

64  
2ej.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO COMPARATIVO DE ALGORITMOS  
DE CONTROL PARA UN ROBOT CON UNION  
FLEXIBLE

T E S I S

Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico Electricista  
Area Eléctrica y Electrónica

p r e s e n t a

GUSTAVO GARCIA SANCHEZ



DIRECTOR DE TESIS: DR. YU TANG XU

Ciudad Universitaria México DF.

1997

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

**A los compañeros con los que compartí algún momento durante esta travesía.**

**A todos mis profesores.**

**Al Dr. Yu Tang Xu por haber hecho posible este trabajo.**

**A mis hermanas Mary, Laura y Sandra por soportarme.**

**A mi taciturno hermano Valen por su apoyo.**

**A mi mamá Emilia por sus consejos que mantienen mi camino.**

**A la persona que me ha dado la mejor enseñanza que pueda recibir, Timo con su trabajo me enseñó el camino, ¡ gracias papá !.**

## El último de la fila.

Somos un barco sin tormenta,  
frío sin calor,  
luz dentro de la obscuridad.  
Deja que te alcance.

Somos una risa sin lágrimas,  
esperanza sin temor.  
Estamos por llegar a . . .  
Estamos cerca del hechizo.  
Quizá nunca, nunca llegaremos.  
Sin embargo, la magia que sentiremos vale toda la vida.

Nacemos en el crucifijo.  
Somos el disparo antes del tiro.  
Puedes liberarte por ti mismo.  
Pero la única manera es caer.

No venimos solos.  
Estamos fatigados.  
Somos fuertes.  
Somos la primera luz que se aleja rápidamente.  
Sabremos por primera vez si somos diabólicos o divinos.  
Somos los últimos en la fila. ¡Bien!  
Somos los últimos en la fila,  
dos ojos en el este, es el ángel o la bestia  
y la respuesta se encuentra entre lo bueno y lo malo.  
Buscamos la verdad,  
podemos morir por la verdad.  
Sin embargo, la emoción de tan sólo  
un cambio, vale la pena.  
Estaremos cerca del hechizo.  
Mira como brillamos  
Somos los últimos en . . .  
Somos los últimos en . . .  
Somos los últimos en la fila.  
¡Oh!

# ÍNDICE

<b>1.- Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>2.- Control de robots.</b>	<b>5</b>
2.1.- Modelo matemático de un robot rígido.	
2.2.- Propiedades del modelo de un robot rígido.	
2.3.- Control de un robot rígido.	
2.4.- Modelo matemático de un robot con unión flexible.	
2.5.- Propiedades del modelo de un robot con unión flexible.	
2.6.- Control de un robot con unión flexible.	
<b>3.- Control basado en la perturbación singular.</b>	<b>16</b>
3.1.- Ley de control.	
3.2.- Principales propiedades del controlador.	
3.3.- Observaciones en la implementación.	
<b>4.- Control basado en la propiedad de pasividad.</b>	<b>21</b>
4.1.- Ley de control.	
4.2.- Principales propiedades del controlador.	
4.3.- Observaciones en la implementación.	
<b>5.- Control basado en un observador.</b>	<b>26</b>
5.1.- Ley de control.	
5.2.- Principales propiedades del controlador.	
5.3.- Observaciones en la implementación.	

<b>6.- Modulo de experimentos.</b>	<b>34</b>
6.1.- Descripción general del equipo.	
6.2.- Descripción de cada uno de los elementos del equipo.	
<b>7.- Presentación de los resultados experimentales.</b>	<b>41</b>
7.1.- Acondicionamiento de las señales.	
7.1.- Definición de los criterios de comparación y su justificación.	
7.2.- Resultados individuales de cada controlador.	
7.3.- Resultados de comparación.	
<b>9.- Conclusiones.</b>	<b>62</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>64</b>
<b>Apéndice.</b>	<b>66</b>
• Funciones del software de dSPACE.	
• Listado de los programas de cada algoritmo.	

# CAPÍTULO 1.

## INTRODUCCIÓN:

El requerimiento de tareas más especializadas y el buen desempeño es el reto que los robots tendrán que resolver próximamente, por lo que se requiere de algoritmos de control cada vez mejores. Esto ha motivado a los investigadores a proponer diferentes algoritmos para el control de robots con unión flexible basándose en diferentes propiedades de estos sistemas como es, la perturbación singular en el caso del algoritmo propuesto por Spong (1989), el controlador basado en pasividad (Brogliato, Ortega y Lozano (1995) ) y el controlador basado en observador (Alión y Ortega (1993) ).

Es por esto, la importancia de realizar un estudio comparativo entre algunos algoritmos de robots flexibles, para tener un perfil de su desempeño y principales características para facilitar la selección del controlador a emplear en cierta tarea.

Actualmente, existe un gran número de controladores para robot rígidos. Sin embargo, estos no satisfacen adecuadamente el control para los robots con unión flexible. Además, los algoritmos que existen actualmente para controlar a los robots rígidos han sido diseñados para un buen desempeño sin considerar la flexibilidad, y no operan correctamente o son inestables con la presencia de la flexibilidad de la unión.

Aparte de ser altamente no lineales, los robots con unión flexible tiene menos actuadores que el número de grados de libertad, lo que hace más difícil el control en comparación con un robot rígido. Sin embargo, basado en un controlador diseñado para un robot rígido  $M_R$ , es relativamente fácil diseñar una señal de compensación. Al ser añadida esta señal con  $M_R$ , se logra una respuesta satisfactoria cuando el robot es de unión flexible. Son de este tipo de algoritmos que esta tesis pretende hacer una comparación.

En los siguientes capítulos el control para los robots de unión flexibles se realiza a partir de los algoritmos que se derivan del análisis de los modelos dinámicos de los robots rígidos, en los algoritmos analizados más adelante se observará cómo se interpreta la flexibilidad de la unión para poder obtener un controlador para el robot de unión flexible a partir del modelo rígido. Cuando la rigidez de la unión flexible tiende a un valor muy grande el algoritmo se reduce al caso de un robot rígido, es claro que cuando la rigidez de la unión tiende a aumentar llegará a un valor tan grande que prácticamente se trataría de una unión rígida, por lo tanto se justifica que el algoritmo de control sea de forma similar que para un robot rígido. A esta propiedad algunos autores la denominan continuidad.

Obviamente, no existe un criterio normalizado para realizar una comparación entre estos algoritmos. En esta tesis se propone un criterio para poder realizar la comparación de su desempeño, teniendo presente que es prácticamente imposible plantear un criterio que pueda generalizarse para ser aplicado de una forma equitativa a cualquier algoritmo de control, no solo para el caso del robot con unión flexible sino para cualquier sistema, pues existen aplicaciones particulares que hacen mejor a cierto desempeño sin embargo, para otra aplicación este desempeño puede no ser el mejor. El objetivo de esta tesis es entonces hacer que este criterio dé una idea global del comportamiento de cada algoritmo considerando los parámetros más importantes sin tomar en cuenta alguna aplicación en particular.

Anteriormente a esta tesis existe un trabajo de comparación (Brogliato, Ortega y Lozano (1995)) en el cual se derivan los controladores utilizando diferentes técnicas de diseño para sistemas no lineales, comparan sus similitudes, propiedades y desempeño. Otros trabajos relacionados con las técnicas para el diseño de este tipo de controladores son Spong y Vidyasagar (1989), Lozano y Brogliato (1992), Nicosia y Tomei (1992).



## **Organización de esta tesis .**

En el capítulo 2 se muestran los modelos dinámicos de los robots rígidos y con unión flexible para  $n$ -grados de libertad. Se expone un método para controlar un robot rígido  $M_R$  y posteriormente se explica la forma general como se realizará el control de los robots con unión flexible utilizando el algoritmo del robot rígido ( $M_R$ ) más un término de corrección ( $M_F$ ). Finalmente se muestran los modelos dinámicos para un robot de un grado de libertad en el cual se probarán físicamente los algoritmos que se verán en los próximos capítulos.

En el capítulo 3 se muestra cómo pueden ser aprovechadas algunas características de los robots con unión flexible para diseñar  $M_F$  mediante la argumentación de perturbación singular, se realiza también la implementación física para controlar un brazo de un grado de libertad y se obtienen los resultados experimentales de la respuesta escalón.

En el capítulo 4 se implementa un algoritmo basado en la propiedad de pasividad, que aprovecha las características pasivas de los sistemas físicos, como es el caso de los robots flexibles para la realización del controlador, se realiza su implementación y se obtiene experimentalmente la respuesta escalón.

En el capítulo 5 se implementa un algoritmo basado en un observador de punto fijo que permite estimar la velocidad del brazo del robot a partir de los datos de la posición, además se muestran sus principales características y se obtienen los resultados experimentales como en los anteriores capítulos.

En el capítulo 6 se da una explicación de cada módulo que compone el equipo de experimentación, se muestran sus principales características y se muestra la conexión entre sus componentes.

En el capítulo 7 se definen los criterios de comparación, se muestran los resultados individuales del control del robot de un grado de libertad para cada algoritmo visto en los capítulos anteriores y se dan los resultados de la comparación entre los algoritmos implementados.

En el capítulo 8 se da la conclusión de este trabajo.

## **CAPÍTULO 2.**

### **CONTROL DE ROBOTS.**

El problema de control de robots consiste en dada una trayectoria deseada, derivada de una aplicación específica, diseñar un controlador tal que la trayectoria del manipulador siga la trayectoria deseada.

La trayectoria deseada se expresa en general en el espacio de trabajo. Sin embargo, en muchos casos para fines de control, se debe encontrar la trayectoria deseada para cada unión resolviendo el problema de cinemática inversa.

Para la clase de algoritmos considerados en esta tesis se necesita primero diseñar un control para robots rígidos. Existen abundantes algoritmos para este objetivo (ver Ortega y Spong (1989), Abellan et al (1991) para las referencias). Considerando la robustez y simplicidad se considera el algoritmo de control basado en pasividad para un robot rígido (Slotine y Li (1986)).

Se mencionó anteriormente que, para poder controlar a los robots de unión flexible se utilizará un algoritmo obtenido del modelo para un robot rígido haciendo algunas consideraciones, las cuales compensarán el comportamiento de la unión flexible. Por lo tanto, primero se presentará el modelo dinámico del robot rígido y su control, posteriormente el modelo del robot con unión flexible y su forma general de control.

#### **2.1.- Modelo matemático de un robot rígido.**

Uno de los métodos que se utilizan para la obtención del modelo de un robot rígido es por medio de la ecuación Euler-Lagrange (ver Spong y Vidyasagar (1989) para más detalles).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau}. \quad (2.1)$$

Donde  $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_n)^T$  es el conjunto de coordenadas generalizadas para el sistema,  $L$  es una función lagrangiana, definida como la diferencia,  $K-P$ , entre la energía cinética  $K$  y la energía potencial  $P$ , y  $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \dots, \tau_n)^T$  es el vector de fuerzas generalizadas actuando en el sistema. Un caso especial importante, el cual se cumple para los manipuladores de los robots, surge cuando la energía potencial  $P = P(\mathbf{q})$  es independiente de  $\dot{\mathbf{q}}$ , y cuando la energía cinética es una función de el vector  $\dot{\mathbf{q}}$  de la forma

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i,j} d_{ij}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_j = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T D(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2.2)$$

donde la matriz de inercia  $D(\mathbf{q})$  de orden  $n \times n$  es simétrica y definida positiva. Esto es  $D(\mathbf{q}) = \text{diag}(D_1, \dots, D_n)$ ;  $D_1, \dots, D_n > 0$ , para cada  $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ . Las coordenadas generalizadas en este caso son la posición de la unión  $\mathbf{q}$ .

Las ecuaciones Euler-Lagrange para tal sistema pueden ser derivadas como sigue.

$$\mathbf{L} = \mathbf{K} - P = \frac{1}{2} \sum_{i,j} d_{ij}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_j - P(\mathbf{q}). \quad (2.3)$$

De aquí,

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \dot{q}_i} = \sum_j d_{ij}(\mathbf{q}) \dot{q}_j, \quad (2.4)$$

y

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} &= \sum_j d_{kj}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j + \sum_j \frac{d}{dt} d_{kj}(\mathbf{q}) \dot{q}_j, \\ &= \sum_j d_{kj}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j + \sum_j \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j. \end{aligned} \quad (2.5)$$

También

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial P}{\partial q_k}. \quad (2.6)$$

Así de la ecuación Euler-Lagrange se obtiene

$$\sum_j d_{kj}(\mathbf{q}) \ddot{q}_j + \sum_j \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial P}{\partial q_k} = \tau_k, \quad (2.7)$$

$k = 1, \dots, n.$

Tomando ventaja de la simetría de la matriz de inercias, nosotros podemos escribir el segundo término de la ecuación como:

$$\sum_j \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j = \sum_{i,j} \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j. \quad (2.8)$$

Los coeficientes

$$c_{ijk} = \sum_{i,j} \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \quad (2.9)$$

son conocidos como símbolos de Christoffeles. Si hacemos

$$\phi_k = \frac{\partial P}{\partial q_k} \quad (2.10)$$

entonces podemos escribir la ecuación (2.7) como

$$\sum_j d_{kj}(\mathbf{q}) \dot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_j + \phi_k(\mathbf{q}) = \tau_k, \quad (2.11)$$

$$k = 1, \dots, n.$$

En la ecuación anterior, hay tres tipos de términos. El primero involucra la segunda derivada de las coordenadas generalizadas. El segundo es un término cuadrático en la primera derivada de  $\mathbf{q}$ , donde los coeficientes pueden depender de  $\mathbf{q}$ . Estos son clasificados en dos tipos de términos. Los términos que involucran un producto del tipo  $\dot{q}_i^2$  son llamados centrífugos, mientras aquellos que involucren un producto del tipo  $\dot{q}_i \dot{q}_j$ , donde  $i \neq j$ , son llamados términos de coriolis. El tercer tipo de términos son aquellos que involucran únicamente a  $\mathbf{q}$  pero no sus derivadas, y es el término de la energía potencial. Esto es comúnmente escrito en forma de matriz como:

$$D(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.12)$$

donde el  $k/j$ -ésimo elemento de la matriz  $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  es definido como

$$c_{kj} = \sum_{i=1}^n c_{ijk}(\mathbf{q}) \dot{q}_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial d_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{jk}}{\partial q_i} \right\} \dot{q}_i. \quad (2.13)$$

## 2.2.- Propiedades del modelo.

La ecuación de movimiento (2.12) es compleja y no lineal para todo robot, pero se puede utilizar algunas propiedades para facilitar el diseño de los sistemas de control.

