



del 26 al 30 de noviembre de 2012
**16 CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL APLICADAS A UN BRAZO ROBOTIZADO ACCIONADO POR UN INVERSOR MULTINIVEL

Daniel Jara Morales¹, Claudio Urrea Oñate²

Grupo de Automática. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Santiago de Chile.
Avda. Ecuador N° 3519. Estación Central. Santiago. Chile.

¹daniel.jaram@usach.cl, ²claudio.urrea@usach.cl

RESUMEN

En este artículo se presenta el diseño e implementación de dos sistemas de control adaptivo de posición, por Ganancia Tabulada (*Gain Scheduling*): por Tramos y por Interpolación, para un brazo robotizado de un grado de libertad. El sistema robotizado es accionado mecánicamente por una Máquina Eléctrica de Imanes Permanentes (MEIP), a través de un inversor multinivel de 27 niveles. Gracias a topología que ofrece una MEIP y a la implementación del inversor multinivel, se logra disminuir la alta frecuencia de conmutación, como se constata por medio de las simulaciones computacionales desarrolladas. Adicionalmente, se realiza un estudio comparativo del desempeño de los controladores implementados para este sistema robotizado.

PALABRAS CLAVES: Control adaptivo, Ganancia Tabulada, inversor multinivel, sistemas robotizados, servomotores.

DESIGN, IMPLEMENTATION AND CONTROL TECHNIQUES APPLIED TO A ROBOTIC ARM DRIVEN BY A MULTILEVEL INVERTER

ABSTRACT

In this article we present the design and implementation of two position adaptive control systems by Gain Scheduling: per Trenches and by Interpolation, for a robotic arm with one degree of freedom. The robotic system is driven by a Permanent Magnet Machine (PMM), through a 27-level multilevel inverter. Thanks to the building topology of a PMM, we can reduce the high switching frequency, as shown in the developed computer simulations. In addition, we carry out a comparative study on the performance of the controllers implemented for this robotic system.

KEY WORDS: Adaptive control, Gain Scheduling, multilevel inverter, robotic systems, servo motors.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas el campo de la robótica ha tenido una gran aceptación y crecimiento. En particular los robots de configuración polimórfica se emplean en la industria en general, sobretudo en la automotriz, esto lleva a la necesidad de crear cada día robots de tipo industrial con mayores prestaciones en potencia, velocidad y precisión, para ser empleados en variadas tareas, incluyendo la minería.

Inicialmente el uso de máquinas AC se limitaba a un funcionamiento básico, el cual consistía en mover cargas a velocidad constante. Posteriormente, con la aparición de los variadores de frecuencia y partidores suaves se logró hacer el arranque de estas máquinas disminuyendo la corriente nominal y la velocidad de trabajo. Actualmente, estos dispositivos de arranque están muy presentes en el sector industrial y minero. A través del tiempo, estos dispositivos electrónicos fueron evolucionando y apareciendo otras técnicas como el Control Vectorial, el cual permite la partida de un motor AC con carga inicial [1].



Con el transcurrir del tiempo, a pesar del desarrollo tecnológico que tuvo la electrónica de potencia en beneficio de las máquinas AC, éstas aún no presentaban una gran competitividad con las máquinas DC en el campo de la robótica, especialmente en el control de posición, a pesar de que estas últimas tienen un menor rendimiento que las AC y requieren un mayor mantenimiento. La única alternativa de implementación de máquinas AC era por medio de un motor síncrono sin escobillas que se controlaba con un inversor de dos niveles, con modulación PWM, los cuales generaban grandes niveles de dv/dt , además de altas frecuencias de conmutación, que perjudican la vida útil del motor [2].

2. PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

Para el desarrollo de este trabajo se ha implementado un inversor multinivel de 27 niveles, el cual tiene la ventaja de disminuir la alta frecuencia de conmutación para el uso de una Máquina Eléctrica de Imanes Permanentes (ver Fig. 1).

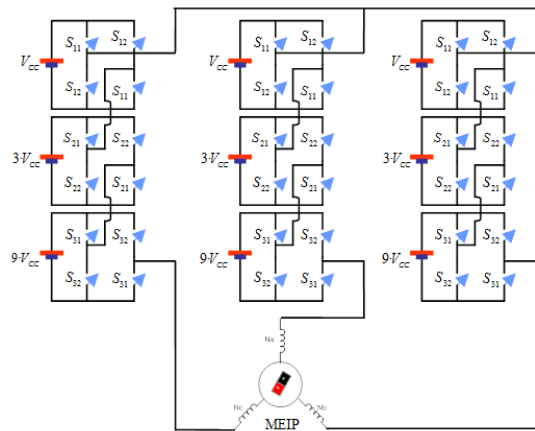


Figura 1. Esquema eléctrico de un Inversor Multinivel Trifásico de 27 niveles conectado a una MEIP.

