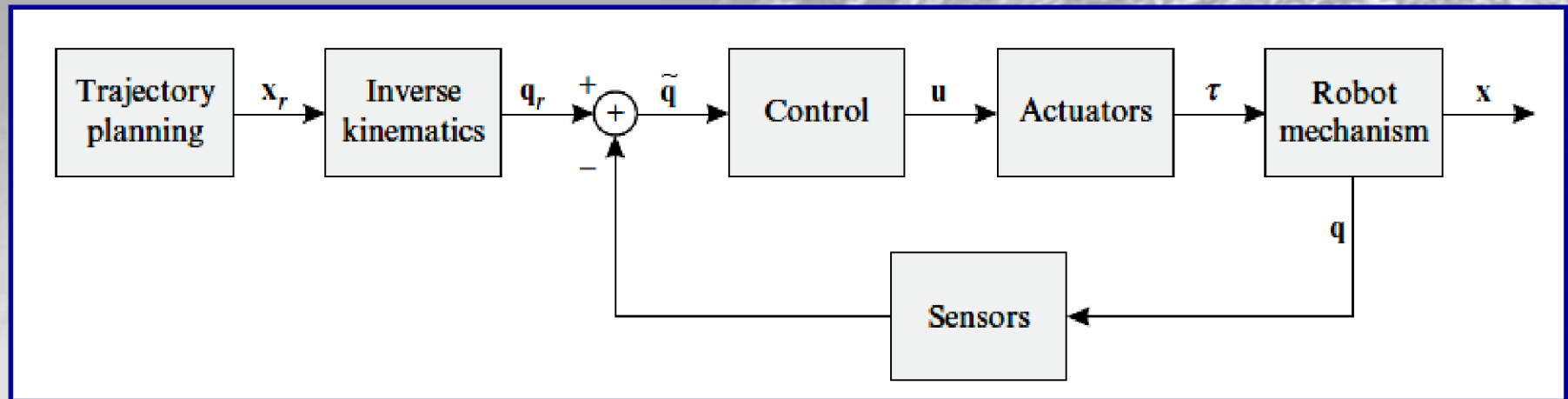
$$q_a = K q$$

$K$  = matriz diagonal de los factores de reducción,  $k_{ij} > 1$



- factor reducción  $\nearrow \nearrow \nearrow$  ( $K$  grande)  $\Rightarrow$  se puede considerar el modelo del robot como “desacoplado”, ya que el par perturbador  $\tau_p$  es casi nulo.
- Sin embargo, un factor de reducción muy elevado, provoca inconvenientes: aumento de rozamiento, holguras,...

## MODELO DE CONTROL DINÁMICO



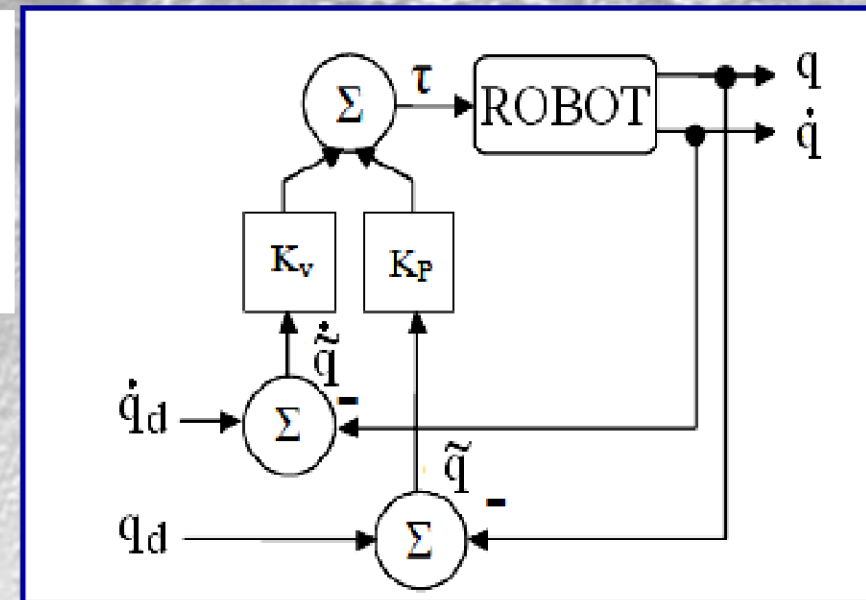


### CONTROL PD

Robot: Representa la Dinámica Directa.

Controlador PD (Control Proporcional-Derivativo), este tipo de control tan sencillo es suficiente para garantizar que en el estado estacionario el error sea cero, es el control clásico de los manipuladores robóticos,

➡ se utiliza para controlar la posición de una articulación



En general, este tipo de controlador se diseña suponiendo que los robots son caracterizados matemáticamente por medio de ecuaciones dinámicas independientes para cada articulación. Este hecho puede repercutir en una prestación limitada del sistema de control para robots modernos, caracterizados en realidad por ecuaciones dinámicas acopladas. No obstante, esta estrategia de control puede dar resultados aceptables bajo ciertas condiciones

➡ **CONTROL PD** esta estrategia de control es aplicada comúnmente en el control de la posición angular de motores de corriente directa. Está formado no sólo por el término proporcional al error de posición  $\tilde{q}$ , sino que también por otro término proporcional a su derivada, al error de velocidad  $\dot{\tilde{q}}$



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

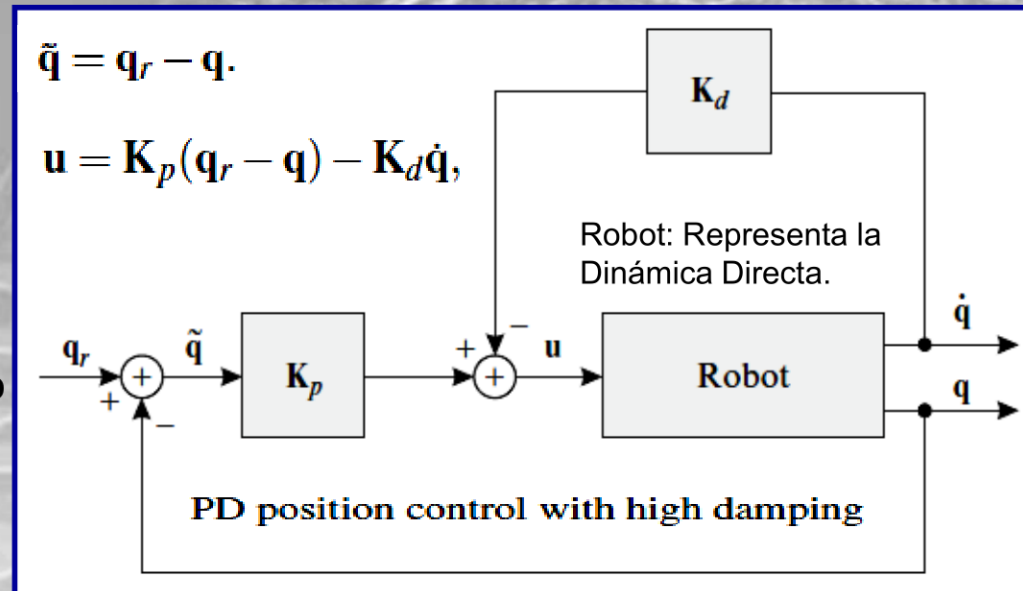
## Control de Robots. Monoarticular

### CONTROL PD amortiguado

El control se basa en el cálculo del error de posición y determinación de los parámetros de control, que permiten reducir o suprimir el error.

El error de posición se reduce para cada articulación por separado, significa que se deben desarrollar tantos controladores como "n" grados de libertad tenga el robot.

Las posiciones referencia " $q_r$ " se comparan con las posiciones reales " $q$ " del robot.



