

Comunicación distribuida activada por eventos para la sincronización de velocidad angular de motores BLDC en red

Hernández-Méndez, A.^a, Guerrero-Castellanos, J.F.^{b,*}, Orozco-Urbieto, T.^b, Linares-Flores, J.^a, Mino-Aguilar, G.^b, Curiel, G.^a

^aInstituto de Electrónica y Mecatrónica, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.

^bFacultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla, México.

To cite this article: Hernández-Méndez, A., Guerrero-Castellanos, J.F., Orozco-Urbieto, T., Linares-Flores, J., Mino-Aguilar, G., Curiel, G. 2021. Distributed event-triggered communication for angular speed synchronization of networked BLDC motors. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18, 360-370. <https://doi.org/10.4995/riai.2021.14989>

Resumen

Este trabajo presenta el diseño e implementación de un control colaborativo descentralizado para la sincronización de velocidad angular de un conjunto de motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) distribuidos espacialmente. Apoyándose de un control por rechazo activo de perturbaciones, actuando como un bucle interno, la dinámica del BLDC puede asimilarse a la de un integrador de primer orden y el cual será considerado un agente. Se propone entonces una estrategia de control colaborativo descentralizado con una comunicación activada por eventos, que resuelve el problema del consenso líder-seguidor del sistema multi-agente y, con ello, la sincronización de velocidades entre motores. La topología de comunicación entre agentes se modela usando un grafo conectado y no dirigido. La ley de control descentralizado incorpora una función de evento, que indica el instante en el que i -ésimo agente transmite la información de velocidad angular a su vecino. Se desarrolló una plataforma experimental compuesta por dos motores y un líder virtual, permitiendo validar la estrategia. Los resultados experimentales muestran un excelente desempeño del consenso de velocidad angular de ambos motores BLDC para tareas de regulación, mientras que el uso del ancho de banda es de solamente 1.25 % con respecto a una implementación de comunicación periódica.

Palabras clave: Rechazo a perturbaciones, control cooperativo, control basado en eventos, control de consenso, mecatrónica, teoría de control automático.

Distributed event-triggered communication for angular speed synchronization of networked BLDC motors

Abstract

This work presents the design and implementation of a collaborative and decentralized control for synchronizing the angular velocity of a group of spatially distributed brushless direct current (BLDC) motors. Via an Active Disturbance Rejection Control (ADRC), acting as an internal-loop, the dynamics of the BLDC can be assimilated to that of a first-order integrator, which is considered an agent. Then, a decentralized collaborative control strategy with event-triggered communication is proposed, which solves the problem of leader-follower consensus for the multi-agent system and thus speed synchronization. The communication topology between agents is modeled using an undirected and connected graph. The decentralized control law incorporates an event function, which indicates the instant at which the i -th agent transmits the angular velocity information to its neighbor. An experimental platform using two BLDC and a virtual leader was developed to validate the proposed approach. The experimental results show excellent performance for angular velocity consensus for regulation tasks, while the bandwidth usage is only 1.25 % regarding a periodic communication implementation.

Keywords: Disturbance rejection, cooperative control, event-based control, consensus, mechatronics, control theory.

*Autor para correspondencia: fermi.guerrero@correo.buap.mx, URL: <http://www.fguerrero.ece.buap.mx>

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

1. Introducción

1.1. Antecedentes y estado del arte

En los últimos años los Sistemas Ciber-Físicos (SCF) también llamados CPS (por sus siglas en inglés, Cyber Physical Systems) han atraído la atención de científicos e ingenieros en el área de control automático, comunicaciones y sistemas embebidos (Song et al., 2017). Los SCF representan una fusión de entidades computacionales y elementos físicos, los cuales por lo general están interconectados por redes de comunicación. Dicha fusión impone grandes desafíos, pero también genera innovaciones y avances tecnológicos en la Industria 4.0 y en el Internet de las cosas, IoT (por sus siglas en inglés, Internet of Things) (Lee et al., 2015). El objetivo de estos nuevos paradigmas es asegurar una monitorización y control en lazo cerrado y en tiempo real de una gran variedad de procesos, teniendo la consigna de ahorrar energía, tamaño y peso (Chaari et al., 2016). Por otra parte, los sistemas multi-*Agentes* (SMA) son un caso particular de los SCF y consisten de una red de sistemas dinámicos que interactúan y se comunican entre sí para alcanzar un objetivo de manera grupal y colaborativa, permitiendo desarrollar tareas que sería imposible llevar a cabo de manera individual (Olfati-Saber and Murray, 2004a; Ren and Beard, 2008). Ejemplos de SMA se encuentran en las redes de vehículos aéreos no tripulados (Guerrero-Castellanos et al., 2019), robots terrestres móviles (Bullo et al., 2009), entre otros. El control cooperativo distribuido o descentralizado para el control de los SMA han despertado un gran interés debido a que proveen una solución atractiva al control de sistemas a gran escala, disminuyendo la complejidad en la formulación del problema, así como la disminución de la carga computacional requerida para la implementación de los algoritmos en tiempo real (Ahmed et al., 2016). Entre los diferentes problemas de control cooperativo se encuentra el consenso o sincronización. De particular interés es el control de un grupo de *Agentes* teniendo a un líder y cuyo comportamiento es independiente de los demás *Agentes*. El problema en cuestión se le conoce como consenso líder-seguidor (Lewis et al., 2013).

Con el objetivo de optimizar el uso de los sistemas embebidos utilizados en las redes multiagentes, se han propuesto nuevas estrategias de control que permitan un aprovechamiento racional y coordinado de los recursos disponibles de la red. Bajo este enfoque, recientemente, ha incrementado la popularidad de las estrategias de control basado en eventos o disparado por eventos aplicadas a los sistemas en red, especialmente debido a su naturaleza aperiódica que permite que la señal de control o la transmisión de información sea actualizada de forma asíncrona. La idea central del control disparado por eventos se basa en la actualización del control únicamente cuando es necesario (existe un evento), en lugar de realizarse de forma periódica. El evento ocurre si se satisface una condición predefinida (llamada función de evento) y directamente relacionada con los estados del sistema (Marchand et al., 2013; Miskowicz, 2015; Xie et al., 2016). En el contexto del control cooperativo distribuido el esquema basado en eventos representa una alternativa para reducir el ancho de banda de la comunicación, el uso de recursos computacionales y de hardware en la red multiagente. Numerosos trabajos han estudiado y desarrollado algoritmos de control con el enfoque basado en eventos, orientados hacia el consenso, formación o sincronización de sistemas dinámicos lineales

y no lineales (Dimarogonas and Frazzoli, 2009; Seyboth et al., 2013; Guinaldo et al., 2013; Zhang and Zhang, 2014; Yang et al., 2014; Garcia et al., 2015; Zhou et al., 2017; Guerrero-Castellanos et al., 2019). Un excelente estudio bibliométrico sobre el control disparado o basado en eventos ha sido recientemente dado en (Aranda-Escolástico et al., 2020).

