



RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar
DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

Title: Plataforma Experimental de Bajo Costo para el Control Desacoplado de un Robot Manipulador de 5 GDL

Author: Antonio, CONCHA-SÁNCHEZ, Juan Felipe, FIGUEROA-RODRÍGUEZ,
Andrés Gerardo, FUENTES-COVARRUBIAS, Ricardo, FUENTES-COVARRUBIAS

Editorial label ECORFAN: 607-8534
BCIERMMI Control Number: 2018-03
BCIERMMI Classification (2018): 251018-0301

Pages: 27
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.

244 – 2 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 | 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.

Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua



CONTENIDO

- Introducción.
- Arquitectura de la plataforma experimental.
- Cinemática del manipulador.
- Dinámica del manipulador con actuadores.
- Estimación paramétrica de los motores cd.
- Control PID.
- Observador de estados.
- Resultados experimentales.
- Conclusiones.



INTRODUCCIÓN.

- Se presenta una plataforma experimental educativa para el estudio de la cinemática, dinámica y control de un robot manipulador de 5 GDL con una pinza.
- Para el control de movimiento del manipulador se propone un controlador PID que se ejecuta en tiempo real a través del Toolbox ARDUINO IO en Matlab-Simulink, con la ayuda de dos tarjeta Arduino Mega.
- La plataforma permite utilizar otros algoritmos de control como robustos, óptimos, adaptables, entre otros. Adicionalmente se pueden implementar bloques de diversos Toolboxes.

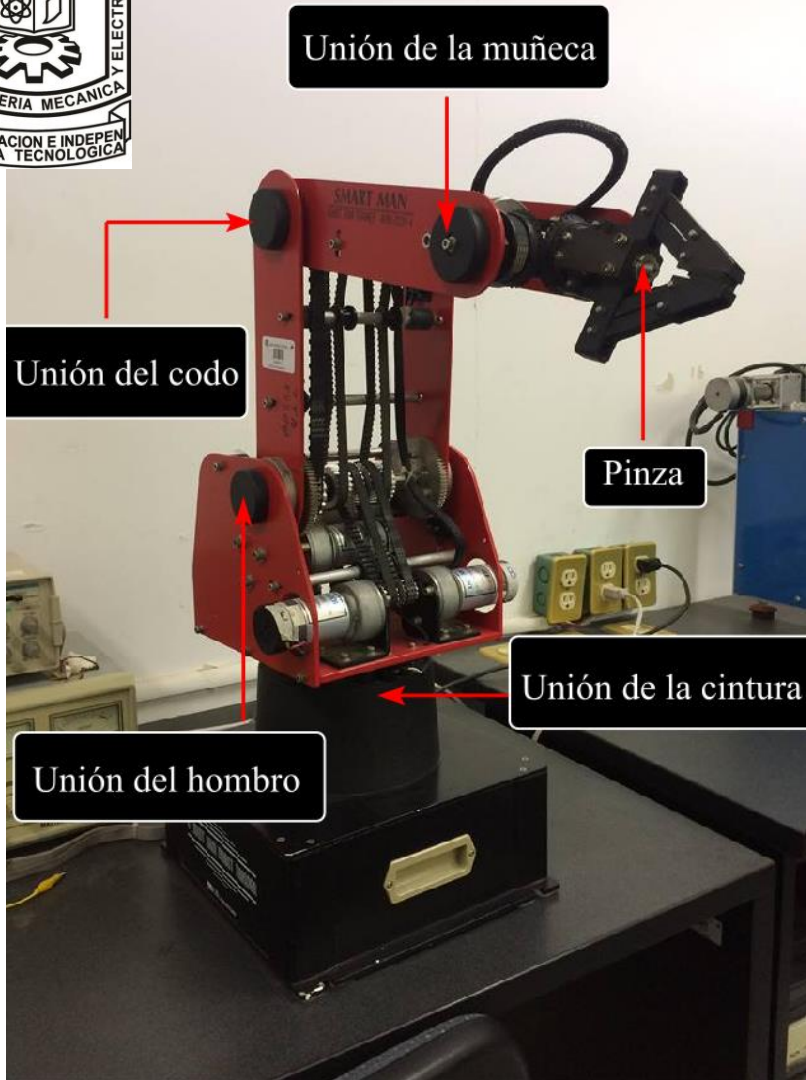


Figura 1. Robot manipulador

Arquitectura del manipulador.

- Brazo robótico Smart Man ED7220C de la compañía Coreana ED Corporation.
- 5 articulaciones.
- 1 pinza.
- Las articulaciones y la pinza son actuadas por motores de cd
- Dispone de interruptores de final de carrera.
- Cada motor tiene de decodificadores ópticos.



Arquitectura de manipulador. Características de los motores.

Modelo	DME38B50G-116	DME38B50-115
Voltaje nominal	24V	24V
Velocidad nominal	34 rpm	65 rpm
Relación de engranes	144	72
PPR del encoder	24	48
Articulaciones que acciona	Cintura Hombro Codo	Muñeca alabeo Muñeca guiñada

Tabla 1: Características de los Motores de corriente directa

Arquitectura de la plataforma.

