

IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE UN MOTOR DC PARA EL CONTROL DE PAR SIN SENSOR DE UNA INTERFAZ HÁPTICA

PARAMETER IDENTIFICATION OF A DC MOTOR FOR SENSOR- FREE TORQUE CONTROL OF A HAPTIC INTERFACE

Alma Guadalupe Rodríguez Ramírez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
al164214@alumnos.uacj.mx

Manuel de Jesús Nandayapa Alfaro

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
mnandaya@uacj.mx

Osslan Osiris Vergara Villegas

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México
overgara@uacj.mx

Recepción: 16/septiembre/2019

Aceptación: 31/octubre/2019

Resumen

Las interfaces hápticas han tenido impacto en aplicaciones que buscan la inmersión del usuario, tal es el caso de las áreas de entrenamiento, educación, medicina y entretenimiento. El impacto que tienen en dichas áreas recae en el hecho de que una interfaz háptica permite la interacción, entre el usuario y un ambiente remoto o virtual, por medio del sentido del tacto. En el presente artículo, se propone un método para la identificación experimental de los parámetros constante de par y momento de inercia de un motor de corriente directa. La identificación de ambos parámetros es indispensable para el diseño de un control de par sin sensor basado en un Observador de Perturbaciones (DOB, por sus siglas en inglés), cuando no se cuenta con la información del fabricante. Se implementó un control de par basado en DOB utilizando los parámetros experimentales de control de par y momento de inercia. Dicho control se implementó en un motor DC que a su vez fungió como interfaz háptica, permitiéndole ejercer un par de referencia. Los resultados obtenidos de la identificación de los parámetros permitieron obtener una respuesta del DOB similar a las de un sensor de par.

Palabra(s) Clave: control de par, identificación de parámetros, interfaz háptica, motor DC.

Abstract

Haptic interfaces have had an impact on applications that seek user immersion, such as training, education, medicine and entertainment. The impact they have on this type of applications lies in the fact that haptic interfaces allow an interaction, between the user and a remote or virtual environment, through the sense of touch. This article proposes a method for the experimental identification of the constant torque and moment of inertia parameters of a DC motor. The identification of these parameters is essential for the design of a sensorless torque control based on a Disturbance Observer (DOB), when the manufacturer's information is not available. The implementation of a torque control based on DOB was achieved using the experimental parameters of torque control and moment of inertia. This control was implemented in a DC motor which served as a haptic interface, allowing to display a reference torque. The parameter identification results allowed to obtain a DOB response corresponding to a torque sensor.

Keywords: torque control, parameter identification, haptic interface, DC motor.

1. Introducción

La palabra háptica, en el presente artículo, se refiere a la tecnología relacionada a una o más sensaciones del tacto percibidas por medio de una interfaz. Particularmente, las interfaces hápticas despliegan información háptica (de tacto) por medio de un dispositivo. Las interfaces hápticas son utilizadas en aplicaciones de entrenamiento [Intani et al., 2013; Oboe & Pilastro, 2016], educación [Edwards et al., 2018; Murphy & Darrah, 2015], medicina [Mitsantisuk et al., 2012; Sariyildiz & Ohnishi, 2015] y entretenimiento [Choi et al., 2018; Tian & Zhang, 2015], en las que se retroalimenta al usuario con información cutánea o kinestésica. La retroalimentación cutánea está relacionada a la sensación táctil de la piel, por ejemplo, texturas, temperatura y vibración. Mientras que, la retroalimentación kinestésica está relacionada al movimiento, fuerza y posición. Las interfaces

hápticas kinestésicas pueden ser representadas por medio de uno o más actuadores con un control de par.

Un control de par se encarga de mantener un par de referencia en un actuador, por ejemplo, para sujetar un objeto con cierta fuerza. Para realizar un control de par es necesario contar con el modelo de la planta (interfaz háptica), el cual a su vez requerirá la identificación de ciertos parámetros. Asimismo, para cerrar el lazo de control, se suele medir la variable de control actual y retroalimentarla al algoritmo de control para estimar un error entre la variable de control de referencia y la actual. Posteriormente, el algoritmo de control determina por medio de una o varias ganancias la aproximación de dicho error a cero, lo que provoca la convergencia de la variable de control en la referencia.