En la industria existe una creciente demanda de sistemas electro-mecánicos que funcionen de forma sincronizada para aplicaciones de alta complejidad; máquinas de manufactura de papel, líneas de ensamble, sistemas robóticos, entre otros (Zhao et al., 2009a). Además, se deben considerar las aplicaciones en donde se requieren actuadores que soporten cargas elevadas como máquinas tuneladoras (Sun et al., 2009), tracción de vehículos (Yu et al., 2014), por mencionar algunos. En estos casos, un solo motor no sería capaz de completar el objetivo. Adoptar un enfoque multi-motor presenta varias ventajas entre las que se destacan, alargar el tiempo de vida de los motores, reducir el estrés en los dispositivos electrónicos de potencia debido a altas corrientes y ser tolerante a fallas. Por esta razón, recientemente se ha recurrido a sistemas multi-motor de alto par de carga, los cuales requieren esquemas de control de sincronización de velocidad y distribución de par sofisticados (Tao et al., 2018). Se han reportado estrategias de sincronización para sistemas multi-motor, tales como, sincronización basada en control por acoplamiento adyacente (Zhao et al., 2009a), el método de sincronización de acoplamiento relativo (Shi et al., 2016), el esquema maestro-esclavo (Torres et al., 2016), estrategia de acoplamiento cruzado (Zhao et al., 2017), esquema sincronización por anillo de acoplamiento (Sun et al., 2009) y sincronización de eje virtual (Valenzuela and Lorenz, 2001). En estos casos el objetivo es hacer que el error de seguimiento y de sincronización converja a cero entre cualquier motor y/o motores adyacentes.

Dichas estrategias de sincronización se combinan con técnicas de control de velocidad generalmente aplicadas a motores, que van desde el uso de controladores PID (Neenu and Poongodi, 2009), pasando por redes neuronales y control difuso (Zhang et al., 2007), hasta esquemas de control no lineal basados en modos deslizantes y controles basados en el segundo método de Lyapunov (Zhao et al., 2009a,b), controladores por retroalimentación de salida que incluyen el uso de observadores asintóticos de estructura variable (Zhang et al., 2015), e incluso control óptimo (Guzey et al., 2018). Dichos esquemas han generado increíbles resultados desde una perspectiva teórica y práctica, sin embargo, todos ellos son estrategias de control centralizado y no consideran el caso donde los motores se encuentran distribuidos espacialmente o donde el lazo de control se cierra mediante una red de comunicación. Además, en algunos casos, la complejidad de la estrategia de control hace imposible su implementación en sistemas embebidos de capacidad computacional.

Es importante mencionar que en diversas aplicaciones, el tipo de acoplamiento mecánico, las variaciones de par de carga aplicadas a los ejes del motor e incluso bajo incertidumbres paramétricas, dificultan garantizar la robustez de la sincronización de velocidad angular en los motores eléctricos. En ese sentido el esquema de control por rechazo activo de perturbaciones ADRC (del sus siglas en inglés, Active Disturbance Rejection Control) introducido por (Han, 2009) se hace muy atractivo,

ya que se basa en la capacidad de estimar en línea, vía un observador de estado extendido (ESO), la parte de la dinámica desconocida del sistema a controlar, así como todos los efectos externos adversos, para posteriormente cancelarlos mediante una apropiada ley de control, (Hebertt Sira-Ramírez and Zurita-Bustamante, 2017). La metodología ADRC, conjuntamente con la propiedad de planitud diferencial (ver la excelente explicación de (Sira-Ramírez et al., 2015)) ha sido utilizada ampliamente en varias áreas tales como el diseño de filtros de potencia reportando en (Fuentes et al., 2015), convertidores DC en (Sira-Ramírez et al., 2016), generación eléctrica a base de fuentes energías renovables, (Hernandez-Méndez et al., 2017), incluso robótica de asistencia, (Guerrero-Castellanos et al., 2018).

1.2. Contribución

El presente trabajo se enfoca en el diseño de una estrategia de control para la sincronización de velocidad de motores ampliamente conocidos en la literatura como motores BLDC (por sus siglas en inglés, *Brushless Direct Current*) y los cuales se asumen están distribuidos espacialmente. El objetivo es que la velocidad angular de los *Agentes* (Motores BLDC) se sincronicen, de tal forma que sigan un régimen de velocidad de referencia establecido por un *Agente* virtual. En este sentido, las contribuciones científicas y técnicas son las siguientes:

- Se propone un esquema de control por rechazo activo de perturbaciones (ADRC) como lazo de control interno. Se trata de un esquema de control que se distingue por su estabilidad y capacidad de compensar adecuadamente una amplia gama de perturbaciones. Sin embargo, en este caso se incluyen términos de sincronización en la ley de control, los cuales corresponden a la información compartida con *Agentes* vecinos interconectados. Lo anterior permite que cada *Agente* también sea sensible a las variaciones de velocidad angular del *Agente* vecino. En otras palabras, cuando se aplica una perturbación a un *Agente*, de inmediato éste inicia una maniobra de compensación de velocidad angular, dicha variación es transmitida a los *Agentes* vecinos, con el objetivo de mantener un error de sincronización de velocidad angular cercano a cero.
- Se propone un enlace de comunicación en donde sólo es necesario comunicar la medición de velocidad angular entre *Agentes* vecinos. La topología de interconexión entre los *Agentes* de los canales de comunicación se establece fácilmente mediante un grafo. Esto permite establecer una red interconectada de motores en donde se pueden agregar o eliminar *Agentes*.
- Además de tener una limitada información fluyendo por los canales de comunicación, se implementa un algoritmo basado en eventos para optimizar aún más dicha interconexión entre *Agentes*. Lo anterior complementa una propuesta integral para el diseño y control de un sistema interconectado de motores, que abarca desde el grafo de interconexión, el esquema de control por rechazo activo de perturbaciones y la optimización del canal de comunicación entre *Agentes*.

2. Preliminares

2.1. Teoría de grafos

La interacción de un sistema *multiagente* puede ser representada mediante grafos. La teoría de grafos es un recurso que permite definir la topología de comunicación entre los *Agentes* y desde el punto de vista de control, permite establecer propiedades de estabilidad. Considere el grafo $\mathcal{G} = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}\}$ el cual consiste en un conjunto de vértices (o nodos) $\mathcal{V} = 1, \dots, N$ y enlaces \mathcal{E} . Si hay un enlace (i, j) entre los nodos i y j , entonces i y j se llaman adyacentes, es decir, $\mathcal{E} = (i, j) \in \mathcal{V} \times \mathcal{V} : i, j \text{ adyacentes}$. \mathcal{G} es llamado no dirigido o bidireccional si $(i, j) \in \mathcal{E} \Leftrightarrow (j, i) \in \mathcal{E}$, en caso contrario el término asignado es grafo dirigido. La matriz de adyacencia A esta definida por los pesos $a_{ij} > 0$ si i y j son adyacentes, y $a_{ij} = 0$ en caso contrario. Si los pesos no son relevantes $a_{ij} = 1$ si i y j son adyacentes. Un camino desde i hasta j es una secuencia de diferentes nodos, iniciando desde i y terminando con j , de modo que cada par de nodos consecutivos es adyacente. Si hay un camino de i a j , entonces i y j son llamados conectados. Si todos los pares de nodos en \mathcal{G} son conectados y \mathcal{G} es no dirigido, entonces se habla de un grafo fuertemente conectado. Para grafos bidireccionales, el término *fuertemente* se omite. La distancia $d(i, j)$ entre dos nodos es el número de enlaces de la ruta más corta desde i hasta j . El diámetro d_{max} de \mathcal{G} es la máxima distancia $d(i, j)$ sobre todos los pares de nodos. La matriz de grados D de \mathcal{G} es la matriz diagonal con elementos d_i igual a la cardinalidad del conjunto vecino del nodo i , $N_i = \{j \in \mathcal{V} : (i, j) \in \mathcal{E}\}$. La matriz Laplaciana \mathcal{L} de \mathcal{G} es definida como $\mathcal{L} = D - A$. Para grafos conectados, \mathcal{L} tiene exactamente un sólo valor propio igual a cero y dichos valores propios pueden ser listados en orden decreciente, $0 = \lambda_1(\mathcal{G}) < \lambda_2(\mathcal{G}) \leq \dots \leq \lambda_N(\mathcal{G})$. $\tilde{\mathcal{G}}$ representa el grafo que contiene al grafo \mathcal{G} y al líder (Olfati-Saber and Murray, 2004b).