**Propiedad 1.** La matriz de inercia  $D(\mathbf{q})$  es simétrica y definida positiva, y ambos  $D(\mathbf{q})$  y  $D(\mathbf{q})^{-1}$  son uniformemente acotadas como una función de  $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ . Estrictamente hablando, el límite de la matriz de inercia requiere, en general, que todas las uniones sean de revolución. Para evitar tal dificultad técnica nosotros de aquí en adelante trataremos únicamente de robots con uniones de revolución.

**Propiedad 2.** Hay una entrada de control independiente para cada grado de libertad.

**Propiedad 3.** Todos los parámetros de interés tales como centros de masa y momentos de inercia, aparecen como coeficientes de funciones conocidas de las coordenadas generalizadas. Por la definición de cada coeficiente como un parámetro separado, una relación lineal resulta así que nosotros podemos escribir la ecuación dinámica (2.12) como

$$D(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + g(\mathbf{q}) = Y(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\theta} = \mathbf{u} \quad (2.14)$$

donde  $Y(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}})$  es una matriz de orden  $n \times r$  de una función conocida, llama regresor, y  $\boldsymbol{\theta}$  es un vector  $r$ -dimensional de parámetros. (Ver An et al.(1985) y Khosla y Kanade (1985).)

**Propiedad 4.** Se define la matriz  $N(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \dot{D}(\mathbf{q}) - 2C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ , entonces  $N(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  es una matriz antisimétrica. Es decir los componentes  $n_{\mu\nu}$  de  $N$  satisfacen  $n_{\mu\nu} = -n_{\nu\mu}$ .

### 2.3.- Control de un robot rígido.

El problema fundamental para el control de los robots sean rígidos o de unión flexible es que en los modelos dinámicos que se presentaron anteriormente algunos de los parámetros son muy difíciles de medir o calcular, tales como momentos de inercia o la exacta posición de el centro de masa del manipulador, esto limita el potencial de los robots para poder manipular objetos de forma y peso grandes. Este problema se incrementa aún más cuando el robot opera a alta velocidad. Bajo estas condiciones el desempeño de los robots se ve afectado severamente para el caso de los parámetros desconocidos. Actualmente los principales métodos en los cuales se trata de mantener el buen desempeño de los robots en estas condiciones, son el control adaptable y el control robusto. Una ventaja del enfoque adaptable es que la exactitud de un manipulador llevando cargas desconocidas mejora con el tiempo, por que el algoritmo de adaptación guarda información de los parámetros de los errores de trayectoria, por lo que el control adaptable retiene la consistencia de su desempeño aún bajo grandes variaciones de carga.

A continuación se analizará un controlador propuesto por Slotine y Li (1988) para un robot rígido de  $n$ -grados de libertad. Más adelante se empleará este mismo controlador como parte de los algoritmos de control para los robots con unión flexible. Este control está dado por la siguiente ecuación :

$$u_n = \hat{D}\ddot{q}_{1r} + \hat{C}\dot{q}_{1r} + \hat{g} - B_1 s_1. \quad (2.15)$$

Donde

$B_1$  es una matriz de ganancia definida positiva.

$\hat{D}$ ,  $\hat{C}$ ,  $\hat{g}$  son la estimación de  $D$ ,  $C$ , y  $g$  respectivamente.



El vector  $\hat{q}_{1r}$ , formado por  $\hat{q}_{1r} = \dot{q}_{1d} - \Lambda_1 \tilde{q}_1$  es llamado "referencia de velocidad" y es introducido para garantizar la convergencia del error de seguimiento de la trayectoria.  $\Lambda_1$  es una matriz definida positiva, y  $\tilde{q}_1(t) = q_1(t) - q_{1d}(t)$  denota el error de seguimiento de la trayectoria. Además, se observa que se incrementa la referencia de velocidad si la trayectoria actual  $q_1$  se aleja respecto a la trayectoria deseada  $q_{1d}$ .

De acuerdo con la propiedad 3, la ley de control (2.15) se puede expresar como

$$u_r = Y(q_1, \dot{q}_1, q_{1r}, \dot{q}_{1r}) \hat{\theta}(t) - B_1 s_1 \quad (2.16)$$

donde  $\hat{\theta}$  es estimación de  $\theta$  en la ecuación (2.14), que se modifica en línea de acuerdo con la ley de adaptación

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma Y^T s_1 \quad (2.17)$$

donde  $\Gamma$  es una matriz constante definida positiva, y el vector  $s_1$ , el cual puede ser tomado como una medida de la exactitud de la trayectoria, es definida como:

$$s_1 = \dot{q}_1 - \dot{q}_{1r} = \dot{\tilde{q}}_1 + \Lambda_1 \tilde{q}_1.$$

La anterior ley de control y ley de adaptación garantizan la convergencia global de los errores de seguimiento de trayectoria y velocidad mientras las trayectorias deseadas  $q_{1d}$ ,  $\dot{q}_{1d}$ , y  $\ddot{q}_{1d}$  sean acotadas. Para ver la comprobación de lo anterior consultar (Slotine y Li (1988)).

#### 2.4.- Modelo matemático de un robot con unión flexible.

El modelo matemático para el robot con unión flexible puede ser derivado de forma general como se hizo con el robot rígido utilizando las ecuaciones Euler-lagrange ver (Spong (1987)), el sistema resultante está dado por

$$D(\mathbf{q}_1)\ddot{\mathbf{q}}_1 + C(\mathbf{q}_1, \dot{\mathbf{q}}_1)\dot{\mathbf{q}}_1 + g(\mathbf{q}_1) + K(\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2) = \mathbf{0} \quad (2.18)$$

$$J\ddot{\mathbf{q}}_2 + B\dot{\mathbf{q}}_2 - K(\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2) = \mathbf{u} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2 \in \mathbb{R}^n$$

donde los vectores  $\mathbf{q}_1$  y  $\mathbf{q}_2$  representan la posición del brazo y del motor, respectivamente,  $J = \text{diag}[J_1, J_2, \dots, J_n]$  es la matriz de inercia de los motores,  $K = \text{diag}[k_1, k_2, \dots, k_n]$  es la matriz de rigidez de las uniones.

#### 2.5.- Propiedades

**Propiedad 1.** La matriz  $D(\mathbf{q}_1)$   $n \times n$  es simétrica, definida positiva para cada  $\mathbf{q}_1$ .

**Propiedad 2.** Los parámetros de interés (masa del brazo, momentos de inercia, etc.) en cada uno de los términos de la ecuación (2.18) aparecen como coeficientes de funciones conocidas de las coordenadas generalizadas.

**Propiedad 3.** El mapeo de  $\mathbf{u} \rightarrow \dot{\mathbf{q}}_2$  es pasivo. Esto es  $\int_0^T \mathbf{u}^T \dot{\mathbf{q}}_2 dt \geq -\gamma^2$ ,  
 $\forall t \geq 0, \gamma \in \mathbb{R}$

Se observa que existen más grados de libertad ( $2n$ ) que el número de controles ( $n$ ) por lo que la propiedad 2 que presenta el modelo rígido (ecuación 2.12) se pierde. Esto representa dificultad adicional que el problema de control de un robot rígido.

### 2.5.- Control de un robot con unión flexible.

Como se observa en las ecuación (2.18 y 2.19) tienen algunas propiedades de la ecuación para el robot rígido (2.12). Sin embargo, no existe una entrada de control independiente para cada grado de libertad y por lo tanto no se puede hacer las simplificaciones que se realizaron en el caso del robot rígido (ver Slotine y Li (1988)). Esto plantea un gran problema en este sistema, no se puede cancelar las no linealidades. Sin embargo, en los capítulos 3, 4 y 5 se analizarán algunos controladores los cuales fueron diseñados para evitar este inconveniente .

Las soluciones propuestas por los autores de los próximos controladores para el robot con unión flexible, fundamentalmente parten del algoritmo del robot rígido al cual sumarán un término de corrección para compensar la flexibilidad de la unión. La solución propuesta es de la forma

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_r + \mathbf{u}_f,$$

donde

$\mathbf{u}$  es el algoritmo de control para un robot con unión flexible.

$\mathbf{u}_r$  es el algoritmo de control para un robot rígido

$\mathbf{u}_f$  es el término de compensación de la flexibilidad de la unión.

El comportamiento de la unión flexible es interpretado de diferente manera por cada autor, obviamente esto origina que los controladores diseñados sean distintos entre sí, y que además presenten características dinámicas diferentes. En los siguientes capítulos nos

enfocaremos a analizar el término  $u$ ; el cual es una modificación para compensar la flexibilidad de la unión. con esto se aprovechan todas las propiedades del modelo dinámico del robot rígido que se mencionaron en este capítulo para obtener el controlador del robot con unión flexible. Por lo tanto el problema se simplifica considerablemente.

## 2.6- Robot de un grado de libertad con unión flexible.<sup>1</sup>

El modelo dinámico del brazo en el cual se probarán los algoritmos de los próximos capítulos se muestra en la siguiente figura.

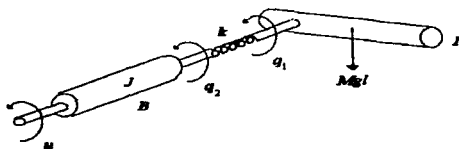


Figura 2.1

El modelo dinámico de este sistema está dado por :

$$I\ddot{q}_1 + Mgl \operatorname{sen}(q_1) + k(q_1 - q_2) = 0 \quad (2.20)$$

$$J\ddot{q}_2 + B\dot{q}_2 - k(q_1 - q_2) = u \quad (2.21)$$

Este sistema es de la forma (2.18) y (2.19), el coeficiente de fricción ( $B$ ) no es suficiente para estabilizar las oscilaciones elásticas de la unión y el término de corrección

<sup>1</sup> En este caso se trata realmente de un robot de 2 grados de libertad, debido a que la unión flexible introduce un grado adicional. Sin embargo, se utiliza la notación anterior para evitar confusión con la notación para el robot rígido, donde el número de uniones es igual al grado de libertad.

$(M_V)$  es requerido. El modelo rígido se muestra en la figura 2.2, es obtenido en el limite cuando  $k$  tiende a infinito.

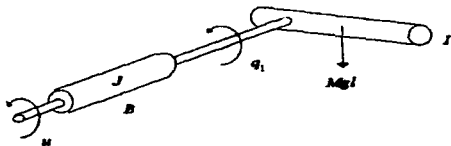


Figura 2.2

$$(I + J) \ddot{q}_1 + B \dot{q}_1 + Mgl \sin(q_1) = u \quad (2.21)$$

El coeficiente de fricción  $B$  en la anterior ecuación es conocida con suficiente precisión por lo que nosotros podemos simplemente cancelar esto en las siguientes leyes de control.

Únicamente el parámetro de inercia es afectado por la variación de la carga. Por consiguiente se define el vector  $\Theta$  como:

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I + J \\ Mgl \end{bmatrix}.$$

Donde

$I$  es la inercia del brazo,  $J$  es la inercia del rotor,  $B$  es el coeficiente de fricción del rotor,  $Mgl$  es el par de carga nominal y  $k$  es la rigidez del resorte.

## CAPÍTULO 3.

### CONTROL BASADO EN LA PERTURBACIÓN SINGULAR.

#### 3.1.- Ley de control.

El siguiente algoritmo fue propuesto por Ghorbel, Hung y Spong (1989) donde se asume que el robot trabaja bajo ciertas condiciones, tales como una unión de revolución impulsada por un motor de (CD) y la constante de rigidez  $K$  es del orden de  $1/\epsilon^2$ , para  $\epsilon > 0$ . En el caso de que  $\epsilon$  es pequeña se puede considerar la flexibilidad de la unión como una perturbación singular.

La ley de control está dada por el siguiente algoritmo

$$M = M_R(q_1, \dot{q}_1) + K_v(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) \quad (3.1)$$

donde  $M_R$  está dada por la ecuación (2.15) en términos de los vectores  $q_1$ ,  $\dot{q}_1$ .  $K_v$  es una matriz diagonal constante cuyos elementos son del orden de  $1/\epsilon$ , los vectores  $q_1$  y  $q_2$  representan la posición del brazo y del motor respectivamente. Para ver la demostración de que tal modificación logra la estabilidad consultar Ghorbel, Hung y Spong (1989).