En algunos casos, existen dificultades para la implementación de algoritmos de control por la falta de sensores adecuados para medir una determinada variable de control y cerrar el lazo. Tal es el caso cuando se requiere medir la corriente, aceleración, o par de un motor. En el caso particular de los sensores de par, suelen ser unidades costosas, frágiles, de difícil calibración y de bajo ancho de banda [Oboe & Pilastro, 2016; Ugurlu et al., 2012]. Debido a las dificultades para la fusión sensorial de los sensores de par, existen diversas investigaciones que buscan darle solución a dicho problema, utilizando sistemas de control de par sin sensor basados en el método conocido como Observador de Perturbaciones (DOB, por sus siglas en inglés) [Intani et al., 2013; Mitsantisuk et al., 2012; Oboe & Pilastro, 2016; Sariyildiz & Ohnishi, 2014, 2015b; Tian & Zhang, 2015; Ugurlu et al., 2012].

El DOB permite observar la perturbación de par (considerada como el par de salida de un motor), utilizando la constante de par de torsión y el momento de inercia del motor. Asimismo, la implementación del DOB, como sensor de fuerza, se puede realizar con los parámetros nominales (información del fabricante). Sin embargo, es común no contar con la información del fabricante al momento de diseñar un algoritmo de control. Se han realizado diferentes investigaciones relacionadas a la identificación de parámetros de motores DC en las cuales se implementaron métodos y algoritmos como redes neuronales artificiales [Rubaii & Kotaru, 2000], mínimos cuadrados ordinarios o recursivos [Arshad et al., 2010], estimación en

tiempo real [Obeidat et al., 2013], observador de modos deslizantes [Zhou et al., 2013], estimación dinámica [Beloiu, 2014], algoritmos genéticos [Jabri et al., 2009] y polinización de flores [Puangdownreong et al., 2017], por mencionar algunos. Cada una de esas investigaciones resuelve de forma distinta el problema de los parámetros desconocidos de un motor DC, ya sea mediante una técnica iterativa o basándose en cálculos directos. A diferencia de la mayoría de los estudios que se han presentado, se propone la identificación de parámetros por medio de experimentación, adquisición de datos a alta velocidad y cálculos directos. Algoritmos como redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos y observador de modos deslizantes, requieren de una estimación compleja. Es necesario que el diseño de sistemas de control de movimiento, como lo es el diseño de interfaces hápticas kinestésicas, cuente con alternativas para la identificación de dichos parámetros. Por lo que, en el presente artículo se propone la identificación experimental de los parámetros 1) constante de par y 2) momento de inercia de un motor de corriente directa (DC, por sus siglas en inglés) para el diseño de un control de par sin sensor. El control de par tiene el propósito de representar un par de torsión de referencia para aplicaciones de interacción háptica utilizando el mismo motor como interfaz.

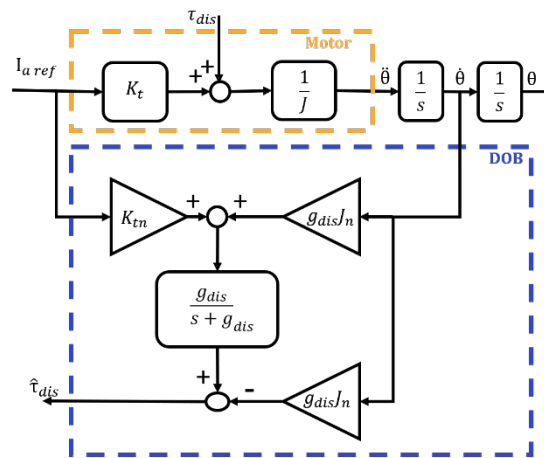
El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la sección 2, se describe el método DOB. En la sección 3, se describe el método para la identificación de los parámetros constante de torque y momento de inercia. En la sección 4, se presentan los experimentos y resultados obtenidos. En la sección 5, se valida la identificación de los parámetros con el diseño e implementación de un control de par. Finalmente, en la sección 6 se muestran las conclusiones y trabajo futuro.

2. Método

Descripción de un observador de perturbaciones

El DOB es un método desarrollado por el profesor Ohnishi en 1983 (Ohishi et al., 1983). En general, el método consiste en estimar un par de carga, invirtiendo el modelo de la planta (motor), para posteriormente utilizarlo en la compensación del

sistema de control, cancelando los efectos de cualquier perturbación externa. La implementación del observador permite diseñar un control de par de torsión sin sensor. En la figura 1, se muestran los bloques de la planta (Motor) y el DOB, donde $I_{a\text{ref}}$ es la corriente de armadura de referencia, K_t es la constante de par, τ_{dis} es el par de carga externa, J es la inercia del rotor, $\ddot{\theta}$ es la aceleración angular, $\dot{\theta}$ es la velocidad angular, θ es la posición angular, s es la variable en el dominio de Laplace, K_{tn} es la constante de par nominal, J_n es la inercia del rotor nominal, g_{dis} es la frecuencia de corte de un LPF y $\hat{\tau}_{\text{dis}}$ es el par de perturbación observado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Diagrama de bloques de un DOB con un motor DC como planta.