Para la aplicación de las distintas estrategias de control, que se desean implementar, se trabajó con un modelo dinámico de un robot de un Grado de Libertad (GDL), ver Fig. 2, que se presenta por medio de la ecuación (1). En este modelo dinámico considera un torque del roce dinámico rotacional que presenta el giro del motor [3], al considerar un sistema de engranajes.

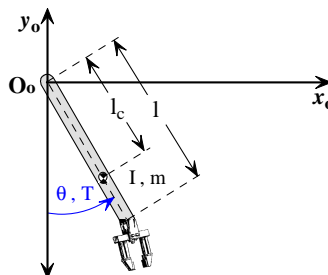


Figura 2. Modelo dinámico del robot de un GDL.

$$T_m = \frac{(m \cdot l_c^2 + I) \cdot \ddot{\theta} + l_c \cdot m \cdot g \cdot \text{sen } \theta}{r} + T_f(\dot{\theta}) \quad (1)$$



donde:

- T_m : Torque presente en el eje de giro del actuador [N·m]
- T_f : Torque de fricción presente en el eje de giro del brazo [N·m]
- θ : Posición angular en el eje del brazo del robot [°].
- $\dot{\theta}$: Velocidad angular en el eje del brazo del robot [°/s]
- $\ddot{\theta}$: Aceleración angular en el eje del brazo del robot [°/s²]
- g : Constante de gravedad ejercida por el sistema gravitacional en el cual se encuentre el robot [m/s²]
- l_c : Longitud entre el eje de giro del brazo y su centro de masa [m]
- I : Momento de inercia del brazo del robot con respecto a su eje de giro [Kg·m]
- r : Razón de transformación del sistema de engranajes [veces]
- m : Masa del brazo del robot [kg]

El torque de fricción es representado por medio de una función que incluye los efectos de la fricción estática, viscosa y de Coulomb. Además, esta función permite eliminar el ruido numérico generado por las simulaciones computacionales originado por los errores de redondeo – producido por el acarreo en operaciones aritméticas reales – y los de truncamiento de series numéricas en un número finito de términos, ver Fig. 3 [4].

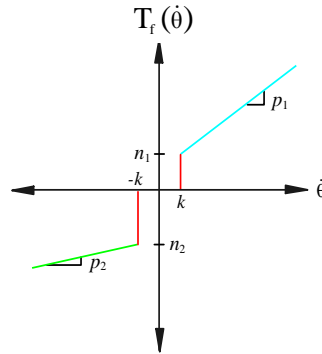


Figura 3. Representación esquemática del modelo de torque de fricción.

$$T_f(\dot{\theta}) = \begin{cases} 0 & ; & -k \leq \dot{\theta} \leq k \\ p_1 \cdot \dot{\theta} + n_1 & ; & p_1, n_1 > 0, \dot{\theta} > k \\ p_2 \cdot \dot{\theta} + n_2 & ; & p_2 > 0, n_2 < 0, \dot{\theta} < -k, \end{cases} \quad (2)$$

donde:

- p_1 : Pendiente de fricción viscosa para torque positivo [N·m·s/Rad]
- p_2 : Pendiente de fricción viscosa para torque negativo [N·m·s/Rad]
- n_1 : Constante de roce de Coulomb para torque positivo [N·m]
- n_2 : Constante de roce de Coulomb para torque negativo [N·m]

Al emplear un controlador PID Clásico en el comando del actuador de este robot se presentan problemas en su arranque (desde su posición de reposo) y estabilidad, los que se acrecientan cuando el brazo del robot es sometido a grandes perturbaciones, no sólo cuando éste se encuentra efectuando algún



movimiento, sino también cuando se alcanza una posición en estado estacionario. Para solucionar esto, se diseña e implementa una estrategia de control que modifique en línea los parámetros del controlador PID, en distintas partes del proceso. Para realizar estas modificaciones de los parámetros se emplea el control variable por *Gain Scheduling* (G-S), que ofrece un versátil control según las necesidades de cada proceso; variando dichos parámetros según el estado del proceso y ofreciendo, además, la ventaja de poder operar de forma autónoma en distintos puntos de operación [5].

El sistema de control, diseñado e implementado, varía el valor de sus parámetros de control según la posición del ángulo en el cual se encuentra el brazo robotizado (ver Fig. 4). El lazo cerrado de control se realiza gracias a un *encoder* ubicado en el sistema de engranajes. Una vez identificado el ángulo en el que está posicionado el eje de giro del brazo robotizado, se escogen los parámetros del controlador PID del lazo cerrado de control de posición, una vez determinada la acción de control, esta se envía al Control Vectorial para realizar la acción que corregirá la posición (ver Fig. 5). El cual envía la acción de control a un sistema de control vectorial para activar el inversor multinivel, logrando así un control de posición para el brazo robotizado.