Un robot tiene varios grados de libertad, el error  $\tilde{q}$  se expresa como un vector,  $K_p$  es una matriz diagonal de las ganancias de todos los controladores de articulación. Como el accionamiento de los motores del robot es proporcional al error, puede ocurrir que el robot sobrepase la posición deseada, en vez de detenerse. El lazo cerrado de velocidad provoca el amortiguamiento sistema.

La ley de control:  $u$  representa las entradas de control, es decir, las fuerzas o pares de fuerzas que deben ser proporcionados por los actuadores.

$$u = K_p(q_r - q) - K_d\dot{q},$$

A velocidades altas de los movimientos del robot, el lazo de control de la velocidad reduce el accionamiento de la articulación y el amortiguando el sistema asegura la estabilidad del robot.

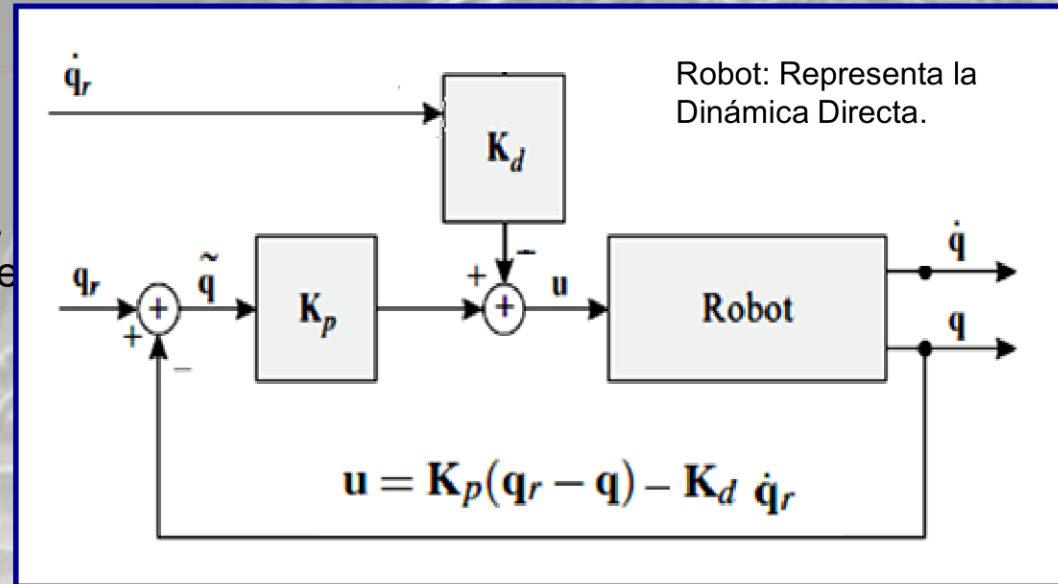


# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control de Robots. Monoarticular

### CONTROL PD amortiguado compensado por velocidad Pre alimentado

Se busca que la trayectoria deseada coincida con la de salida en cada instante. Ese comportamiento del controlador puede conseguirse si se ajusta por error de posición y pre-alimenta por velocidad antes de aplicar la señal de control. La señal de velocidad se obtiene como la derivada numérica de la posición. El sistema se compensa por adelanto.



La diferencia entre la posición de referencia “ $q_r$ ” y “ $q$ ” real se complementa con el aporte de la velocidad de referencia “ $\dot{q}_r$ ”

$$u = K_p(q_r - q) - K_d \dot{q}_r$$

Controlador de posición PD consiste en determinar las matrices  $K_p$  y  $K_d$ . Para una respuesta rápida, las ganancias de  $K_p$  deben ser altas. Con  $K_d$  se obtiene un amortiguamiento crítico de los sistemas del robot. La amortiguación crítica, si  $K_d$  es elevada genera inestabilidad.

### CONTROL MONOARTICULAR

El comportamiento de cada controlador es totalmente independiente de los controladores pertenecientes a las otras articulaciones del mecanismo del robot.





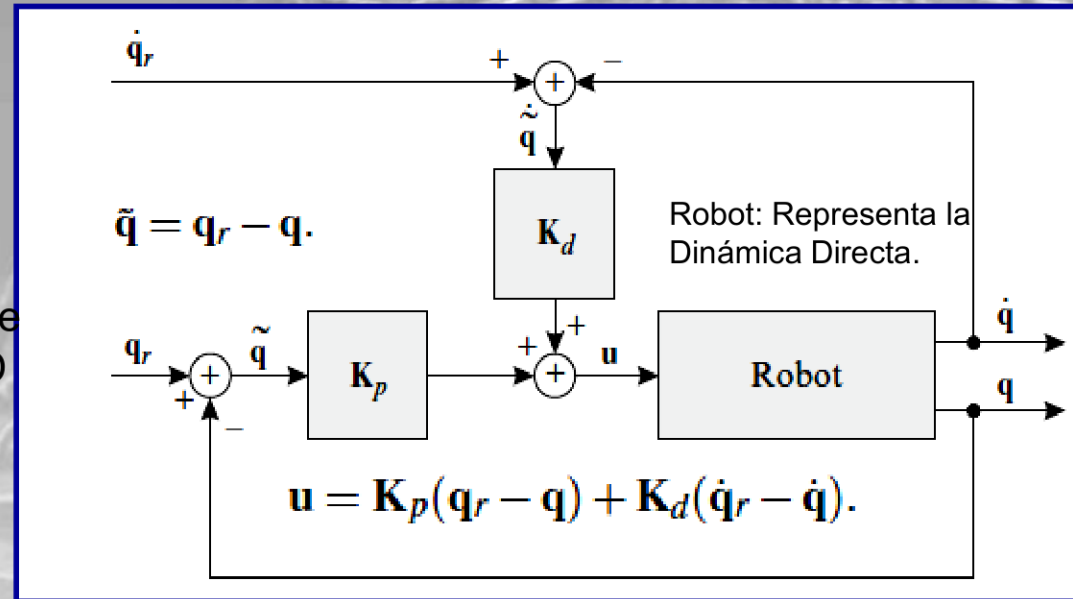
## UNIDAD 3 - ROBOTICA II

### Control de Robots. Monoarticular

#### CONTROL PD amortiguado compensado por velocidad

#### Corrección de posición, velocidad

Hay un alto amortiguamiento del sistema en la parte más rápida de la trayectoria. Ese comportamiento del controlador puede ser evitado actualizando el controlador PD con la referencia velocidad. Esta señal se obtiene como la derivada numérica de la posición. El error de velocidad se utiliza como entrada de control



La diferencia entre la velocidad de referencia " $\dot{q}_r$ " y " $\dot{q}$ " se utiliza en lugar toda la velocidad " $\dot{q}$ ", se reduce el efecto amortiguador.

$$u = K_p(q_r - q) + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}).$$

Controlador de posición PD consiste en determinar las matrices  $K_p$  y  $K_d$ . Para una respuesta rápida, las ganancias de  $K_p$  deben ser altas. Con  $K_d$  se obtiene un amortiguamiento crítico de los sistemas del robot. La amortiguación crítica garantiza una respuesta rápida sin sobrepasar.

#### CONTROL MONOARTICULAR

El comportamiento de cada controlador es totalmente independiente de los controladores pertenecientes a las otras articulaciones del mecanismo del robot.





# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## CONTROL PD amortiguado Compensado por Gravedad

Modelo dinámico del Robot. Modelo simplificado. Sólo la fricción viscosa  $F_v$  se considera  $B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F_v\dot{q} + g(q) = \tau$ .

Al conocer el modelo dinámico se pueden predecir las fuerzas que son necesarias para el desempeño de un movimiento del robot. Estas fuerzas se aplican en los motores del robot independientemente de la señal de error de posición.

Como la fuerza se calcula a partir del error de posición, esto significa que en general el error nunca es igual a cero.