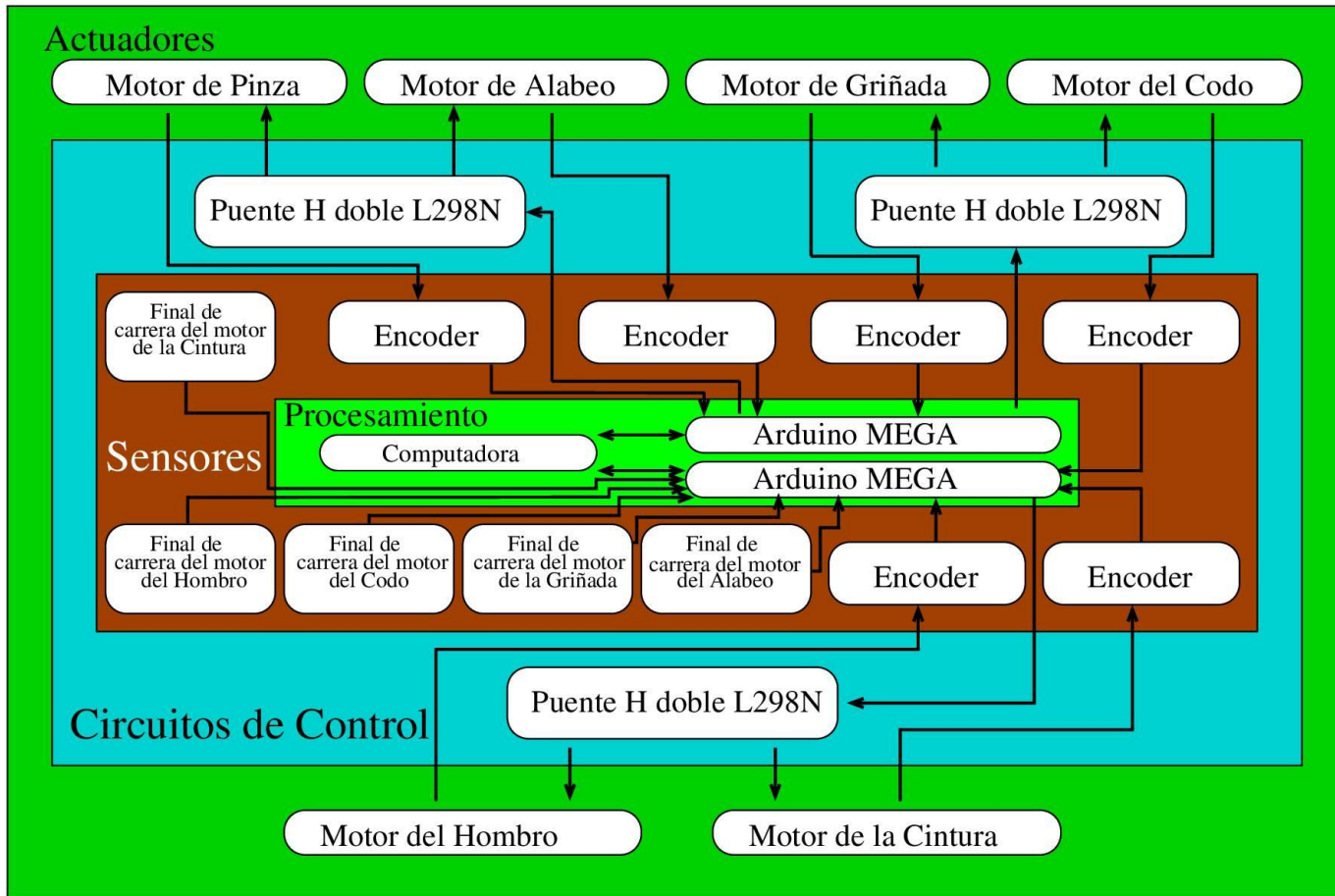


Figura 2. Arquitectura de la plataforma

Cinemática del manipulador.

Cinemática directa.

- Determina la configuración del efector final x, y, z a partir de las posiciones de las articulaciones.