En ausencia de perturbaciones externas, el sistema formado por (2.16), (2.17), (2.18), (2.19) y (3.1) es estable, pero en general, no asintóticamente estable, ya que los parámetros estimados no garantizan la convergencia sin condiciones adicionales en la referencia de entrada, llamado persistencia de excitación (ver Anderson (1982)).

### 3.2.- Principales propiedades del controlador.

**Propiedad 1.** El error de seguimiento de la posición y el error de la velocidad convergen a cero para toda referencia de trayectoria suave ( $q_{1d}, \dot{q}_{1d}$  y  $\ddot{q}_{1d}$  acotadas).

**Propiedad 2.** Todas las señales en el sistema de lazo cerrado están acotadas.

**Propiedad 3.**  $\hat{\theta}(t)$  es acotado, pero no necesariamente tiende al valor real  $\theta$ .

La robustez para perturbaciones externas puede obtenerse con una modificación de los parámetros de la ley actual como se propone en Ioannou y Kokotovic(1984) o usar una entrada de excitación permanente (Anderson (1982)) para garantizar la convergencia de los parámetros, y, por lo tanto estabilidad exponencial.

### 3.3.- Observaciones en la implementación.

Ahora considerando el robot con unión flexible ecuaciones (2.20) y (2.21). El diseño de la ley de control para el término  $u_R$  está dado por la ley de control (2.15). Usando el algoritmo de Slotine y Li (1986) para calcular este término, la ley de control completa con el término de compensación para el robot de un grado de libertad está dada por

$$u = \hat{\theta}_1 \ddot{q}_1 + \hat{\theta}_2 \text{sen}(q_1) + B\dot{q}_1 - B_1 s_1 + K_v(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) \quad (3.5)$$

donde  $\bar{q}_i$ , y  $s_i$  están dadas por

$$\begin{aligned} \bar{q}_i &= q_i - q_{i,d}, & \dot{q}_{1r} &= \dot{q}_{1d} - \Lambda_1 \bar{q}_1, \\ s_i &= \dot{q}_i - \dot{q}_{i,r}, & \dot{q}_{i,r} &= \frac{d}{dt} \bar{q}_{i,r}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

$\Lambda_1$  es una matriz constante diagonal definida positiva dada en el capítulo 2. Seleccionando  $\Gamma^{-1} = \text{diag}(g_1, g_2)$ , La ley de adaptación de parámetros está dada para la ecuación (3.1) como

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = -g_1 \bar{q}_{1r} s_1. \quad (3.7)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = -g_2 \text{sen}(q_1) s_1. \quad (3.8)$$

El cálculo de los valores estimados  $\hat{\theta}$  se implementa realizando una aproximación de la derivada de  $\hat{\theta}$  como

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \frac{d\hat{\theta}(t)}{dt} \cong \left[ \frac{\hat{\theta}(kT) - \hat{\theta}((k-1)T)}{T} \right],$$

el término  $\hat{\theta}(kT)$  representa el valor de los parámetros estimados para el tiempo de muestreo presente ( $kT$ ), y  $\hat{\theta}((k-1)T)$  es el valor para el tiempo de muestreo pasado



$(k-1)T$ . El tiempo de muestreo en nuestro caso ( $T$ ) es de 1ms. Los valores de los parámetros estimados  $\hat{\theta}(kT)$  se despejan de las ecuaciones (3.7) y (3.8)

$$\hat{\theta}_1(kT) = \hat{\theta}_1((k-1)T) - T(g_1 \ddot{q}_1(kT) s_1(kT)).$$

$$\hat{\theta}_2(kT) = \hat{\theta}_2((k-1)T) - T(g_2 \text{sen}(q_1(kT)) s_1(kT)).$$

Como se puede observar en estas ecuaciones para calcular los parámetros  $\hat{\theta}_1(kT)$  y  $\hat{\theta}_2(kT)$  solo se necesitan los valores anteriores de éstos. Los términos de  $\ddot{q}_1(kT)$ ,  $s_1(kT)$  se pueden calcular en línea por medio de las expresiones (3.6),  $q_1(kT)$  es la posición del brazo en el instante de muestreo ( $kT$ ).

Los valores iniciales aproximados del vector  $\theta$  están dados por una estimación fuera de línea como se muestra continuación.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{I} + \hat{J} \\ \hat{Mgl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.001 \\ 10 \end{bmatrix}$$

$(\hat{I} + \hat{J})$  son los valores aproximados de las inercias del motor y del brazo,  $(\hat{Mgl})$  es el par de la carga nominal aproximada.

El cálculo de las derivadas ( $\dot{q}_1$ ,  $\dot{q}_2$  y  $\dot{q}_3$ ) para la obtención de  $s_1$ ,  $\dot{q}_1$ , y  $\ddot{q}_1$ , se realizó por medio de la aproximación numérica

$$\dot{q}_1 \cong \frac{q_1(kT) - q_1((k-1)T)}{T}$$

$$\dot{q}_2 \cong \frac{q_2(kT) - q_2((k-1)T)}{T}$$

$$\dot{q}_4 \cong \frac{q_4(kT) - q_4((k-1)T)}{T}$$

La selección de este tipo de derivación numérica se debe a la simplicidad de las expresiones y no requieren de un gasto computacional mayor comparado con otros métodos recursivos. Sin embargo, la señal derivada presenta cierto ruido pero esto no afecta de forma significativa el desempeño del algoritmo de control. Por lo que es aceptable este método de derivación y no se consideró necesario tener que implementar algún otro método que complicaría el algoritmo.

Los resultados experimentales de este controlador se muestran en el capítulo 7.

## CAPÍTULO 4.

### CONTROL BASADO EN LA PROPIEDAD DE PASIVIDAD.

#### 4.1 Ley de control.

El modelo del robot con unión flexible posee la propiedad de pasividad. Visto esto en términos de la energía

$$\int_0^T \dot{w}^T \dot{q}_2 dt \geq -\gamma_i^2, \quad \forall t \geq 0$$
$$\gamma_i \in \mathbb{R}$$

esto fue aprovechado para diseñar un controlador para el robot de unión flexible, pero este diseño presenta ciertas restricciones que se mencionarán más adelante.

El algoritmo que se implementará en este capítulo fue propuesto por Brogliato, Ortega y Lozano (1995). Ellos aplican la técnica basada en pasividad para sistemas del tipo Euler-Lagrange propuesta por Takegaki y Arimoto (1981), para la obtención de controladores basados en pasividad, este método permite derivar diferentes controladores con solo seleccionar diferentes funciones de malla cerrada de energía potencial deseada, este controlador es exponencialmente estable, y también admite una implementación adaptable.

Sin embargo hay que hacer notar que las técnicas descritas por Ortega y Spong (1989) son aplicables a robots rígidos, y no pueden ser generalizadas a robots con uniones flexibles, pero para una selección adecuada de la función de energía potencial se garantiza en

forma particular que estas técnicas puedan extenderse a los sistemas de robots con uniones flexibles.

Antes de mostrar el algoritmo de control basado en esta técnica primero se darán algunas definiciones de los términos de error como se hizo en caso del robot rígido (capítulo 2) y algunas expresiones que sirven como apoyo para la presentación del algoritmo.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \bar{q}_1 \\ \bar{q}_2 \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix},$$

donde los términos  $s_1$ ,  $\bar{q}_1$  y  $\dot{q}_1$ , fueron definidos en el capítulo 2 en función de  $q_1$ . Las expresiones que definen a  $s_2$ ,  $\bar{q}_2$  y  $\dot{q}_2$ , son de la misma forma que los términos anteriores pero en función de  $q_2$ .

$$\bar{D} = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{g} = \begin{bmatrix} g \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix}.$$

En este procedimiento  $q_{2d}$  fue definido para asegurar el modelo de la energía (energy shaping), así que la energía total de la malla cerrada iguala a una energía deseada.

La función de la energía deseada para este controlador es de la forma.

$$H_d = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \bar{D} \mathbf{s} + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{q}}^T \bar{K} \bar{\mathbf{q}},$$

y la dinámica del error de perturbación deseado

$$\bar{D}\dot{s} + (\bar{C} + \bar{B})s + \bar{K}q = \psi \quad (4.1)$$

con el término de perturbación  $\psi$

$$\psi = \bar{u} - (\bar{D}\dot{q}_r + \bar{C}q_r + \bar{K}q_d + \bar{g}) + \bar{B}s.$$

Igualando a cero se obtiene la siguiente ley de control

$$s = J\dot{q}_{2r} + K(q_{2d} - q_{1d}) - B_2 s_1, \quad (4.2)$$

$$q_{2d} = K^{-1} s_R + q_{1d}, \quad (4.3)$$

donde  $s_R$  es el algoritmo de control definido en el capítulo 2 por la ecuación (2.15).

Para ver la demostración de convergencia global consultar Brogliato, Ortega y Lozano (1994), donde el análisis de estabilidad se llevó a cabo por medio de una función Lyapunov.

#### 4.3 Principales propiedades del controlador.

**Propiedad 1.** La ecuación de error establece un mapeo estrictamente pasivo. Esto permite garantizar la estabilidad asintótica global con la ley de control (4.2) y (4.3).

**Propiedad 2.** El controlador propuesto anteriormente no es único. Utilizando esta técnica se pueden seleccionar diferentes funciones de energía potencial deseadas para obtener otros controladores.

**Propiedad 3.** La función de la energía deseada para este controlador garantiza que el análisis de estabilidad pueda hacerse por medio de un análisis de Lyapunov. Debido a los estados adicionales, producidos por la flexibilidad de la unión, no es posible establecer de una forma general que el análisis pueda hacerse por medio de Lyapunov para cualquier selección de función de energía potencial deseada, como en el caso de los robots rígidos.

**Propiedad 4.** Notar en particular que la ley de control es independiente de la ganancia  $K$ ; la dependencia en  $K$  viene únicamente de  $K^{-1}$  y  $K(q_2 - q_1)$ , la cual queda limitada cuando  $K \rightarrow \infty$ . Cuando  $K$  crece ilimitadamente, la ley de control converge al controlador propuesto por Slotine y Li (1988) para los robots completamente rígidos.

#### 4.3. Observaciones en la implementación.

Para poder calcular  $u$  para el brazo de prueba de un grado de libertad, en la ecuación (4.2) necesitamos conocer  $\ddot{q}_{2x}$  y  $u_x$ , tenemos que :

$$\ddot{q}_{2x} = \ddot{q}_{2d} - \Lambda_2 \dot{\tilde{q}}_2.$$

$$s_2 = \dot{\tilde{q}}_2 + \Lambda_2 \tilde{q}_2.$$

Se observa que las ecuaciones anteriores son las mismas que las vistas en el capítulo anterior pero ahora para  $q_2$ . Por lo que se utiliza el mismo método computacional para el cálculo de  $\dot{q}_2$  y  $s_2$ .

De la ecuación (4.3) tenemos

$$u_R = K(q_{2d} + \dot{q}_{1d}),$$

por lo tanto la ecuación (4.1) puede ser escrita nuevamente como

$$u = u_R + J\dot{q}_{2r} - B_2 s_2,$$

donde  $u_R$  es el algoritmo para el robot rígido propuesto en el capítulo 2 dado por la ecuación (2.15), el cual se resolvió utilizando la ley de adaptación (2.17) como se hizo en el capítulo 3.

La similitud de los términos del algoritmo basado en pasividad y el presentado en el capítulo 3 permite que se utilicen las mismas técnicas para el cálculo de los parámetros estimados de  $u_R$  y de los términos de corrección  $\dot{q}_2$  y  $s_2$ .

## CAPÍTULO 5.

### CONTROL BASADO EN UN OBSERVADOR.

Generalmente las aplicaciones de control de robots actualmente son resultados utilizando un controlador proporcional y derivativo ( PD ) con compensación de gravedad. Una desventaja de estos controladores es que ellos requieren de mediciones de velocidad de la unión, la cual a menudo está contaminado con ruido. Para evitar este inconveniente, una solución es la diferenciación numérica de la posición. Hoy en día es frecuentemente empleada esta solución en aplicaciones de robotica. Sin embargo este tipo de reconstrucción de la velocidad es inadecuadas para baja y alta velocidad.

Una aproximación alternativa que se considera en la literatura de control es el diseño de un observador que utiliza información de la posición para reconstruir la señal de velocidad, entonces el controlador es implementado remplazando la medición de la velocidad por su valor estimado. Es importante notar que esto no es equivalente para sistemas no lineales, como es el caso del robot con unión flexible. Sin embargo, se puede aprovechar que el valor estimado converge al valor real de la señal y esto cambia la estabilidad de la malla cerrada. En el trabajo presentado por Nicosia y Tomei (1990) se propone un observador no lineal que reproduce la dinámica total del robot, es usado en el diseño de un controlador PD con compensación de gravedad. En el trabajo de Berghuis y Nijmeijer (1992) es mostrado que sumando un término proporcional al error de observación del controlador PD compensado, permite utilizar un observador lineal mientras aún se preserva la estabilidad asintótica local para una ganancia lo suficientemente grande. Las soluciones existentes del problema de regulación de punto fijo sin mediciones de velocidad tienen algunas desventajas. Por el momento únicamente es local y requiere de una ganancia alta.



