

Un análisis comparativo para la aplicación de controladores de movimiento en robots manipuladores industriales

M. en C. Josué R. MARTÍNEZ

Coordinación de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Politécnica de Pachuca
Zempoala, Hidalgo CP. 43830, México

M. en C. Jazmín RODRÍGUEZ

Coordinación de Ingeniería Telemática, Universidad Politécnica de Pachuca
Zempoala, Hidalgo CP. 43830, México

Dr. Gerardo V. GUERRERO

Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Cuernavaca, Morelos CP. 62490, México

Dr. Luis G. VELA

Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Cuernavaca, Morelos CP. 62490, México

RESUMEN

En la actualidad el diseño de controladores de movimiento para robots manipuladores se centra en el desarrollo de nuevas estrategias que permitan obtener una mayor precisión con un menor tiempo de establecimiento para mejorar el desempeño de un robot manipulador maximizando los recursos que son aplicados en el proceso de manufactura dentro de las diferentes plantas del sector industrial.

Sin embargo, al realizar el desarrollo de un nuevo controlador no se toman en cuenta los requerimientos de hardware y software que demandan para su implementación, es por ello que en el presente documento se realiza un análisis presentando diferentes situaciones que se presentan al momento de realizar trabajos en la industria.

Debido a las exigencias de calidad y rapidez en los sistemas de producción se ha generalizado el uso de robots manipuladores en muchas aplicaciones en la industria. Para cubrir dichas exigencias se requiere que el robot manipulador cuente con técnicas de control más avanzadas. Para el procesamiento de la gran cantidad de información que se presenta al controlar el movimiento de un robot manipulador industrial se requieren equipos con altas prestaciones lo que encarece la implementación y dificulta la aplicación de las nuevas metodologías de control.

Las pruebas se realizan en diferentes situaciones de cambios de carga, cambios en los parámetros del robot, en el seguimiento de diferentes trayectorias. Las gráficas demuestran las características de operación del robot bajo las diferentes acciones de control y se determina en que casos es mejor el uso de una técnica de control determinada.

Palabras Claves: Robot Manipulador, Control Adaptable, Control Robusto, Métodos de Lyapunov, Índices de desempeño.

1. INTRODUCCIÓN

El propósito que presenta un sistema de control de robots es el mantener un movimiento preestablecido del robot a lo largo de una trayectoria deseada, considerando las limitaciones físicas de los dispositivos actuadores, así como se deberá analizar el equipo con el cual se implementarán los controladores.

En este artículo se presenta un estudio comparativo de las respuestas de lazo cerrado que presentan los controladores de robots manipuladores ante situaciones que se presentan en el quehacer de cada día dentro del sector industrial. En la sección 2 se describen y enlistan los controladores seleccionados para este estudio. En la sección 3 se presentan las características para las pruebas de desempeño. En la sección 4 se presentan y discuten los resultados de las diferentes pruebas planteadas. Finalmente, la sección 5 resume y presenta las conclusiones de este trabajo.

2. SELECCIÓN DE CONTROLADORES

Clasificación de Controladores

Los controladores de robots manipuladores industriales pueden ser clasificados a partir del objetivo de control que busquen alcanzar:

1. Control de posición. El objetivo del control de posición es lograr que el robot manipulador alcance una posición deseada, esta posición es constante en el tiempo $\dot{x} = 0$, como lo es en el almacenaje de piezas.
2. Control de movimiento. El objetivo del control de posición es lograr que el robot manipulador alcance una posición deseada, esta posición es variante en el tiempo $\dot{x} \neq 0$, principalmente aplicado para tareas de soldadura y pintura.
3. Control de trayectoria. El objetivo del control de trayectoria es lograr que el robot manipulador alcance una posición y velocidad deseadas, utilizado en el transporte de piezas.

Elección de Controladores para Pruebas

Buscando abarcar los diferentes tipos de controladores en las pruebas que se desarrollan más adelante, se seleccionaron diferentes metodologías de control, las cuales se enlistan a continuación. Dichos controladores se seleccionaron considerando un análisis de la bibliografía existente como se puede observar en [1], [2], [7] a [11].

Controlador PID.