El modelo dinámico considerado para el motor DC corresponde a la ecuación 1.

$$J\ddot{\theta} = K_t I_a - \tau_i - \tau_e - \tau_f \quad (1)$$

Donde J es la inercia del rotor, $\ddot{\theta}$ es la aceleración angular, K_t es la constante de par, I_a es la corriente de armadura, τ_i es el par de interacción que incluye los términos de Coriolis y de gravitación, τ_e es el par de reacción del motor cuando está trabajando y τ_f es el par relacionado a la fricción viscosa y de Coulomb. Los términos negativos en el modelo son tomados como una perturbación, ya que disminuyen el par de torsión de salida ($J\ddot{\theta}$). Lo anterior, conlleva a un modelo simplificado como se muestra en la ecuación 2.

$$J\ddot{\theta} = K_t I_a - \tau_{\text{dis}} \quad (2)$$

Donde τ_{dis} es el par de perturbación. A la planta entra una corriente de armadura de referencia $I_{a\ ref}$ que, dependiendo de la constante de par K_t , provoca que el motor ejerza un par de torsión al cual se le suma un par de carga/perturbación externa τ_{dis} . El par de torsión que se genera puede ser percibido como una aceleración $\ddot{\theta}$ que vence el momento de inercia del rotor J . Asimismo, la velocidad $\dot{\theta}$ y la posición θ se obtienen a la salida de la planta.

El bloque del DOB se encarga de observar el par de perturbación $\hat{\tau}_{dis}$, ecuación 3, con la retroalimentación de la velocidad $\dot{\theta}$, los valores nominales de K_t y J , así como un filtro pasa bajas (LPF, por sus siglas en inglés) que determina el ancho de banda del observador (Ohnishi et al., 1996).

$$\hat{\tau}_{dis} = (K_{tn}I_{a\ ref} + g_{dis}J_n\dot{\theta}) \frac{g_{dis}}{s + g_{dis}} - g_{dis}J_n\dot{\theta} \quad (3)$$

Donde g_{dis} es la frecuencia de corte del filtro LPF y s es la variable en el dominio de Laplace. La forma básica del DOB, mostrada en la Figura 1, está diseñada con los parámetros nominales K_{tn} y J_n ya que la respuesta del DOB toma en cuenta las variaciones entre los parámetros nominales y reales. Sin embargo, se propone el diseño con los valores experimentales K_t y J_n , debido a que no siempre se cuenta con la información del fabricante.

Por otro lado, la frecuencia de corte g_{dis} del LPF determina el límite superior del ancho de banda del DOB rechazando cualquier perturbación fuera de ese límite. Por lo tanto, se propone que g_{dis} sea una frecuencia alta, siempre que no se vea afectada la estabilidad del sistema. Al ser implementado el DOB en un control de lazo cerrado, la respuesta del observador $\hat{\tau}_{dis}$ funge como sensor de par de la planta. El método también puede compensar tanto el par de carga como la amortiguación viscosa.

Identificación de los parámetros K_t y J

La constante de par K_t y la inercia del rotor J son parámetros de un motor DC que, al ser utilizados en un DOB, permiten estimar el par de torsión a la salida. El DOB, entonces, funge como un sensor de par/fuerza para cerrar un lazo de control. A continuación, se presenta un método para la identificación de ambos parámetros.

Identificación de K_t

La constante de par determina cuanto par de torsión puede producir el motor por ampere, y está dado en Nm/A. El método que se presenta se basa en la relación paramétrica dimensional entre las constantes de par K_t y de velocidad K_v .