Otro factor que dificulta el desempeño de estos controladores es la presencia de flexiones de las uniones causada por los impulsos armónicos, la torsión de piezas largas, la deformación de conexiones, y la compresibilidad del fluido en robots hidráulicos. Es conocido por Spong y Vidyasagar (1989) que en ausencia de gravedad el control PD realiza del lado del motor un amortiguamiento en la tarea de regulación punto a punto en la presencia de la unión flexible. En el documento (Tomei (1991)) se muestra que para compensar los efectos de la gravedad es suficiente sumar un término de compensación constante (la fuerza de gravedad en la posición deseada del brazo) al control PD. Para algunas selecciones adecuadas de ganancia aún es preservada la estabilidad asintótica global.

El controlador que se presentará posteriormente asume que la rigidez de la unión predomina sobre la fuerza de gravedad, si la rigidez de la unión es conocida, entonces nosotros podemos sintonizar la ganancia del controlador para que el punto de equilibrio coincida con la posición deseada. Además, el diseño de formación de la energía total de malla cerrada del sistema es tal que se garantiza que es absolutamente mínimo en el punto de equilibrio deseado, y se suma el requerido amortiguamiento para realizar la estabilidad asintótica. A continuación se dan algunas consideraciones importantes que se plantearon para el diseño del algoritmo.

Dada una posición constante deseada para el ángulo del brazo se supone que

- (1) se conoce las fuerzas de gravedad en  $q_{1d}$  por ejemplo.  $g(q_{1d})$ ,
- (2) la medida de la posición de el motor  $q_2$ ,
- (3) el coeficiente de rigidez domina sobre las fuerzas de gravedad en la siguiente razón

$$\lambda_{\min}\{K\} > \delta\beta, \quad (5.1)$$

donde  $\lambda_{\min}\{\cdot\}$  denota el mínimo de los valores propios de una matriz,  $\alpha > 1$  es una constante determinada posteriormente, y

$$\beta := \max_{\mathbf{q}_1 \in \mathcal{K}^*} \left\| \frac{\partial \mathcal{K}(\mathbf{q}_1)}{\partial \mathbf{q}_1} \right\|, \quad (5.2)$$

donde  $\|\cdot\|$  representa la norma en el espacio Euclidiano,  $\|\mathbf{x}\| = \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$ .

(4) se tiene una aproximación del coeficiente de rigidez de la unión  $\hat{K}$  tal que  $\hat{K} \geq \delta\beta$ .

Bajo estas condiciones se diseñó la ley de control que asegura que el punto de equilibrio es único y global asintóticamente estable, además, el punto de equilibrio se aproxima a la posición deseada cuando la rigidez de la unión se aproxima al valor real, y (exactamente) coincide con la posición deseada siempre que la rigidez de la unión sea conocida.

### 5.1 Ley de control.

Considerando el modelo del robot (2.18 y 2.19) y asumiendo que el coeficiente de la unión flexible satisface (5.1) con  $\beta$  dada en (5.2). El controlador es definido por

$$\mathbf{u} = K_2(\hat{\mathbf{q}}_2 - \mathbf{q}_2), \quad (5.3)$$

$$\ddot{\hat{\mathbf{q}}}_2 + B\dot{\hat{\mathbf{q}}}_2 + K_1(\hat{\mathbf{q}}_2 - \alpha) = -K_2(\hat{\mathbf{q}}_2 - \mathbf{q}_2), \quad (5.4)$$

donde

$$B = B^T > 0,$$

$$K_1 = K_1^T > \delta \beta I,$$

$$K_2 = K_2^T > \delta \beta I,$$

$$\alpha := \mathbf{q}_{1d} + K_2 g(\mathbf{q}_{1d}),$$

$\mathbf{q}_{1d}$  es el vector de la posición (constante) deseada del brazo y

$$K_3 = \hat{K}^{-1} + K_1^{-1} + K_2^{-1},$$

$\hat{K} > \delta \beta I$  es una estimación de la flexibilidad, y

$$\delta := \lambda_{\min} \left( \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 3 \end{bmatrix} \right).$$

Bajo estas consideraciones, la malla cerrada del sistema (con estados  $\mathbf{x} := [\mathbf{q}_1^T, \dot{\mathbf{q}}_1^T, \mathbf{q}_2^T, \dot{\mathbf{q}}_2^T, \hat{\mathbf{q}}_2^T, \dot{\hat{\mathbf{q}}}_2^T]^T$ ) tiene un punto de equilibrio único,  $\mathbf{x}_s := [\mathbf{q}_{1s}^T, \mathbf{0}, \mathbf{q}_{2s}^T, \mathbf{0}, \hat{\mathbf{q}}_{2s}^T]^T$  además, es global asintóticamente estable, el cual satisface

$$\|\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_s\| \leq \gamma \|\hat{K} - K\|,$$

para algunas  $\gamma > 0$  (independientes de  $K$  y  $\hat{K}$ ), donde

$$\mathbf{x}_d := \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1d} \\ 0 \\ \mathbf{q}_{2d} \\ 0 \\ \hat{\mathbf{q}}_{2d} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1d} \\ 0 \\ \mathbf{q}_{1d} + K^{-1}g(\mathbf{q}_{1d}) \\ 0 \\ \mathbf{q}_{2d} + K_2^{-1}g(\mathbf{q}_{1d}) \\ 0 \end{bmatrix},$$

es la posición deseada. Así, si  $\hat{K} = K$  el objetivo de regulación del punto fijo es logrado.

### 5.2.- Principales propiedades del controlador.

**Propiedad 1.** El diseño asegura estabilidad global asintótica del equilibrio.

**Propiedad 2.** Únicamente la medición de la posición del motor es requerida.

**Propiedad 3.** El único conocimiento requerido para esta implementación es un límite superior en los parámetros de las fuerzas de gravedad y su valor en la posición deseada del brazo.

**Propiedad 4.** El controlador es lineal invariante con el tiempo de orden igual al número de grados de libertad del robot.

**Propiedad 5.** El punto de equilibrio coincide exactamente con la posición deseada del brazo cuando el coeficiente de rigidez es conocido.

**Propiedad 6.** El análisis de estabilidad es simple, y se basa en la clásica notación en mecánica de disipación de energía y fricción.

### 5.3.- Observaciones en la implementación.

En la ecuación de control (5.3) se puede observar que la salida  $w$  depende únicamente de los valores de  $\hat{q}_2$  y  $q_2$ . Por lo tanto, para poder implementar este controlador es necesario resolver la ecuación diferencial dada por (5.4). Nosotros consideramos conveniente en representar esta ecuación diferencial de segundo orden en un sistema de dos ecuaciones diferenciales de primer orden dado por

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{q}_2 \\ \dot{\hat{q}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(K_1 + K_2) & -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{q}_2 \\ \dot{\hat{q}}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_2 \end{bmatrix} q_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ K_1 \end{bmatrix} \alpha \quad (5.5)$$

aproximando la matriz de derivadas como

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{q}(t) \\ \dot{\hat{q}}(t) \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} \frac{\hat{q}(T(k-1)) - \hat{q}(Tk)}{T} \\ \frac{\dot{\hat{q}}(T(k-1)) - \dot{\hat{q}}(Tk)}{T} \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

dónde

$\hat{q}(Tk)$  representa el valor de  $\hat{q}_2$  para el tiempo  $(Tk)$

$\hat{q}(T(k-1))$  representa el valor de  $\hat{q}_2$  para el tiempo  $(T(k-1))$

Sustituyendo la matriz de derivadas (5.6) en (5.5) tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\hat{q}(T_k) - \hat{q}(T(k-1))}{T} = \dot{\hat{q}}(T(k-1)), \quad (5.7)$$

$$\frac{\hat{q}(T_k) - \hat{q}(T(k-1))}{T} = -(K_1 + K_2)\hat{q}(T(k-1)) - B\dot{\hat{q}}(T(k-1)) + K_2q_2 + K_1\alpha, \quad (5.8)$$

despejando  $\dot{\hat{q}}(T_k)$  de la ecuación anterior

$$\dot{\hat{q}}(T_k) - \dot{\hat{q}}(T(k-1)) = -T(K_1 + K_2)\hat{q}(T(k-1)) - TB\dot{\hat{q}}(T(k-1)) + TK_2q_2 + TK_1\alpha,$$

$$\dot{\hat{q}}(T_k) = \dot{\hat{q}}(T(k-1)) - T(K_1 + K_2)\hat{q}(T(k-1)) - TB\dot{\hat{q}}(T(k-1)) + T(K_2q_2 + K_1\alpha), \quad (5.9)$$

de la ecuación (5.7)

$$\hat{q}(T_k) = \hat{q}(T(k-1)) + T\dot{\hat{q}}(T(k-1)). \quad (5.10)$$

Se puede notar en las ecuaciones (5.9) y (5.10) que para calcular el valor de  $\hat{q}(T_k)$  y  $\dot{\hat{q}}(T_k)$  solo es necesario conocer los valores de  $q_1$ ,  $\dot{\hat{q}}(T(k-1))$  y  $\hat{q}(T(k-1))$ . Por lo tanto, la solución de la ecuación diferencial es posible realizarla en línea, esto es, si nosotros conocemos los valores anteriores dados en un tiempo  $(T(k-1))$ , con las expresiones anteriores es posible estimar los valores presentes en  $(T_k)$ , el algoritmo para solucionar esta ecuación diferencial se ejecuta en cada periodo de muestreo.

En este caso la expresión que define  $\alpha$  se reduce al valor de la posición deseada del brazo

$$\alpha = q_{1,d}$$

dado que

$$g(q, \dot{q}) = 0,$$

el valor de la función de la gravedad en dicho punto es nulo para este caso en particular, por que el brazo de experimentación se mueve en un plano perpendicular a la fuerza de gravedad, por lo tanto la función de energía potencial de la posición inicial a el final de la posición deseada no varia, y no interviene en nuestro algoritmo.

Otra observación importante es que los valores de la de rigidez de la unión flexible no se conoce con suficiente precisión, por lo que las ganancias  $K_1$  y  $K_2$  se modificaron para que el punto de equilibrio coincidiera con el valor de la posición deseada. Sin embargo, esto puede originar que el valor de las ganancias sean muy grande y provocar problemas de estabilidad .

Otra alternativa para corregir este problema es modificar el valor de  $\alpha$  para lograr que dicho punto de equilibrio coincida con el valor de la posición deseada del brazo del robot.

Como se mencionó anteriormente si el valor de  $K_1$  y  $K_2$  se conocen con suficiente precisión, el punto de equilibrio coincide con la posición deseada por lo que el único parámetro que se tendría que ajustar es el valor de  $\alpha$ .

En el capítulo 7 se muestran los resultados experimentales de este controlador.

## CAPÍTULO 6.

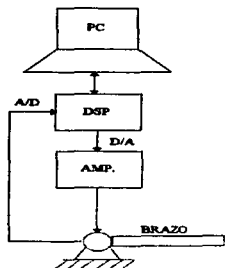
### MÓDULO DE EXPERIMENTOS.

#### 6.1- Descripción general del equipo.

El módulo de experimentos está compuesto por tres bloques principales los cuales podemos clasificar como:

- 1.- Módulo de control.
- 2.- Módulo de potencia.
- 3.- Brazo mecánico.

El módulo de control está formado por una PC y una tarjeta DSP, el módulo de potencia está formado por un amplificador de corriente, el brazo mecánico se compone por un robot de un grado de libertad. El diagrama 6.1 muestra esquemáticamente la forma en que están conectados estos módulos.



6.1 Diagrama a bloques del módulo de experimentos



## **6.2.- Descripción de cada uno de los elementos del equipo.**

El módulo de control está formado por una PC y una tarjeta de procesamiento digital de señales (DSP). La computadora es utilizada como interfaz entre el programador y la tarjeta (DSP), esto permite que los programas pueden ser compilados y cargados desde la PC en lenguaje C, utilizando las funciones que acompañan al software de la tarjeta .

Una vez que el programa de control ha sido compilado y cargado por medio de la función `down31`, el programa queda residente en la tarjeta (DSP), y se puede ejecutar el algoritmo de una manera autónoma de la PC. Sin embargo, existe la posibilidad de monitorear y modificar los parámetros del controlador, mientras se está ejecutando el algoritmo de control empleando el software de la tarjeta. Además, proporciona una interfaz gráfica que es compatible con Windows (Cockpit y trace).

La tarjeta de procesamiento digital de señales (DSP) es la parte central del sistema de control, cuenta con una memoria RAM donde se carga el algoritmo de control para que pueda ser ejecutado de manera independiente de la PC, además cuenta con una memoria ROM donde se almacenan funciones que utiliza la tarjeta. Cuenta con 3 convertidores A/D dos de 16 bits y otro de 12 bits, dos convertidores D/A y un contador incremental con una frecuencia máxima de conteo de 8.3 Mhz.

La tarjeta se encuentra insertada en una ramura de expansión ISA de la P.C, también dispone de un conector P10 macho que permite una conexión exterior a todos los puertos de los convertidores A/D y D/A , el puerto incremental y otras señales de referencia como Vcc y tierra.