Es el controlador más utilizado a nivel industrial considerando el conocimiento que se tiene sobre su comportamiento y los efectos que presentará el sistema ante un cambio en los parámetros del mismo, así como la facilidad de

implementación. Éste controlador se caracteriza con la siguiente ecuación.

$$\tau = k_p \ddot{\tilde{q}} + \dot{\tilde{q}} \quad (1)$$

Controlador PD por Dinámica Inversa

Uno de los controladores de movimiento más conocidos, considera una linealización por retroalimentación. Para el diseño de éste controlador se debe tener un conocimiento detallado de la dinámica del sistema, puesto que se basa en la eliminación de las no linealidades de un sistema dinámico.

$$\tau = M(q) \ddot{q} + \dot{q} \quad (2)$$

Controlador Robusto de Movimiento

Partiendo del Controlador PD por Dinámica Inversa que requiere de un conocimiento detallado de los factores que afectan a la dinámica del sistema, se genera un margen de robustez para contrarrestar la incertidumbre que se puede presentar en la parametrización de un sistema dinámico. Su ecuación se presenta a continuación.

$$\tau = M_0(q)a + C_0(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (3)$$

$$\Delta a = \begin{cases} -\rho(x,t) \frac{w}{\|w\|} & \text{si } \|w\| \neq 0 \\ 0 & \text{si } \|w\| = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Controlador Adaptable de Movimiento

Éste controlador considera el desconocimiento que se puede llegar a tener en los parámetros de un sistema dinámico para la implementación de una linealización por retroalimentación para generar estrategias de actualización de los valores de los parámetros para lograr el objetivo de control. Su comportamiento se describe por las ecuaciones.

$$\tau = \hat{M}(q)a + \hat{C}(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (5)$$

$$\dot{\hat{c}} = -\Gamma^T B^T P x \quad (6)$$

Controlador PD más compensación para el seguimiento de trayectoria

Es el controlador básico para asegurar el seguimiento de una trayectoria, considera una ponderación entre la disminución del error de posición y el error de velocidad. Para ello el control requiere del conocimiento del modelo dinámico del sistema. La ecuación que define a éste controlador es la siguiente.

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{s}, s) \quad (7)$$

Controlador Robusto para el seguimiento de trayectoria

Éste controlador logra el seguimiento de una trayectoria considerando un margen de incertidumbre en los parámetros que compensa por medio de un margen de ganancia. La siguiente ecuación define a éste controlador.

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{s}, s) + \omega \quad (8)$$

Controlador Adaptable para el seguimiento de trayectoria

Al igual que el Controlador Adaptable de Movimiento, éste controlador considera la necesidad de un cálculo para la actualización de parámetros que pueden llegar a cambiar de una manera inesperada debido al uso o algún daño del robot.

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{s}, s) \quad (9)$$

$$\dot{\hat{c}} = -\Gamma^T B^T P x \quad (10)$$

Controlador PID para el seguimiento de trayectoria

Este controlador se caracteriza por ser una modificación del PID clásico que permite lograr el objetivo del control de

seguimiento de una trayectoria considerando las no linealidades propias del sistema dinámico.

$$\tau = \left(K + \frac{1}{\gamma^2} I \right) \begin{pmatrix} \ddot{\tilde{q}} \\ \dot{\tilde{q}} \\ \tilde{q} \end{pmatrix} \quad (11)$$

3. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO

Robot Manipulador

Para las pruebas que se desarrollaron se seleccionó el robot SCORBOT ER-V+ que se encuentra en el laboratorio de mecatrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), en la figura 1 se muestra al robot que se utiliza como objeto de estudio en las simulaciones, para controlar para posición del efector final. Los parámetros del robo manipulador son:

- Masa del elemento i.
 $m_i = m_1 = 7.1402 \text{ kg}, m_2 = 2.2483 \text{ kg}, m_3 = 0.9888 \text{ kg},$
 $m_f = \text{carga} + 0.5$
- Longitud del elemento i.
 $l_i = 0.22 \text{ m}, l_3 = 0.22 \text{ m}$
- Distancia del centro de masa al eje de giro del elemento i.
 $l_{ci} = 0.052 \text{ m}, l_{c3} = 0.137 \text{ m}$
- Inercia del elemento i.
 $I_i = 0.04624 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, m_2 = 0.02545 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, m_3 = 0.03616 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

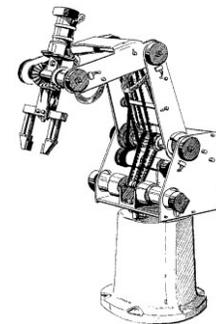


Figura 1. Robot SCORBOT ER-V+ [3]