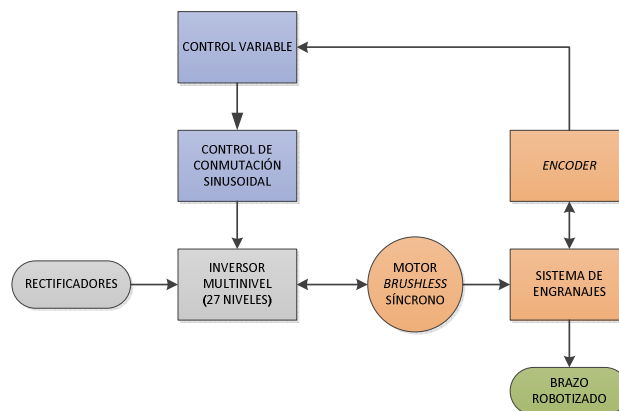


Figura 4. Esquema general del sistema de control de posición.

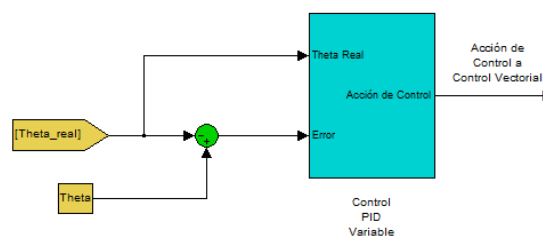


Figura 5. Esquema de la estrategia de Control de PID Variable.

Para analizar un sistema de control variable se escogió dos métodos, los cuales son:

- *Gain Scheduling* por Tramos.
- *Gain Scheduling* por Interpolación.

***Gain Scheduling* por Tramos**

El primer tipo de control por G-S a contemplar en este trabajo es por Tramos, en el cual se definen los parámetros del controlador PID por medio del rango en el que se encuentra el ángulo del brazo robotizado.



Con esto se busca no tener el problema de arranque desde su posición de reposo, ya que muchas veces el valor de los parámetros del controlador PID no eran capaces de iniciar la partida del motor, cuando se establecía un *setpoint* alto. La Tabla 1 representa como se realiza la división del rango de funcionamiento del brazo robotizado, rangos a los cuales se les asignan distintos parámetros PID.

Tabla 1. Esquema representativo de los parámetros PID por rango de ángulos.

| Rango | K_p | T_i | T_d |
|-----------------------|----------|----------|----------|
| $0^\circ - \theta_1$ | K_{p1} | T_{i1} | T_{d1} |
| $\theta_1 - \theta_2$ | K_{p2} | T_{i2} | T_{d2} |
| $\theta_2 - \theta_3$ | K_{p3} | T_{i3} | T_{d3} |
| $\theta_3 - \theta_4$ | K_{p4} | T_{i4} | T_{d4} |
| $\theta_4 - 90^\circ$ | K_{p5} | T_{i5} | T_{d5} |

Gain Scheduling por Interpolación

En este segundo tipo de control, la asignación de cada parámetro del controlador PID se realiza con un polinomio de interpolación según la posición en la que se encuentra el brazo robotizado, así como el método anterior, se asigna un valor de para cada ganancia del controlador según el rango de operación, en este método, se realiza una interpolación para cada rango en que se encuentre el robot (ver Fig. 6).

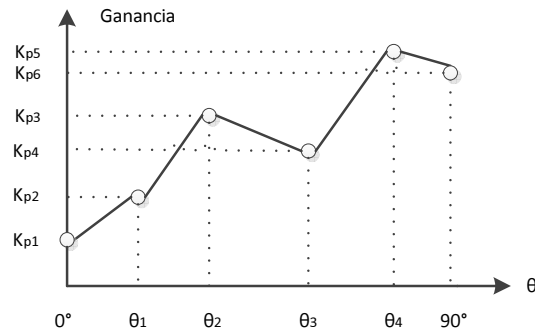


Figura 6. Esquema representativo de interpolación.

3. IMPLEMENTACIÓN DE SIMULACIONES COMPUTACIONALES

A continuación, se presenta la implementación de las simulaciones computacionales realizadas, las que nos permitirán observar la evolución de posición angular que tiene el brazo del robot y la velocidad que éste adquiere en el tiempo. De igual manera se podrá visualizar el torque mecánico que se genera en el eje mecánico de la MEIP. Además, se considera un sistema de engranajes (relación 1:40) para aumentar el torque presente en el eje mecánico del brazo del robot. También se grafica el torque de fricción generado en el sistema de engranajes.