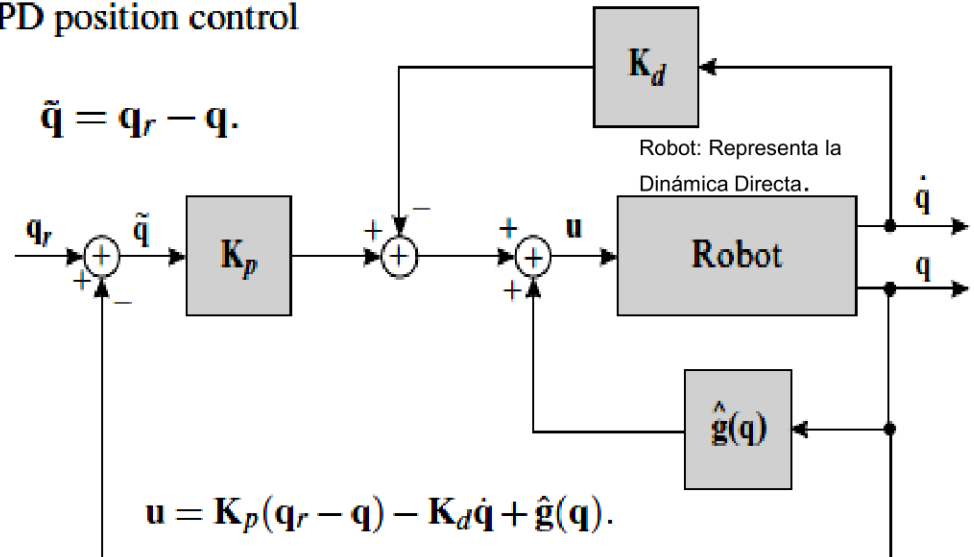
En condiciones cuasi-estáticas, cuando el robot se mueve lentamente, se asume cero aceleraciones " $\ddot{q} \approx 0$ " y velocidades " $\dot{q} \approx 0$ ". El modelo dinámico se simplifica

$$\tau \approx g(q).$$

Un bucle de control adicional, calcula las fuerzas gravitatorias de la posición real del robot y las añade directamente a la salida del controlador.

$$u = K_p(q_r - q) - K_d\dot{q} + \hat{g}(q).$$

PD position control



Al introducir la compensación por gravedad, la carga de reducir los errores causados por gravedad, se retira del controlador PD. De esta manera los errores en la trayectoria se reducen significativamente.

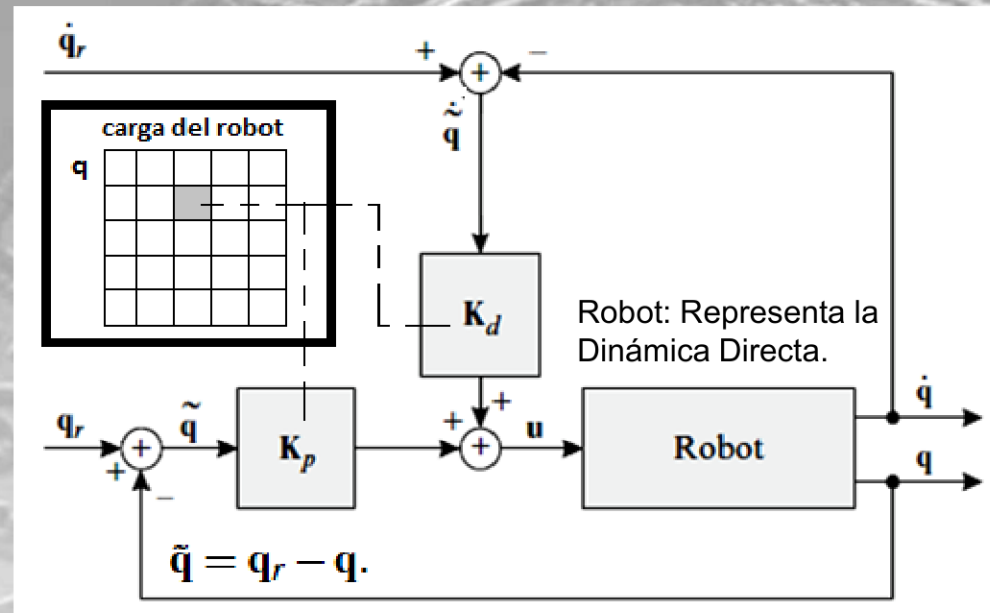


# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control de Robots. Monoarticular

### CONTROL PD amortiguado compensado por velocidad Planificador de Ganancias

Hay un alto amortiguamiento del sistema en la parte más rápida de la trayectoria. Ese comportamiento del controlador puede ser evitado actualizando el controlador PD con la referencia velocidad. Una mejora es modificar las Ganancias  $K_p$  y  $K_d$  para lograr un sistema más eficiente, dado que:



**Problema:** los parámetros del modelo y la magnitud de los pares perturbadores a compensar cambian con el punto de trabajo del robot.

$$u = K_p(q_r - q) + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}).$$

El Controlador de posición PD por Planificador de Ganancias consiste en cambiar los parámetros del controlador,  $K_p$  y  $K_d$  modificando el punto de trabajo. Se recurre a una tabla pre-calculada de doble entrada que contiene los valores de  $K_p$  y  $K_d$  en función de la carga y las coordenadas generalizadas.

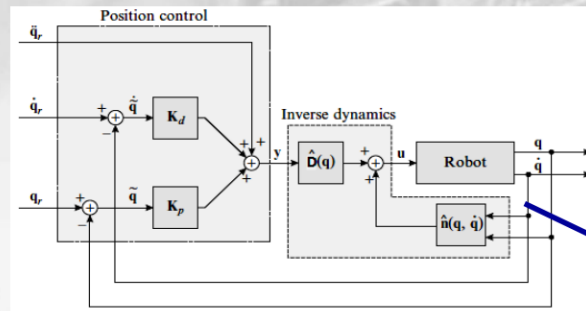
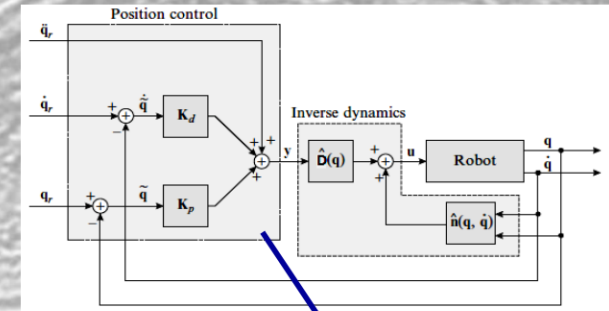
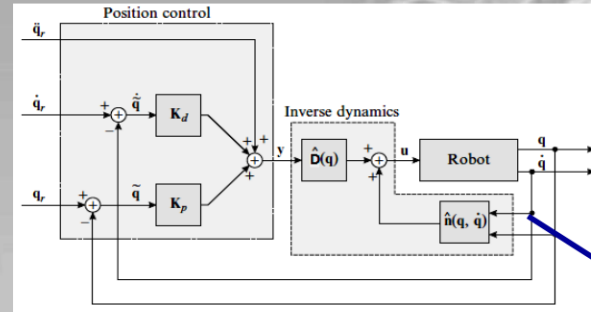
### CONTROL MONOARTICULAR

El comportamiento de cada controlador es totalmente independiente de los controladores pertenecientes a las otras articulaciones del mecanismo del robot.



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## Control Multiarticular de Robots



### Importante:

Se recomienda el uso de bibliografía recomendada en el Programa de la Asignatura para el estudio de los temas. Al final del material se transcribe la bibliografía recomendada.