Sintonización de los Controladores

Una dificultad que se presenta con la metodología de diseño de Lyapunov radica en la determinación de los valores que van a tener las constantes del controlador puesto que afectan a la respuesta del sistema. Para homogeneizar éstos resultados se diseñó un procedimiento de sintonización basado en la optimización por medio de algoritmos genéticos, debido a que no requieren de información acerca del gradiente además de que esta técnica es considerada robusta en su aplicación y muy general. La sintonización de un controlador por medio de la aplicación de algoritmos genéticos requiere que se tenga una señal de referencia, para este proyecto se seleccionó el escalón unitario y un índice de desempeño para la optimización definido por la siguiente suma $0.7*ITAE + 0.3*ISE$, teniendo como límite una disminución mínima de una diezmilésima, con lo que se obtuvieron los siguientes valores para las constantes de cada controlador. [4], [5], [6] y [7]

Control PID.

$$K_p = \text{diag}\{4.88, 10.89, 13.75\}, K_v = \text{diag}\{2.32, 2.23, 3.09\},$$

$$K_f = \text{diag}\{1.09, 1.88, 2.28\}$$

Control PD por dinámica inversa.

$$K_p = \text{diag}\{5.23, 5.35, 5.27\}, K_v = \text{diag}\{3.18, 3.20, 3.26\}$$

Control Robusto de movimiento.

$$K_p = \text{diag}\{4.56, 4.78, 4.63\}, K_v = \text{diag}\{3.25, 3.04, 3.10\}, \varepsilon = 1.46$$

Control Adaptable de movimiento.

$$K_p = \text{diag}\{2.29, 1.95, 2.28\}, K_v = \text{diag}\{2.18, 1.93, 2.19\}$$

Control PID de seguimiento de trayectoria.

$$K_p = \text{diag}\{4.87, 6.24, 6.43\}, K_v = \text{diag}\{1.78, 1.98, 1.86\},$$

$$K_I = \text{diag}\{1.43, 1.62, 1.53\}, K = \text{diag}\{4.71, 4.75, 4.68\}, \gamma = 1.89$$

Control PD más compensación.

$$K_p = \text{diag}\{3.06, 2.32, 2.73\}, \Lambda = \text{diag}\{2.43, 2.87, 2.23\}$$

Control Robusto de seguimiento de trayectoria.

$$K_p = \text{diag}\{1, 1.25, 2\}, \Lambda = \text{diag}\{7.97, 6.1, 4.12\}, \varepsilon = 1.189$$

Control Adaptable de seguimiento de trayectoria.

$$K_p = \text{diag}\{2.76, 2.72, 2.68\}, \Lambda = \text{diag}\{3.87, 3.84, 3.8\}$$

Descripción de las pruebas

Se realizaron 2 conjuntos de pruebas, el primer conjunto busca observar cómo se modifica la respuesta ante cambios en la posición deseada o cambios en los parámetros del sistema. El segundo conjunto de pruebas busca observar los efectos que provocan los cambios en la carga, la incertidumbre en las masas de los elementos y en los momentos de inercia, cambios en las señales de referencia. Todas las pruebas se realizan durante 5 segundos.

Primer conjunto de pruebas

Este conjunto de pruebas tiene el objetivo de observar la respuesta al cambiar las condiciones de la incertidumbre en los parámetros y de la posición deseada a seguir.

Prueba 1. Se busca alcanzar una posición constante, para la prueba se considera que se tiene un conocimiento perfecto de los parámetros del robot manipulador.

Prueba 2. Se sigue una posición variante en el tiempo, considerando que no existe incertidumbre en los parámetros del robot manipulador.

Prueba 3. La posición que se desea alcanzar es constante, esta prueba se realiza considerando que se tiene una incertidumbre del 25% en el valor de los parámetros del robot manipulador.

Prueba 4. En esta prueba la posición es variante en el tiempo, y para la realización de la prueba se considera que se tiene una incertidumbre del 25% en el valor de los parámetros del robot manipulador.

Segundo conjunto de pruebas

El objetivo de este conjunto de pruebas es el de observar los efectos en las respuestas de los controladores al presentarse cambios en la carga, incertidumbre en las masas y las inercias, respuestas con diferentes señales de referencia.

Prueba 5. Durante esta prueba se siguen diferentes posiciones deseadas. En primer lugar se sigue una señal escalón, seguida por una señal senoidal, la tercera señal es una señal polinomial y la última señal es una señal compuesta.