Para implementar las simulaciones se empleó la plataforma MatLab/Simulink [6]. Por medio de la Fig. 7 se esquematiza parte del sistema de simulación implementado. Los parámetros utilizados para representar la MEIP, marca WEB, corresponden a los parámetros reales entregados por el fabricante, los que se presentan por medio de la Tabla 2. Para obtener los 27 niveles establecidos, en el inversor trifásico se configuraron los siguientes niveles de tensión: $V_{cc} = 14$ [V]; $3 \cdot V_{cc} = 42$ [V]; $9 \cdot V_{cc} = 125$ [V]. Las Tablas 3 y 4 muestran los parámetros empleados para el brazo robotizado y los trenes de engranajes.



Tabla 2. Valores de parámetros utilizados en la simulación de la MEIP.

| | |
|--|--|
| Pares de polos | 4 |
| Inductancia sincrónica | 20,95 [mH] |
| Resistencia sincrónica | 5,521 [Ω] |
| Inercia del motor | 0,2189 [$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$] |
| Roce viscoso con el aire | 0,001 [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$] |
| Densidad de flujo generada por el imán del rotor | 0,168219 [Wb] |

Tabla 3. Valores de parámetros utilizados en la simulación del brazo robotizado.

| | |
|-------|---------------------------------------|
| m | 6,5223 [kg] |
| l_c | 0,0983 [m] |
| I | 0,1213 [$\text{Kg} \cdot \text{m}$] |
| g | 9,81 [m / s^2] |

Tabla 4. Valores de parámetros utilizados en la simulación del tren de engranajes.

| | |
|-------|--|
| P_1 | 0,000873 [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / ^\circ$] |
| P_2 | 0,001 [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / ^\circ$] |
| n_1 | 0,03 [$\text{N} \cdot \text{m}$] |
| n_2 | - 0,03 [$\text{N} \cdot \text{m}$] |
| k | 0,573 [$^\circ/\text{s}$] |
| r | 40 [veces] |

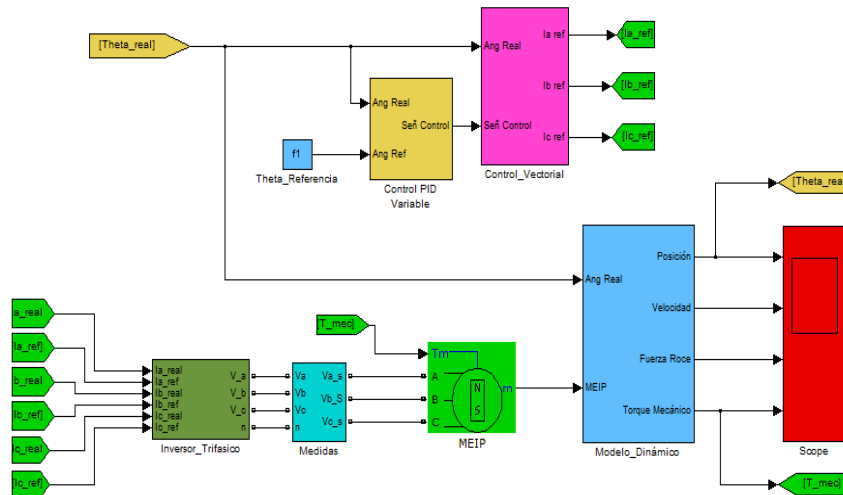


Figura 7. Esquema de interpolación empleando *Simulink*.



4. RESULTADOS

Considerando los dos métodos de control *Gain Scheduling* mencionados anteriormente, a continuación, se muestran los resultados del desempeño dinámico del sistema robotizado en estudio.

Gain Scheduling por Tramos

Se observa el comportamiento del brazo robotizado partiendo desde el reposo, el que en primer lugar se desplaza desde 0° a 20° (ver Fig. 8), luego se visualiza su desplazamiento desde 0° a 40° (ver Fig. 9) y, finalmente, desde 0° a 70° (ver Fig. 10).

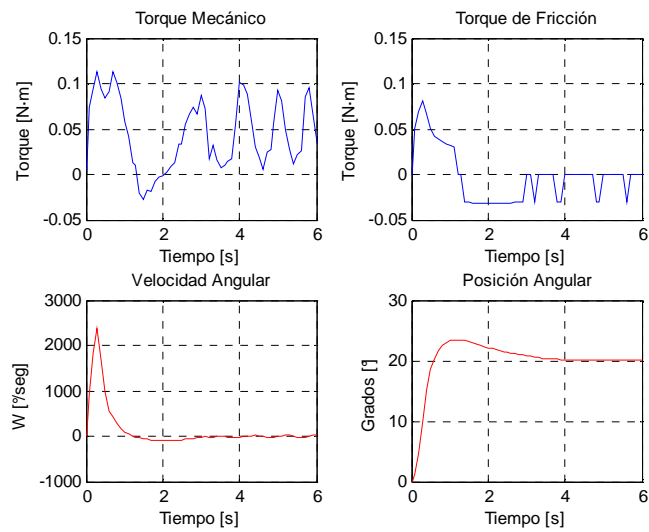


Figura 8. Gráfica con *Gain Scheduling* por tramos desde 0° a 20° .