### **Características de la PC.**

**P.C ACER Compatible con IBM.**

**Procesador 486 a 33 Mhz**

**8 Mbytes en RAM.**

**Disco duro de 220 Mbytes**

**Monitor SVGA.**

### **Características de la tarjeta (DSP).**

#### **Procesador principal**

**DSP Texas Instruments TMS320C31 de punto flotante  
a 40 Mhz y 50 ns tiempo de ciclo.**

**Dos timers de 32 bit.**

**Comunicación serial bidireccional de 8 Mbaud**

#### **DMA**

**4 líneas de interrupción.**

**Memoria de 128Kx32 Bit**

**Memoria 2Kx32 bit**

#### **Procesador secundario**

**Texas Instruments TMS320P14 DSP**

**25 Mhz y 160 ns tiempo de ciclo.**

**Unidad aritmética de 32 bit**

**4Kx16 PROM conteniendo software de apoyo**

**4Kx16 RAM para programa externo**

**256x16 bit RAM para datos**

La etapa de potencia está formada por un módulo compuesto por un amplificador operacional, que se conecta en nuestro caso como un seguidor de voltaje, lo que proporciona una ganancia de corriente. La salida del convertidor D/A es conectada directamente a la entrada de esta etapa, posteriormente, a la salida de este módulo se tiene la señal con el mismo nivel de voltaje, pero con una ganancia de corriente, tal señal alimenta directamente al motor de CD.

#### Características del amplificador operacional.

Máxima salida de corriente.	3 Amperes
Potencia máxima de salida.	40 Wats
Ancho de banda a gran potencia.	60 KHz.
Ancho de banda para señales pequeñas.	700 KHz.

El robot con unión flexible está formado por un brazo y un servo que además de dar soporte al brazo también aloja al motor, los engranes y los sensores de posición.

La flexibilidad de la unión es simulada por un par de resortes que se conectan entre el brazo del robot y una base giratoria como se muestra en el siguiente figura.

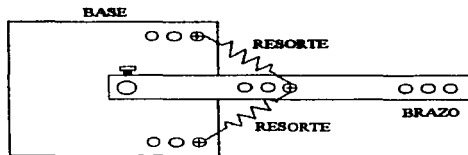


Figura 6.2 Simulación de la flexibilidad de la unión.

### **Servo rotativo (SRV-02).**

Este módulo es el encargado de mover al brazo, está compuesto por una plataforma que cuenta con un motor de CD, engranes y los sensores de posición. La plataforma tiene una caja de engranes que está conectada directamente a la salida del motor de CD, la finalidad de los engranes es la de aumentar mecánicamente el par de salida del motor la relación de los engranes es de 14:1, la salida de la caja de engranes se acopla con la base giratoria del brazo de la figura 6.2 por medio de dos engranes con una relación 5:1, que puede modificarse a 1:1. Esta plataforma cuenta con dos potenciómetros que sirven como sensores de posición los cuales se detalla continuación.

#### **Sensores de posición.**

Los sensores de posición están formados por dos potenciómetros, uno que está acoplado directamente a la salida de la caja de engranes, la medición que se obtiene por medio de este potenciómetro es la posición del motor  $q_2$ , el segundo potenciómetro está acoplado al brazo que se muestra en la figura anterior por medio de un par de engranes y la medición que se obtiene es  $q_1$ .

En las siguientes figuras se muestra el servo rotativo y el diagrama de conexión de los sensores de posición.

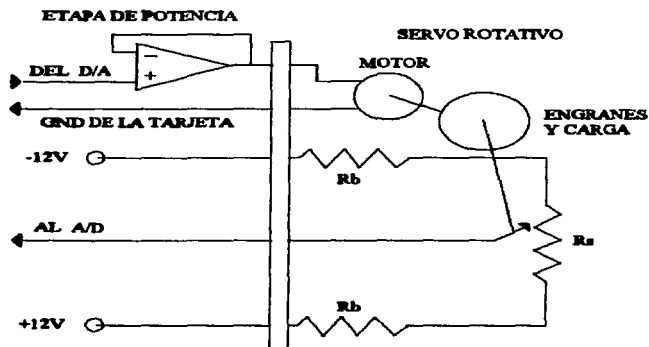


Figura 6.3 Servo rotativo.

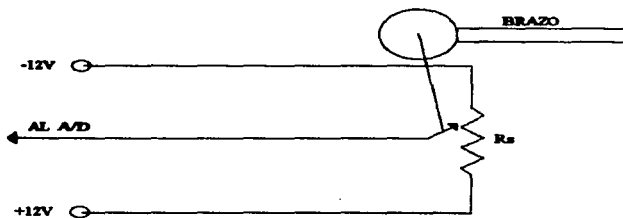


Figura 6.4 Sensor de posición  $q_1$ .

La siguiente tabla muestra características de las partes que forman el servo rotativo  
(SRV-02)

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
<b>MOTOR</b>		
CONSTANTE DE TORQUE DEL MOTOR	0.00767	Nm/amp V/(rad/seg)
EFICIENCIA	0.9	
RESISTENCIA DE ARMADURA	2.6	$\Omega$
INDUCTANCIA DE ARMADURA	0.18	mHenry
VOLTAJE MÁXIMO	6.0	Volts
INERCIÓN DE LA ARMADURA	$3.87 \text{ e}^{-5}$	Kgm <sup>2</sup>
<b>RELACIÓN DE ENGRANES</b>		
RELACIÓN INTERNA	14:1	
RELACIÓN EXTERNA ALTA	1:1	
RELACIÓN EXTERNA BAJA	1:5	
RELACIÓN DE ENGRANES	14:1 70:1	
<b>INERCIÓN DE LOS ENGRANES</b>		
CARGA DE INERCIÓN DEL DISCO DE LA ARMADURA AL CENTRO	0.00003	Kgm <sup>2</sup>
DE LA ARMADURA AL FINAL	0.0000275	
120 DIENTES	0.001 $2.27 \text{ e}^{-3}$	Kgm <sup>2</sup>
72 DIENTES	$1.4 \text{ e}^{-3}$	Kgm <sup>2</sup>
24 DIENTES	$1.0 \text{ e}^{-3}$	Kgm <sup>2</sup>
<b>SENSOR DE POSICIÓN</b>		
RESISTENCIA DEL POTENCIOMETRO	10	K $\Omega$
VOLTAJE DE BIAS	+/- 12	Volts
RESISTENCIA DE BIAS	7.15	K $\Omega$
RANGO	+/- 176	Grados
SENSIBILIDAD	0.0284	V/Grados

## CAPÍTULO 7.

### PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS INDIVIDUALES.

#### 7.1.- Acondicionamiento de las señales

Un punto importante en la implementación de los algoritmos es que las lecturas de las señales  $q_1$  y  $q_2$  tomadas por un par de potenciómetros, las cuales son registradas directamente por los convertidores A/D presentaban un nivel de ruido importante. Por lo tanto, se tuvieron que filtrar utilizando un filtro digital de primer orden, del cual se muestra su función de transferencia.

$$\frac{x_f}{x} = \frac{\omega}{s + \omega},$$

donde  $x_f$  es la señal filtrada y  $x$  es la señal a filtrar.

Utilizando transformación bilineal para su implementación digital.

$$s = \frac{2}{T} \frac{z - 1}{z + 1}.$$

Y definiendo

$$a_f = \frac{\omega T}{\omega T + 2},$$

$$b_f = \frac{\omega T - 2}{\omega T + 2}.$$

témos

$$x_r(kT) = -b_r x_r((k-1)T) + a_r x(kT) + a_r x((k-1)T),$$

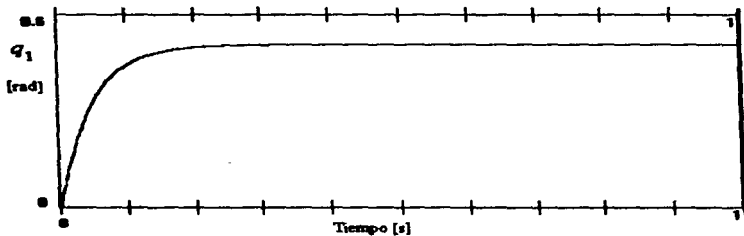
donde  $T$  es el tiempo de muestreo,  $\omega$  es la frecuencia natural del filtro.

El valor de  $\omega$  con el cual se obtiene una señal filtrada con un mínimo ruido es de 25,  $T$  es igual a 1ms. Por lo tanto, los valores resultantes de  $a_r$  y  $b_r$  son:

$$a_r = 0.01234$$

$$b_r = -0.9753$$

La gráfica siguiente muestra la respuesta escalón del filtro.



Gráfica 7.1



## 7.2- Definición de los criterios de comparación y su justificación.

A continuación se definirá un índice total de desempeño que represente en forma general el comportamiento de los controladores y que será utilizado como un parámetro de comparación entre los diferentes algoritmos que se han implementado, este índice está formado por tres parámetros de la respuesta escalón, estos son : El sobrepaso  $M_p$ , el tiempo de levantamiento  $t_l$  y la sumatoria del error absoluto del seguimiento de trayectoria.

El índice de desempeño total está dado por :

$$I = \omega_1 I_1 + \omega_2 I_2 + \omega_3 I_3 ,$$

donde

$I_1 = M_p$  es el sobrepaso (%),

$I_2 = t_l$  es el tiempo de levantamiento (seg),

$I_3 = \sum_{k=1}^N |q^k - q_{k-1}|$  es el error absoluto (rad),

los coeficientes  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  y  $\omega_3 \geq 0$  determinan el peso que se asigna a cada índice de desempeño y cumplen con

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1.$$

Experimentalmente se observó que los valores del índice de error del valor absoluto es demasiado grande en comparación con los otros índices, por lo que se normalizaron los valores de los índices  $t_l$  y error absoluto; Para que al hacer la suma las cantidades sean de un orden semejante y con esto puedan reflejar de forma proporcional su importancia.

Se tomaron como base los valores experimentales de la respuesta de un controlador que presenta valores de un nivel intermedio.

$$t_r = 1 \text{ seg.}$$

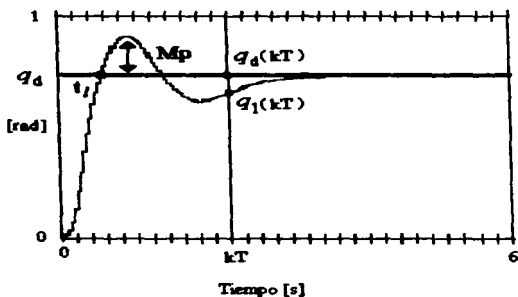
$$E_{ab} = 500.$$

Por lo tanto redefiniremos los índices  $I_2$  y  $I_3$  como :

$$I_2 = \frac{t_r}{1 \text{ seg.}}$$

$$I_3 = \frac{1}{500} \sum_{k=1}^n |q^d(kT) - q(kT)|.$$

La gráfica 7.2 muestra estos parámetros



Gráfica 7.2

La siguiente tabla muestra los resultados de algunos experimentos para el algoritmo basado en un observador con diferentes valores de  $\omega$ .

$\omega_1 = .1 \quad \omega_2 = .1 \quad \omega_3 = .8$				
EXPERIMENTO	Mp (%)	t <sub>r</sub> (Seg.)	ERROR AB. (rad)	I
EXP. 7	0.24%	0.606	128	0.2656
EXP. 8	4.2%	0.293	116	0.2119
EXP. 9	0%	0.83	189	0.3854

$\omega_1 = .2 \quad \omega_2 = .1 \quad \omega_3 = .7$				
EXPERIMENTO	Mp (%)	t <sub>r</sub> (Seg.)	ERROR AB. (rad)	I
EXP. 7	0.24%	0.606	128	0.2402
EXP. 8	4.2%	0.293	116	0.2001
EXP. 9	0%	0.83	189	0.3476

$\omega_1 = .3 \quad \omega_2 = .1 \quad \omega_3 = .6$				
EXPERIMENTO	Mp (%)	t <sub>r</sub> (Seg.)	ERROR AB. (rad)	I
EXP. 7	0.24%	0.606	128	0.2149
EXP. 8	4.2%	0.293	116	0.1811
EXP. 9	0%	0.83	189	0.3098

En las tablas anteriores puede notarse que para los diferentes valores de  $\omega$ , el orden de desempeño I se mantuvo. Sin embargo, el experimento 8 que tiene el mejor índice de desempeño en los tres casos, presenta el mayor sobrepaso pero, tiene un tiempo de levantamiento y un error absoluto menor que los demás. Por lo tanto, los valores de  $\omega$  en cada caso describen correctamente el comportamiento del controlador. En el tercer caso las

diferencias del índice I entre el experimento 8 y los otros experimentos son menores debido a que se le asignó mayor peso al parámetro  $M_p$ , nosotros utilizaremos estos valores de  $\omega$  para nuestra comparación debido a que refleja mejor el comportamiento de estos controladores, por lo que los valores de  $\omega$  están dados por:

$$\omega_1 = 0.3$$

$$\omega_2 = 0.1$$

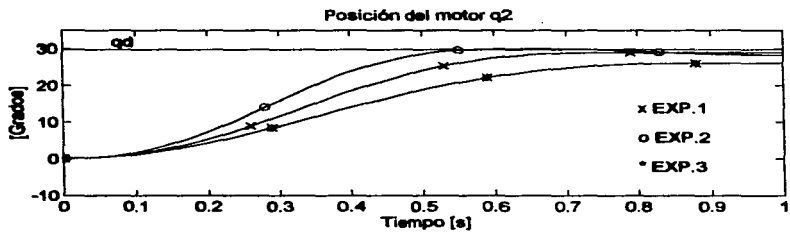
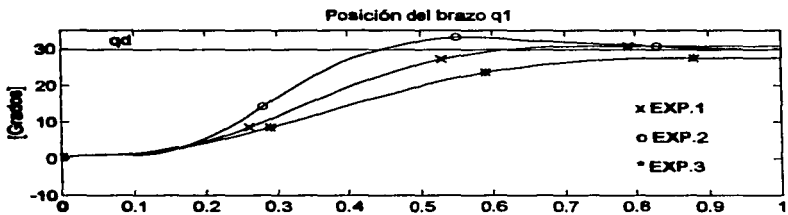
$$\omega_3 = 0.6$$

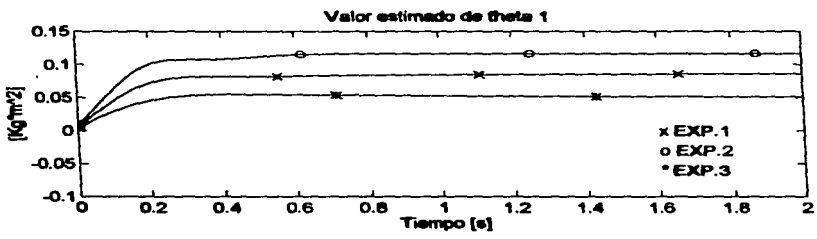
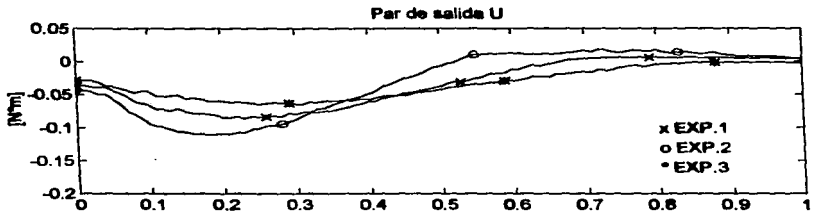
### 7.3.- Resultados de comparación.