### CONTROL MULTIARTICULAR

### DESACOPLAMIENTO POR INVERSION DEL MODELO

**Control del robot basado en la dinámica inversa.**

Las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de un robot son No lineales. **Se puede suponer que los pares  $\tau$ , generados por los actuadores (motores) son igual a las salidas de control  $u$ .**

Se puede escribir:

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{u}.$$

Donde:

D Matriz de Inercia,

C Matriz de Coriolis,

G Matriz de Gravedad

Fv Fricción Viscosa

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}) (\mathbf{u} - (\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}))).$$



$$\mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}).$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} = \mathbf{u}.$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}) (\mathbf{u} - \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$$

Se define una nueva variable  $\mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  que comprende todos los componentes dinámicos excepto el componente inercial

**Nota2:** En los actuadores eléctricos el torque se obtiene como resultado de aplicar una señal de control, tipo  $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K} \mathbf{u}$ .





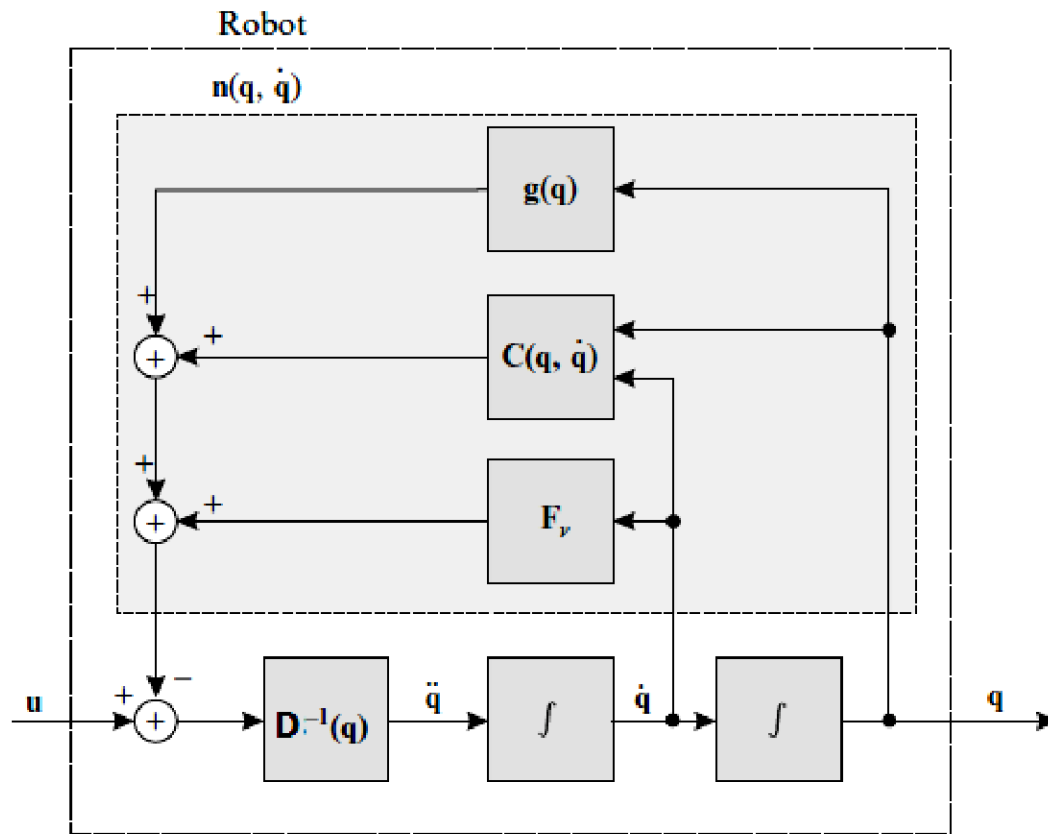
# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## CONTROL MULTIARTICULAR

### Control de Robots. Multiarticular

### DESACOPPLAMIENTO POR INVERSION DEL MODELO

Control del robot basado en la dinámica inversa.



Modelo dinámico directo del mecanismo del robot

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{u}.$$


El modelo dinámico directo del robot describe los movimientos del robot bajo la influencia de los pares y fuerzas.

Se expresa la aceleración  $\ddot{\mathbf{q}}$  de la ecuación

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}) (\mathbf{u} - (\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}))).$$

Si se considera que:

$$\mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}).$$


$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}) (\mathbf{u} - \mathbf{n}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}))$$

Al integrar la aceleración, teniendo en cuenta el valor de velocidad inicial, se obtiene la velocidad del movimiento del robot. Mediante la integración de la velocidad, teniendo en cuenta la posición inicial, se calculan las posiciones reales en las articulaciones del robot.

# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

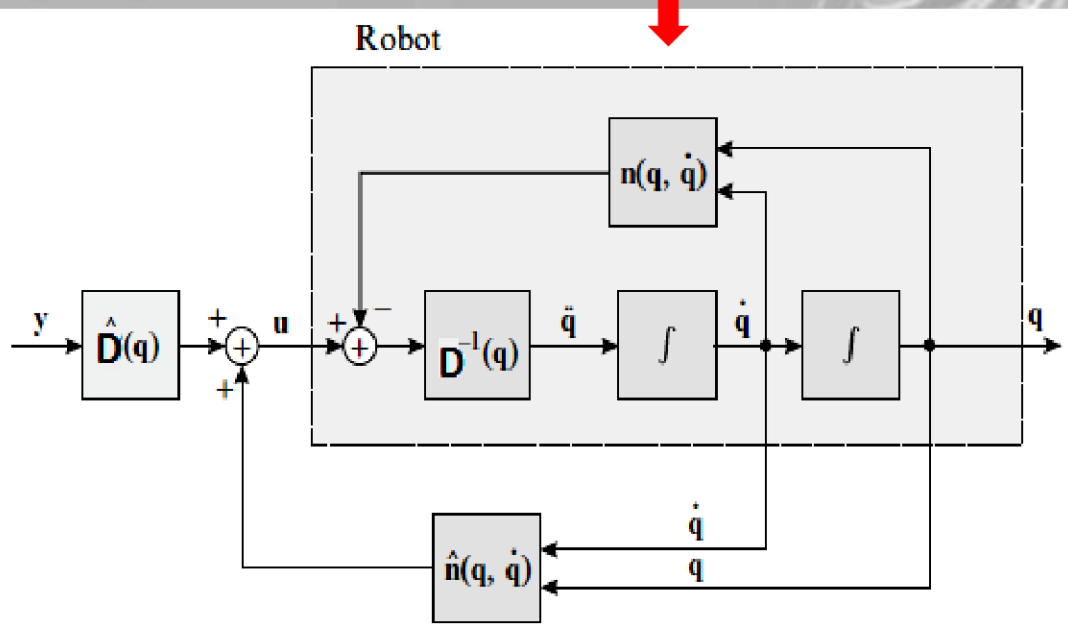
## CONTROL MULTIARTICULAR

### Control de Robots. Multiarticular

### DESACOPLAMIENTO POR INVERSION DEL MODELO

Control del robot basado en la dinámica inversa.

Modelo dinámico directo



Se puede suponer que:

En el Modelo la matriz inercial

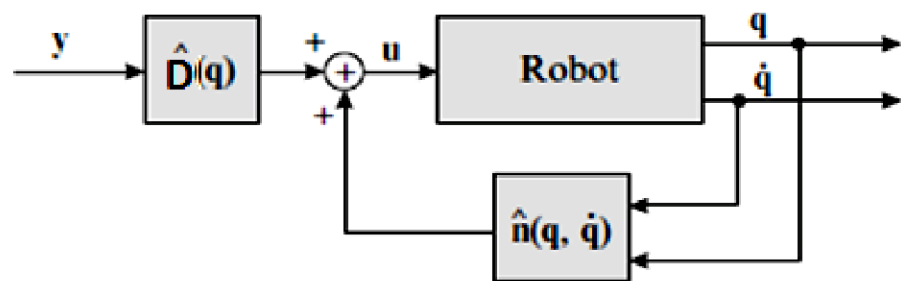
$\hat{D}(q)$  es una aproximación de los valores reales  $D(q)$ , al igual que

$\hat{n}(q, \dot{q})$  con respecto a  $n(q, \dot{q})$

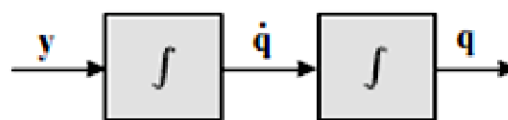
$$\hat{n}(q, \dot{q}) = \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{F}_v\dot{q} + \hat{g}(q).$$

La salida  $u$  del controlador es:

$$u = \hat{D}(q)y + \hat{n}(q, \dot{q}),$$



$\equiv$



Linearización del sistema de control mediante la implementación del modelo dinámico inverso.