Prueba 6. En esta prueba se incrementan los niveles de incertidumbre en el valor de los parámetros. Se comienza considerando un conocimiento exacto en el valor de los parámetros, después de incertidumbre del 10% y al final una incertidumbre del 25%. En todos los casos, la señal a seguir es una señal escalón.

Prueba 7. Para esta prueba primero se considera que la incertidumbre existe sólo en el valor de las masas de los eslabones y después la incertidumbre solamente se encuentra solo en el valor de las inercias. La señal a seguir es una señal escalón.

Prueba 8. En el desarrollo de esta prueba, se realizan cambios en la masa de carga. Primero se duplica el valor de la masa de carga y después se elimina la misma. Para las pruebas, se tiene como objetivo el seguir una señal escalón.

Presentación de Resultados

Se presentan los resultados de las pruebas de dos maneras diferentes, en primer lugar se presenta una tabla con los valores de los índices de desempeño (que denotan la precisión del movimiento y el esfuerzo de control), cabe mencionar que el valor de los índices incluye el efecto de todas las articulaciones por lo que se infiere el comportamiento en espacio de la tarea,. Después se presenta la gráfica del comportamiento de la posición de la segunda articulación puesto que es la que sufre los efectos de las otras dos articulaciones. Para el segundo conjunto de pruebas se presentan las gráficas donde se observa la razón de cambio de los índices de desempeño respecto al movimiento de referencia.

4. Resultados de las pruebas

Prueba 1. Para esta prueba se sigue una señal escalón, considerando que se tiene un conocimiento exacto en el valor que presentan los parámetros del robot manipulador. La tabla 1 muestra los valores de los índices de desempeño presentados por los controladores.

Tabla 1. Índices de desempeño presentados por cada controlador en la prueba 1

Controlador \ Índice	IAE	ITAE	ISE	CE
PD por dinámica inversa	2.10	1.13	1.38	52.38
Robusto de posición	2.25	1.26	1.49	53.80
Adaptable de posición	3.28	2.68	2.16	68.52
PID de posición	1.93	2.29	0.89	48.79
PD de seguimiento	1.57	0.68	0.92	50.03
Robusto de seguimiento	1.04	0.25	0.68	50.68
Adaptable de seguimiento	1.04	0.68	0.49	147.37
PID de seguimiento	1.56	1.94	0.60	73.05

En la figura 2 se observa que el controlador adaptable de posición presenta la peor respuesta debido al retraso de tiempo que presenta la señal, en cambio el controlador de seguimiento robusto presenta la mejor respuesta, tomando en cuenta que presenta el mejor tiempo de establecimiento sin tener un sobreimpulso.

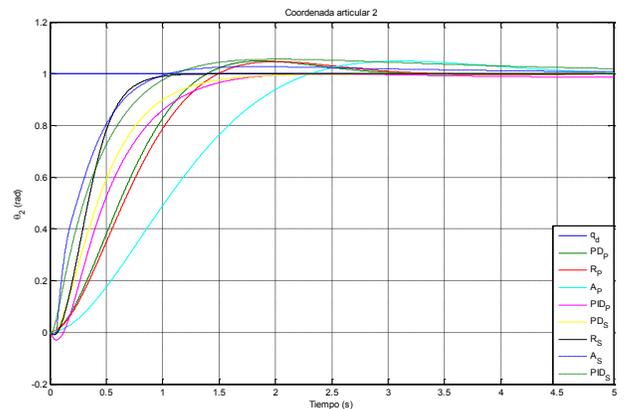


Figura 2. Coordenada articular presentada por los controladores en la prueba 1

A partir de los datos mostrados en la tabla 1 se ve que el controlador de posición adaptable es el controlador más ineficiente pues presenta el esfuerzo de control más elevado presentando el peor funcionamiento (índices de error más elevados). De forma global se ve que los controladores de seguimiento presentan una mejor respuesta. Se destaca el

controlador de posición PID pues realiza el menor esfuerzo de control y sus índices de error no son de los más elevados. El controlador que presenta la mejor respuesta entre los ocho controladores es el controlador robusto de seguimiento.

Prueba 2. La tabla siguiente muestra los valores de los índices de desempeño presentados por cada controlador.