2.2. Comunicación entre Agentes basada en eventos

Un grafo teniendo como nodos sistemas dinámicos es denotado por (\mathcal{G}, x) , siendo \mathcal{G} el grafo que contiene N nodos y $x = (x_1^T \cdots x_N^T)^T$ un vector de estado global, donde los estados de cada nodo evolucionan de acuerdo a la dinámica

$$\dot{x}_i = f(x_i, u_i) \quad (1)$$

donde $x_i \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ y $u_i \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}^p$. La transmisión de información entre *Agentes* basada en eventos relaciona dos funciones principales (Sánchez-Santana et al., 2018):

- Una función de evento: $e_i : \mathcal{X} \times \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}$ que indica si es necesario que el *Agente* i transmita ($e_i > 0$) o no ($e_i \leq 0$) su estado al *Agente* j , con $j \in N_i$. La función de evento toma como entrada el valor actual del estado del *Agente* i , x_i y una memoria m_i de x_i la última vez que e_i fue positivo.
- Control distribuido estático $u_i(m_i, m_j)$. El término estático significa aquí que los estados son medidos y no son estimados por algún otro sistema dinámico, por ejemplo un observador. Que el control dependa de las memorias de los estados x_i y x_j con $j \in N_i$, significa que el control del *Agente* i depende del estado transmitido por el

propio *Agente* la última vez que ocurrió un evento y el estado proveniente del *Agente* j , así como del estado actual del *Agente* i , i.e. x_i . El término distribuido se debe a que el control del *Agente* i solo depende del conjunto N_i el cual es un subconjunto del conjunto total de nodos, i.e. $N_i \subset \mathcal{V}$.

Definición 2.1. Consenso líder-seguidor: *El consenso líder seguidor de un sistema se lleva a cabo si, para cada uno de los Agentes $i \in \{1, \dots, N\}$, existe un control distribuido estático u_i de $\{x_j : j \in N_i\}$ tal que el sistema en lazo cerrado satisface*

$$\|x_i(t) - x_0(t)\| = 0, \quad i = 1, \dots, N$$

cuando $t \rightarrow \infty$ y para cualquier condición inicial $x_i(0)$, $i = 0, 1, \dots, N$. Donde $x_0 \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ representa el vector de estado del líder (Ren and Beard, 2008).

Definición 2.2. Consenso práctico líder-seguidor: *El consenso líder seguidor de un sistema se lleva a cabo si, para cada uno de los Agentes $i \in \{1, \dots, N\}$, existe un control distribuido estático u_i de $\{x_j : j \in N_i\}$ tal que el sistema en lazo cerrado satisface*

$$\|x_i(t) - x_0(t)\| \leq \Delta, \quad i = 1, \dots, N$$

cuando $t \rightarrow \infty$, con $\Delta \in \mathbb{R} > 0$ y para cualquier condición inicial $x_i(0)$, $i = 0, 1, \dots, N$. Donde $x_0 \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$ representa el vector de estado del líder.

3. Modelo del sistema y planitud diferencial

3.1. Modelo y descripción del sistema

El motor BLDC es ampliamente utilizado en la industria debido a su alta eficiencia eléctrica, alto torque en un espacio reducido y mínimo mantenimiento. Este tipo de motores trifásicos requieren una secuencia de conmutación en cada fase la cual está sincronizada con las señales de los sensores de efecto hall instalados en dicho actuador. Considerando el circuito eléctrico del motor el voltaje en cada fase es el siguiente (Xia, 2012):

$$V_x = R_x I_x + E_{\Psi_x} \quad (2)$$

donde x representa a las fases A, B y C, V_x es el voltaje de fase, I_x es la corriente de fase, E_{Ψ_x} es la fuerza electromotriz inducida (FEM) en cada fase y R_x es la resistencia en cada devanado.

A partir de (2) y suponiendo que las variaciones de la auto inductancia del estator con la posición del rotor y la inductancia mutua entre los devanados del estator son insignificantes; la dinámica eléctrica de un motor BLDC puede modelarse en un sistema balanceado eléctricamente como:

$$\begin{aligned} L_s \frac{dI_A}{dt} &= -R_s I_A - E_A + V_A \\ L_s \frac{dI_B}{dt} &= -R_s I_B - E_B + V_B \\ L_s \frac{dI_C}{dt} &= -R_s I_C - E_C + V_C \end{aligned} \quad (3)$$

donde L_s y R_s son la inductancia y la resistencia del estator, V_{A-C} y i_{A-C} es el voltaje y la corriente de fase y E_{A-C} es la fuerza electromotriz inducida. A su vez $E_{A-C} = K_e \omega$, donde K_e es

la constante eléctrica del motor y ω es su velocidad angular. Por otro lado, $L_s = L - M$, donde L es la inductancia de fase y M es la inductancia mutua. Si se considera a la dinámica de la inductancia como una perturbación singular, debido a que $L_s \rightarrow 0$ i.e. $L_s \frac{dI_{A,B,C}}{dt} \rightarrow 0$ entonces de (3) se tiene:

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{V_A - E_A}{R_s} \\ I_B &= \frac{V_B - E_B}{R_s} \\ I_C &= \frac{V_C - E_C}{R_s} \end{aligned} \quad (4)$$

Posteriormente, utilizando las leyes de movimiento de Newton se relaciona la velocidad angular del eje y el voltaje en cada fase del motor BLDC:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_L \quad (5)$$

donde T_e es el par electromagnético desarrollado por el motor, J es el momento de inercia, B es la constante de fricción de Coulomb y T_L es el par de carga aplicado al eje del motor. Al mismo tiempo, el par electromagnético es directamente proporcional a la suma de las corrientes de fase multiplicadas por su respectiva FEM, y se define como:

$$T_e = \frac{E_A I_A + E_B I_B + E_C I_C}{\omega} \quad (6)$$

Posteriormente, al sustituir (4) y (6) en (5), se obtiene el modelo del motor BLDC en términos de la velocidad angular:

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{K_{EA}^2}{R_s} + \frac{K_{EB}^2}{R_s} + \frac{K_{EC}^2}{R_s} + B \right) \omega + T_L &= \\ \left(\frac{K_{EA}}{R_s} V_A + \frac{K_{EB}}{R_s} V_B + \frac{K_{EC}}{R_s} V_C \right) & \end{aligned} \quad (7)$$

3.2. Diseño de un lazo de control interno con rechazo activo de perturbaciones

Se define $\omega = F$ y $\gamma = \frac{K_{EA}^2}{R_s} + \frac{K_{EB}^2}{R_s} + \frac{K_{EC}^2}{R_s} + B$. De esta forma el modelo dinámico del motor BLDC dado en (7) se puede escribir como:

$$\dot{F} = \frac{K_E}{JR} U - \underbrace{\frac{\gamma}{J} F - \frac{1}{J} T_L}_{:=\xi} \quad (8)$$

donde $U = V_A + V_B + V_C$ es la entrada de control y ξ es el término de perturbaciones desconocidas que contiene tanto perturbaciones endógenas y exógenas (par de carga aplicado). Con el objetivo de estimar en línea la perturbación total ξ y resolver el problema de control, se propone el diseño de un observador de estado extendido.