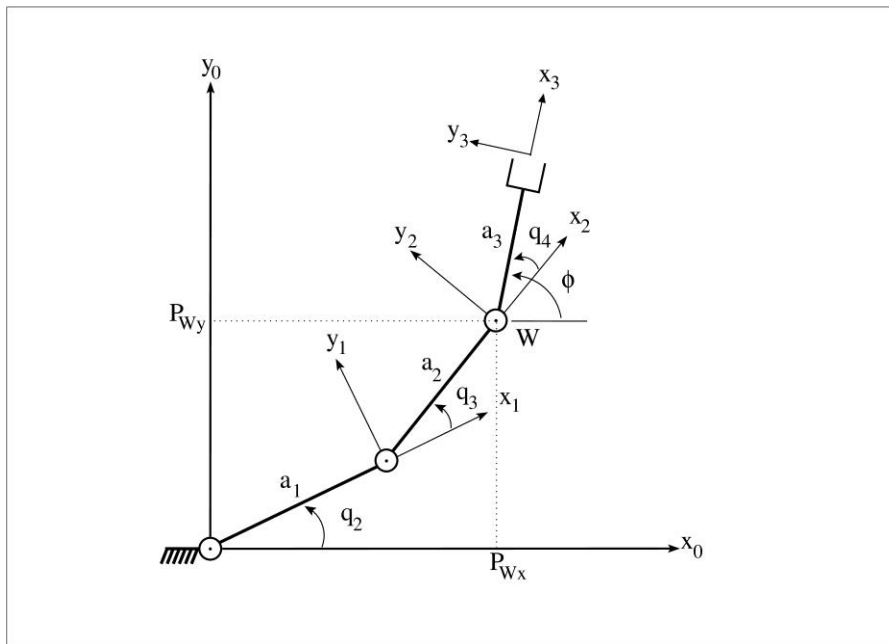


Figura 3. Esquema de la cinemática del manipulador

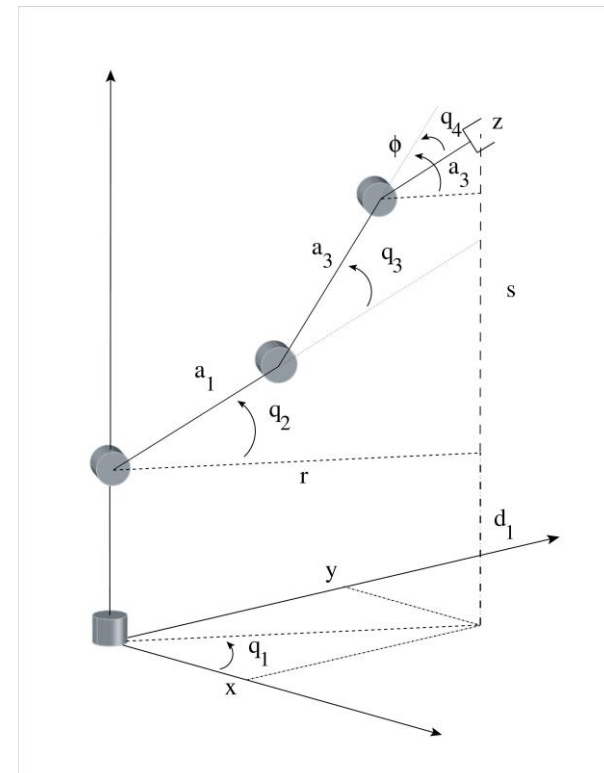


Figura 4. Posición del efector final del manipulador



Cinemática directa del manipulador.

Esta expresado por:

$$\begin{aligned}x &= C_1(a_1 \cdot C_2 + a_2 \cdot C_{23} + a_3 \cdot C_{234}) \\y &= S_1(a_1 \cdot C_2 + a_2 \cdot C_{23} + a_3 \cdot C_{234}) \\z &= d_1 + a_1 \cdot S_2 + a_2 \cdot S_{23} + a_3 \cdot S_{234}\end{aligned} \quad (1)$$

Donde:

$$\cos(q_1) = C_1; \cos(q_1 + q_2) = C_{12}; \cos(q_1 + q_2 + q_3) = C_{123}$$

Cinemática inversa.

- Permite encontrar el valor de las coordenadas articulares q_1, q_2, \dots, q_5 para que la pinza se posicione y oriente en una determinada localización espacial.

Cinemática inversa del manipulador.

Está expresada por:

$$\begin{aligned}
 s &= z - d_1 \\
 r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\
 p_{wx} &= r - a_3 \cos(\phi) \\
 p_{wy} &= s - a_3 \sin(\phi) \\
 D &= \frac{p_{wx}^2 + p_{wy}^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1 a_2} \\
 q_1 &= \text{atan2}(y, x) \\
 q_2 &= \text{atan2}(p_{wy}, p_{wx}) - \text{atan2}(a_2 \sin(\phi), a_1 + a_2 \cos(\phi)) \\
 q_4 &= \phi - q_2 - q_3 \\
 q_5 &= \psi
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

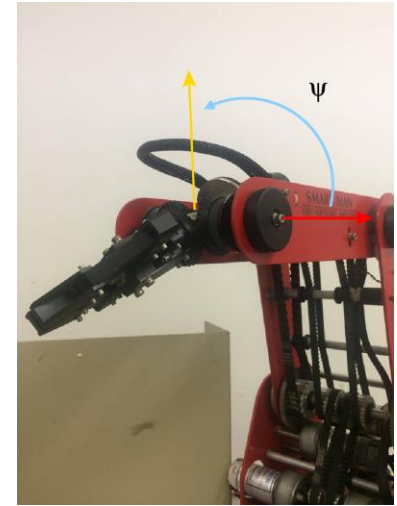


Figura 5. Ángulo ψ

Donde $\text{atan2}(y^*, x^*)$ calcula el arcotangente de y^*/x^* , pero utiliza el signo de cada argumento para determinar el cuadrante al que corresponde el ángulo entre x^* e y^* .



Dinámica del manipulador con actuadores.

Modelo dinámico del manipulador.

