

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE UN EXOESQUELETO PARA ASISTENCIA DEL MOVIMIENTO DEL CODO

Development of a control system of an exoskeleton for assistance of elbow motion

RESUMEN

En este artículo se define una forma de realizar un sistema de control para un exoesqueleto con una estructura definida. Se muestra la manera típica de hacer que el sistema completo responda ante la referencia proveniente del humano con especificaciones dadas, además de realizar una identificación de parámetros del actuador. Por último se propone un sistema de control de fuerza para la estructura mecánica y el actuador eléctrico, en el cual se verán establecidas ciertas condiciones de diseño razonables.

PALABRAS CLAVES: Control de fuerza, exoesqueleto.

ABSTRACT

In this article is defined a form to make a control system for an exoskeleton with a defined structure. It is shown the typical way to make that the whole system responds to the reference coming from the human with given specifications, besides make a parametric identification of the actuator. Finally a force control system for the mechanical structure and the electrical actuator is proposed, in which will be established certain reasonable conditions of design.

KEYWORDS: Force control, exoskeleton.

1. INTRODUCCIÓN

El propósito del dispositivo que se menciona en este trabajo es amplificar la fuerza del sistema muscular humano, sin perder el control natural de los movimientos, es por ello que los típicos controles de posición para las máquinas, no son aplicables, pues cuando el humano proporciona el comando de referencia de posición se pierde la naturalidad de los movimientos, además se quiere dar una ganancia constante, a la fuerza ejercida por la persona, la cual es la variable a controlar.

Una máquina con las características anteriores es el exoesqueleto del brazo, atado en paralelo al brazo humano, con uniones y partes que corresponden a las del hombro y del codo. Sobre ésta parte del exoesqueleto se realiza un estudio en cuanto al diseño del sistema de control, en el que el torque generado por un actuador localizado en la coyuntura del codo es usado para amplificar el momento producido por los músculos del codo, de tal manera que la mayor parte del torque sea producido por el actuador, y como consecuencia una fracción de la carga será soportada por el humano.

Es necesario un modelo del sistema, cuya salida sea el torque y cuya entrada sea el voltaje de control para el actuador, si este es un actuador eléctrico. Se conocen los parámetros mecánicos para la estructura que se pone como carga, para el actuador se hace una identificación de la dinámica. A partir del modelo completo, se obtiene un modelo de espacio de estado, para con este realizar un

JASON EDWIN MOLINA

Ingeniero Electricista
Analista
XM los expertos en mercados
jmolina@xm.com.co

JUAN PABLO GONZÁLEZ

Ingeniero Electrónico, M. Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
jpgonzalez@utp.edu.co

algoritmo de control por realimentación del estado, de modo que el sistema en lazo cerrado sea estable y responda en forma rápida a las señales de comando.

Adicional a esto, se diseña un observador digital del estado para obtener la señal de realimentación. El sistema de control por realimentación del estado, permite controlar no solo la salida sino también el estado del sistema. Se presentan finalmente los resultados de cada una de las partes del diseño, que consiste en la identificación del sistema, el diseño del observador y de la ley de control.

2. DEFINICIÓN DE EXOESQUELETO

Un exoesqueleto es un mecanismo o estructura externa que tiene uniones que corresponden a las del cuerpo humano. Este es usado por el humano y el contacto físico que existe entre el operador y el exoesqueleto permite una transferencia directa de la potencia mecánica y las señales de información [1].

El exoesqueleto puede ser usado para tres diferentes aplicaciones, en donde el diseño del mismo depende estrictamente de la aplicación en particular:

- Amplificación de potencia.
- Dispositivos maestro de un sistema teleoperador maestro-esclavo.
- Dispositivos *Haptic*.

El diseño de la estructura del exoesqueleto debe estar dirigido a soportar una carga neta, además de proveer una interfaz mecánica con el operador que sea transparente y permitir una utilización eficiente de la energía del sistema. “En esencia un exoesqueleto para amplificar fuerza es un dispositivo que envuelve al usuario para soportar una carga neta y su propio peso con el objeto de minimizar las perturbaciones de carga sobre el operario” [2].