La constante de velocidad K_v es el valor de velocidad angular, en radianes por segundo (rad/s), del motor por cada volt (V) aplicado en sus terminales, cuando no se tienen carga en la flecha. El valor experimental de K_v se obtiene a partir de una serie de pruebas en las cuales se relaciona la velocidad angular dado un voltaje aplicado. La relación no debería cambiar considerablemente entre experimentos ya que dicha relación es constante y está dada por la ecuación 4.

$$\dot{\theta} = K_v V \quad (4)$$

Donde $\dot{\theta}$ es la velocidad angular sin carga, K_v es la constante de velocidad y V es el voltaje. Una vez que se tiene la K_v es posible estimar K_t como la inversa de K_v como se muestra en la ecuación 5.

$$K_t = \frac{1}{K_v} \quad (5)$$

El método de identificación de velocidad debe ser el apropiado a la unidad de procesamiento con la que se esté trabajando. En el presente artículo, se utiliza el método N (Nandayapa et al., 2012), ya que se recomienda para aplicaciones de procesamiento a alta velocidad. El algoritmo de control se ejecuta a una velocidad de 1 MHz, lo cual se considera alta velocidad.

Identificación de J

El momento de inercia del motor J es la propiedad que le permite mantener su estado de reposo o movimiento, y está dado en Kgm^2 . Se propone identificar el momento de inercia J por su relación con la constante mecánica de tiempo, las constantes de par y velocidad, K_t y K_v , así como la resistencia de armadura R . Se propone que sea identificado por medio de la ecuación 6.

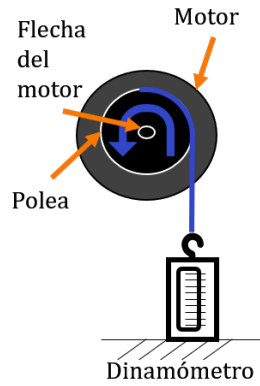
$$J = \frac{T_m K_t K_e}{R} \quad (6)$$

Donde T_m es la constante mecánica de tiempo, K_e es la inversa de la constante de velocidad K_v y R es la resistencia entre las terminales del motor. La constante mecánica de tiempo se estima aplicando el voltaje nominal del motor y midiendo el tiempo que le toma alcanzar el 63% de la velocidad máxima sin carga, partiendo de su estado estacionario. La constante K_e se obtiene como la inversa de la constante de velocidad, en V/rads. Se pueden tomar los valores de las constantes de par y velocidad calculadas en la etapa de identificación de K_t . Finalmente, se identifica el momento de inercia con la ecuación 6.

3. Resultados

Se presentan resultados experimentales de la identificación de los parámetros K_t y J . Se compararon diferentes motores para ser utilizados como interfaz háptica de los cuales se seleccionó el motor MAXON DC148867 ya que cuenta con una corriente nominal de 6 A lo que indica que puede trabajar de forma continua con una corriente de 6 A. Para la medición de la posición angular se acopló un codificador incremental YUMO E6B2-CWZ3E a la flecha del motor. Los algoritmos para identificar los parámetros se programaron en una plataforma DE0-Nano Altera Cyclone IV, el cual es un arreglo de compuertas programable de campo (FPGA, por sus siglas en inglés). El FPGA, a diferencia de otras plataformas que se consideraron para realizar la implementación, es una unidad con una capacidad de procesamiento de 50 MHz y puede ser utilizado en aplicaciones multi-reloj.

Se diseñó la interfaz háptica de un grado de libertad con el motor DC y una polea, como se muestra en la figura 2. La interfaz háptica se utilizó de forma alternativa con un dinamómetro para los experimentos de validación de los parámetros con el control de par sin sensor basado en DOB. El motor y el dinamómetro se montaron, cada uno, en una base que permitió mantenerlos fijos. Se unió una polea, de radio conocido, a la flecha del motor. Después, se sujetó la polea a la terminal de un dinamómetro como alternativa para la etapa de validación del método. Al girar la flecha del motor, el elemento de sujeción de la polea debe quedar en un ángulo recto con respecto al dinamómetro para la medición de par ejercido por un motor DC, como se muestra en la figura 2.



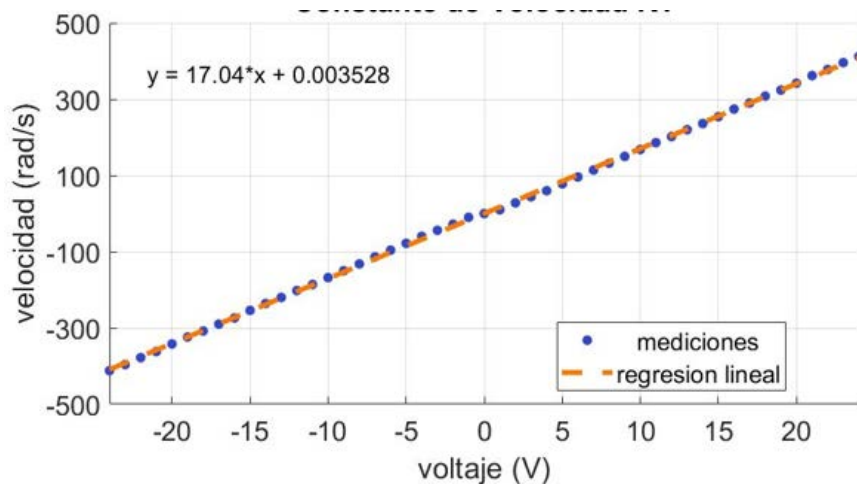
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Interfaz háptica y set experimental.