El comportamiento dinámico del manipulador se describe como :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f(\dot{q}) = \tau \quad (3)$$

- ❖ $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ es el vector de posiciones articulares, n es el número de GDL y $q_i, i = 1, \dots, n$ es la posición articular de la i -ésima articulación del robot.
- ❖ \dot{q} es el vector de velocidades angulares.
- ❖ $M(q) = M(q)^T \in R^{n \times n}$ se denomina matriz de inercia.
- ❖ $C(q, \dot{q})\dot{q} \in R^{n \times 1}$ se llama vector de fuerzas centrífugas y de Coriolis.
- ❖ $g(q) \in R^{n \times 1}$ es un vector de fuerzas gravitacionales.
- ❖ $f(\dot{q}) \in R^{n \times 1}$ es un vector de fuerzas de fricción.
- ❖ $\tau \in R^{n \times n}$ es un vector de pares aplicados por los actuadores en las articulaciones.

Dinámica del manipulador con actuadores.

- **Modelo dinámico de los actuadores.**

Un motor de corriente directa de imán permanente acoplado a una carga mecánica se representa mediante el siguiente modelo matemático:

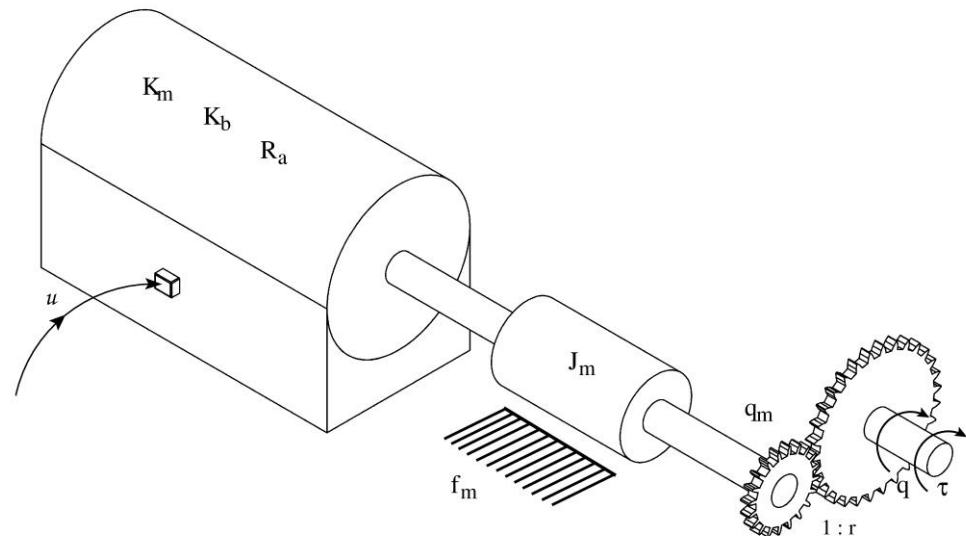


Figura 6. Motor de cd.

$$J_m \ddot{q} + \left[f_m + \frac{K_m K_b}{R_a} \right] \dot{q} + \frac{\tau}{r^2} = \frac{K_m}{r R_a} u \quad (4)$$



Dinámica del manipulador con actuadores.

Donde

Término	Definición	Unidad
q	Posición angular del eje la carga	rev
q_m	Posición angular del eje del motor	rev
r	Relación de transmisión de engranes	
u	Voltaje de alimentación del motor	V
τ	Par aplicado sobre el eje de la carga	N·m
J_m	Momento de inercia del rotor	kg·m ²
f_m	Coeficiente de fricción viscosa del motor	N·m·s
R_a	Resistencia de armadura	Ω
K_b	Constante de fuerza contraelectromotriz	V·s/rad
K_m	Constante de par	N·m/A

Tabla 2: Variables y parámetros de un motor de cd.



Dinámica del manipulador con actuadores.

Se representa a través de la siguiente ecuación diferencial matricial:

Donde:
$$J\ddot{q} + B\dot{q} + R\tau = Ku \quad (5)$$

❖ $J = \text{diag}[J_{mi}]$

❖ $B = \text{diag} \left[f_{mi} + \frac{K_{mi}K_{bi}}{R_{ai}} \right]$

❖ $R = \text{diag} \left[\frac{1}{r_i^2} \right]$

❖ $K = \text{diag} \left[\frac{K_{mi}}{r_i R_{ai}} \right]$

❖ $u = \text{diag}[u_i]$

❖ $\tau = \text{diag}[\tau_i]$



Dinámica del manipulador con actuadores.

- Modelo dinámico del manipulador con los actuadores.

$$[RM(q) + J]\ddot{q} + RC(q, \dot{q})\dot{q} + Rg(q) + Rf(\dot{q}) + B\dot{q} = Ku \quad (6)$$

Si r_i es elevado resulta en $R \approx O$. Resultando la siguiente ecuación diferencial

$$J\ddot{q} + B\dot{q} = Ku \quad (7)$$

$$\ddot{q}_i + a_i\dot{q}_i = b_i u_i$$
$$a_i = \frac{f_{mi}R_{ai} + K_{mi}K_{bi}}{J_{mi}R_{ai}}, b_i = \frac{K_{mi}}{J_{mi}r_i R_{ai}} \quad (8)$$

- Por consiguiente, se puede despreciar la dinámica del manipulador (3) y se pueden utilizar un controlador independiente o desacoplado para cada articulación.