Para esto, definimos \hat{F} y η_1 como la velocidad estimada y la estimación del término ξ , respectivamente. El observador de tercer orden propuesto está dado por:

$$\Sigma_{ESO} := \begin{cases} \dot{\hat{F}} = \frac{k_E}{JR} U + \eta_1 + l_2(F - \hat{F}) \\ \dot{\eta}_1 = \eta_2 + l_1(F - \hat{F}) \\ \dot{\eta}_2 = l_0(F - \hat{F}) \end{cases} \quad (9)$$

Donde las ganancias l_0, l_1, l_2 son seleccionadas por medio de un polinomio Hurwitz de tercer orden. De acuerdo con (Sira-Ramírez et al., 2015; Guerrero-Castellanos et al., 2018) la elección apropiada de estas ganancias hacen que después de un

tiempo suficientemente grande, $\eta_1 \rightarrow \xi$. La ley de control con rechazo activo de perturbación puede ser diseñada de la forma:

$$U = \frac{JR}{K_E}(\bar{u} - \eta_1) \quad (10)$$

donde \bar{u} es una nueva señal de control a ser diseñada en la siguiente sección para la sincronización de la velocidad de múltiples motores. De esta forma, la dinámica del motor BLDC en lazo cerrado mediante el control (10) es transformado en la dinámica de un integrador de primer orden:

$$\dot{F} \approx \bar{u} \quad (11)$$

4. Control distribuido de un conjunto de BLDC

En esta sección se presenta una técnica de control para la sincronización de velocidad angular de múltiples motores BLDC bajo un esquema de consenso líder-seguidor. En este sentido, cada motor BLDC conjuntamente con el observador dado en (9) y el control interno dado por (10) será considerado un agente y el conjunto de todos ellos conforma un sistema multi-agente. La Figura 1 muestra los elementos que conforman a cada agente. El módulo de control disparado por eventos se presenta en esta sección.

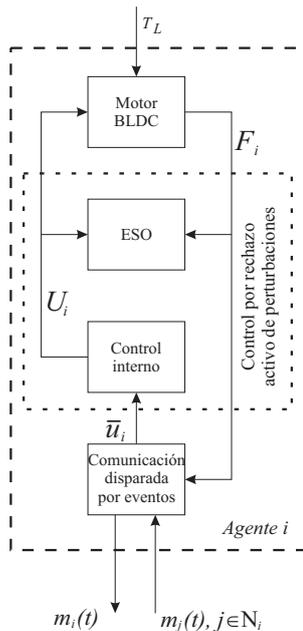


Figura 1: Esquema de control general en cada Agente.

Los agentes distribuidos espacialmente y unidos mediante una red de comunicación, compartirán información solamente con los agentes vecinos. La topología de la red de comunicación es representada por un grafo no dirigido y conectado, *i.e.*, existe un camino entre cada uno de los agentes del grafo. El agente o nodo líder genera las señales de referencia deseadas y es representado mediante un sistema autónomo y no es afectado por ningún agente de la red. Además, se asume que al menos existe un agente en la red que puede tener acceso a la referencia dictada por el agente líder. En el esquema de control propuesto, una función de evento determinará el instante en el que el i -ésimo agente debe transmitir su velocidad al j -ésimo agente con $j \in N_i$ (agentes vecinos).

4.1. Control y comunicación basada en eventos

De acuerdo con lo visto en el epígrafe 3.2, la dinámica de cada Agente está dada por

$$\dot{F}_i = \bar{u}_i \quad (12)$$

donde \bar{u}_i representa el protocolo de consenso entre los Agentes y que será presentado en los siguientes párrafos.

El líder se considera como un sistema exógeno con dinámica de la forma

$$\dot{F}^* = \bar{a}F^* \quad (13)$$

Estamos listos para presentar nuestro resultado principal.

Teorema 4.1. *Considere un grupo de N -motores BLDC representados por (12), los cuales interactúan bajo el grafo conectado y no dirigido \mathcal{G} . Si existe comunicación entre el motor BLDC i y el líder representado por (13), entonces existe una constante $g_i > 0$ y el grafo aumentado que contiene al líder se denota $\tilde{\mathcal{G}}$. Entonces la función de control distribuido está definida por*

$$\bar{u}_i = \left[k_{ij} \sum_{j=1}^{N_i} (m_j - m_i) + g_i(F^* - m_i) \right] \quad (14)$$

donde la función de evento está dada por:

$$e_i(F_i, m_i) = |\bar{e}_i| - \delta \quad (15)$$

con $\bar{e}_i = m_i - F_i$, siendo $\delta \in \mathbb{R}_+$ el umbral de activación de la función de evento con $i \in \mathcal{V}$. Entonces, después de un tiempo suficientemente grande, las velocidades F_i de cada uno de los motores, tienden de forma exponencial a una vecindad del valor de la velocidad de referencia F^* dictada por el líder, esto es

$$\|\varepsilon(t)\| \leq \frac{\sqrt{N}\delta \|H\|}{\lambda_M}$$

cuando $t \rightarrow \infty$ y para cualquier condición inicial $\varepsilon(0)$, donde $\varepsilon = (\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_N)^T$ y $\varepsilon_i = F_i - F^*$. λ_M es el valor propio de H de menor magnitud, siendo donde $H = \mathcal{L} + G$, con $G = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_N)$.

Antes de realizar la demostración de nuestro resultado principal, discutamos la idea detrás de ello. Cuando la función de evento (15) se cumple, *i.e.*, $e_i > 0$, el estado del Agente i (F_i) es guardado como una memoria m_i y es a su vez transmitido a los Agentes vecinos con los que tiene comunicación de acuerdo a la topología de comunicación dictada por el grafo $\tilde{\mathcal{G}}$. El control u_i (definido en (14)) es calculado con los datos actualizados. En caso contrario, el estado F_i no se transmite, las memorias no se actualizan y el control es calculado con las memorias guardadas la última vez que ocurrió el evento. Note que el valor del control u_i es utilizado de forma continua en el control por rechazo activo de perturbación (ver Figura 1).

Observación 4.1. *La matriz $H = \mathcal{L} + G$ corresponde al grafo $\tilde{\mathcal{G}}$ y tiene las siguientes propiedades (ver Lewis et al. (2013)):*

- H contiene valores propios positivos los cuales pueden ser listados en orden decreciente, $\lambda_M = \lambda_1(H) < \lambda_2(H) \leq \dots \leq \lambda_N(H) = \lambda_{max}$.
- H es definida positiva

Demostración. Definamos el error entre la memoria del estado y el valor del estado actual por $\bar{e}_i = m_i - F_i$ y el error del estado con respecto a la referencia F^* como $\varepsilon_i = F_i - F^*$. Entonces, el control puede escribirse en términos de dichas diferencias

$$\bar{u}_i = \left[k_{ij} \sum_{j=1}^{N_i} (\varepsilon_j - \varepsilon_i) + g_i \varepsilon_i + k_{ij} \sum_{j=1}^N (\bar{e}_j - \bar{e}_i) - g_i \bar{e}_i \right]$$

Usando los vectores globales $\varepsilon = (\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \dots \ \varepsilon_N)^T$ y $\bar{e} = (\bar{e}_1 \ \bar{e}_2 \ \dots \ \bar{e}_N)^T$ y $G = \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_N)$ la dinámica del error ε del sistema multi-agente en lazo cerrado es:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -\mathcal{L}\bar{e} - \mathcal{L}\varepsilon - G\bar{e} - G\varepsilon = -(\mathcal{L} + G)\varepsilon - (\mathcal{L} + G)\bar{e} \\ &= -H\varepsilon - H\bar{e} \end{aligned}$$

mediante la formula de variación de parámetros, la solución de la ecuación anterior está dada por

$$\varepsilon(t) = e^{-Ht} \varepsilon(0) - \int_0^t e^{-H(t-\tau)} H \bar{e}(\tau) d\tau \quad (16)$$