Identificación de K_t

Se realizó una serie de pruebas en las cuales se aplicaron voltajes de referencia de -24 a 24 V en pasos de 1 V. La velocidad angular del motor se estimó con el método N.

En la figura 3, se muestra el comportamiento de la velocidad angular del motor DC al ser energizado por un voltaje de referencia constante.



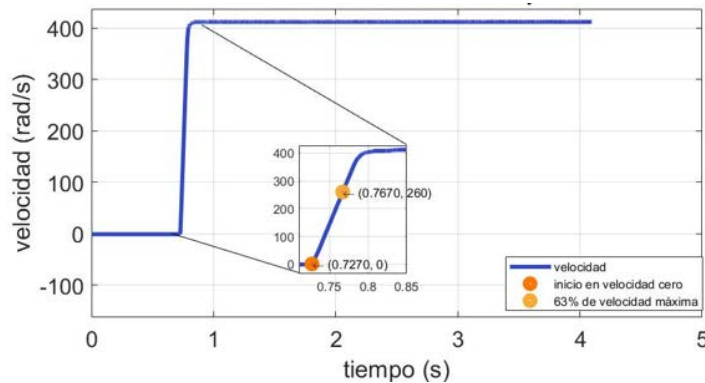
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3 Respuesta de velocidad angular del motor DC.

Como se puede apreciar, la respuesta de las mediciones fue lineal. Se utilizó regresión lineal para ajustar una curva los datos de las mediciones, donde la pendiente indica el valor de la constante de velocidad K_V . Como resultado de las pruebas se obtuvo una $K_V = 17.04 \text{ rads/V}$ y, por lo tanto, una $K_t = 0.058 \text{ Nm/A}$.

Identificación de J

Se identificaron los parámetros de constante mecánica de tiempo T_m y la inversa de la constante de velocidad K_e para utilizar la ecuación 6 en la identificación del parámetro momento de inercia J . En la figura 4 se muestra la respuesta de velocidad del motor al aplicarle un escalón de voltaje nominal.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 Respuesta de velocidad ante un escalón de voltaje nominal respecto al tiempo.

Como se puede observar, el voltaje se aplica en el tiempo 0.727 s después de iniciar el experimento y en el tiempo 0.767s el motor alcanza el 63% (260 rad/s) de la velocidad máxima (412 rad/s). Como resultado del experimento, se obtuvo una constante mecánica de tiempo T_m de 0.04 s. En la tabla 1 se muestran los parámetros utilizados para la identificación del momento de inercia J así como el resultado final dicha identificación. Se puede apreciar el resultado final de la identificación del parámetro momento de inercia $J= 0.00048 \text{ kg.m}^2$.

Tabla 1 Parámetros para la identificación del momento de inercia con la ecuación 6.

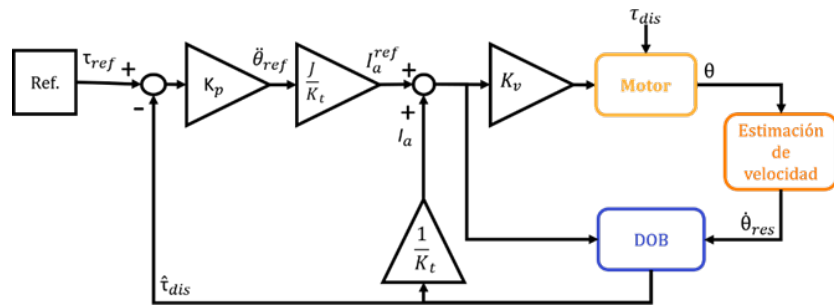
T_m	K_t	K_e	R	J
0.04 s	0.058 Nm/A	0.058 V/rads	0.299 Ω	0.00048 kg.m²

Fuente: Elaboración propia.