Tabla 2. Índices de desempeño presentados por cada controlador en la prueba 2

Controlador \ Índice	IAE	ITAE	ISE	CE
PD por dinámica inversa	0.09	0.05	0.0033	1625.12
Robusto de posición	0.10	0.06	0.0036	1624.95
Adaptable de posición	0.16	0.17	0.0053	1622.96
PID de posición	6.20	17.13	5.73	1861.07
PD de seguimiento	0.07	0.03	0.0022	1625.57
Robusto de seguimiento	0.05	0.01	0.0018	1633.29
Adaptable de seguimiento	0.04	0.01	0.0015	1625.11
PID de seguimiento	1.62	4.33	0.37	1729.30

En la figura 3 se observa que los controladores PID para el control de posición y el control de seguimiento de trayectoria presentan la peor respuesta, en cambio todos los demás controladores presentan una respuesta muy similar y cercana a la referencia.

Los datos en la tabla 2 confirman lo que se observa en la figura 3, los controladores PID (de posición y de seguimiento de trayectoria), los demás controladores presentan índices de error muy pequeños, destacándose los controladores adaptable y robusto de seguimiento. El menor esfuerzo de control lo presenta el control PD por dinámica inversa y el mejor desempeño global lo presenta el controlador PD de seguimiento.

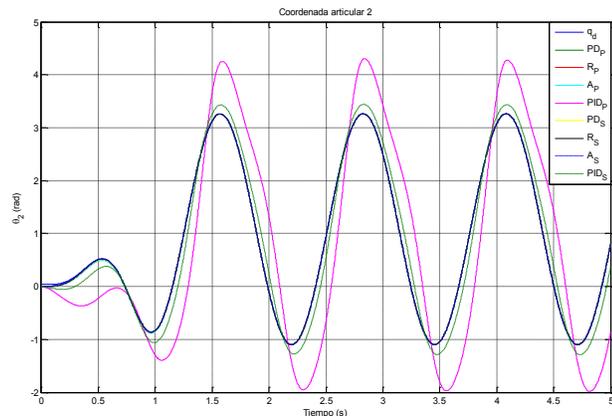


Figura 3. Coordenada articular presentada por los controladores en la prueba 2

Prueba 3. Esta prueba es similar a la prueba uno al buscar alcanzar una posición constante, pero para esta prueba se considera una incertidumbre del 25% en el valor de los parámetros. La figura 4 nos muestra la evolución de la coordenada articular 2, a partir de la operación bajo cada uno de los controladores. La tabla 3 presenta los valores de los índices de desempeño para cada controlador.

Tabla 3. Índices de desempeño presentados por cada controlador en la prueba 3

Controlador \ Índice	IAE	ITAE	ISE	CE
PD por dinámica inversa	12.07	28.81	17.35	261.08
Robusto de posición	11.70	27.52	17.22	314.56
Adaptable de posición	14.22	34.50	24.25	177.61
PID de posición	2.60	3.53	1.23	94.98
PD de seguimiento	2.40	2.50	1.23	108.36

Robusto de seguimiento	0.71	0.45	0.36	492.02
Adaptable de seguimiento	1.04	0.61	0.52	239.33
PID de seguimiento	1.65	2.07	0.65	111.16

A partir de los datos que se muestran en la tabla anterior se observa claramente que los controladores robusto y adaptable de seguimiento de trayectoria son los que presentan un error más pequeño. Además, el controlador adaptable de seguimiento de trayectoria es el controlador que presenta el menor esfuerzo de control. En la figura 3 se observa que los controladores PID y adaptable de posición son los que tienen la respuesta más retardada ante la entrada escalón. Además se ve que los controladores PD y robusto de posición son los que presentan un mayor error.

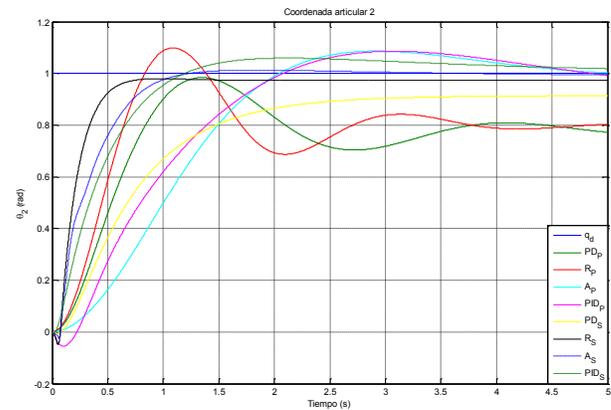


Figura 4. Coordenada articular presentada por los controladores en la prueba 3

Prueba 4. Como se detalló anteriormente esta prueba consiste en seguir una posición deseada variante en el tiempo y se consideró una incertidumbre de 25% en el valor de los parámetros. La tabla 4 muestra los valores de los índices de desempeño presentados por cada controlador durante la prueba 4.