A partir de la Observación 4.1, la matriz $-H$ es una matriz Hurwitz, por lo que la magnitud del error está acotado mediante:

$$\|\varepsilon(t)\| \leq e^{-\lambda_M t} \|\varepsilon(0)\| + \int_0^t e^{-\lambda_M(t-\tau)} \|H\bar{e}(\tau)\| d\tau$$

note que $\|H\bar{e}\| \leq \|H\| \|\bar{e}\|$, puesto que la condición de evento forzaría a

$$\|\bar{e}\| = \sqrt{\delta^2 + \delta^2 + \dots + \delta^2} = \delta \sqrt{N}$$

sustituyendo

$$\begin{aligned} \|\varepsilon(t)\| &\leq e^{-\lambda_M t} \|\varepsilon(0)\| + \int_0^t e^{-\lambda_M(t-\tau)} \delta \sqrt{N} \|H\| d\tau \\ &= e^{-\lambda_M t} \|\varepsilon(0)\| + e^{-\lambda_M t} \|H\| \delta \sqrt{N} \int_0^t e^{\lambda_M \tau} d\tau \\ &= e^{-\lambda_M t} \|\varepsilon(0)\| \\ &\quad + e^{-\lambda_M t} \|H\| \delta \sqrt{N} \left(\frac{e^{\lambda_M t}}{\lambda_M} - \frac{1}{\lambda_M} \right) \end{aligned}$$

Por lo tanto, para un tiempo suficientemente grande, *i.e.*, cuando $t \rightarrow \infty$ se tiene

$$\|\varepsilon(t)\| \leq \frac{\sqrt{N} \delta \|H\|}{\lambda_M} \quad (17)$$

□

Observación 4.2. De acuerdo con el Teorema 4.1, se garantiza que las trayectorias de $\varepsilon(t)$ para $t \rightarrow \infty$ que empiezan fuera de la esfera $\mathcal{B}(\rho)$, con centro en el origen del espacio de estados del error y de radio $\rho = \frac{\sqrt{N} \delta \|H\|}{\lambda_M}$, convergen exponencialmente a su interior y todas las trayectorias que inician dentro de dicha esfera, nunca la abandonan.

4.2. Exclusión del efecto Zeno

Con el objetivo de verificar que con la ley de control propuesta, el efecto Zeno (frecuencia infinita en el disparo de eventos) es excluido, considere la dinámica de la variable $\bar{e}_i = m_i - F_i$ justo después que un evento ocurrió en el instante t^* , esto es, $\dot{\bar{e}}_i = \dot{m}_i - \dot{F}_i$. Puesto que m_i permanece constante entre dos eventos, entonces $\dot{\bar{e}}_i = -\dot{F}_i = -u_i$. Utilizando la notación vectorial tenemos:

$$\dot{\bar{e}} = -(-H\bar{e} - H\varepsilon) = H\bar{e} + H\varepsilon \quad (18)$$

La solución de la anterior ecuación diferencial está dada por:

$$\bar{e}(t) = e^{Ht} \bar{e}(t^*) + \int_{t^*}^t e^{H(t-\tau)} H \varepsilon(\tau) d\tau \quad (19)$$

De la Observación 4.1, la norma de la trayectoria de $\bar{e}(t)$ puede acotarse superiormente por:

$$\|\bar{e}(t)\| \leq e^{\lambda_{max} t} \|\bar{e}(t^*)\| + \int_{t^*}^t e^{\lambda_{max}(t-\tau)} \gamma_T d\tau \quad (20)$$

con $\gamma_T = \|H\| \sup_{t^* \leq \tau \leq t} \|\varepsilon(\tau)\|$.

Un razonamiento similar puede ser hecho al separar al vector global $\bar{e}(t)$ en cada componente $\bar{e}_i(t)$ y tomando en cuenta que justo después de que un evento ocurre $\bar{e}_i(t^*) = 0$, se tiene

$$|\bar{e}_i(t)| \leq \int_{t^*}^t e^{\lambda_{max}(t-\tau)} \gamma_T d\tau = \frac{\gamma_T}{\lambda_{max}} (e^{\lambda_{max}(t-t^*)} - 1) \quad (21)$$

De acuerdo con la función de evento, el próximo evento será disparado en el instante t , tan pronto $|\bar{e}_i(t)| = |m_i - F_i| \geq \delta$. De (21) se tiene entonces

$$\frac{\gamma_T}{\lambda_{max}} (e^{\lambda_{max}(t-t^*)} - 1) \geq \delta \quad (22)$$

esto lleva a la siguiente relación

$$(t - t^*) \geq \frac{1}{\lambda_{max}} \ln \left(\delta \frac{\lambda_{max}}{\gamma_T} + 1 \right) \quad (23)$$

Por lo tanto, el intervalo de tiempo que transcurre entre dos eventos consecutivos y para cada uno de los agentes, está acotado inferiormente por una constante positiva, lo que indica que el efecto Zeno es excluido en el comportamiento del sistema en lazo cerrado.

5. Resultados experimentales

5.1. Descripción de la plataforma experimental

El análisis de desempeño de los controladores por rechazo activo de perturbaciones y el algoritmo basado en eventos programados en cada *Agente*, se realiza con pruebas de seguimiento de una trayectoria suave, sincronización de velocidad y cambios súbitos de carga. Para esto se implementa la plataforma experimental mostrada en la Figura 2. Los algoritmos de control son programados en el DSP TMS320F28335. Las salidas PWM se conectan al correspondiente Inversor trifásico. Dichos inversores suministran la potencia controlada a su respectivo motor BLDC. Las señales de los sensores de efecto Hall y del encoder de cada motor son realimentadas a su respectiva tarjeta DSP. Además, se instaló un módulo de comunicación serial con

el cual se capturan los datos de interés en una computadora para su análisis y para visualizar y reportar los resultados.

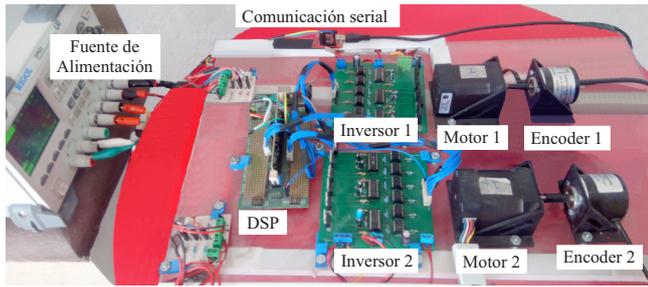


Figura 2: Plataforma experimental

Los motores BLDC modelo DT4260 utilizados en la plataforma experimental, tienen los siguientes parámetros nominales: potencia nominal 12 W, voltaje nominal 24 V, par nominal 0.38 N.m/A, número de polos 8, $R = 0,8 \Omega$, $L = 1,2 mH$, $kt = ke = 0,4249$, $J = 0,0048 Kg m^2$. Los dispositivos de conmutación son del modelo IGBT GF14NC60KD y en cada motor se utiliza un encoder óptico modelo LPD3806-400BM de 400 pulsos por revolución. El grafo que representa la topología de comunicación se muestra en la Figura 3. Además, la conexión entre Agentes y las conexiones eléctricas se muestra de forma simplificada en la Figura 4. Con esta plataforma experimental se realizan las diferentes pruebas de desempeño con el esquema de control propuesto.