El uso de un exoesqueleto para amplificación de fuerza realiza básicamente la tarea de dar cierta ganancia al momento neto que ejerce el humano sobre una carga mediante un actuador, de tal forma que el humano aporte siempre un porcentaje del esfuerzo y el resto lo aporte el actuador, no obstante el actuador debe realizarlo de tal forma que para el humano no sea notoria la reacción de la estructura y no se introduzcan retardos en la acción de la fuerza. Lo anterior requiere un sistema de control que actualice en tiempo real una señal, producto de la interacción entre el dispositivo y la máquina.

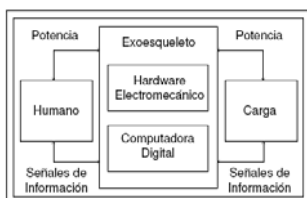


Figura 1. Interacción entre el humano, el exoesqueleto y la carga.

3. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

La identificación de sistemas busca la forma de determinar el modelo matemático de un proceso dinámico desconocido con base en entradas y salidas medidas, con el fin de realizar control sobre el sistema identificado, esto equivale a hacer control basado en el diseño del modelo, además es el punto inicial de cualquier trabajo de diseño en control. El trabajo de identificación puede ser aún más laborioso que el de control. La idea principal es encontrar un modelo con parámetros ajustables para que este se ajuste tanto como sea posible, a los datos medidos [3].

El modelado del sistema se dividió en dos partes, la primera consiste en la identificación del modelo del actuador, para el cual se tiene un motor cuyos valores nominales se dan en la tabla 1. Los parámetros del motor son desconocidos, por lo cual se procede a realizar una identificación de parámetros. La segunda parte es el modelado de la estructura del exoesqueleto, que consiste en una barra rígida con una carga en el extremo. El modelo requerido es de momento en función del voltaje aplicado a la entrada del motor. Para la estructura se conocen los parámetros, y para el motor se hace una identificación.

Se cuenta con un sensor de velocidad, con el cual se identifican los parámetros del modelo de velocidad en función del voltaje a la entrada, y se realiza el complemento con los demás datos para obtener el momento a la salida. La identificación se hace usando un método que estima el modelo de un sistema, a partir de una función de transferencia dada por:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{\sum_{i=1}^m b_i z^{-i}}{\sum_{i=0}^n a_i z^{-i}} \quad \text{con: } a_0 = 1 \quad (1)$$

Este método estima los parámetros de la función de transferencia $H(z)$, usando las entradas y las salidas pasadas, en una señal muestreada. Este modelo se denomina ARX (autorregresivo con entradas extra), y consiste en que se tiene la salida $y(k)$ dependiendo de entradas y salidas pasadas [3], con lo que se obtiene de la ecuación (1):

$$y(k) = -\sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^m b_i u(k-i),$$

donde $y(k) = y(kh)$

h es el periodo de muestreo. Sean:

$$\theta = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} -y(k-1) \\ -y(k-2) \\ \vdots \\ -y(k-n) \\ u(k-1) \\ u(k-2) \\ \vdots \\ u(k-m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

entonces $y(k)$ puede escribirse como:

$$y(k) = Z^T(k)\theta$$

Para destacar que esto es un modelo paramétrico, se denomina $y(k)$ como $\hat{y}(k/\theta)$. El parámetro θ se determina usando el criterio de mínimos cuadrados, el cual consiste en que, dado el conjunto de muestras de entradas y salidas:

$$Z^N = \{u(1), y(1), u(2), y(2), \dots, u(N), y(N)\} \quad (3)$$

se minimice la función:

$$V_N\{\theta; Z^N\} = \frac{1}{N} \sum_{k=n+1}^N (y(k) - \hat{y}(k/\theta))^2,$$

$$\text{sujeto a } \hat{y}(k/\theta) = Z^T(k)\theta$$

De modo que el valor de θ que minimiza $V_N\{\theta; Z^N\}$, sea:

$$\hat{\theta}_N = \underset{\theta}{\text{argmin}} V_N\{\theta; Z^N\}$$

El anterior valor de los parámetros del modelo ARX, se obtiene de forma simple igualando a cero, el gradiente respecto a θ , y dado que la función $V_N\{\theta; Z^N\}$ es cuadrática en θ , se obtiene en efecto un mínimo [3].