Validación de Identificación de Parámetros, con un Control de Par sin Sensor

Para la validación de la identificación de parámetros, se diseñó un control de par a lazo cerrado sin necesidad de implementar una unidad de sensado de fuerza o par. Por medio del DOB se observó un par de perturbación τ_{dis} que cumple dos

funciones 1) fungir como sensor de par y 2) compensar el sistema ante un par de carga externo en el cual se incluyen los efectos de fricción, gravitacionales y amortiguamiento que afectan el par de salida del motor. En el diagrama de la figura 5 se muestra el control de par basado en DOB, donde K_p y K_v son ganancias proporcionales. La función de sensor del DOB se utiliza restando la respuesta del DOB $\hat{\tau}_{dis}$ al par de referencia τ_{ref} de tal manera que el control disminuya el error.



Fuente: Elaboración propia.

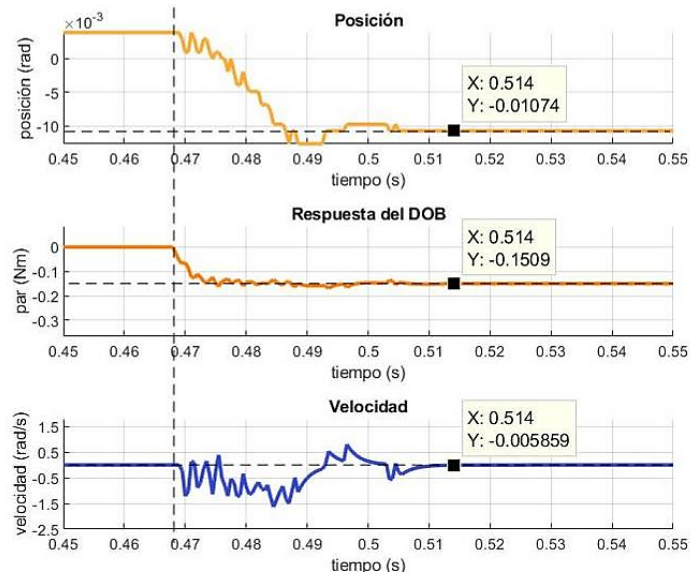
Figura 5 Diagrama de control de par basado en DOB.

Por otro lado, la compensación ante cargas externas se realiza al sumar la respuesta del observador $\hat{\tau}_{dis}$, dividido entre la constante de par K_t , con la corriente de armadura de referencia $I_{a\ ref}$. Las ganancias proporcionales K_p y K_v ajustan el control para que la respuesta del motor converja al par de referencia τ_{ref} . El término J/K_t representa el modelo de la planta en el diagrama de control. En la tabla 2 se muestran los valores de los parámetros utilizados para el diseño del diagrama de control de la figura 5. Posteriormente, se programó el algoritmo en la unidad de procesamiento. El algoritmo se ejecuta a 1 MHz, considerada una alta velocidad de procesamiento. Se probó el control de par monitoreando la respuesta del observador $\hat{\tau}_{dis}$ ante un escalón de par de referencia τ_{ref} . En figura 6 se muestran los resultados de posición, par y velocidad al aplicar un escalón de τ_{ref} de 0.15 N·m.

Tabla 2 Parámetros utilizados para el control de par basado en DOB.

τ_{ref}	K_p	K_t	J	g_{dis}	r	K_v
-0.15 Nm	1600	0.058 Nm/A	0.00048Kgm ²	500	0.011 m	1

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Respuesta del DOB en el control de par sin sensor ante escalón de $-0.15 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Los experimentos se realizaron iniciando con la flecha del motor en reposo, al enviar el par de referencia τ_{ref} se energizó el motor, y manteniendo su estado estacionario se observó la respuesta del motor. Las líneas punteadas horizontales muestran el valor al que convergió cada variable (ver puntas de prueba) y la línea punteada vertical muestra el momento del experimento en que se energizó el motor. Una vez que el motor regresa a su estado estacionario en $\dot{\theta} = 0 \text{ rad/s}$, se puede apreciar que el control converge a la referencia. Se mide la fuerza real ejercida por el motor en el momento que el motor se detiene por completo y la fuerza, mostrada por el dinamómetro, es estable y constante. A partir de la fuerza medida por el dinamómetro, se calcula el par de torsión ejercido por el motor tomando en cuenta que el radio de la polea es el brazo de palanca, como en la ecuación 7.

$$\tau = F r \quad (7)$$

Donde τ es el par de torsión, F es la fuerza medida por el dinamómetro y r es el brazo de palanca (radio de la polea). La medición de la fuerza se toma cuando el eje del motor se detiene por completo en $\dot{\theta}_{res} = 0$. Al medir el torque ejercido por el motor, en el experimento de la figura 6, se obtuvo como resultado un torque $\tau_{dis} = -0.154 \text{ Nm}$, lo cual indica que la respuesta del observador cumple la función de sensor de par en el algoritmo de control.