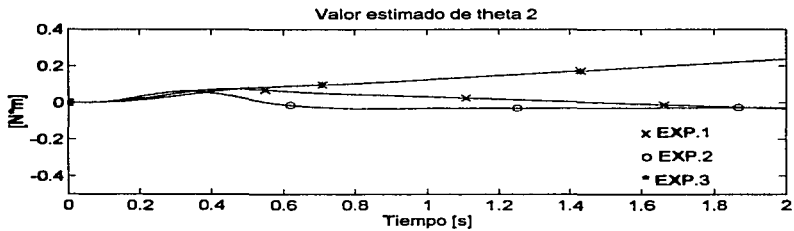
#### Controlador basado en la propiedad de perturbación singular

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el criterio de comparación definido anteriormente para el controlador basado en la propiedad de perturbación singular. La sintonización de este controlador se realizó experimentalmente modificando los valores de las ganancias, los resultados presentados son los que tuvieron mejor respuesta para diferentes valores de las ganancias. La tabla siguiente muestra estos valores.

EXPERIMENTO	PARAMETROS	GANANCIAS	SALIDA U	INDICE I	COMENTARIOS
EXP. 1 perturbación singular	$\theta_1=0.01$ $\theta_2=1$	$\Lambda_1=10$ $B_1=2$ $k_v=2$ $g_1=0.009$ $g_2=8$	$M_p=0$ $t_r=633$ $E_{ab}=268$	$I=0.3849$	La respuesta no tiene $M_p$ y es rápida. Presenta un pequeño error estacionario.
EXP. 2 perturbación singular	$\theta_1=0.01$ $\theta_2=1$	$\Lambda_1=12$ $B_1=2$ $k_v=2$ $g_1=0.009$ $g_2=8$	$M_p=13.3$ $t_r=446$ $E_{ab}=231$	$I=0.3617$	Se aumentó la ganancia $\Lambda_1$ , la respuesta es más rápida que la anterior pero tiene un sobrepaso. Sin embargo, el error absoluto se disminuyó y el error de estacionamiento es prácticamente cero.
EXP. 3 perturbación singular	$\theta_1=0.01$ $\theta_2=1$	$\Lambda_1=8$ $B_1=2$ $k_v=2$ $g_1=0.009$ $g_2=8$	$M_p=0$ $t_r=86$ $E_{ab}=362$	$I=0.5204$	Se disminuyó la ganancia $\Lambda_1$ , la respuesta es muy lenta, no tiene $M_p$ pero el error absoluto es mayor que las anteriores.





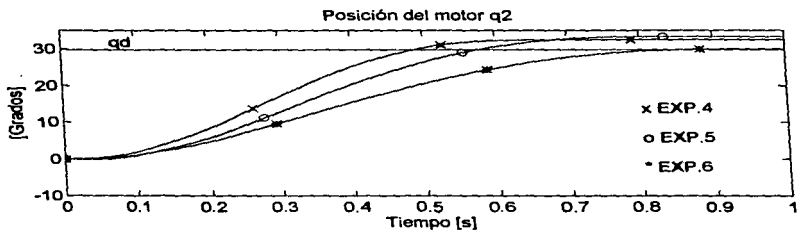
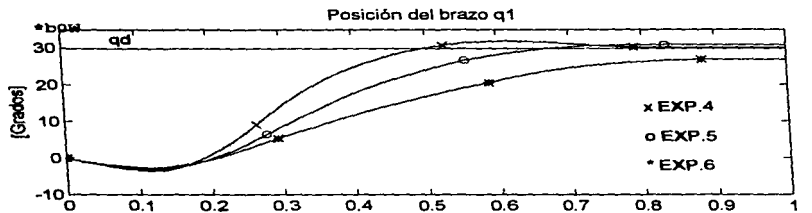


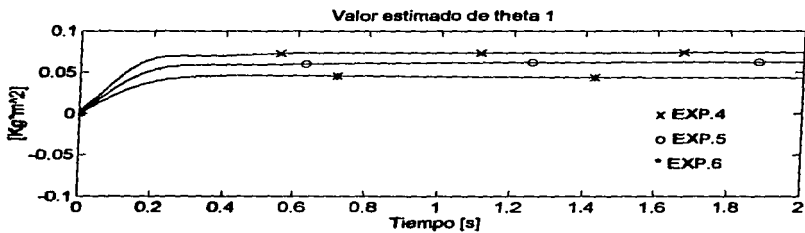
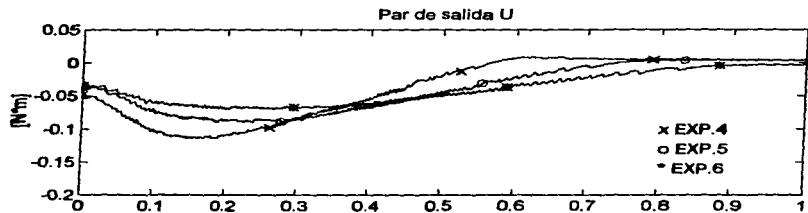


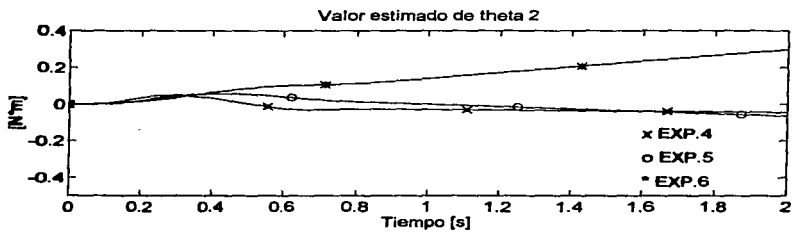
### Resultados del controlador basado en la propiedad de pasividad.

En las pruebas realizadas con este controlador los valores de las ganancias ( $B_1$ ,  $\Lambda_1$ ,  $g_1$  y  $g_2$ ) del algoritmo adaptable para resolver  $w_1$  son los mismos que los utilizados para el algoritmo basado en perturbación singular, los valores que se variaron para sintonizar este controlador son  $\Lambda_2$  y  $B_2$

EXPERIMENTO	PARAMETROS	GANANCIAS	SALIDA U	I	COMENTARIOS
EXP. 4 Pasividad	$J=0.0002$ $K=0.2$	$\Lambda_2=8$ $B_2=0.09$	$M_p=7.8\%$ $t_r=0.501$ $E_{ab}=234$	0.3543	La respuesta es buena, el error estacionario es prácticamente cero. Presenta un $M_p$ grande.
EXP. 5 Pasividad	$J=0.0002$ $K=0.2$	$\Lambda_2=7$ $B_2=0.09$	$M_p=1.24\%$ $t_r=0.63$ $E_{ab}=255$	0.3727	Se disminuyó el valor de la ganancia $\Lambda_2$ para disminuir el sobrepaso. El tiempo de levantamiento y el error absoluto aumentaron.
EXP. 6 Pasividad	$J=0.0002$ $K=0.2$	$\Lambda_2=6$ $B_2=0.09$	$M_p=0$ $t_r=0.8$ $E_{ab}=414$	0.5768	Se disminuyó la ganancia $\Lambda_2$ para hacer $M_p=0$ . El tiempo de levantamiento y el error absoluto aumentaron.



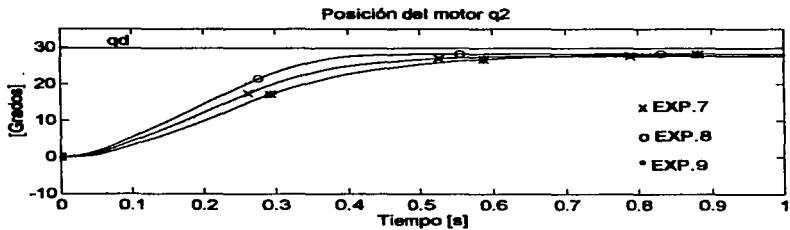
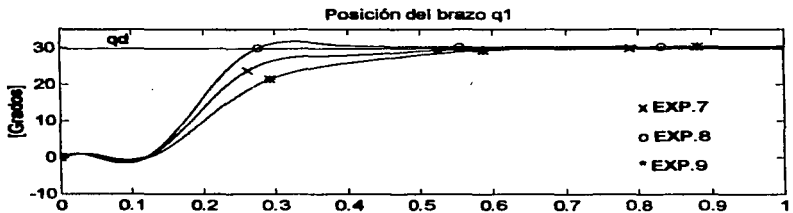


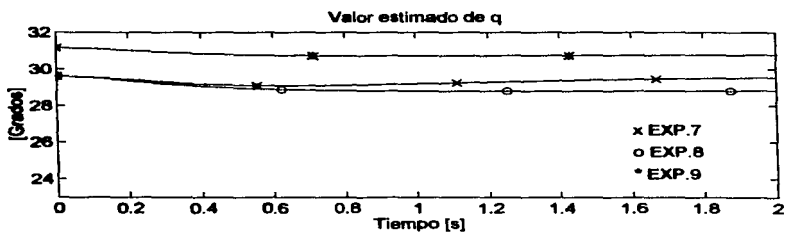
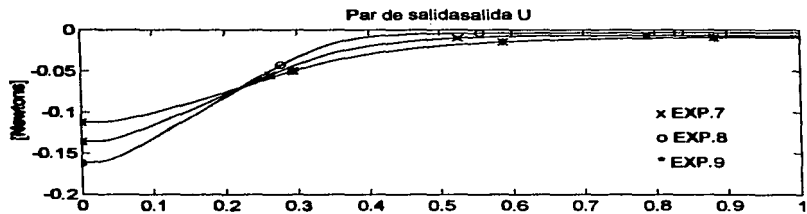


**Resultados del controlador basado en un observador.**

Las ganancias  $K_1$  y  $K_2$  se variaron para sintonizar adecuadamente la respuesta de este controlador, los resultados que se presentan son los que tuvieron mejores resultados en cuanto a su desempeño.

EXPERIMENTO	PARAMETROS	GANANCIAS	SALIDA U	I	COMENTARIOS
EXP. 7 observador	$B=1.6$	$K_1=.47$ $K_2=.47$	$Mp=0.24\%$ $t_r=.606$ $Eab=128$	0.2149	El error estacionario y $Mp$ son prácticamente cero. por lo tanto, la respuesta es buena.
EXP. 8 observador	$B=1.6$	$K_1=.55$ $K_2=.56$	$Mp=4.2\%$ $t_r=.293$ $Eab=116$	0.1811	Se incrementó el valor de las ganancias $K_1$ y $K_2$ , la respuesta es mas rápida que la anterior pero presenta cierto sobrepaso.
EXP. 9 observador	$B=1.2$	$K_1=.37$ $K_2=.37$	$Mp=0$ $t_r=0.83$ $Eab=189$	0.3098	Las ganancias $K_1$ y $K_2$ se disminuyeron, el tiempo de levantamiento y el error absoluto aumentaron. No presenta $Mp$ .





#### 7.4.- Resultados de comparación.

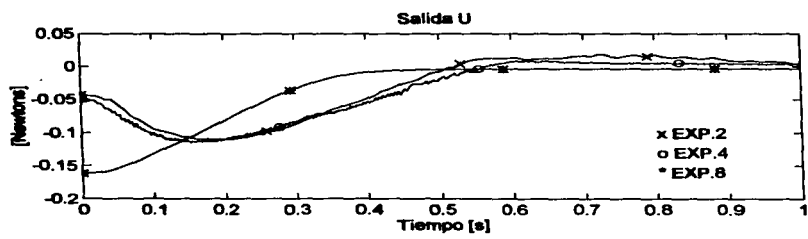
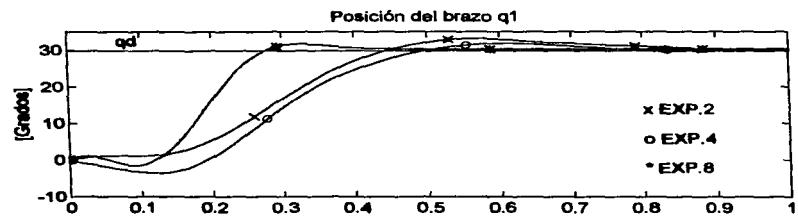
Para facilitar la comparación entre los controladores a continuación se muestran los mejores resultados experimentales de cada controlador donde se presenta exclusivamente la respuesta escalón de la salida. Tomando exclusivamente el índice de desempeño como único criterio de comparación.