De donde se obtiene $\hat{\theta}_N$ como:

$$\hat{\theta}_N = \left[\sum_{k=n+1}^N \underline{\gamma}(k) \underline{\gamma}^T(k) \right]^{-1} \left[\sum_{k=n+1}^N \underline{\gamma}(k) y(k) \right] \quad (4)$$

Una vez obtenido este modelo paramétrico, se procede a validarlo, verificando que su comportamiento sea similar al medido directamente, cuando se introduce una entrada al sistema que no corresponde al conjunto de datos de (3). Este criterio puede ser muy subjetivo, por lo cual se acostumbra que el conjunto de datos en (3), sea lo mejor posible, con respecto a que contenga mucha información en el dominio de la frecuencia [3].

La función de transferencia propuesta para modelar el motor se determina partiendo de que para un motor cuya salida es la velocidad, y la entrada es el voltaje en la armadura, típicamente se tiene un sistema de primer orden [3], el cual está dado por la función de transferencia:

$$H(z) = \frac{\Omega(z)}{U(z)} = \frac{b}{z+a} \quad (5)$$

Esto resulta de discretizar la función de transferencia análoga:

$$H(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{k1}{s+k2}$$

donde $U(s)$ es el voltaje en terminales de la armadura del motor, y $\Omega(s)$ es la velocidad angular en el eje. En (5) se presenta un modelo paramétrico, dado que no se conocen los parámetros a y b , y según (2):

$$\underline{\theta} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad \underline{\gamma}(k) = \begin{bmatrix} -w(k-1) \\ u(k-1) \end{bmatrix}$$

El sistema mecánico al que va acoplado el motor, es el que se muestra en la figura 2, el cual consiste de dos grados de libertad, de los cuales sólo es actuado el de la coyuntura del codo, denotado por θ . El modelamiento de la estructura después del motor es un sistema mecánico, con una reducción de velocidad, y una inercia acoplada al eje en forma transversal, como se ve en la figura 3. Dicha inercia es calculada como concentrada en el extremo del brazo, dado que allí se concentra la carga significativamente alta que deberá soportar el motor, con lo cual la inercia de la barra es cero, no obstante en el caso riguroso podría sumarse la inercia de la barra. La inercia respecto al otro extremo de la barra, que es el punto de aplicación del torque, es, según el teorema del eje paralelo [4]:

$$J = O + Ml^2$$

donde l es la distancia entre extremos de la barra.

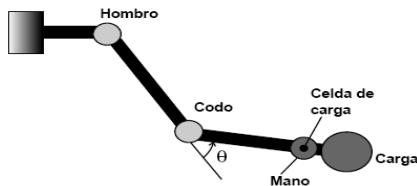


Figura 2. Sistema mecánico del exoesqueleto para el brazo.

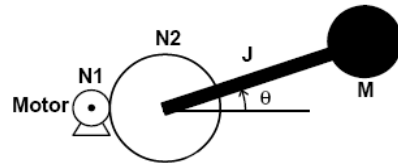


Figura 3. Modelo mecánico del sistema.

El rango de movilidad del ángulo θ indicado en la figura 3 es aproximado a:

$$0 \leq \theta \leq 150^\circ$$

La relación entre torque y velocidad de la barra se da por [5]:

$$\tau = J \left(\frac{N1}{N2} \right)^2 \frac{dw}{dt} \quad \text{con } J = ML^2 \quad (6)$$

Donde w es la velocidad en el eje del motor, M es la masa de la carga, L es la longitud de la barra y τ es el torque en el eje del motor, sin embargo, es necesario determinar el torque en la estructura y no en el motor, por lo cual se hace necesario referir el torque hallado en (6), al eje del motor, así:

$$\tau = J \left(\frac{N1}{N2} \right)^2 \frac{dw}{dt} \left(\frac{N2}{N1} \right) = J \left(\frac{N1}{N2} \right) \frac{dw}{dt} \quad (7)$$