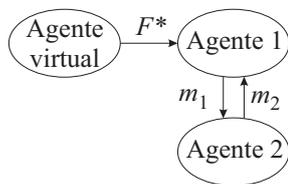


Figura 3: Esquema de interconexión de la plataforma experimental

5.2. Implementación de la estrategia de control

Considerando las leyes de control (10) y (14)-(15), así como el esquema de interconexión mostrado en la Figura 3, la estrategia de control distribuido que se propone para cada elemento de la red interconectada de motores BLDC es el siguiente:

- Control por rechazo de perturbaciones (Lazo-interno)

$$U_i = \frac{J_i R_i}{K_{E,i}} (\bar{u}_i - \eta_{1,i}) \tag{24}$$

El observador de estado extendido correspondiente es el siguiente:

$$\begin{aligned} \hat{F}_i &= \frac{k_{E,i}}{J_i R_i} U_i + \eta_{1,i} + l_{2,i} (F_i - \hat{F}_i) \\ \dot{\eta}_{1,i} &= \eta_{2,i} + l_{1,i} (F_i - \hat{F}_i) \\ \dot{\eta}_{2,i} &= l_{0,i} (F_i - \hat{F}_i) \end{aligned} \tag{25}$$

En donde las ganancias son constantes positivas y se obtienen a partir de igualar la dinámica del error de observación con un polinomio Hurtwitz (Sira-Ramírez et al., 2015), dando el siguiente resultado: $l_{0,i} = 81$, $l_{1,i} = 108$, $l_{2,i} = 54$.

- Control distribuido con comunicación disparada por eventos (Lazo-externo)

$$\bar{u}_i = \left[k_{ij} \sum_{j=1}^{N_i} (m_j - m_i) + g_i (F^* - m_i) \right] \tag{26}$$

donde la función de evento esta dada por:

$$e_i (F_i, m_i) = |\bar{e}_i| - \delta \tag{27}$$

con $\bar{e}_i = m_i - F_i$, siendo $\delta \in \mathbb{R}_+$ el umbral de activación de la función de evento con $i \in \{1, 2\}$.

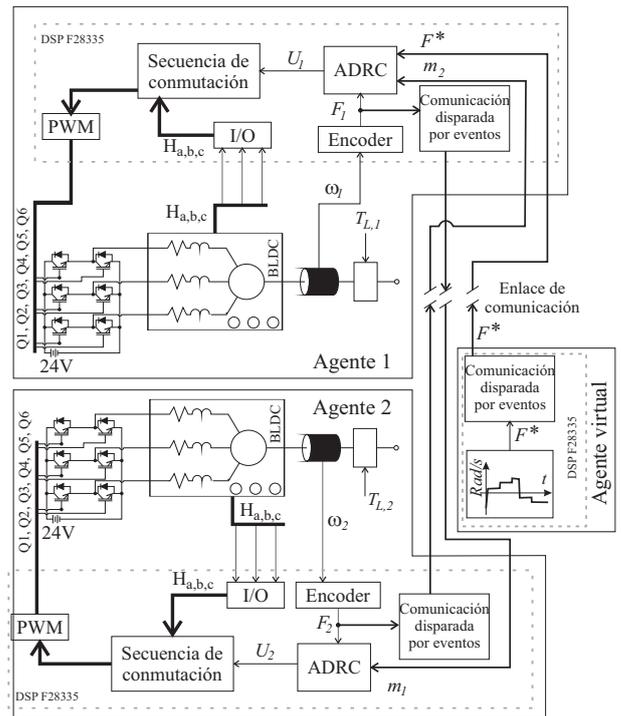


Figura 4: Esquema general de conexiones del sistema descentralizado.

Las ganancias k_{ij} y g_i del controlador distribuido, se obtienen asegurando que la matriz $-H$ sea una matriz Hurtwitz, lo cual se asegura asignando valores positivos a las ganancias antes comentadas. Con el objetivo de obtener un comportamiento aceptable en términos de velocidad de convergencia, la sintonización se realizó durante los experimentos de forma heurística. En este caso, las ganancias del controlador son las siguientes: $k_{11} = 42,42$, $k_{21} = 900$, $g_1 = 40$ y $g_2 = 0$. Además, se establece el umbral de activación de la función de evento en $\delta = 1$. Este controlador se aplica a cada Agente del sistema interconectado que se muestra en la Figura 4. En el Agente virtual se establece la señal de referencia F^* . La cual es transmitida al Agente 1 utilizando el módulo Comunicación disparada por eventos (CDE) para optimizar el canal de comunicaciones. A su vez, el Agente 1 transmite (cuando sucede un evento) la medición de su velocidad angular al Agente 2, utilizando su propio módulo CDE. De la misma forma, el Agente 2 envía (cuando sucede un evento) la medición de su velocidad angular al Agente 1. Note que este esquema puede ser extendido fácilmente a un mayor número de agentes.

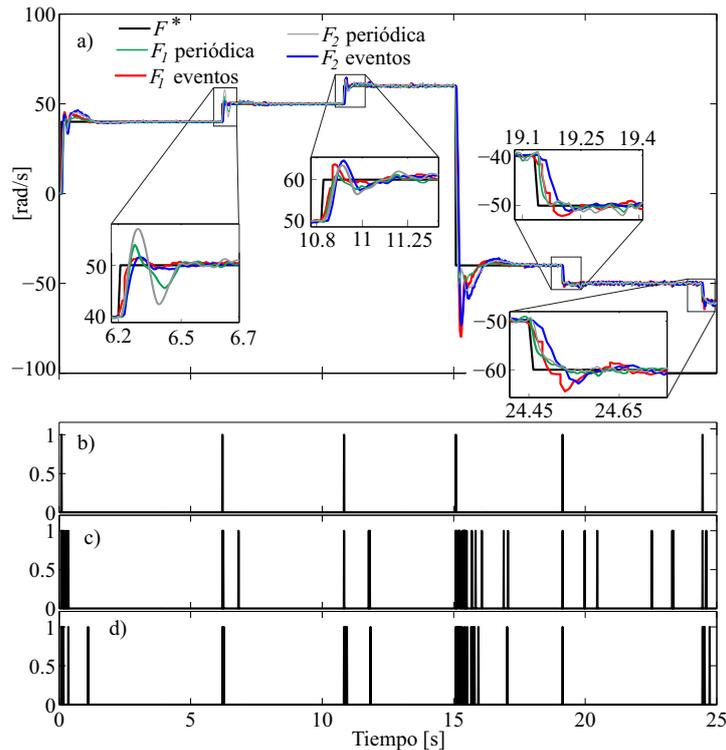


Figura 5: Comparativa entre a) Respuesta de velocidad angular ante cambios de referencia, y gráficas de eventos del enlace de comunicación de la velocidad angular medida en el: b) *Agente virtual*, c) *Agente 1*, d) *Agente 2*.

La prueba inicial, consiste en que el sistema interconectado debe seguir una trayectoria de referencia de velocidad angular establecida por el *Agente virtual*. Ante este primer escenario de prueba, la respuesta de velocidad angular y las gráficas de eventos del enlace de comunicación se muestran para su comparación en la Figura 5. En la Figura 5 a) se observa la respuesta de velocidad angular de los *Agentes 1* y *2* ante los cambios en la referencia de velocidad angular impuesta por el *Agente virtual*. En este caso, se observa la maniobra de sincronización en cada cambio en la referencia de velocidad angular. Al inicio, cuando la velocidad angular de referencia cambia de 0 a 40 rad/s el tiempo de estabilización es de 1,1 s. Cuando la velocidad angular de referencia cambia de 60 a -40 rad/s el sistema se estabiliza en 2,1 s. En las variaciones de $\pm 10 \text{ rad/s}$ el tiempo de estabilización es de 150 a 300 ms. Como se observa en las ampliaciones de las señales, en ambos motores se mantiene sincronizada la velocidad, presentando un desfase máximo en los cambios de velocidad angular de 0,05 s. En la Figura 5 a), también se muestra la respuesta de velocidad angular del esquema de control sin utilizar el módulo de *Comunicación disparada por eventos* (F_1 periódica y F_2 periódica). Se observa un desempeño similar en ambos casos (comunicación disparada por eventos y comunicación periódica), sin embargo las mayores diferencias son en los cambios de valor de referencia de velocidad angular. En la Figura 5 a), se observa que en el primer cambio de referencia (de 40 a 50 rad/s) existe un pico transitorio de amplitud mayor en el caso de la comunicación periódica, en el resto de los cambios de referencia se observa un desempeño igual o ligeramente mejor que en las señales obtenidas utilizando comunicación disparada por eventos. En promedio el desempeño es muy parecido, lo cual se demuestra en el análisis