4. Discusión

Los resultados de la identificación de los parámetros constante de par y momento de inercia permitieron obtener una respuesta del DOB correspondiente a la respuesta real del motor DC. Se confirmó que la sensación generada corresponde a la ejercida por el motor, ya que la variable de control de par converge en la referencia en tiempo finito. La respuesta del DOB, y por lo tanto del control de par, brindan información háptica confiable. Múltiples aplicaciones han integrado háptica con el propósito de generar novedosas experiencias multisensoriales. Los usuarios, en la actualidad, buscan experiencias inmersivas en las que puedan interactuar con ambientes virtuales y remotos con naturalidad. Se han desarrollado diferentes interfaces hápticas que dan solución a dicha demanda. En el caso de interfaces kinestésicas, el usuario tiene la capacidad de sentir una fuerza de reacción al interactuar con un ambiente virtual o remoto. Dicha sensación es usualmente generada por medio de un actuador con un control de par, fuerza o posición. Por ejemplo, una interfaz háptica kinestésica de un grado de libertad puede representar las fuerzas de reacción al interactuar con una perilla, un volante, un pedal o unas tijeras. Por otro lado, el diseño de diferentes algoritmos de control suele requerir la retroalimentación de la variable de control por medio de un sensor. Sin embargo, en el caso de un control de par de torsión esto se convierte en un problema ya que las unidades de sensado de par son costosas, frágiles, difíciles de calibrar y de bajo ancho de banda. El DOB es una alternativa útil para mejorar la estabilidad y desempeño de un control de par/fuerza debido a que se obtienen mediciones confiables a comparación de sensores comerciales debido a que se puede incrementar el ancho de banda. El desarrollo de un control de par sin sensor reduce costos y la complejidad del dispositivo. Para el diseño de un control de par basado en DOB se requiere conocer el valor de los parámetros constante de par y momento de inercia de la planta.

En el presente artículo, se discutió un método para identificar los parámetros de constante de par y momento de inercia de forma experimental cuando se carece de la información de parámetros nominales. En comparación a los parámetros nominales, los parámetros experimentales representan fielmente el comportamiento

de la planta, en este caso del motor DC. Lo anterior, ocasiona que la respuesta del DOB, y por lo tanto el control de par, brinden información háptica confiable.

El método de identificación permitió obtener una respuesta de DOB correspondiente a la respuesta real del motor DC. El diseño del control de par basado en DOB se desarrolló sin necesidad de conocer los parámetros nominales del motor, ni utilizar un sensor de par o de fuerza. El método propuesto se validó con el diseño de un control de par basado en DOB. La validación fue exitosa, permitiendo desplegar información háptica, de tipo par, por medio de la flecha del motor que fungió como interfaz háptica. Así mismo, el motor DC logró desplegar información háptica por medio de su flecha al usuario, permitiéndole sentir una fuerza proporcional al par de referencia programado. Se confirmó que la sensación generada corresponde a la ejercida por el motor, ya que la variable de control de par converge en la referencia en tiempo finito. En conclusión, se logró identificar los parámetros experimentales de un motor DC para utilizarlo como interfaz háptica kinestésica al aplicarle un control de par sin sensor basado en DOB. Se observó que existen nichos de oportunidad para la mejora de los sistemas de control de interfaces hápticas kinestésicas. Tal es el caso del control de par sin sensor basado en DOB. En un futuro se tiene contemplado realizar pruebas con diferentes actuadores para generalizar la propuesta presentada en este artículo. Así mismo, trabajar en la caracterización del DOB como sensor de fuerza/par variando sus propiedades. Finalmente, realizar diferentes simulaciones que puedan ser representadas por una interfaz háptica kinestésica de un grado de libertad para mostrar experimentalmente las múltiples áreas de aplicación que tiene.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Arshad, S., Qamar, S., Jabbar, T., & Malik, A. (2010). Parameter estimation of a DC motor using ordinary least squares and recursive least squares algorithms. Proceedings of the 8th International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT'10. <https://doi.org/10.1145/1943628.1943659>.
- [2] Beloiu, R. (2014). Dynamic determination of DC motor parameters-Simulation and testing. Proceedings of the 2014 6th International Conference on

- Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2014, 13–18. <https://doi.org/10.1109/ECAI.2014.7090191>.
- [3] Choi, I., Ofek, E., Benko, H., Sinclair, M., & Holz, C. (2018). CLAW: a multifunctional handheld haptic controller for grasping, touching, and triggering in virtual reality. In 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) (pp. 1–13). <https://doi.org/10.1145/3173574.3174228>.
- [4] Edwards, B. I., Bielawski, K. S., Prada, R., & David, A. (2018). Haptic virtual reality and immersive learning for enhanced organic chemistry instruction. *Virtual Reality in Education*, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0345-4>.
- [5] Intani, P., Boonwong, P., & Mitsantisuk, C. (2013). Study on sensorless force control based on disturbance observer with friction force compensation. In 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS) (pp. 593–598). Kimdaejung Convention Center, Gwangju, Korea.
- [6] Jabri, M., Belgacem, A., & Jerbi, H. (2009). Moving horizon parameter estimation of series DC motor using genetic algorithm. 2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC 2009 - Proceedings, 1528–1531. <https://doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393668>.
- [7] Mitsantisuk, C., Nandayapa, M., Ohishi, K., & Katsura, S. (2012). Parameter estimation of flexible robot using multi-encoder based on disturbance observer. *Industrial Electronics Conference (IECON)*, (1), 4424–4429. <https://doi.org/10.1109/IECON.2012.6389473>.
- [8] Murphy, K., & Darrah, M. (2015). Haptics-based apps for middle school students with visual impairments. *IEEE Transactions on Haptics*, 8(3), 318–326. <https://doi.org/10.1109/TOH.2015.2401832>.
- [9] Nandayapa, M., Mitsantisuk, C., & Ohishi, K. (2012). Improving bilateral control feedback by using novel velocity and acceleration estimation methods in FPGA. In *International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)* (pp. 1–6). Sarajevo, Bosnia-Herzegovina: IEEE. <https://doi.org/10.1109/AMC.2012.6197024>.

- [10] Ohnishi, K., Shibata, M., & Murakami, T. (1996). Motion control for advanced mechatronics. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1(1), 56–67.
- [11] Obeidat, M. A., Wang, L. Y., & Lin, F. (2013). Real-time parameter estimation of PMDC motors using quantized sensors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(7), 2977–2986. <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2251431>.
- [12] Oboe, R., & Pilastro, D. (2016). Performance improvement of haptic device in bilateral control using aaKF and RFOB. *Industrial Electronics Conference (IECON)*, 6421–6428. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793855>.
- [13] Ohishi, K., Ohnishi, K., & Miyachi, K. (1983). Torque-speed regulation of DC motor based on load torque estimation method. 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON).
- [14] Puangdownreong, D., Hlungnamtip, S., Thammarat, C., & Nawikavatan, A. (2017). Application of flower pollination algorithm to parameter identification of DC motor model. 2017 International Electrical Engineering Congress, IEECON 2017, (March), 8–10. <https://doi.org/10.1109/IEECON.2017.8075889>.
- [15] Rubaai, A., & Kotaru, R. (2000). Online identification and control of a dc motor using learning adaptation of neural networks. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(3), 935–942. <https://doi.org/10.1109/28.845075>.
- [16] Sariyildiz, E., & Ohnishi, K. (2014). A comparison study for force sensor and reaction force observer based robust force control systems. In *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 1156–1161). Istanbul, Turkey: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864777>.
- [17] Sariyildiz, E., & Ohnishi, K. (2015a). An adaptive reaction force observer design. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2), 750–760. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2321014>.
- [18] Ugurlu, B., Nishimura, M., Hyodo, K., Kawanishi, M., & Narikiyo, T. (2012). A framework for sensorless torque estimation and control in wearable exoskeletons. 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), 1–7. <https://doi.org/10.1109/AMC.2012.6197032>.

- [19] Sariyildiz, E., & Ohnishi, K. (2015b). On the explicit robust force control via disturbance observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3), 1581–1589. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2361611>.
- [20] Tian, D., & Zhang, Y. (2015). Remote haptic sensing using sliding-mode assist disturbance observer as force detector. *IET Control Theory & Applications*, 9(10), 1517–1524. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2014.0435>
- [21] Zhou, Y., Soh, Y. C., & Shen, J. X. (2013). Speed estimation and nonmatched time-varying parameter identification for a DC motor with hybrid sliding-mode observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(12), 5539–5549. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2228140>.