Tabla 4. Índices de desempeño presentados por cada controlador en la prueba 4

Controlador \ Índice	IAE	ITAE	ISE	CE
PD por dinámica inversa	10.98	28.77	18.33	1591.18
Robusto de posición	12.57	32.90	22.42	1584.49
Adaptable de posición	17.49	53.35	42.15	1168.08
PID de posición	8.23	22.95	10.20	3174.87
PD de seguimiento	1.91	4.94	0.51	2526.79
Robusto de seguimiento	0.03	0.01	0.0014	5957.72
Adaptable de seguimiento	0.06	0.03	0.0021	2889.07
PID de seguimiento	2.16	5.79	0.67	3077.94

Analizando los datos mostrados en la tabla 4 se observa que todos los controladores de posición presentan errores bastante elevados. Los controladores de seguimiento de trayectoria presentan índices de error más pequeños. Se destaca el controlador adaptable de seguimiento de trayectoria pues presenta índices de error muy pequeños con un esfuerzo de control de mediana magnitud.

En la siguiente figura, se puede observar la evolución que presenta la coordenada articular número 2, se confirman las observaciones que se presentan en la tabla 4, los controladores con un mejor seguimiento de la posición son los controladores robusto y adaptable de seguimiento de trayectoria.

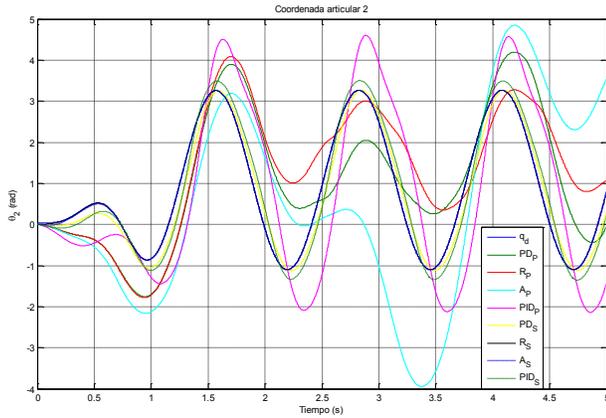


Figura 5. Coordenada articular presentada por los controladores en la prueba 4

A lo largo de las pruebas se ve que los controladores de seguimiento presentan una mejor respuesta a las dos posiciones deseadas (escalón unitario y posición variante en el tiempo). El controlador que mejor responde al cambio en los parámetros el controlador adaptable de seguimiento, pues sus índices de error son pequeños y realiza el menor esfuerzo de control.

Resultados del segundo conjunto de pruebas.

Los resultados de estas pruebas se muestran en un conjunto de gráficas que contienen la relación que guardan los valores de los índices de desempeño para el caso de prueba y los valores de los índices de desempeño para el caso nominal.

Prueba A.

En esta prueba se realizan cambios en la trayectoria a seguir. El caso nominal es el seguimiento de una señal escalón y se considera un conocimiento perfecto del valor de los parámetros.

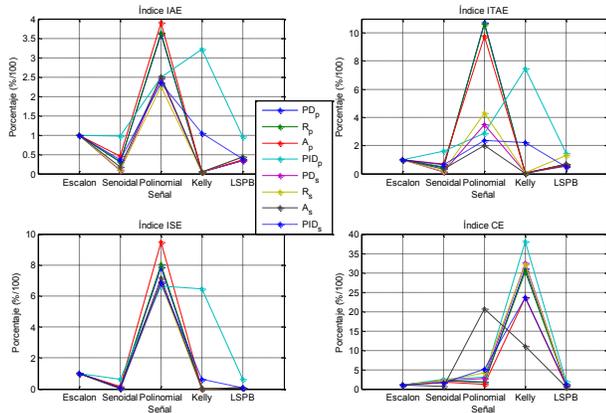


Figura 6. Relación de cambio en los valores de los índices de desempeño presentados por los controladores en la prueba A

En la figura anterior se observa que el controlador adaptable de seguimiento de trayectoria presenta el mejor comportamiento en los valores de los índices de error, sin embargo, para una señal polinomial presenta un elevado esfuerzo de control.