Estimación paramétrica.

- ✓ Se desconocen los parámetros a_i y b_i , $i = 1, 2, \dots, 5$ del modelo matemático de los motores acoplados a las articulaciones del manipulador.
- ✓ Los parámetros a_i y b_i del modelo de un motor de cd se emplean para: 1) el diseño de controladores que permiten obtener movimientos de alta precisión en el manipulador, y 2) para el diseño de observadores de estado que estiman la velocidad del motor.



Estimación paramétrica.

- Mínimos cuadrados recursivo (MCR).

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(k) &= \hat{\boldsymbol{\theta}}_i(k-1) + \mathbf{P}_i(k)\boldsymbol{\phi}_i(k)\epsilon_i(k) \\ \mathbf{P}_i(k) &= \frac{1}{\gamma_i} \left[\mathbf{P}_i(k-1) - \frac{\mathbf{P}_i(k-1)\boldsymbol{\phi}_i(k)\boldsymbol{\phi}_i^T(k)\mathbf{P}_i(k-1)}{\gamma_i + \boldsymbol{\phi}_i^T(k)\mathbf{P}_i(k-1)\boldsymbol{\phi}_i(k)} \right] \\ \epsilon_i(k) &= z_i(k) - \boldsymbol{\phi}_i^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(k-1)\end{aligned}\quad (9)$$

- ❖ $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(k) = [\hat{a}_i(k), \hat{b}_i(k)]^T$ es un estimado de $\boldsymbol{\theta}_i$.
- ❖ γ_i se denomina factor de olvido y satisface $0 < \gamma_i \leq 1$.
- ❖ γ_i se denomina factor de olvido y satisface $0 < \gamma_i \leq 1$.
- ❖ $\epsilon_i(k)$ es el error de estimación de salida.

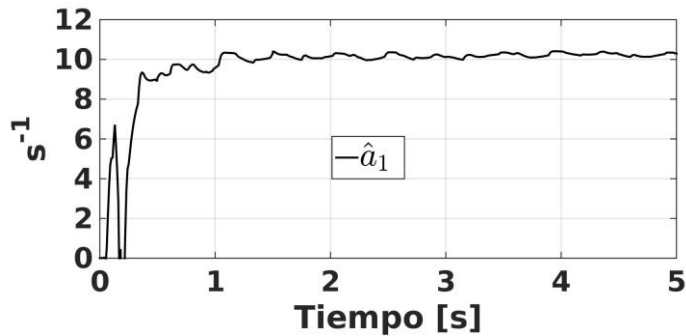


Figura 7. Parámetro estimado \hat{a}_1

Estimación paramétrica.

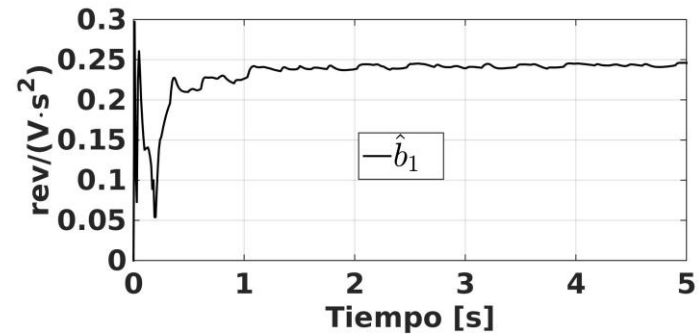


Figura 7. Parámetro estimado \hat{b}_1

Parámetro \hat{a}_i [s ⁻¹]	Parámetros \hat{b}_i [rev/(V · s ²)]	Articulación del motor
$\hat{a}_1 = 10.2$	$\hat{b}_1 = 0.243$	Cintura
$\hat{a}_2 = 13.1$	$\hat{b}_2 = 0.175$	Hombro
$\hat{a}_3 = 5.5$	$\hat{b}_3 = 0.14$	Codo
$\hat{a}_4 = 17$	$\hat{b}_4 = 0.14$	Muñeca
$\hat{a}_6 = 16.5$	$\hat{b}_5 = 0.15$	Muñeca

Tabla 3: Parámetros estimados \hat{a}_i y \hat{b}_i

Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).

Un controlador PID está dado por (10):

$$u_i = k_{Pi}e_i(t) + k_{Ii} \int e_i(t)dt + k_{Di} \frac{de_i(t)}{dt} \quad (10)$$

❖ Donde k_{Pi} , k_{Ii} , k_{Di} son, respectivamente, las ganancias proporcional, integral, y derivativa del controlador de posición del i -ésimo motor.

Y el sistema a lazo cerrado para el control de un motor se ilustra con la figura 8.