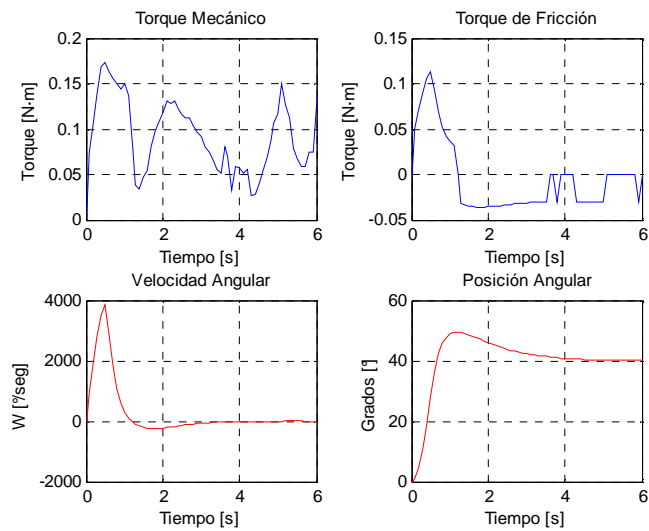


Figura 9. Gráfica con *Gain Scheduling* por tramos desde 0° a 40° .

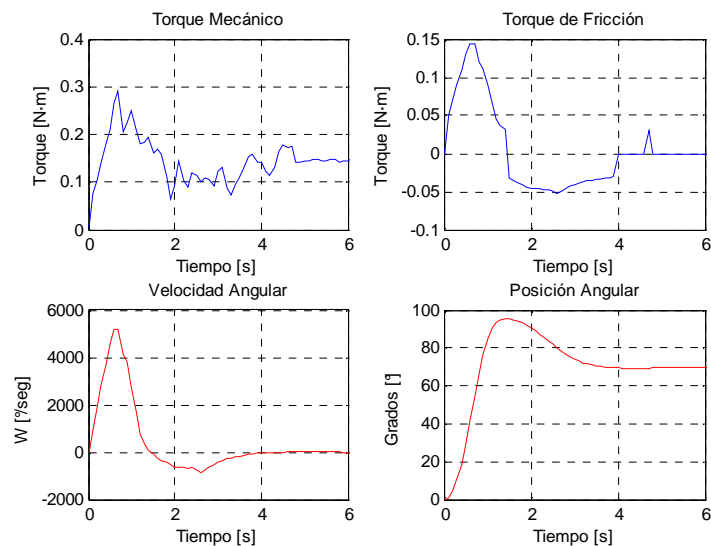


Figura 10. Gráfica con *Gain Scheduling* por tramos de 0° a 70°.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en general, la aplicación de este método le proporciona al robot un buen desempeño dinámico. Esto se puede observar en los primeros rangos de operación, sin embargo, a medida que se evoluciona hacia en los rangos superiores (cercanos a los 90°) el sistema robotizado presenta un mayor sobrepaso. Sin embargo, el sistema llega a su estado estacionario tras los 4 segundos de iniciado el desplazamiento.

También se analizó la diferencia de comportamiento dinámico cuando el robot se desplaza desde un punto a otro, pero en ambos sentidos. Es por ello que la Fig. 11 muestra tal comportamiento, desde 30° a 60°, y desde 60° a 30°.

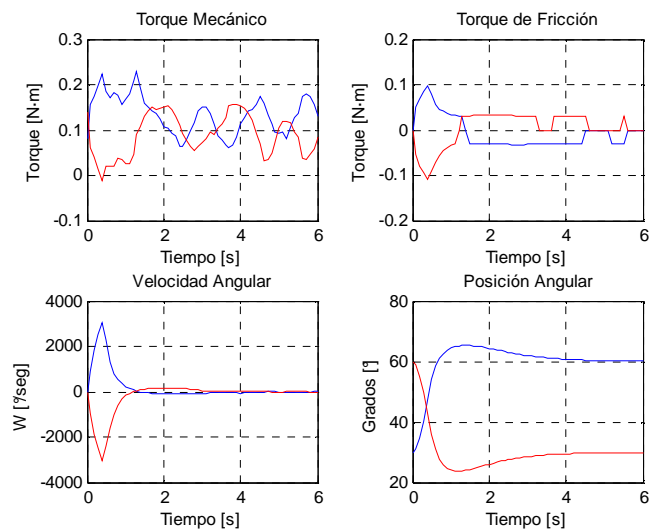


Figura 11. Gráfico de *Gain Scheduling* por tramos, desde 30° a 60° (azul) y desde 60° a 30° (rojo).