Prueba B. En esta prueba se realizan cambios en el nivel de la incertidumbre para probar como se modifica la respuesta de los controladores. Esta prueba tiene como objetivo observar que controlador tiene la posibilidad de ser robusto a los cambios en los parámetros del robot manipulador. En la figura 7 se observa que los controladores PD, robusto y adaptable de posición no pueden mantener una buena respuesta a la salida del sistema. Además, el incrementar la incertidumbre en el valor de los

parámetros del sistema, el índice del esfuerzo de control que realizan los controladores se incrementa demasiado.

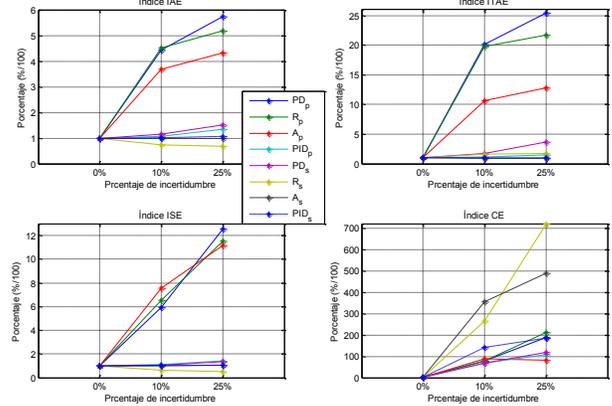


Figura 7. Relación de cambio en los valores de los índices de desempeño presentados por los controladores en la prueba B

En esta prueba se destacan los controladores adaptable y PID de seguimiento de trayectoria, pues en base al comportamiento de los índices de error ambos pueden manejar el incremento en el nivel de incertidumbre en el valor de los parámetros.

Prueba C. En esta prueba se realizan cambios en la ubicación de la incertidumbre, con el fin de distinguir qué conjunto de parámetros tiene un mayor efecto en el comportamiento del sistema. Los parámetros están divididos en el conjunto de masas y el conjunto de inercias. En ambos conjuntos se maneja un nivel de incertidumbre del 25%. Como en las pruebas anteriores, se compara el comportamiento de cada caso contra el caso de prueba nominal. En la figura siguiente se ve claramente que es mucho mayor el efecto de las masas en comparación con el efecto de las inercias, esto nos indica que cuando se diseña un controlador se debe de tratar de conocer lo más exacto posible las masas de cada uno de los eslabones del sistema.

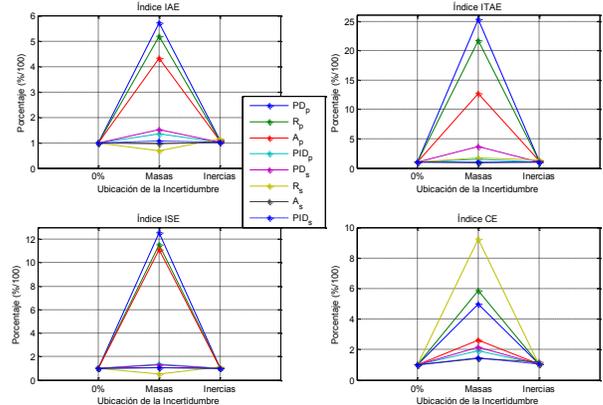


Figura 8. Relación de cambio en los valores de los índices de desempeño presentados por los controladores en la prueba C

Prueba D. Para esta prueba, se realizan cambios en la masa de carga. Esta prueba surge a partir del uso del robot manipulador para el transporte de piezas, donde su masa de carga va a estar variando constantemente hasta el grado de llegar a desaparecer. En esta prueba se compara la respuesta del controlador en el caso nominal con el caso donde se duplica el valor de la masa de carga y el caso donde se elimina la masa de carga.

En la figura 9 se observa que es mayor el efecto de duplicar la carga que el efecto de eliminar la carga. Para algunos

controladores es benéfico y se tiene un mejor control del sistema. Los controladores que se ven gravemente afectados por los cambios en la masa de carga son los controladores PD, robusto y adaptable de seguimiento de trayectoria.