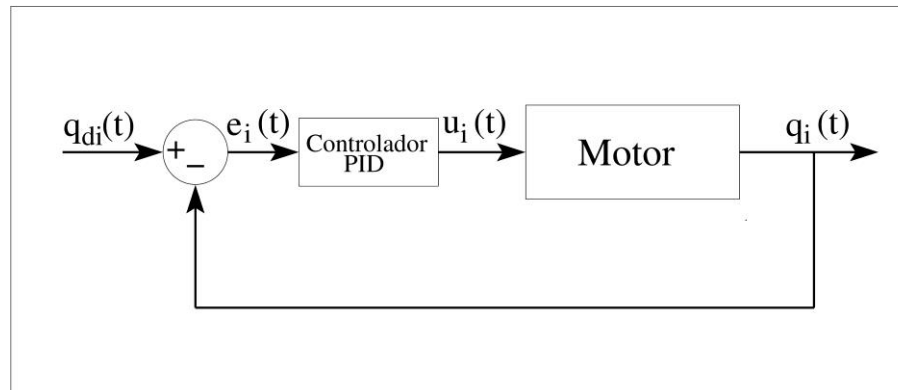


Figura 8. Controlador PID para un motor



Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).

- ✓ Es importante determinar el rango de valores de las ganancias k_{Pi} , k_{Ii} , k_{Di} que garantizan que el sistema en lazo cerrado es estable.
- ✓ La función de transferencia a lazo cerrado esta dada por (11).

$$\frac{Q_i(s)}{Q_{di}(s)} = \frac{s^2(k_{Di}b_i) + s(k_{Pi}b_i) + k_{Ii}}{s^3 + s^2(a_i + k_{Di}b_i) + s(k_{Pi}b_i) + k_{Ii}b_i} \quad (11)$$

- ✓ Con el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz se determina los valores de k_{Pi} , k_{Ii} , k_{Di} , dado por (12).

$$\begin{aligned} k_{Di} &> \frac{-a_i}{b_i} \\ k_{Ii} &> 0 \\ k_{Pi} &> \frac{k_{Ii}}{a_i + k_{Di}b_i} \end{aligned} \quad (12)$$



Observador de estados.

- Los controladores PID requieren de la velocidad de los motores del manipulador, la cual no se encuentra disponible, pero se estima mediante un observador de estado.
- Un observador de estados es un algoritmo que permite estimar señales no medibles a partir de valores de entrada y de salida de un sistema.

Sea el sistema en espacio de estados definido por:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{x}\end{aligned}$$

- Donde $\mathbf{x} \in R^{n \times 1}$ es el vector de estados, $y \in R^{1 \times 1}$ es la salida del sistema, $u \in R^{1 \times 1}$ es la señal de control, $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$ es la matriz de estados, $\mathbf{B} \in R^{n \times 1}$ es el vector de entrada y $\mathbf{C} \in R^{1 \times n}$ es el vector de salida.



Observador de estados.

Un observador tiene por modelo matemático a:

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + K_e(y - C\hat{x}) = (A - K_eC)\hat{x} + Bu + K_ey \quad (13)$$

□ \hat{x} es un estado estimado de x , e $\hat{y} = C\hat{x}$ es un estimado de la salida y . Por otro lado, $K_e \in R^{n \times 1}$ es la ganancia del observador de estado.

- Observador de estado para los motores del manipulador.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix} u_i \\ y = x_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_i \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Donde $x_1 = q_i$ y $x_2 = \dot{q}_i$.

Observador de estados.