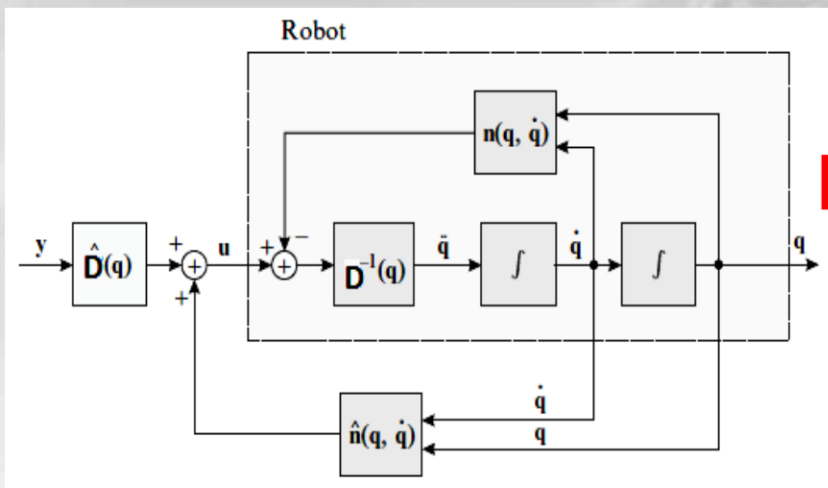
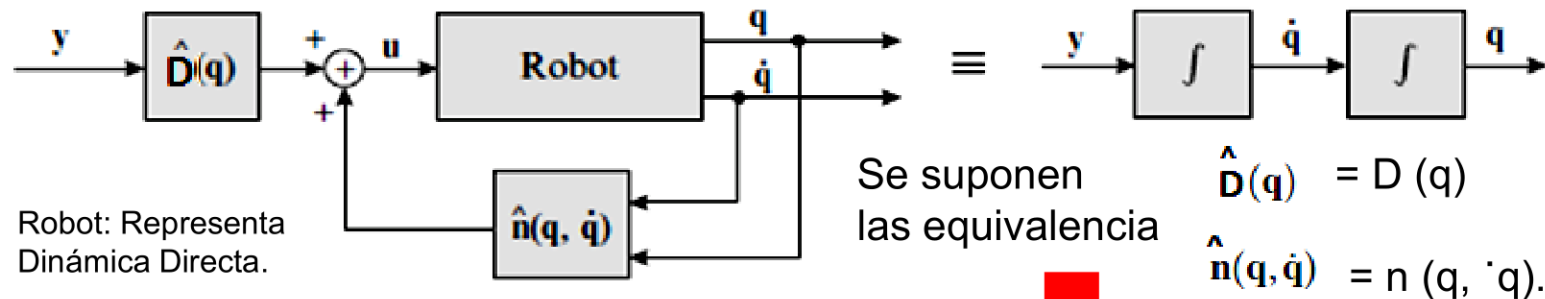
# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## CONTROL MULTIARTICULAR

### Control de Robots. Multiarticular

### DESACOPLAMIENTO POR INVERSION DEL MODELO

Control del robot basado en la dinámica inversa.



Las señales  $n(q, \dot{q})$  se sustraen, como una se presenta con un positivo y el otro con un signo negativo. De manera similar, el producto de las matrices  $D(q)$  y  $D^{-1}(q)$  da lugar a una matriz unitaria

Mediante la implementación de la dinámica inversa el sistema de control está linealizado, ya que sólo hay dos integradores entre la entrada y la salida  $q$ .

**El sistema es Lineal y desacoplado.**





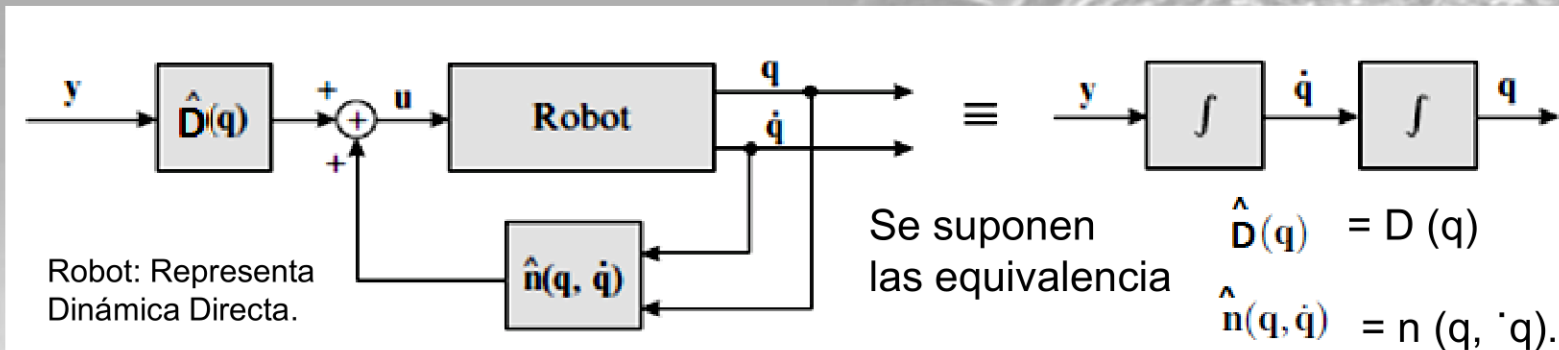
# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## CONTROL MULTIARTICULAR

### Control de Robots. Multiarticular

### DESACOPLAMIENTO POR INVERSION DEL MODELO

Control del robot basado en la dinámica inversa.



En un caso ideal, basta con determinar las aceleraciones de la articulación deseadas como las segundas derivadas de las posiciones de articulación deseadas y el sistema de control seguirán las trayectorias conjuntas prescritas



$$y = \ddot{q}.$$

Como No se tiene un modelo dinámico completamente preciso del robot, siempre se producirá una diferencia entre la posición deseada y la posición real. Además, aumentará con el tiempo. El error de posición y velocidad se define por



$$\tilde{q} = q_r - q,$$

$$\dot{\tilde{q}} = \dot{q}_r - \dot{q}.$$

El vector “y”, que tiene las características de aceleración, puede escribirse



$$y = \ddot{q}_r + K_p(q_r - q) + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}).$$





# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## CONTROL MULTIARTICULAR

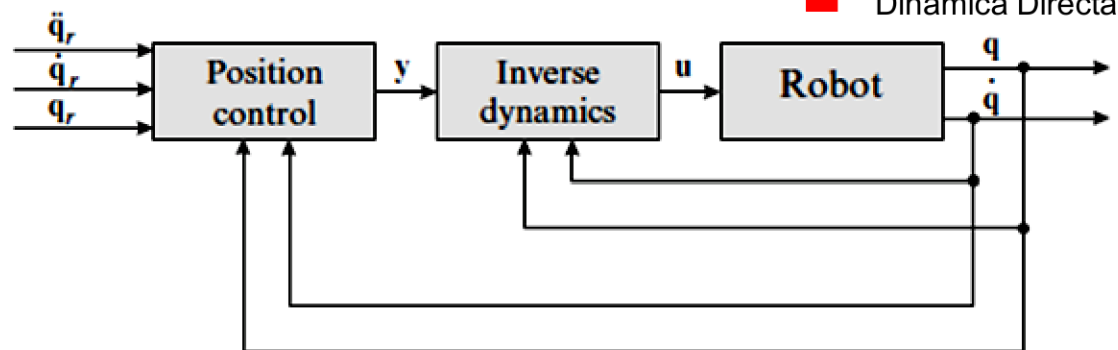
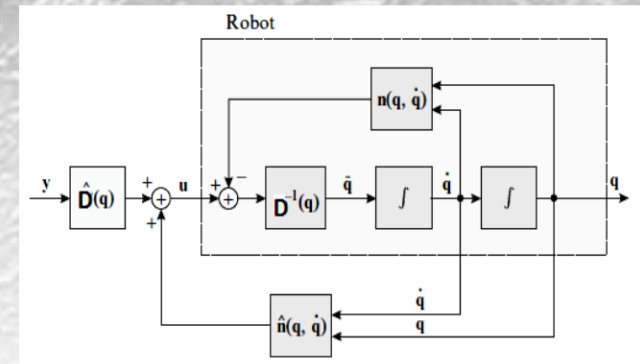
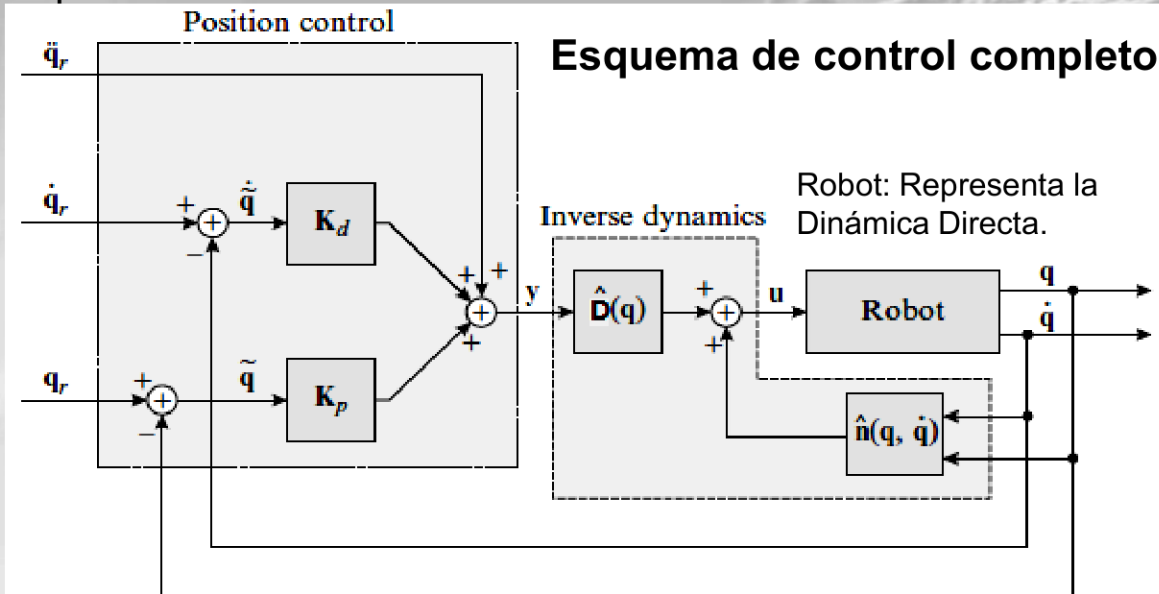
### Control de Robots. Multiarticular

### DESACOPLAMIENTO POR INVERSION DEL MODELO

Control del robot basado en la dinámica inversa.

“y” es igual a una aceleración de referencia  $\ddot{q}_r$  y dos señales contribuyentes que dependen de los errores de posición y velocidad. Estas dos señales suprimen el error debido a la dinámica imperfecta del modelo.

$$y = \ddot{q}_r + K_p(q_r - q) + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}).$$



# UNIDAD 3 - ROBOTICA II

## CONTROL MULTIARTICULAR

### Control de Robots. Multiarticular

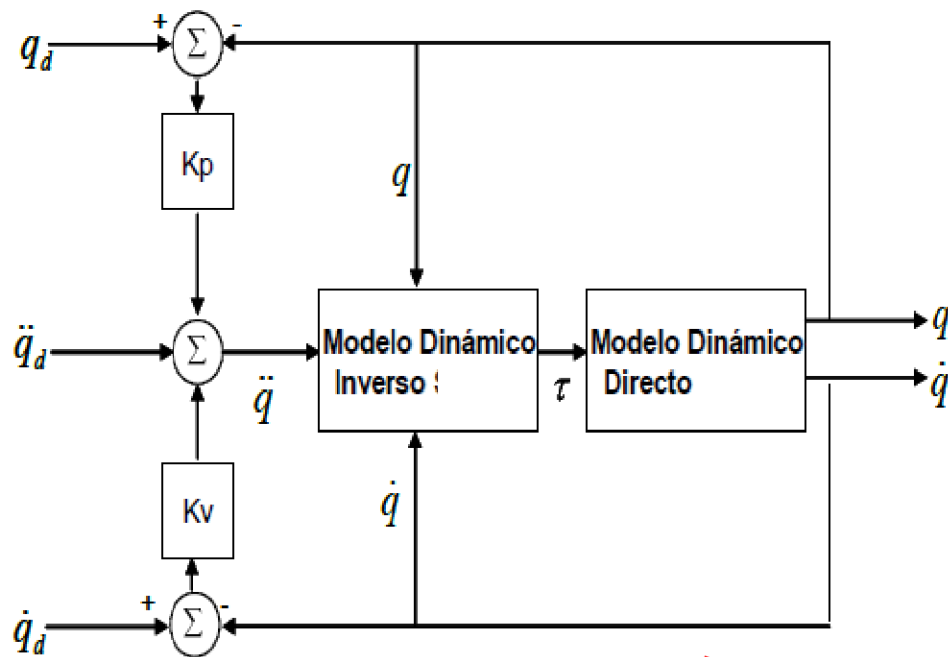
### DESACOPLAMIENTO POR INVERSION DEL MODELO

Control del robot basado en la dinámica inversa.

“y” es igual a una aceleración de referencia  $\ddot{q}_r$  y dos señales contribuyentes que dependen de los errores de posición y velocidad. Estas dos señales suprimen el error debido a la dinámica imperfecta del modelo.

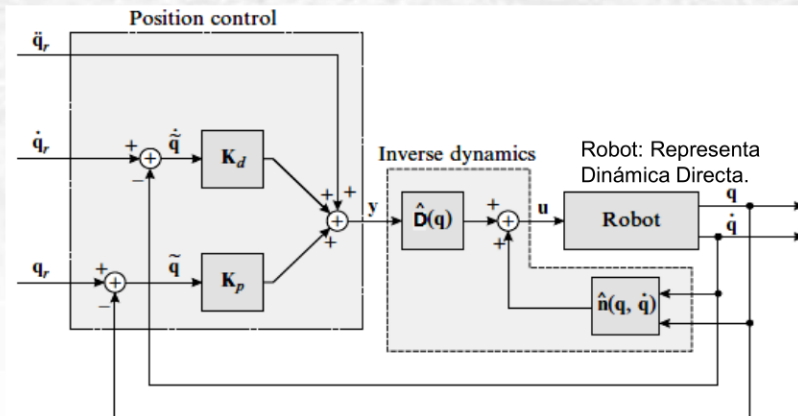
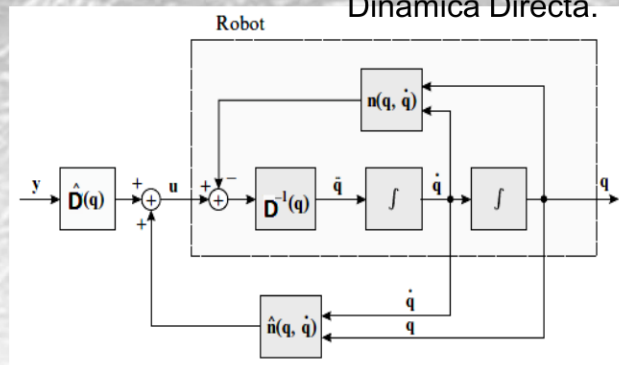
Esquema de control completo

$$y = \ddot{q}_r + K_p(q_r - q) + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}).$$