EXPERIMENTO	Mp (%)	t <sub>r</sub> (Seg)	ERROR AB.	ÍNDICE I
EXP. 2 perturbación singular	Mp=13.3%	t <sub>r</sub> =.446	Eab=206	I=0.3317
EXP. 4 pasividad	Mp=7.8%	t <sub>r</sub> =.501	Eab=234	I=0.3543
EXP. 8 observador	Mp=4.2%	t <sub>r</sub> =.293	Eab=116	I=0.1811

Tabla 7.1

Es importante notar en la tabla 7.1 que los tres controladores que presentaron el mejor índice de desempeño de cada controlador presentan un sobrepaso. También se observa que el experimento 8 del control basado en un observador tuvo el mejor índice de desempeño. Además, la diferencia con los otros índices es casi el doble de éste. Por lo tanto, el controlador basado en un observador (experimento 8) tiene un desempeño mucho mejor que los experimentos 2 y 4. La diferencia que presenta el índice de desempeño I del experimento 8, se mantiene en cada uno de los tres parámetros que forman al índice. Esto es el Mp, t<sub>r</sub> y Eab. del experimento 8 son mejores que los obtenidos en los experimentos 2 y 4.





Comparando los experimentos 2 y 4 se nota que la diferencia del índice I es pequeña, dado que ambas respuestas son similares (ver las gráficas de  $Q_1$ ). Los parámetros de Eab. y t, hacen que el experimento 2 sea mejor que el experimento 4. Sin embargo, el experimento 4 presenta un sobrepaso mayor. Esto hace que el índice final de cada experimento sean muy cercanos. En este caso, los parámetros Eab. y t, dominaron sobre el parámetro de  $M_p$ , puesto que el índice del experimento 2 es mejor que el del experimento 4.

En la gráfica de la salida U se muestra el comportamiento de la salida de los tres controladores. El experimento 8 presenta la curva más suave, inicia en un valor máximo y comienza a disminuir cuando t aumenta. Esto hace que la respuesta sea más rápida.

El signo del par de salida U indica el sentido en que se aplica el par para mover al brazo. Para un movimiento del brazo en sentido de las manecillas del reloj se necesita un par negativo y para moverlo en sentido inverso el par debe ser positivo.

Con la aclaración anterior notamos que el par de salida del experimento 8 siempre es negativo. Esto indica que el par se aplicó en un sólo sentido. En los experimentos 2 y 4 esto no se cumple dado que el par llega ser positivo al final de la curva y es más acentuado para el experimento 2. Esto representa un esfuerzo adicional para los controladores 2 y 4.

Analizando el par de salida U para cada controlador al inicio de la curva, se observa que el par de los controladores de los experimentos 2 y 4 comienza con un valor pequeño y comienza a aumentar hasta llegar a un valor máximo posteriormente empieza a disminuir. Esto produce lentitud en la respuesta de la posición de  $Q_1$ . Además, representa más esfuerzo para el controlador. En el caso del controlador basado en pasividad éste comienza en un valor máximo, empieza a disminuir y nunca cambia la tendencia de U. Esto hace que la respuesta de  $Q_1$  sea más rápida y que el esfuerzo de control sea menor.

El par de salida  $U$  de los experimentos 2 y 4 son muy parecidas. Sin embargo, el esfuerzo de control es un poco menor para el experimento 4 por que la curva es más suave. Además presenta un menor valor positivo al final de la curva.

Las gráficas de  $U$  para los experimentos 2 y 4 presentan ruido. Esto se debe a que los algoritmos de control requiere del cálculo de las derivadas de  $q_1$  y  $q_2$ , las cuales tienen un nivel pequeño de ruido aún después de haber sido filtradas. Este ruido se incrementa en el proceso de derivación.

El experimento 8 no presenta ruido en la salida  $U$  debido a que no requiere de las derivadas de las señales  $q_1$  y  $q_2$ . Este controlador estima las derivadas a partir de la información de la posición y no requiere el algoritmo que se implementó en los experimentos 2 y 4 para el cálculo de las derivadas.

La implementación de los controladores basado en la perturbación singular y pasividad requieren del cálculo de más parámetros en comparación con el controlador basado en un observador, ya que utilizan el algoritmo adaptable para el robot rígido (Slotine y Li(1988)). Esto también complica la sintonización por que el algoritmo requiere de los valores adecuados de las ganancias de adaptación y la ganancia del sistema. Por el contrario el controlador basado en un observador es más sencillo de implementar. Solo requiere de la solución de una ecuación diferencial de segundo orden. Además la sintonización es simple, solo requiere de la modificación de dos ganancias.

Por último el cálculo de una derivada representa una dificultad adicional en el algoritmo adaptable pues se obtiene haciendo una aproximación numérica e introduce cierto ruido y los otros métodos existentes aumentarían el tiempo de ejecución del algoritmo. Esto podría ser un inconveniente en alguna aplicación.

## CONCLUSIONES .

El índice de desempeño que se propuso en esta tesis utilizando los parámetros más importantes de la respuesta escalón, refleja el comportamiento general de cada controlador que se implementó. Esto cumple con el objetivo principal que se planteó al inicio de esta tesis y que es dar una idea global del comportamiento de los controladores sin considerar una aplicación específica. El análisis de los resultados de los tres algoritmos comparados corroboran lo anterior.

El controlador basado en un observador (experimento 8) tuvo el mejor índice de desempeño. Además fue el que presentó mejor respuesta en cada uno de los tres parámetros que se consideraron para formar el índice I. Otra característica a favor de este controlador es que no requiere mediciones de las velocidades del motor y del brazo. Debido a esto la salida u de este controlador no presenta ruido. Esto es especialmente útil en aplicaciones de robots donde no se disponga de un mecanismo para medir la velocidad. Además la sintonización es simple y su implementación no requiere programar un algoritmo complejo.

El controlador basado en la perturbación singular (experimento 2) tuvo el segundo mejor índice de desempeño. Sin embargo, la respuesta de  $Q_1$  con el controlador basado en pasividad son semejantes. El sobrepaso que presenta este controlador es el mayor de los tres controladores que se compararon. Este parámetro no fue lo suficientemente grande para que modificara al índice I, de tal forma que se cambiara el orden en los resultados de la comparación para los experimentos 2 y 4. En este caso los parámetros ( $t_r$  y  $E_{ab}$ ) fueron los que dominaron finalmente en el índice I.

El tercer lugar considerando el índice de desempeño lo tiene el controlador basado en pasividad (experimento 4). Presento la respuesta más lenta y el error absoluto más

grande. Sin embargo, el Mp fue el segundo mejor, pero como se mencionó anteriormente no fue suficiente para alterar el orden de esta comparación.

Una característica importante que tienen los controladores basados en pasividad y el basado en la perturbación singular, es que al utilizar como parte de su diseño el algoritmo adaptable de Slotine y Li (1988), permite que el desempeño se mantenga aún con variaciones de la carga y mejora con el tiempo cuando existe una entrada de excitación permanente.

Un factor que puede provocar problemas de estabilidad para los dos controladores anteriores es que los parámetros estimados de  $\theta$  no convergen al valor real cuando no existe una entrada permanente de excitación.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Alion A. and R. Ortega (1993). "An observer-based set-point controller for robot manipulators with flexible joints." *System and control*, Pag. 329-335.
- [2] An, C. H. , C. G. Atkeson and J. M. Hollerbach (1985). "Estimation of inertial parameters of rigid body links of manipulators." *Proc. IEEE conf. On decision and control*, Fort Lauderdale, Florida.
- [3] Anderson B.D.O (Dec. 1982). "Exponential convergence and persistent excitation," *proc. 21 IEEE Conf. Decision and contr*, Pag. 12-17, Orlando Florida.
- [4] Berghuis H. and H. Nijmeijer (April 1992). "A passivity approach to controller-observer design for robots", University of Twente Int. Report 1050.
- [5] Brogliato R., R. Ortega y R. Lozano (1995). "Global tracking controllers for flexible joint manipulators : a comparative study" *Automatica*, Vol. 31, No. 7, Pag. 941-956.
- [6] De Luca A. and S. Panzieri (1992). "An iterative scheme for learning gravity compensation in flexible robot arms." *Cancun, Workshop on nonlinear systems and robotics*, Cancún, México.
- [7] Ghorbel Fathi, Mark W. Spong (Dec.1989) "Adaptive control of flexible-joint manipulators". *IEE conf. On robotics and automation*, Pag. 9-13, Scottsdale Arizona.
- [8] Ioannou P.A. and P.V. Kokotovic (Sept. 1984). "instability analysis and improvement of robustness adaptive control," *Automatica*, Vol. 20, No.5, Pag. 583-594.

- [9] Kanellakopoulos I. (1991). "Adaptive control of nonlinear systems", Ph. D. Thesis, University of Illinois.
- [10] Khosla, P. and T. Kanade (1985). "Parameter identification of robot dynamics," *IEEE conf. On decision and control*, Fort Lauderdale, Florida.
- [11] Nicosia S. and P. Tomei (1990). "Robot control by using only joint position measurement" *IEEE Trans. Automat. Control*, Vol. 35, Pag. 1058-1061.
- [12] Ortega, R. and M. W. Spong (1989). "Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial.", *Automatica*, Vol. 25, Pag. 877-888.
- [13] Slotine J. J. E. and W. Li (Dec. 1986). "On adaptive control of robot manipulators," *ASME Winter annual meeting*, Vol. 3, Pag. 51-56, Anaheim CA.
- [14] Slotine J. J. E. and W. Li (Nov. 1988). "Adaptive manipulators control : A case study." *IEEE transactions on automatic control*, Vol. 33, No. 11, Pag. 995-1003.
- [15] Spong, M. and M. Vidyasagar (1989). "Robot dynamics and control." Wiley, New York
- [16] Spong, M. W. (1987). "Modeling and control of elastic joint robots." *ASME J. Dyn. Syst. meas. Control*, Vol. 109, Pag. 310-319.
- [17] Takegaki y S. Arimoto (1981). "A new feedback method for dynamic control of manipulator," *ASME J. Dyn. Syst. meas. Control*, Vol. 102, Pag. 119-125.
- [18] Tomei P. (1991). "A simple PD controller for robots with elastic joints." *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 36 Pag. 1208-1213.

## APÉNDICE



## SOFTWARE DEL DSP.

<b>LD31</b>	Llama al compilador de C para compilar un archivo en lenguaje C.
<b>DOWN31</b>	Llama automáticamente al compilador, ensamblador y ligador. Se utiliza para cargar automáticamente un programa en C.
<b>TRACE.</b>	Es un programa que proporciona una interface compatible con Windows 3.1, donde se pueden monitorear las variables del programa que está corriendo en la tarjeta (DSP).
<b>COCKPIT.</b>	Es un programa compatible con Windows 3.1 que permite modificar los valores de las variables del programa que esta ejecutando la tarjeta
<b>Funciones</b>	
<b>init( )</b>	Inicializa los convertidores D/A para las salidas de -10V a 10V y , son calibrados.
<b>timer0( ), timer1( )</b>	Inicializa los timers para generar las interrupciones
<b>ds1102_ad_start( )</b>	Inicializa los convertidores A/D y los calibra.
<b>ds1102_ad(1-4 )</b>	Toma la lectura del convertidor A/D especificado.
<b>ds1102_da(canal, valor )</b>	El contenido de "valor" es puesto en el convertidor D/A especificado por "canal"
<b>start_isr_to( t )</b>	Es una sustitución de timer0 y timer1. Genera una llamada a la rutina de interrupción cada instante t
<b>isr_to( )</b>	Especifica la rutina de interrupción



```

/*****
*****  ARCCHIVO rol21.C *****
CONTROLADOR BAZADO EN PERTURBACION
SINGULAR (SPONG)
*****/

```

```

#include "math.h"
#include "brtenv.h"

/* constantes */

#define t 1.000e-3
#define TMRO 0

/* valores globales */

float q1=0,q2=0,qd=0.52;
float qes=-0.52;
float O1=0.001,O2=0.0;
float r=-52.5398;
float V=52.5398;
float a;
float U;
float dq1,dq2,dq1f,dq2f,dqd,dV;
float q3f,_q3f,dq3f;
float _q1,_q2,_qd,_V,_O1,_O2;
float af=0.01234,bf=0.-0.9753;
float qlf,_qlf,q2f,_q2f;
float q1=0.001,q2=5;
float B=0.007,Kd=0.602,Kv=0.201;
float V_fd,V_ds,omega=2;
float A=15;
float Z=0,iniciar=0;

/** PARAMETROS DE LOS INDICES DE DESEMPEÑO **/

float e_ab_anterior,error_ab;
float mpi=0,mp=0,tlev=0,treal=0;
float I;

/***** CTE. PAR DE SALIDA *****/

float cte_par=-.01624;

/***** COMPROBAR LA BANDERA DE ERROR *****/

float exec_time;

int *error=(int *)(DP_MEM_BASE+DP_MEM_SIZE-1);
unsigned long count0;

/***** RUTINA DE INTERUPCION *****/

ISR_t0()
{
service_trace();
service_cockpit();
count0 = count_timer(TMRO);
}