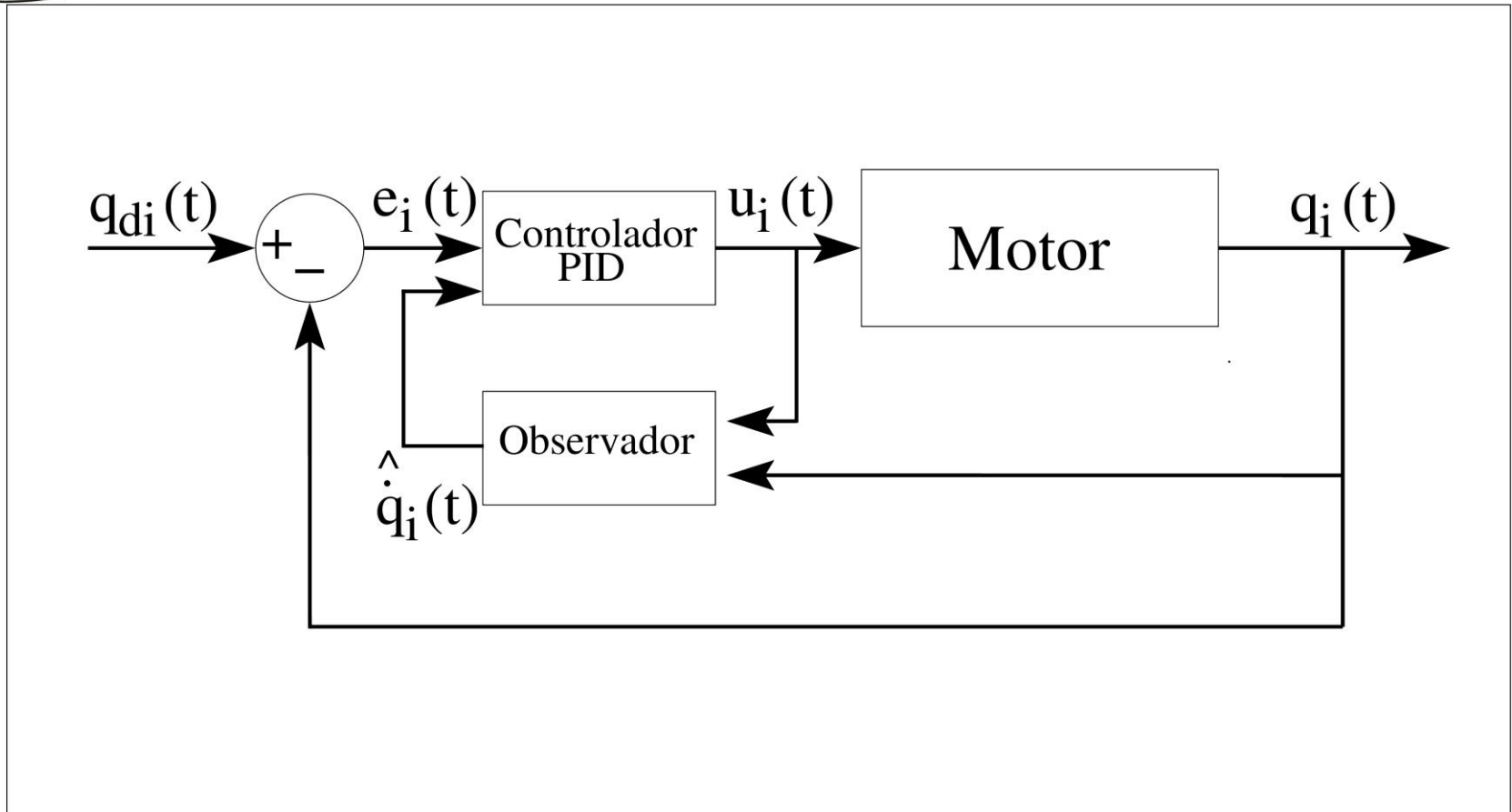


Figura 9. Controlador PID de un motor con observador de estados.



Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) y Observador de estados.

Controlador PID			Observador de estado		Articulación del motor
P	I	D	k_{1i}	k_{2i}	
k_{Pi}	k_{Ii}	k_{Di}			
450	0.1	30	13.8	3.24	Cintura
600	0.1	50	10.9	1.21	Hombro
650	0.1	65	18.5	42.25	Codo
450	0	10	7	25	Muñeca
450	0	10	9	20.25	Muñeca

Tabla 4: Ganancias usadas en el controlador y en el observador de cada motor

Resultados experimentales.

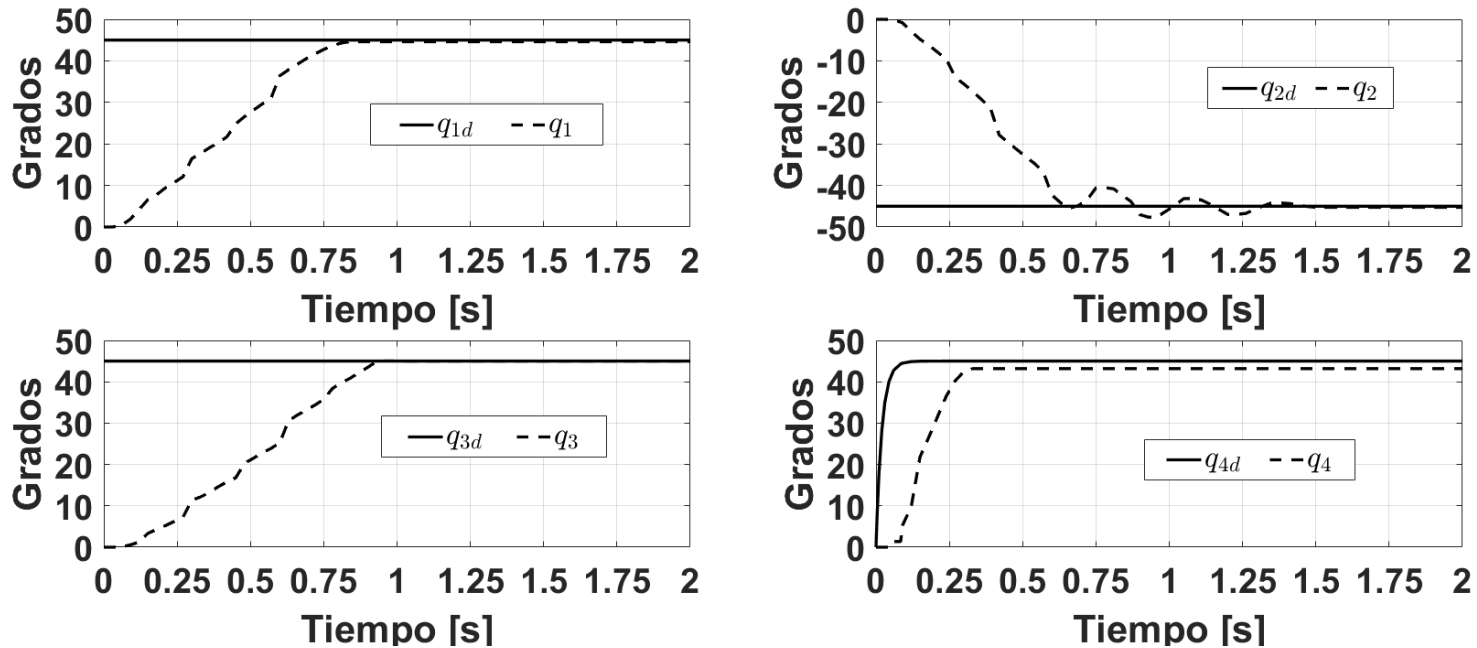


Figura 10. Posiciones articulares 1, 2, 3 y 4

Resultados experimentales.