La diferencia en el comportamiento dinámico del robot, que se produce entre el desplazamiento desde 30° a 60°, y viceversa (subida y bajada), es muy clara. Esto se debe a la acción de la fuerza de gravedad, que en el sentido subida del brazo se opone a su movimiento, teniendo que aplicarse un mayor torque



mecánico desde el servomotor para lograr impulsar el brazo robotizado. Sin embargo, ocurre exactamente lo contrario al bajar el brazo, pues ahora la fuerza de gravedad apoya el desplazamiento del robot.

Gain Scheduling por Interpolación

Ahora, para conocer el comportamiento dinámico del sistema empleando el método de *Gain Scheduling* por interpolación, desde el reposo el sistema es sometido a distintos desplazamientos, los cuales van desde 0° a 20° (ver Fig. 12), desde 0° a 40° (ver Fig. 13) y desde 0° a 70° (ver Fig. 14).

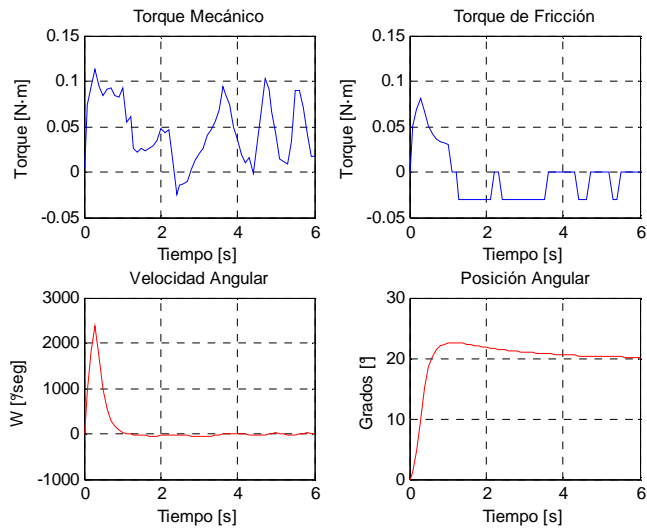


Figura 12. Gráfica con *Gain Scheduling* por interpolación desde 0° a 20° .

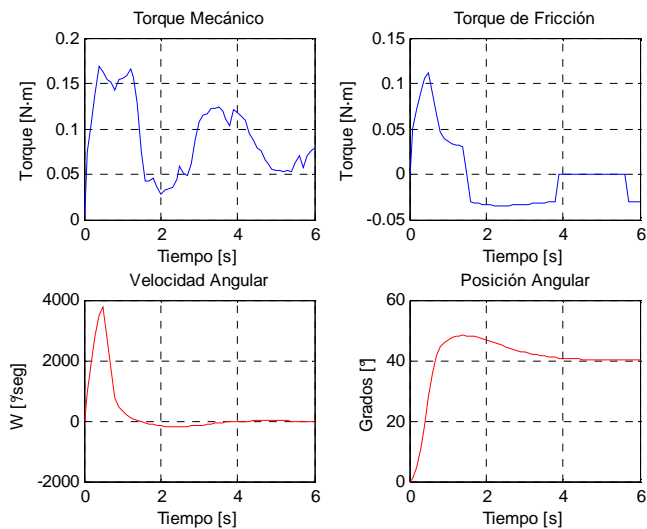


Figura 13. Gráfica con *Gain Scheduling* por interpolación desde 0° a 40° .

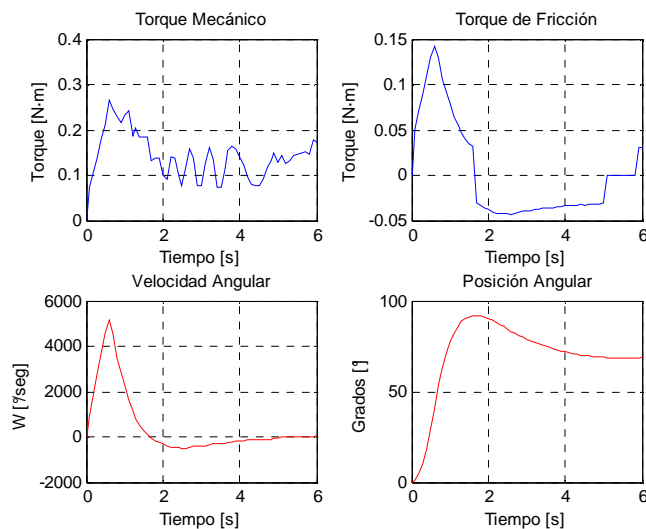


Figura 14. Gráfica con *Gain Scheduling* por interpolación desde 0° a 70° .