Aquí, τ representa el torque en la carga y w , la velocidad en el eje del motor. La expresión (7) proporciona el torque dinámico, es decir el torque necesario para que el motor llegue de una posición angular a otra; este torque también es llamado torque acelerador, porque es proporcional a la aceleración. Aparte de necesitar un torque acelerador para los cambios de posición, es también necesario un torque adicional para sostener la carga en una posición dada, llamado torque estático, este torque es una función no lineal de la posición angular, de este modo el torque total está dado por [6]:

$$\tau = J \left(\frac{N1}{N2} \right) \frac{dw}{dt} + MLg \cos \theta$$

Lo anterior puede ilustrarse en un diagrama de bloques como en la figura 4.

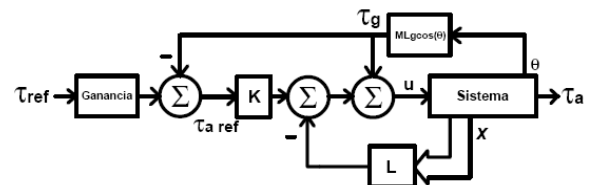


Figura 4. Diagrama del controlador para el modelo de la perturbación.

En la figura se ve que a la referencia, que proviene del operador humano, se le ha restado la perturbación de carga τ_g (torque de gravitación) de modo que el sistema solo controlará el torque de aceleración τ_a . Ahora uniendo el modelo del motor y la ecuación que resulta de aplicar la transformada Z [5] en la ecuación (7) se tiene el siguiente modelo:

$$\tau = J \left(\frac{N1}{N2} \right) \left(\frac{z-1}{hz} \right) \Omega(z), \quad H(z) = \frac{\Omega(z)}{U(z)} \quad (8)$$

En la anterior ecuación, $H(z)$ es la función de transferencia que modela al motor, y fue obtenida mediante la identificación, h es el periodo de muestreo. Luego la función de transferencia del sistema es:

$$G(z) = \frac{\tau(z)}{U(z)} = J \left(\frac{N1}{N2} \right) \left(\frac{z-1}{hz} \right) \left(\frac{b}{z+a} \right) = \frac{Jb}{h} \left(\frac{N1}{N2} \right) \frac{z-1}{z(z+a)} \quad (9)$$

La ecuación (9) completa el modelamiento del sistema a controlar.

4. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control del exoesqueleto se basa en un comando de torque, de entrada para la estructura y no uno de posición, la relación existente entre la posición del exoesqueleto y el torque esta dada por:

$$\tau = J\theta'' + B\theta' + K\theta$$

Donde J , B y K , son los parámetros de la estructura de la de la figura 5: inercia, fricción y elasticidad; τ y θ son el torque y la posición angular de alguna parte de la estructura. Algunos sistemas de control utilizan el control directo del torque [1], y otros utilizan el control de la impedancia, para hacer que el sistema se comporte con ciertos parámetros [7].

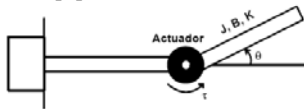


Figura 5. Definición de variables para un exoesqueleto.

El sistema de control basado en el torque o momento, integra la predicción del momento por parte del procesador de señales electromiográficas y usa señales de realimentación, medidos entre el brazo humano y el exoesqueleto. El procesador de señales electromiográficas, involucra un modelo del músculo humano, y con base en éste se establece que la señal de comando principal es la señal electromiográfica.

4.1. Control por Realimentación de Estado

Cuando se requiere ser específico con la respuesta del sistema, se recurre a métodos como el de la realimentación del estado. En este método las especificaciones del sistema se dan en términos de los polos en lazo cerrado, y el método consiste en reubicar los polos actuales en los especificados. Evidentemente, para la realimentación del estado es necesario conocer el estado completo del sistema. Sensar todas las variables de estado resulta en ocasiones imposible, porque no se tiene acceso a ellas o bien no son variables con alguna interpretación física, y en otras ocasiones resulta impráctico. Es por esto que se recurre a los observadores asintóticos del estado, dado que estos están en capacidad de estimar el estado a partir de la entrada y la salida del sistema, de tal manera que en el estado estacionario el error de estimación sea cero [8]. El torque de aceleración necesita ser regulado mas no ser llevado a una referencia dado que el torque de aceleración se usa solo para el

cambio de posición y es transitorio, por esto el problema a solucionar es de regulación y no de seguimiento. Teniendo el modelo (9), se puede determinar fácilmente un modelo de espacio de estado, necesario para desarrollar el control de la planta.