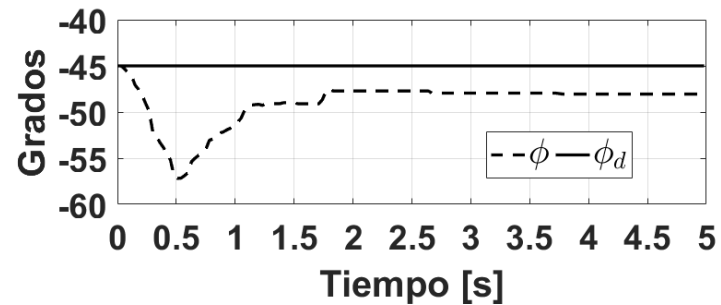
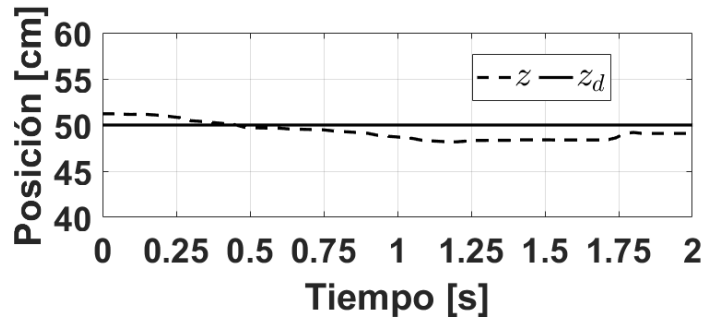
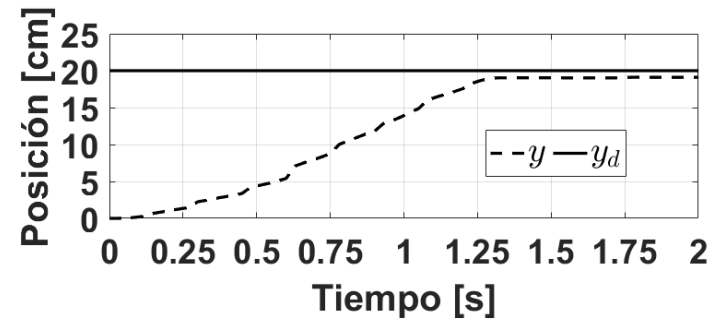
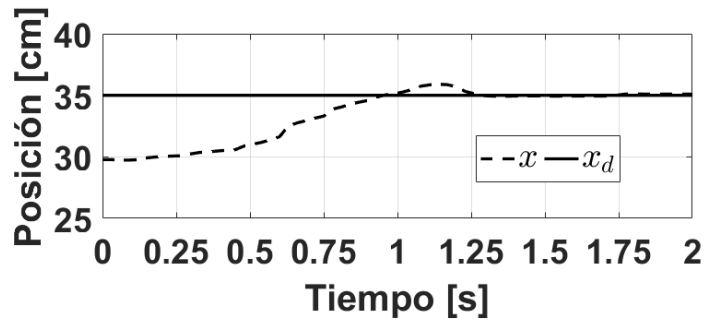


Figura 11. Posiciones del efector final x , y , z y ϕ

Resultados experimentales.

Defínase el error articular como:

$$\tilde{q}_i = q_{di} - q_i \quad (14)$$

Error articular	Valor en estado estacionario	Unidad
\tilde{q}_1	0.375	°
\tilde{q}_2	0.026	°
\tilde{q}_3	0.260	°
\tilde{q}_4	1.818	°

Tabla 5. Error articulares en estado estacionario

Defínase los siguientes errores en la posición y orientación del efector final:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x_d - x \\ \tilde{y} &= y_d - y \\ \tilde{z} &= z_d - z \\ \tilde{\phi} &= \phi_d - \phi \end{aligned} \quad (15)$$



Resultados experimentales.

Error articular	Valor en estado estacionario	Unidad
\tilde{x}	-0.058	cm
\tilde{y}	0.915	cm
\tilde{z}	0.993	cm
$\tilde{\phi}$	3.054	°

Tabla 6. Error en estado estacionario de la posición y orientación del efector final



Conclusiones.

- Se describió la **cinemática** y **dinámica** del robot manipulador, así como el **sistema de control** propuesto de bajo costo para el **control desacoplado** del movimiento de las posiciones articulares del robot.
- Se presentaron resultados experimentales que mostraron el buen desempeño del controlador.
- En trabajo futuro, se realizará una sintonización más fina de las ganancias de los controladores PID con la finalidad de reducir aún más los errores en las posiciones articulares, así como en la orientación y posición del efector final.



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/ booklets)