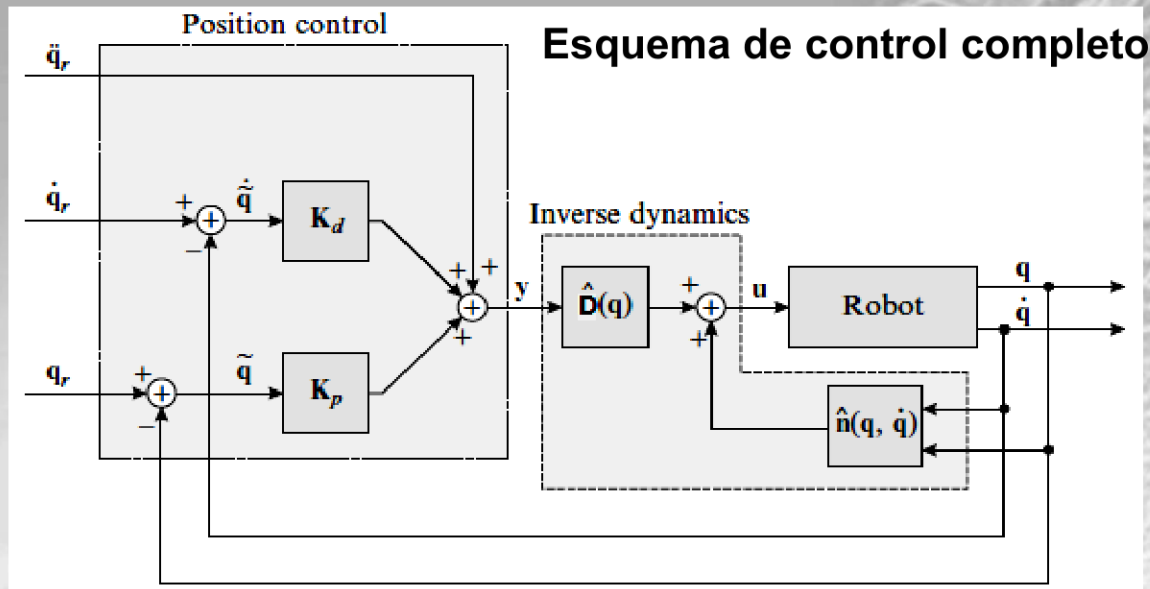
Otra Forma de ver lo Mismo

Modelo Directo Robot: Representa la Dinámica Directa.



### CONTROL ADAPTATIVO MULTIARTICULAR

Control del robot basado en la dinámica inversa.



$$y = \ddot{q}_r + K_p(q_r - q) + K_d(\dot{q}_r - \dot{q}).$$

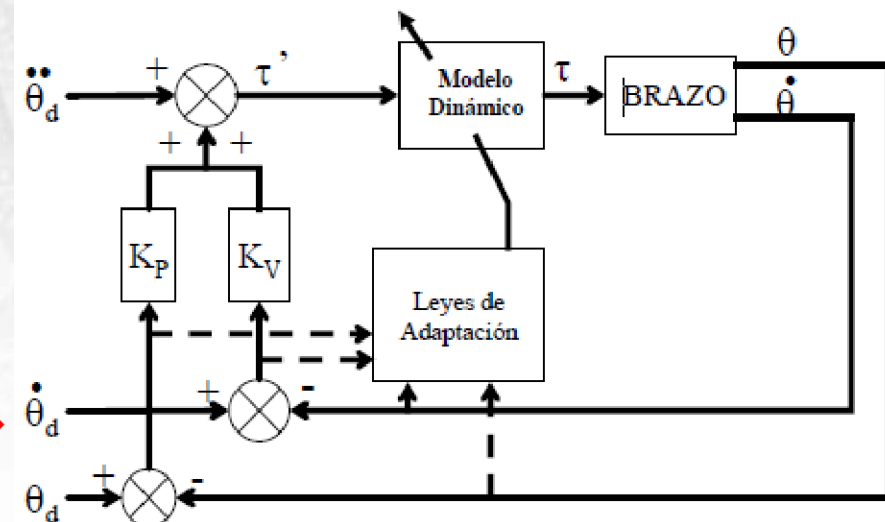
**Esquema básico  
Control Adaptativo**

#### Control Adaptativo

Debido a que los parámetros del manipulador no se conocen con exactitud, los parámetros del modelo no coinciden con la realidad provocando errores en el control. Dichos errores pueden usarse para intentar corregir el modelo. Este es un tipo de Control Adaptativo. Basado en la ley de control.

**Esquema Modelo de Referencia Adaptativo** →

Modelo conceptual de Control Adaptativo



### ESTRATEGIAS DE CONTROL.

#### Otras Estrategias de Control a Considerar.

Conociendo el modelo generar Dinámico es posible considerar otras formas de controlar. Las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de un robot son no lineales.

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{A}(q) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(q, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{Q}(q) + \mathbf{F}_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_s \text{sign}(\dot{\mathbf{q}})$$



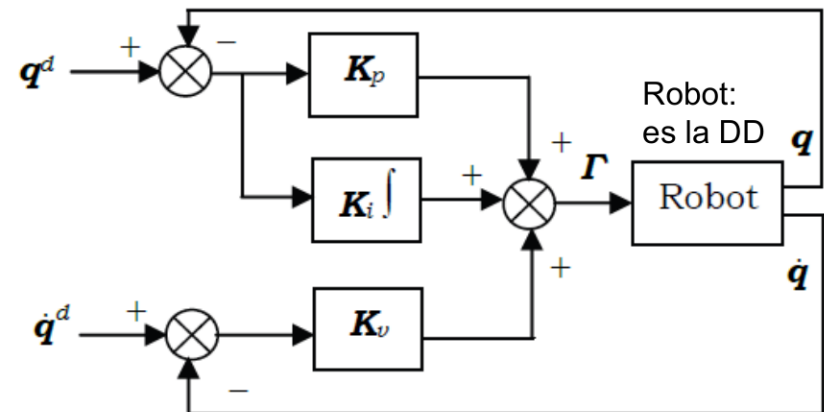
Si no se utiliza un modelo matemático del robot:  
Control PID, control difuso (*fuzzy*) u otro tipo de control general (IA)

Si se utiliza un modelo matemático del robot:  
Control por par calculado (CTC), control predictivo, control robusto, control adaptativo, entre otros.

#### CONTROL CLASICO PID

Considerado como un sistema lineal, cada articulación es controlada por un control descentralizado de tipo PID con ganancias constantes. Su ventaja es su facilidad de implementación y su bajo costo. En contraste se pueden encontrar malas precisiones y desplazamientos excesivos en el caso de movimientos rápidos

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{K}_p (\mathbf{q}^d - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_v (\dot{\mathbf{q}}^d - \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{K}_i \int (\mathbf{q}^d - \mathbf{q}) dt$$





### ESTRATEGIAS DE CONTROL.

#### Otras Estrategias de Control a Considerar.

Conociendo el modelo generador Dinámico es posible considerar otras formas de controlar. Las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de un robot son no lineales.