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & -R \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R \\ 1 \end{bmatrix} (u(k) + v(k))$$

$$\tau(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

En el modelo anterior, la entrada v es una perturbación de tipo constante, dada como el voltaje necesario para generar el torque estático o gravitacional en el eje del motor. La entrada u corresponde al voltaje aplicado a la armadura del motor, el cual está limitado por el voltaje nominal del motor. Dicha limitación está en 45 V. Es claro entonces que (10) tiene dos polos, uno en $z = 0$ y otro en $z = -a$. Sean Φ , Γ y C , las matrices del modelo de espacio de estado (10), de forma que se escriba como:

$$\begin{aligned} \underline{x}(k+1) &= \Phi \underline{x}(k) + \Gamma(u(k) + v(k)) \\ \tau(k) &= C \underline{x}(k) \end{aligned} \quad (11)$$

donde:

$$\underline{x}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}$$

La ley de control seguida para realizar la realimentación del estado es:

$$u(k) = -L \underline{x}(k) \quad (12)$$

L puede ser calculada, con la formula de Ackermann [8]:

$$L = [0 \ 1] W_c^{-1} P(\phi) \quad (13)$$

W_c es la matriz controlable y $P(z)$ es el polinomio característico del sistema en lazo cerrado, el cual, para el caso particular del control *Dead Beat* [8]:

$$P(z) = z^2$$

Reemplazando, se obtiene:

$$P(\phi) = \begin{bmatrix} a^2 & aR \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} -\frac{a^2}{R(a+1)} & -\frac{a}{a+1} \end{bmatrix}$$

Se diseña un observador de estado cuyos polos estén en el origen como para el caso de la planta a controlar, este observador es llamado observador *Dead Beat* [8]. La figura 6, describe lo dicho anteriormente.

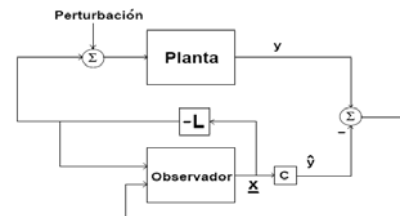


Figura 6. Diagrama del sistema con el observador paralelo. El modelo para el observador es el siguiente [8]:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{x}}(k+1/k) &= \Phi \hat{\underline{x}}(k/k-1) + \Gamma u(k) + K(y(k) - \hat{y}(k)) \\ \text{con } \hat{y}(k) &= C \hat{\underline{x}}(k/k-1) \end{aligned}$$

Nótese que la matriz K escogida para ubicar los polos del observador en el origen, se puede determinar mediante la formula de Ackermann de acuerdo con (13), así:

$$K^T = [0 \ 1](W_o^T)^{-1}P(\phi^T)$$

Si se va a estimar la perturbación, entonces la ecuación de estado del observador, si la perturbación actúa sobre la entrada al sistema, es:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1/k) \\ \hat{v}(k+1/k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi & \Gamma \\ 0 & \phi_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k/k-1) \\ \hat{v}(k/k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} K \\ K_v \end{bmatrix} (y(k) - \hat{y}(k))$$

Donde Φ_v define el modelo de estado de la perturbación constante $v(k)$ en la ecuación (10), de acuerdo con:

$$v(k+1) = \phi_v v(k)$$

Una elección adecuada de la matriz K_v , fijará que tan pronto el observador determinará la perturbación. Además la ley de control es ahora:

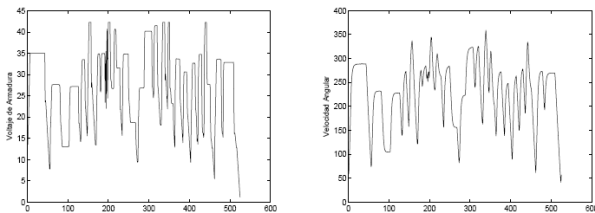
$$u(k) = -L\hat{x}(k) - L_v\hat{v}(k)$$

L_v determina el efecto que la perturbación tendrá sobre el sistema; en particular, si la perturbación es de tipo constante y perturba la entrada del sistema, $L_v = 1$ elimina totalmente el efecto de ésta sobre el sistema

5. RESULTADOS

Los datos de velocidad y de voltaje a la entrada del motor fueron medidos directamente mediante una tarjeta de adquisición NI USB 6008, de 8 entradas análogas, 12 bits de resolución y frecuencia de muestreo de 10 kHz, la adquisición de dichas señales se muestra en la figura 7 para datos de voltaje en la armadura del motor y datos de velocidad angular en el eje. La velocidad del motor fue medida usando un encoder Sharp GP-1R04A, con resolución de 96 ranuras, que proporciona una señal sinusoidal cuya frecuencia es proporcional a la velocidad del motor, todos los anteriores datos fueron tomados con un periodo de muestreo de 62,5 ms.

Con lo anterior se realiza un algoritmo en LabView, que calcula los parámetros θ a partir de las medidas de voltaje y velocidad.



(a) Voltaje en la armadura señal 1. (b) Velocidad angular señal 1.
 Figura 7. Colección de datos.

Para la simulación de los algoritmos obtenidos en este desarrollo se emplea la herramienta Simulink de Matlab. Se realiza la simulación de la respuesta del sistema con realimentación del estado, con condiciones iniciales no nulas, para verificar la respuesta estable del sistema, con las especificaciones dadas. Como consecuencia del

diseño del observador, se procede a simular la respuesta del sistema, incluyendo el observador digital de estado, y a analizar el error de estimación de estado del sistema a partir de la simulación.

La identificación, se evalúa con el algoritmo ARX determinado mediante el método de mínimos cuadrados. A partir de los datos de velocidad y voltaje a la entrada, se obtienen, usando el algoritmo, los parámetros del modelo del motor propuesto en (9), para el conjunto de datos de la figura 7:

$$\theta = \begin{bmatrix} -0,684190 \\ 2,639179 \end{bmatrix}$$

Con estos datos se realiza una verificación, para ver cuál de los tres modelos presenta el mejor ajuste, de los datos para los cuales fue ejecutado. Para esto se presentan en una misma figura, los datos de velocidad experimentales, y los simulados con el modelo (9) y cada uno de los parámetros θ , en la figura 8.

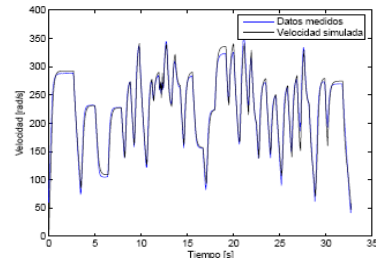


Figura 8. Comparación de los datos y la respuesta del modelo para los parámetros obtenidos con el modelo ARX.

Con los parámetros θ y utilizando los parámetros conocidos del sistema mecánico y $h = 62.5 \text{ ms}$, el modelo queda:

$$G(z) = \frac{\tau(z)}{U(z)} = R \frac{z-1}{z(z-0,684190)} \quad \text{con } R = 0,0563$$

La respuesta del sistema en lazo abierto es:

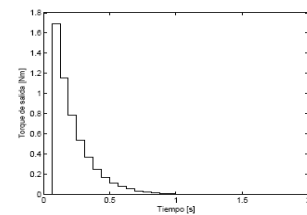


Figura 9. Respuesta a un escalón de 30V.

Para el control *Dead Beat* se hace uso del modelo de espacio de estado dado en (10) y se realizan las simulaciones del sistema de control, obteniendo los siguientes resultados:

Parámetro	Descripción	Valor
L	Matriz de realimentación del estado	[-26,3269; 2,1665]

K	Matriz de realimentación del observador	[0,6842; 0]
---	---	-------------

Tabla 1. Resultados del algoritmo para los parámetros del algoritmo de control.