del error (ISE) mostrado más adelante. En estas pruebas se optimiza el enlace de comunicación entre los *Agentes* utilizando el módulo de comunicación disparada por eventos. La Figura 5.b), c) y d) muestra los eventos en donde el canal de comunicación es utilizado. En la Figura 5.b) se observa que el canal de comunicación del *Agente virtual* es utilizado sólo en seis ocasiones para enviar la misma cantidad de referencias de velocidad angular (F^*). Al comparar el uso del canal optimizado con el caso de envío continuo de información (2500 muestras en un intervalo de 25 s a un periodo de muestreo de 0,01 s), significa que se utiliza el 0,24 % del ancho de banda del canal de comunicación. Del mismo modo en el canal de comunicación del *Agente 1* (señal m_1 de la Figura 5.c)) y del *Agente 2* (señal m_2 de la Figura 5.d)), se utiliza 1,28 % y 1,20 % del ancho de banda respectivamente.

La respuesta de la entrada de control U_1 y U_2 que se aplica a los *Agentes 1* y *2*, se muestra en la Figura 6. En ella se observa un ligero nivel de voltaje adicional de compensación (1,5 V aproximadamente) al *Agente 1* con respecto al *Agente 2*.

En la Figura 7, se muestra la respuesta del índice de desempeño dado por la integral del error cuadrático (*Integral Squared Error*, ISE por sus siglas en inglés). En ésta gráfica se compara la velocidad angular de referencia F^* con la velocidad angular medida del *Agente 1* (línea oscura) y la velocidad angular entre el *Agente 1* y el *Agente 2* (línea roja). El análisis de esta señales indica que el nivel ISE se mantiene con variaciones mínimas en los cambios de velocidad angular. Las variaciones mayores se presentan al inicio (arranque de los dos motores) y al cambiar abruptamente el sentido de giro. Este parámetro de desempeño es comparado con el obtenido aplicando la misma

prueba al sistema, pero sin el módulo de comunicación disparada por eventos. En el caso de la comunicación periódica se observa una ligera mejora en el ISE del 1% (en $F^* - F_1$) y 0,9% (en $F_1 - F_2$) aproximadamente.

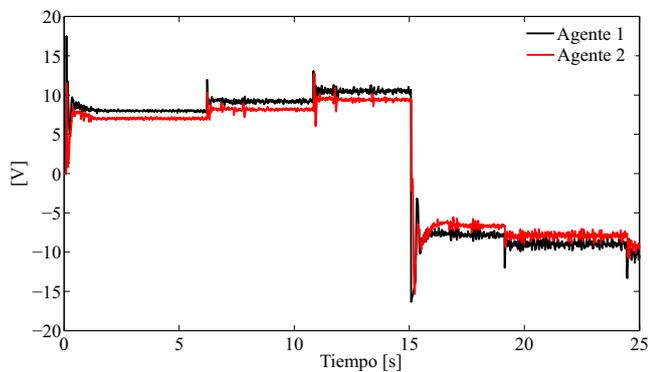


Figura 6: Respuesta de las señales de control en cada motor BLDC.

observa que las variaciones de velocidad angular son similares en ambos motores, lo cual demuestra que además de la compensación de las perturbaciones aplicadas, también se mantiene una maniobra de sincronización de velocidad entre ellos.

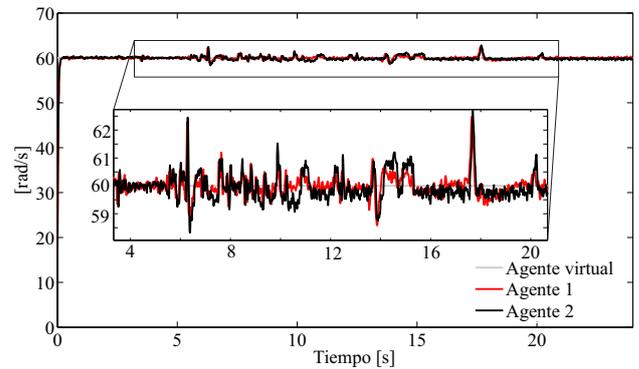


Figura 9: Respuesta de velocidad angular ante perturbaciones de par arbitrarias

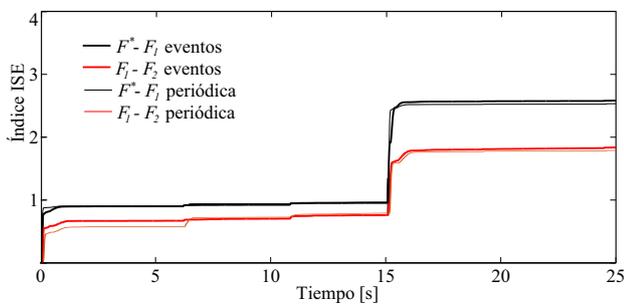


Figura 7: Índice de error: caso de comunicación disparada por eventos y comunicación periódica.

En la Figura 8 se observa que el error de seguimiento con respecto al valor de referencia, es mayor al inicio cuando F^* cambia de 0 a 40 rad/s , y en $t = 15$ cuando se exige un cambio de dirección de 60 a -40 rad/s .

La Figura 10 muestra las señales de la entrada de control para los Agentes 1 y 2.

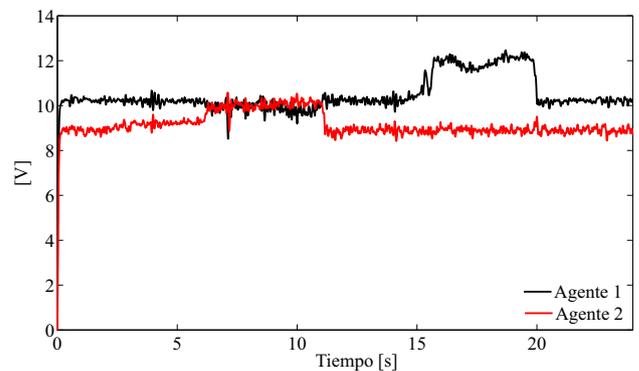


Figura 10: Entrada de control

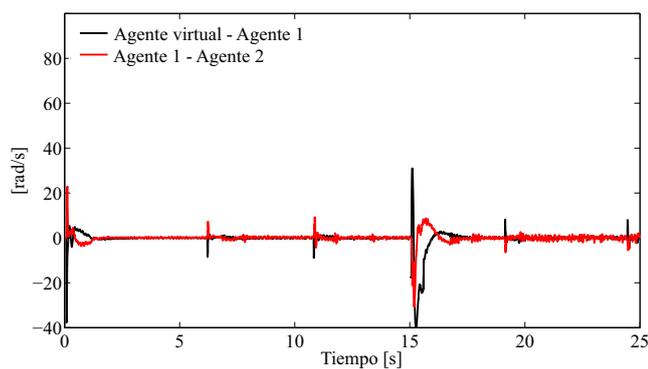


Figura 8: Error de velocidad angular

Finalmente, se realiza una prueba aplicando un par arbitrario al Agente 1 y 2 de forma alternada (aplicado al eje de los motores BLDC). En la Figura 9 se muestra la respuesta de velocidad angular del sistema interconectado. Al igual que en la prueba anterior, el Agente virtual establece la referencia de velocidad angular (en este caso una velocidad constante de 60 rad/s) y el resto de los Agentes la siguen. En el acercamiento se

La estimación de par en cada Agente se muestra en la Figura 11. El par aplicado es de 0.4 Nm en el Agente 1 y de 0.7 Nm al Agente 2 aproximadamente.