Este método logra controlar adecuadamente el comportamiento del sistema para los diferentes sectores de operación. Sin embargo, se observa que para los valores angulares más pequeños de trabajo, es decir entre 0° y 45° , el comportamiento del robot presenta un pequeño sobrepaso y sólo tiene un pequeño error en estado estacionario; en cambio, para los valores superiores, *i.e.* desde 45° hasta 90° , el sistema presenta sobrepaso y una pequeña oscilación en estado estacionario.

Empleando este método de control, a continuación, se visualiza la diferencia en el comportamiento del brazo robotizado al desplazarse desde 30° a 60° , y viceversa (ver Fig. 15).

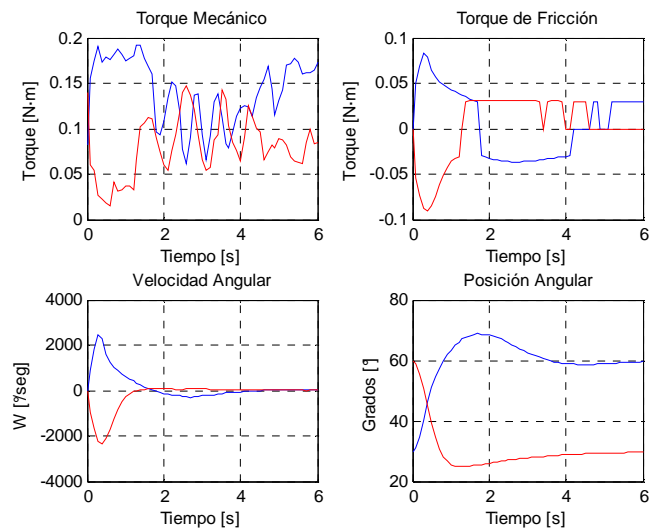


Figura 15. Gráfico de *Gain Scheduling* por interpolación, desde 30° a 60° (azul) y desde 60° a 30° (rojo).

De acuerdo a las gráficas mostradas en la figura anterior, al analizar la diferencia que presenta el desempeño dinámico del robot al subir o bajar su brazo, se ve claramente que es más difícil para éste desplazarse desde 30° a 60° . Obviamente esto se debe al esfuerzo adicional que el robot debe realizar a causa de la oposición a su movimiento generado por la acción de la fuerza de gravedad; presentando un



mayor sobrepaso, pero aún así los desplazamientos de subida y bajada concluyen con la obtención del *setpoint* impuesto.

Comparación de ambos Métodos

Es importante hacer una comparación entre los dos métodos propuestos en este trabajo, para ello, se establece un *setpoint* común, desplazarse desde 50° a 60° (ver Fig. 16), y desplazarse desde 60° a 50° (ver Fig. 17). En ambos casos se grafica la posición y la velocidad obtenidas por los dos métodos de control.

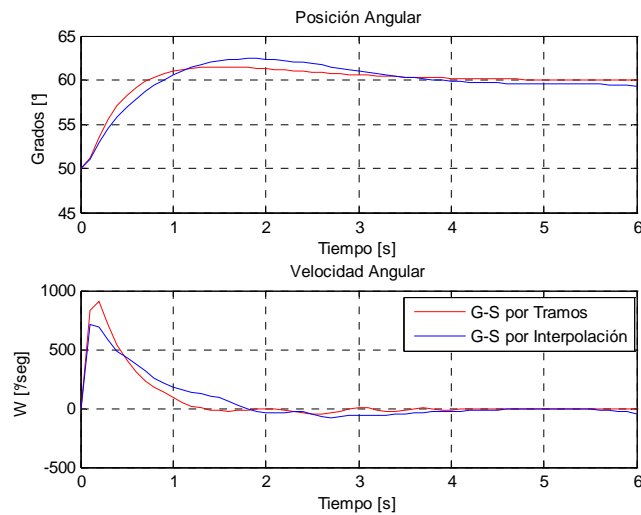


Figura 16. Comparación de ambos métodos desde 50° a 60° .