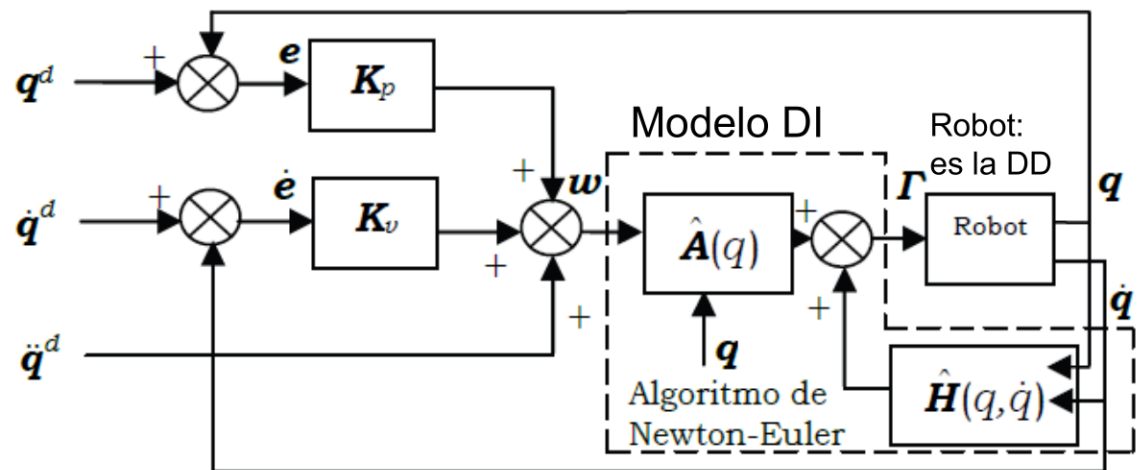
$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{A}(q) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(q, \dot{q}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{Q}(q) + \mathbf{F}_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_s \text{sign}(\dot{\mathbf{q}})$$

#### CONTROL DINAMICO (Es igual al Modelo de control Multiarticular)

Para evoluciones rápidas del robot y de gran precisión, se usa una ley de control más sofisticada, que tenga en cuenta las fuerzas de interacción dinámica. Una solución es el control por desacoplamiento no lineal, **control por par calculado** o simplemente, control dinámico. En inglés se lo conoce como CTC (*computed torque control*). Este tipo de control exige el cálculo del modelo dinámico en línea y el conocimiento de los valores numéricos de los parámetros dinámicos

$$(e = q^d - q)$$

$$w(t) = \ddot{q}^d + K_v(\dot{q}^d - \dot{q}) + K_p(q^d - q)$$



### ESTRATEGIAS DE CONTROL.

#### Otras Estrategias de Control a Considerar.

Conociendo el modelo generador Dinámico es posible considerar otras formas de controlar. Las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de un robot son no lineales.

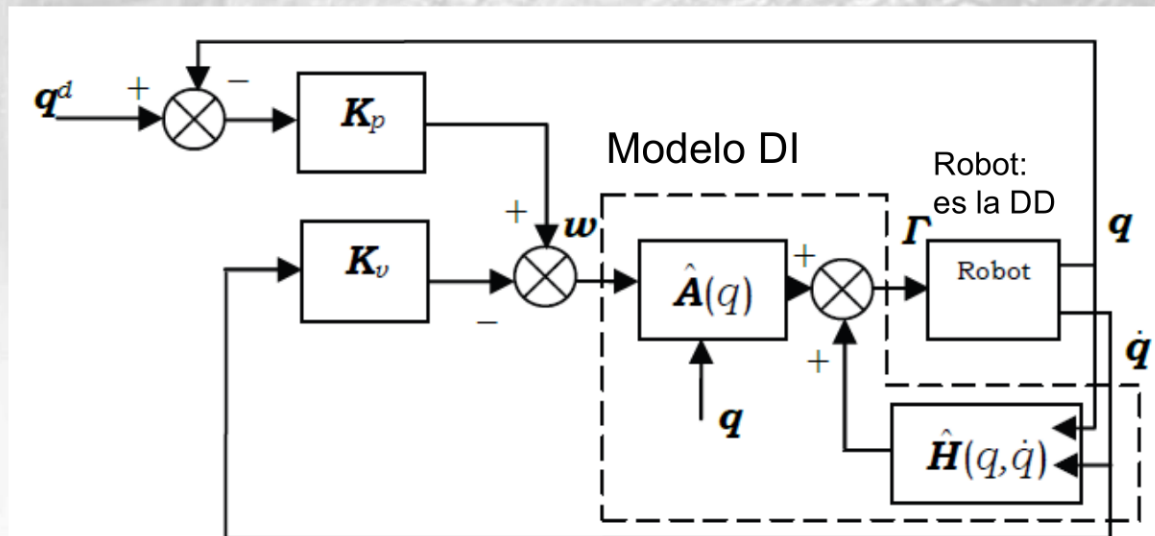
$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{A}(q)\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(q, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{Q}(q) + \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}_s \text{sign}(\dot{\mathbf{q}})$$



#### CONTROL POR POSICION DESEADA

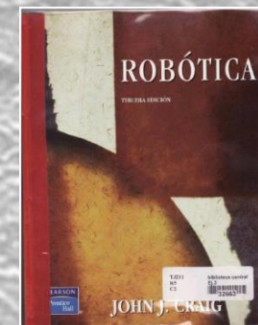
El objetivo es solo alcanzar la posición deseada del efector.

$$\mathbf{w}(t) = \mathbf{K}_p(\mathbf{q}^d - \mathbf{q}) - \mathbf{K}_v\dot{\mathbf{q}}$$



## Bibliografía Básica y de Referencia

Autor	Título	Editorial	Año	Ejemplares Biblioteca	Unid. Prog
A. Barrientos et all	Fundamentos de Robótica.	McGraw Hill	2007	1	1-2-3-6
B. Ollero	Robótica	Alfaomega	2007	1	2-3-4-5-6
J. Craig	Robótica.	Pearson	2006	1	2-3-4-6
J. Angulo Usategui et all	Introducción a la Robótica.	Paraninfo.	2005		1-2-4-6-7
Angulo Yesa, Martínez	Microrobótica.	Editorial Thomson.	2002	no	
Maloney Timothy	Electrónica Industrial Moderna. 5ªed.	Pearson	2006	1	1-4-6-7
R. Mott	Diseño de elementos de máquinas. 4ªed.	Pearson	2006	1	2
M. Groover, Weiss Nagel & N. Odrey	Robótica Industrial. Tecnología, Programación y Aplicaciones.	McGraw Hill	1989	1	1-2-3-4-5-6
J. Angulo	Robótica Práctica. Tecnologías y Aplicaciones.	Paraninfo	1986	1	1-2-3-4-6
García Lopez, Librán, González	Programación de Robots industriales	Universidad de Oviedo	2000	no	



## Bibliografía complementaria

Autor	Título	Editorial	Año	Ejemplares Biblioteca	Unid. Prog
F. Torres Medina	Robot y Sistemas sensoriales. Ed.	Pearson	2002		1-2-3-4-5-6-7
R. Kelly & V. Santibañez	Control de Movimientos de Robot Manipuladores.	Pearson	2003		3
M. Gomez et all	Teleoperación y Telerobótica.	Prentice Hall	2006		3-4-5-6
McGookin Euan	Robotic systems	Wiley-VCH	2012	no	
W. Bolton	Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. (3ªed.	Alfaomega	2006	1	3-4
F. Cembranos Nistal	Sistemas de Control Secuencial.	Thomson	2002	1	1-4-7
D. Poole	Algebra Lineal. Una Introducción Moderna. 2ªed.	Thomson	2007	1	3
W. Bolton	Instrumentación y control Industrial.	Paraninfo	1996	1	4