```

```

ds1102_ad_start();

/***** SALVAR LECTURAS ANTERIORES *****/
_q1=q1;
_q1f=q1f;
_q2=q2;
_q2f=q2f;
_q3f=q3f;
_qd=qd;
_V=V;
_O1=O1;
_O2=O2;
e_ab_anterior=error_ab;
treal=treal+0.001;

/***** lectura de los com A/D *****/
q1=6.283185*ds1102_ad(1);
q2=6.283185*ds1102_ad(2);

/***** INTERUMPIR SI ES INESTABLE *****/
if(q2>1.5||q2<-1.5)
    (
        U=0.0;
        iniciar=0.0;
        goto eti;
    )
else
/***** filtrado de las lecturas *****/
q1f=af*(q1+_q1)-bf*_q1f;
q2f=af*(q2+_q2)-bf*_q2f;
q3f=q1f+q2f;

/*****

/***** puesta de la pocicion a cero *****/

if(Z1=0)
    (
        mp=0;
        tlev=0;
        error_ab=0;
        e_ab_anterior=0;

        if(q1>.01)
            (
                U=.06;
                goto eti;
            )
        else
            if(q1<-.01)
                (
                    U=-.06;
                    goto eti;
                )
    )

```

```

else
  {
    U=0;
    goto eti;
  }
)
else
/***** preguntar si iniciar es 1 *****/
/***** para empezar el control *****/
if(iniciar==0)
  (
    treal=0;
    U=0;
    goto eti;
  )

else
/***** calculo de derivadas *****/
/***** y valores estimados *****/

dq1f=(q1f-q1f)/t;
dq2f=(q2f-q2f)/t;
dq3f=(q3f-q3f)/t;
dqd=(qd-qd)/t;
qes=q3f-qd;
V=dqd-A*qes;

/***** derivada de V *****/
V_ds=V_ds+t*omega *V_fd;
V_fd=omega*V-V_ds;

/***** INDICES DE DESEMPEÑO *****/
/***** ERROR ABSOLUTO *****/
error_ab=fabs(q3f-qd)+e_ab_anterior;
/***** TIEMPO DE LEVANTAMIENTO *****/
if(tlev==0)
  (
    if(q3f>=qd)
      (
        tlev=treal;
        goto eti4;
      )
    else
      goto eti4;
  )
else
/***** SOBRE PASO *****/
eti4:  mpi=((q3f-qd)/qd)*100;

```

```

        if(mpi>mp)
        {
            mp=mpi;
            goto eti5;
        }
    else

eti5:    I=0.8*error_ab/500+0.1*tlev/1+0.1*mp;
        a=V_fd;
        r=dq3f-V;
        O1=_O1-t*g1*a*r;
        O2=_O2-t*g2*sin(q1f)*r;
        /*****
        /***** ley de control *****/
        U=(O1*a+O2*sin(q1f)+B*dq1f-Kd*r+Kv*(dq1f-dq3f))*(-cte_par);
eti:    ds1102_da(1,U);
        exec_time = time_elapsed(TMR0, count0);
    )

/***** funcion principal *****/
main()
{
    ds1102_ad_start();
    ini: *error = NO_ERROR;
    dp_mem[0].f=0.0;

/***** condiciones iniciales *****/
eti2:    init();
        start_isr_t0(t);
        while (*error == NO_ERROR)
            (
                while (iniciar<5)
                {
                    q1=0;
                    q2=0;
                    q1f=0;
                    q2f=0;
                    q3f=0;
                    F=-78.5398;
                    V=78.5398;
                    O1=0.001;
                    O2=0.00;
                }
            )

```

```
)  
)  
ds1102_da(1,0.0);
```

```
)
```

```

/*****
* CONTROLADOR BASADO EN PASIVIDAD *
* LOZANO Y BROGLIATO
*****/

#include "math.h"
#include "brtenv.h"

/***** constantes *****/

#define t 1.000e-3
#define TMRO 0

/***** valores globales *****/

float q1=0,q2=0, q11,q22;
float qd=0.52,qem=-0.52;
float O1=0.001,O2=0.0;
float r=-78.5398,v=78.5398;
float a;
float U;
float dq1;
float dq2;
float dq1f;
float dq2f;
float dqd;
float q3f,_q3f,dq3f;
float dv;
float _q1;
float _q2;
float _qd;
float _v;
float _O1;
float _O2;
float sf=0.01234,bf=0.-0.9753,q1f,_q1f,q2f,_q2f;
float q1=0.001,q2=5;
float B=0.007,Kd=0.602,J=0.201,B2=0.007;
float V_fd,V_ds,omega=2;
float A=15;
float Z=0,iniciar=0;

/** PARAMETROS DE LOS INDICES DE DESEMPEÑO **/

float e_ab_anterior,error_ab;
float mpi=0,mp=0,tlev=0;
float treal=0;
float I;

/***** cte del par u *****/

float cte_par=-.01624;

/***** *****/

float exec_time;

int *error=(int *) (DP_MEM_BASE+DP_MEM_SIZE-1);
unsigned long count0;

```



```

/***** rutina de interrupcion *****/
imr_t0()
{
service_trace();
service_cockpit();
count0 = count_timer(TMRO);
ds1102_ad_start();

/***** SALVAR LECTURAS ANTERIORES *****/
_q1=q1;
_q1f=_q1f;
_q2=q2;
_q2f=_q2f;
_q3f=_q3f;
_q3=q3;
_V=V;
_O1=O1;
_O2=O2;
e_ab_anterior=error_ab;
treal=treal+0.001;

/***** lectura de los com A/D *****/
q1=6.283185*ds1102_ad(1);
q2=6.283185*ds1102_ad(2);

/***** INTERUMPIR SI ES INESTABLE *****/
if(q1>1.5||q1<-1.5)
{
iniciar=0.0;
U=0.0;
goto sti;
}
else
/***** filtrado de las lecturas *****/
q1f=af*(q1+_q1)-bf*_q1f;
q2f=af*(q2+_q2)-bf*_q2f;
q3f=q1f+q2f;

/*****

/***** puesta de la pocicion a cero *****/

if(Z1=0)
{
sp=0;
tlew=0;
error_ab=0;
e_ab_anterior=0;

if(q1>.01) {
U=.06;

```

```

                                ) goto eti;
else
  if(q1<-.01)
    (
      U=-.06;
      goto eti;
    )
  else
    (
      U=0;
      goto eti;
    )
)
else
  if(iniciar==0)
    (
      treal=0;
      U=0;
      goto eti;
    )
else
  /***** calculo de derivadas *****/
  /***** y valores estimados *****/
  dq1f=(q1f-q1f)/t;
  dq2f=(q2f-q2f)/t;
  dq3f=(q3f-q3f)/t;
  dqd=(qd-qd)/t;
  qes=q3f-qd;
  V=dqd-A*qes;

  /***** derivada de V *****/
  V_ds=V_ds+t*omega *V_fd;
  V_fd=omega*V-V_ds;

  /*****
  /***** INDICES DE DESEMPEÑO *****/
  /***** ERROR ABSOLUTO *****/
  error_ab=fabs(q3f-qd)+e_ab_anterior;

  /***** TIEMPO DE LEVANTAMIENTO *****/
  if(tlev==0)
    (
      if(q3f>=qd)
        (
          tlev=treal;
          goto eti4;
        )
      else
        goto eti4;
    )

```

```

else
    )
/***** SOBRE PASO *****/
eti4:  mpi=((q3f-qd)/qd)*100;
      if(mpi>mp)
      {
          mp=mpi;
          goto eti5;
      }
else

eti5:  I=0.8*error_ab/500+0.1*tlev/1+0.1*mp;
      a=V_fd;
      r=dq3f-V;
      O1=_O1-t*g1*a*r;
      O2=_O2-t*g2*sin(q1f)*r;

/***** ley de control *****/
      U=(O1*a+O2*sin(q1f)+B*dq1f-Kd*r+J*a-B2*r)*(-cte_par);
eti:   ds1102_da(1,U);
exec_time = time_elapsed(TMR0, count0);
)

/***** funcion principal *****/
main()
{
    ds1102_ad_start();
    ini: *error = NO_ERROR;
    dp_mes[0].f=0.0;

/***** condiciones iniciales *****/
    eti2: init();
    start_isr_t0(t);
    while (*error == NO_ERROR)
    {
        while (iniciar<5)
        {
            q1=0;
            q2=0;
            q1f=0;
            q2f=0;
            q3f=0;
            r=-78.5398;

```

V=78.5398;  
O1=0.001;  
O2=0.00;

ds1102\_da(1,0.0);

```

/***** ARCHIVO ro122.C *****/
CONTROLADOR BASADO EN OBSERVADOR
A. ALIEN Y R. ORTEGA
*****/

/***** incluir archivos cabecera *****/
#include "math.h"
#include "brtenv.h"

/***** constantes *****/
#define t 1.000e-3
#define TMRO 0

/***** valores globales *****/
float q1=0, q2=0, qd=0.52;
float qes=0, _qes, U;
float q3f, _q3f, dqes=0, _dqes;
float _q1, _q2, _qd;
float af=0.00099, bf=-0.998, q1f, _q1f, q2f, _q2f;
float B=0.007, K2=0.201, K1=.3;
float a=.52;
float Z=0, iniciar=0;

/** PARAMETROS DE LOS INDICES DE DESEMPEÑO **/
float e_ab_anterior, error_ab;
float mpi=0, mp=0, tlev=0, I;
float treal=0;

/***** CTE. PAR DE SALIDA *****/
float cte_par=-.01624;

/***** comprobar la bandera de error *****/
float exec_time;

int *error=(int *) (DP_MEM_BASE+DP_MEM_SIZE-1);
unsigned long count0;

/***** RUTINA DE INTERUPCION *****/
ISR_t0()
{
service_trace();
service_cockpit();
count0 = count_timer(TMRO);
ds1102_ad_start();
}

/***** SALVAR LECTURAS ANTERIORES *****/
_q1=q1;
_q1f=q1f;
_q2=q2;

```

```

    _q2f=q2f;
    _q3f=q3f;
    _qd=qd;
    _qes=qes;
    _dges=dges;
    e_ab_anterior=error_ab;
    treal=treal+0.001;

/***** lectura de los com A/D *****/
q1=6.283185*ds1102_ad(1);
q2=6.283185*ds1102_ad(2);

/***** INTERUNPIR SI EL ALGORITMO ES *****/
***** ES INESTABLE *****/

if(q1>1.5||q1<-1.5)
{
    U=0.0;
    iniciar=0.0;
    goto eti;
}
else
/***** filtrado de las lecturas *****/
q1f=af*(q1+_q1)-bf*_q1f;
q2f=af*(q2+_q2)-bf*_q2f;
q3f=q1f+q2f;
/*****

/***** puesta de la pocicion a cero *****/

if(Z1=0)
{
    mp=0;
    tlev=0;
    error_ab=0;
    e_ab_anterior=0;

    if(q1>.01)
    {
        U=.06;
        goto eti;
    }

    else
        if(q1<-.01)
        {
            U=-.06;
            goto eti;
        }

    else
        {
            U=0;

```

```

                                )      goto eti;

                                )

else

/***** preguntar si iniciar es 1 *****/
/***** para empezar el control *****/
/*      if(treal==5)
        {
            iniciar=0;
            U=0;
            goto etis;
        }

else
etis:      */
if(iniciar==0)
        {
            treal=0;
            U=0;
            goto eti;
        }

else

/***** calculo de derivadas *****/
/***** y valores estimados *****/
qes=_qes + t*_dqes;
dqes=_dqes+t*((-K1-K2)*_qes-B*_dqes+K2*q1f+K1*a);

/***** INDICES DE DESEMPEÑO *****/
/***** ERROR ABSOLUTO *****/
error_ab=fabs(q3f-qd)+e_ab_anterior;

/***** TIEMPO DE LEVANTAMIENTO *****/
if(tlev==0)
        {
            if(q3f>=qd*.75)
                {
                    tlev=treal;
                    goto eti4;
                }
            else
                goto eti4;
        }

else

/***** SOBRE PASO *****/

```

```

eti4: mpi=((q3f-qd)/qd)*100;
      if(mpi>mp)
        (
          mp=mpi;
          goto eti5;
        )
      else
eti5: I=0.8*error_ab/500+0.1*tlev/1+0.1*mp;
      /***** lay de control *****/
      U=K2*(qes-q1f)*(cte_par);
eti:  dal102_da(1,U);
      exec_time = time_elapsed(TMR0, count0);
    )/***** funcion principal *****/
    main()
  {
    dal102_ad_start();
    *error = NO_ERROR;
    dp_mom[0].f=0.0;

    /***** condiciones iniciales *****/
eti2:  init();
        start_isr_to(t);
        while (*error == NO_ERROR)
          {
            while (iniciar<5)
              {
                q1=0;
                q2=0;
                q1f=0;
                q2f=0;
                q3f=0;
                _qes=0;
                _dqes=0;
              }
          }

        dal102_da(1,0.0);
  }

```