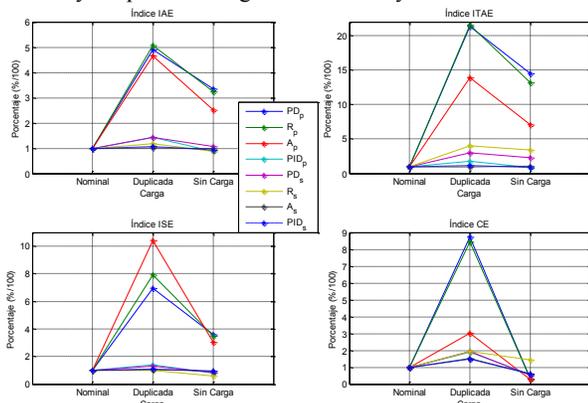


Figura 9. Relación de cambio en los valores de los índices de desempeño presentados por los controladores en la prueba D

A partir de la revisión de la evolución del conjunto de índices de desempeño se llega a la conclusión que los controladores PID y adaptable de seguimiento presentan el mejor comportamiento a lo largo de la prueba.

5. SUMARIO Y CONCLUSIONES

En el presente documento, se desarrolló una comparación de diferentes controladores por medio de la simulación de la operación del robot SCORBOT ER-V+. A lo largo de las pruebas se ve claramente que el controlador que presenta el mejor desempeño es el controlador de adaptable de seguimiento de trayectoria, pues presenta los índices de error pequeños con los esfuerzos de control del rango de los más pequeños.

El controlador PID de seguimiento de trayectoria presenta la propiedad de robustez ante los cambios en los valores de los parámetros, sacrificando un poco el consumo de esfuerzos de control de mediano tamaño. El controlador robusto de seguimiento de trayectoria presenta en varias ocasiones los índices de error más pequeños, sin embargo, presenta los esfuerzos de control más elevados en la mayoría de las pruebas.

6. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica de Pachuca por brindar el tiempo para el desarrollo del presente trabajo, al CENIDET por contar con su equipo para la caracterización del sistema para este proyecto. A COSNET por el apoyo brindado a este proyecto

7. REFERENCIAS

- [1] J. J. E. Slotine, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.
- [2] J. R. Martínez, *Controladores de Robots Rígidos: Un Análisis Comparativo de las Metodologías de Control Clásico, Adaptable y Robusto Basadas en el Método de Lyapunov*, CENIDET, 2006.
- [3] S. Abdala y R. Neco. *Caracterización de un robot manipulador articulado*, CENIDET, 2003.
- [4] Astolfi, A. *Optimization An Introduction*, Estados Unidos, Octubre del 2005.
- [5] Bäck, T. and F. Hoffmeister, *Global Optimization by Means of Evolutionary Algorithms*, Random Search as

a Method for Adaptation and Optimization of Complex Systems, Krasnoyarsk Space Technology University, USSR, Marzo de 1991.

- [6] Bäck, T. and H.P. Schwefel, *Evolutionary Algorithms: Some Very Old Strategies for Optimization and Adaptation*, Proceedings of the 2nd International Workshop on Software Engineering, Artificial Intelligence and Expert Systems for High Energy and Nuclear Physics, La Londe-Les-Maures, Francia, Enero de 1992.
- [7] Mile Erlic and W.S. Lu, *A Comparative Evaluation of Adaptive, Robust and Classical Feedback Controllers used in Unconstrained Trajectory Tracking for Robot Manipulators*, University of Victoria, 1991.
- [8] Ian Griffin, *On - line PID Controller Tuning using Genetic Algorithms*, PhD Thesis, Universidad de la ciudad de Dublin. 2003.
- [9] Ianais Loizidis and Zoe Doulgeri, *Performance of two kinds of non-linear Robust Controllers for robot manipulators-a comparative study*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Atenas, Grecia, Julio de 1995
- [10] Lu, W.-S and Erlic, M., *Robust Motion Control of Manipulators: Design and Experimental Evaluation*, Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, Montreal, PQ, September, 1989
- [11] R. Ortega and M. W. Spong, *Adaptive motion control of rigid robots: a tutorial*, Automatica, vol. 25, no. 6, pp. 877-888, 1989
- [12] J. J. E. Slotine, *The robust control of robot manipulators*, Int. J. Robotics Research, vol. 4, pp. 49-63, 1985.
- [13] J. J. E. Slotine and W. Li, *Adaptive manipulator control: a casestudy*, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 33, no. 11, 1988.
- [14] Z. Sotirov, *A Nonlinear Robust Controller for Robot Manipulators*, Proceedings of the IEEE Control, Robotics and Automation, pp.2134-2139, Mayo de 1992.
- [15] B. Yao and M. Tomizuka, *Comparative experiments of robust and adaptive control with new robust adaptive controllers for robot manipulators*. Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control, pp. 1290-1295, 1992