En cuanto a la regulación del sistema se tienen las siguientes respuestas:

Para la realimentación del estado sin observador:

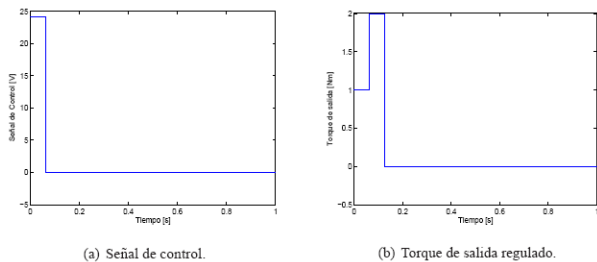


Figura 10. Realimentación del estado.

Con el observador de estado, se tiene:

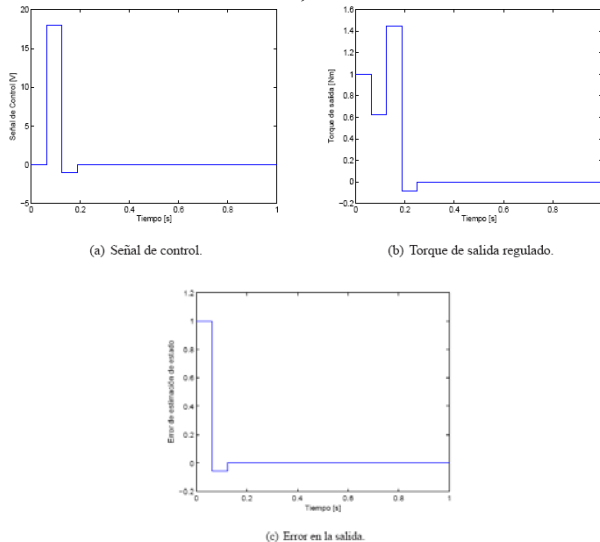


Figura 11. Realimentación del estado con observador.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un exoesqueleto es un dispositivo que requiere una interacción natural con el operador; por lo cual se hace necesario diseñar un sistema de control de fuerza y no de posición angular del dispositivo; el comando de fuerza lo da el operador humano.

Se realizó una identificación de parámetros usando un modelo *ARX* para la parte del modelo cuyos parámetros se desconocen, haciendo uso de entradas y salidas, medidas directamente del motor DC; y se realizó un algoritmo de control digital *Dead Beat* con observador digital de estado *Dead Beat* para el sistema completo. El algoritmo de control realiza la regulación de la planta de acuerdo con las especificaciones previas al diseño. Además el observador de estado, estima las variables de

estado, de tal forma que la ley de control por realimentación del estado sea posible implementarla con las mediciones disponibles. El observador de estado también estima la perturbación, mientras que el regulador elimina su efecto sobre el sistema.

7. BIBLIOGRAFÍA

Referencias de publicaciones periódicas:

[1] J. Rosen, M. Brand, M. B. Fuchs, and M. Arcan, "A Myosignal-Based Powered Exoskeleton System," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 31, no. 3, Mayo 2001.

[2] J. E. Pratt, B. T. Krupp, C. J. Morse, and S. H. Collins, "The Roboknee: an Exoskeleton for Enhancing Strength and Endurance During Walking," *Proceedings of the IEEE International conference on robotics & automation*, 2004.

[7] K. Kiguchi, S. Kariya, K. Watanabe, K. Izumi, and T. Fukuda, "An Exoskeletal Robot for Human Elbow Motion Support—Sensor Fusion, Adaptation, and Control," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 31, no. 3, Junio 2001.

Referencias de libros:

[3] L. Ljung and K. J. Astrom, *System Identification*, ch. 8.

[4] F. P. Beer, E. Russell, J. Johnston, W. E. Clausen, and G. H. Staab, *Vector Mechanics for Engineers*. N.Y.: McGraw Hill, 2004, vol. 1.

[5] K. Ogata, *System Dynamics*. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

[6] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, and R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*. Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, España: McGrawHill, 1997.

[8] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Computer-Controlled Systems, Theory and design*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1997.