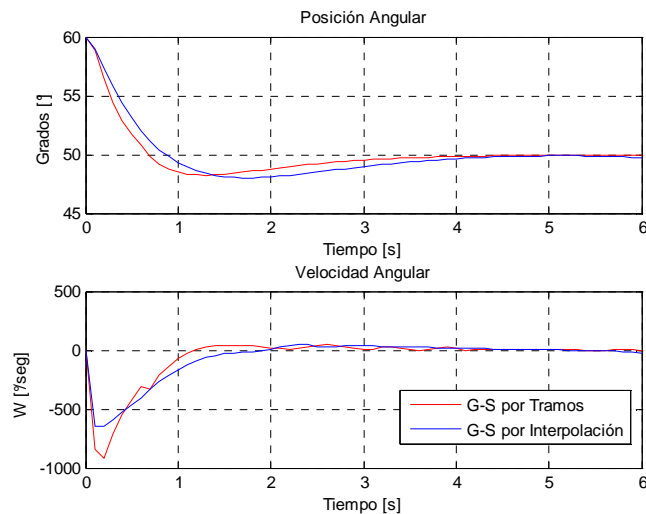


Figura 17. Comparación de ambos métodos desde 60° a 50° .

En ambos sentidos de desplazamiento, y empleando los dos métodos de control basados en *Gain Scheduling*, el desempeño dinámico del robot logra estabilizarse al cabo de unos 4 segundos. El método por tramos presenta un mayor sobrepaso que el otro método, esto se debe a que con este método el robot alcanza una mayor velocidad que empleando el método por interpolación. Ambos métodos de G-S, en general, presentan un buen comportamiento, aunque un tanto mejor para los rangos inferiores (desde 0° a 45°), que para los rangos superiores (desde 45° a 90°).



CONCLUSIONES

En general, el método de control G-S por tramos le permite un mejor comportamiento dinámico al robot, que el método G-S por interpolación. Al analizar la velocidad con la que se desplaza el brazo robotizado entre 50° y 60° (y viceversa), queda de manifiesto que es mejor emplear el método G-S por interpolación, ya que el robot pesa a que llega a su estado estacionario en tiempo similar al presentado por el método G-S por tramos, lo hace a menor velocidad y, por consiguiente, con menor aceleración, lo que evita desgaste mecánico innecesario del robot y a la vez permite disminuir el consumo de energía en su desplazamiento. El empleo de controladores basados en *Gain Scheduling*, por medio de las dos metodologías expuestas, ha permitido un control en todo el rango de trabajo del robot (entre 0° y 90°), lo que no se consigue con un controlador PID clásico. Se pudo disminuir bastante el error de posición en estado estacionario, problema característico del controlador PID clásico, que debido a su intrínseca linealidad no se conseguía eliminar.

En un futuro cercano, considerando todo el sistema robotizado descrito en este trabajo, se podrán implementar físicamente los dos métodos de *Gain Scheduling* abordados, por lo cual, este *paper* constituye la base de nuestras futuras investigaciones en esta área.

RECONOCIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen el apoyo brindado por:

- El Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Santiago de Chile, por medio del Proyecto DICYT 060713UO.
- El Grupo de Automática, con su constante inspiración e impulso a la investigación científica.
<http://www.die.usach.cl/>

REFERENCIAS

1. ROJAS, Félix. "Diseño, implementación y construcción de un inversor multinivel para el accionamiento de un brazo robotizado, mediante un motor *Brushless*". Tesis de Grado Magister, Universidad de Santiago de Chile. Ciudad de Santiago. Chile, 2009.
2. MUHAMMAD, Rashid. "Electrónica de Potencia. Circuitos Dispositivos y Aplicaciones", Tercera Edición, Editorial: Pearson Educación. 2004.
3. URREA, Claudio; KERN John; ORTIZ, Holman. "Robotic Systems. Applications, Control and Programming", Capítulo: "Performance Evaluation of Fault-Tolerant Controller in Robotic Manipulators". pp. 553-570, InTech, ISBN: 978-953-307-941-7, 2012.
4. URREA, Claudio. "Modelado y Control de Oscilaciones no Lineales de un Manipulador de dos Grados de Libertad". Tesis de Grado Magister, Universidad de Santiago de Chile. Ciudad de Santiago. Chile, 1999.
5. URREA, Claudio; SANTANDER, Felipe. "Comparación de Técnicas de Control en Servomotores" XIV Congreso Latinoamericano de Control Automático (CLCA) y XIX Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA), USACH. Ciudad de Santiago. Chile, 2010.
6. www.mathworks.com/

SOBRE LOS AUTORES

Daniel Jara Morales, Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Estudiante de Ingeniería Civil en Electricidad. Universidad de Santiago de Chile (USACH).

Claudio Urrea Oñate, Ph.D. en Ciencias de la Ingeniería, mención: Automática y Producción, INPG, Francia. Profesor/Investigador Jornada Completa del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la USACH. Director del Programa de Modelación Industrial y Simulación Computacional de la Facultad de Ingeniería, USACH.