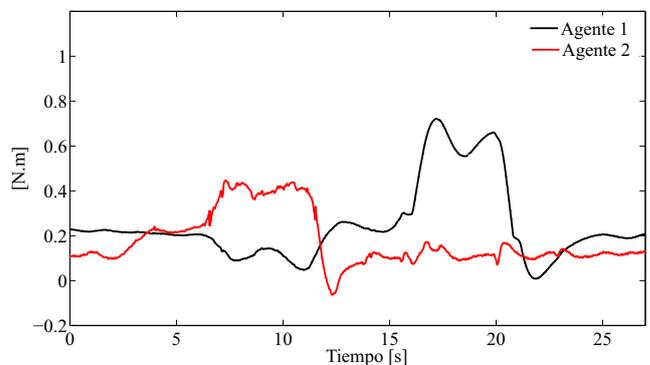


Figura 11: Estimación del par aplicado en el eje de cada motor

El índice de desempeño dado por la integral del error cuadrático (ISE) se muestra en la Figura 12. Esto indica que se tiene un nivel bajo de error (menos de 0.4 en un intervalo de tiempo de 25 s).

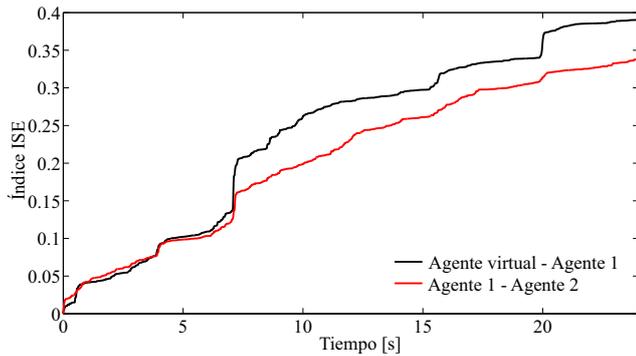


Figura 12: Índice de error

El error del *Agente 1* con respecto al *Agente virtual* y el que corresponde al *Agente 1* con respecto al *Agente 2* es de ± 2 rad/s aproximadamente y se muestra en la Figura 13.

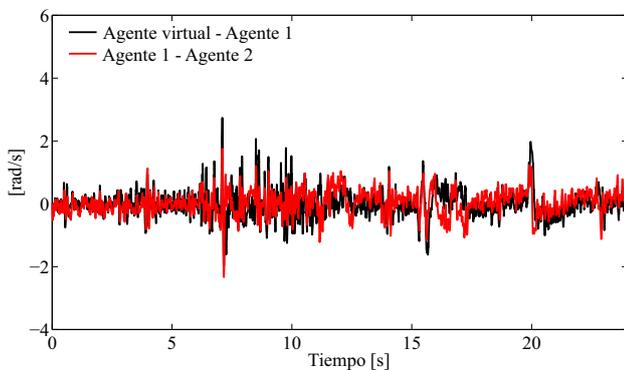
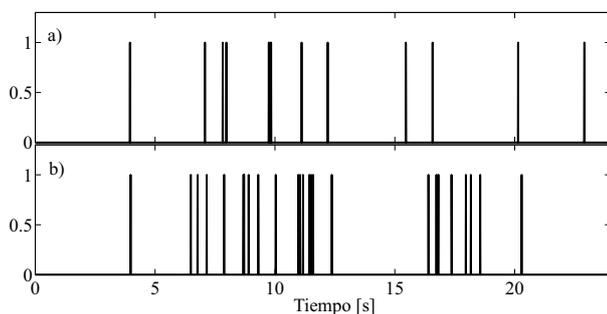


Figura 13: Error de velocidad angular

En la Figura 14 se observa el uso intermitente del enlace de comunicación entre los *Agentes 2* y *3* debido al módulo de comunicación disparada por eventos. Considerando que en el caso continuo de comunicación, se tienen 2700 muestras en un intervalo de 27s con un periodo de muestreo de 0,01s, el canal de comunicación de los *Agentes 1* y *2* utilizan el 0,59% y 1,07% del ancho de banda respectivamente (ver Figura 14.a) y 14.b)).

Figura 14: Gráficas de eventos del enlace de comunicación de la velocidad angular medida en el: a) *Agente 1*, b) *Agente 2*

6. Conclusiones

En este trabajo, un algoritmo de control colaborativo distribuido es aplicado a un problema de sincronización de velocidad angular entre varios *Agentes* interconectados (en este caso motores BLDC). Se verificó mediante resultados a partir de

pruebas experimentales el desempeño del controlador. Se muestra que con un control distribuido es posible reducir el tráfico de información en una red de comunicación, sin degradar el desempeño del sistema en lazo cerrado. El sistema interconectado que se presenta coincide con la idea de una red de motores inteligentes, los cuales incluso pueden ser de diferentes características, con limitadas señales de interconexión entre *Agentes*, pero realizando tareas de seguimiento de velocidad angular sincronizada y compensación de perturbaciones, todo lo anterior manteniendo un enlace de comunicación optimizado.

Referencias

- Ahmed, N., Cortes, J., Martinez, S., 2016. Distributed control and estimation of robotic vehicle networks: Overview of the special issue-part II. *IEEE Control Systems* 36 (4), 18–21.
DOI: 10.1109/MCS.2016.2558398
- Aranda-Escolástico, E., Guinaldo, M., Heradio, R., Chacon, J., Vargas, H., Sánchez, J., Dormido, S., 2020. Event-based control: A bibliometric analysis of twenty years of research. *IEEE Access* 8, 47188–47208.
DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978174
- Bullo, F., Cortés, J., Martínez, S., 2009. *Distributed Control of Robotic Networks: A Mathematical Approach to Motion Coordination Algorithms*. Princeton University Press.
- Chaari, R., Ellouze, F., Koubaa, A., Qureshi, B., Pereira, N., Youssef, H., Tovar, E., 2016. Cyber-physical systems clouds: A survey. *Computer Networks* 108, 260–278.
DOI: 10.1016/j.comnet.2016.08.017
- Dimarogonas, D. V., Frazzoli, E., 2009. Distributed event-triggered control strategies for multi-agent systems. In: *Communication, Control and Computing, 2009. Allerton 2009. 47th Annual Allerton Conference on*. IEEE, pp. 906–910.
DOI: 10.1109/ALLERTON.2009.5394897
- Fuentes, G. A. R., Cortés-Romero, J. A., Zou, Z., Costa-Castelló, R., Zhou, K., 2015. Power active filter control based on a resonant disturbance observer. *IET Power Electronics* 8 (4), 554–564.
DOI: 10.1049/iet-pe.1.2014.0032
- García, E., Cao, Y., Wang, X., Casbeer, D. W., July 2015. Decentralized event-triggered consensus of linear multi-agent systems under directed graphs. In: *2015 American Control Conference (ACC)*. pp. 5764–5769.
DOI: 10.1109/ACC.2015.7172242
- Guerrero-Castellanos, J., Rifai, H., Arnez-Paniagua, V., Linares-Flores, J., Saynes-Torres, L., Mohammed, S., 2018. Robust active disturbance rejection control via control lyapunov functions: Application to actuated-ankle-foot-orthosis. *Control Engineering Practice* 80, 49–60.
DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.08.008
- Guerrero-Castellanos, J., Vega-Alonzo, A., Durand, S., Marchand, N., Gonzalez-Diaz, V., Castañeda-Camacho, J., Guerrero-Sánchez, W., 2019. Leader-following consensus and formation control of vtol-uavs with event-triggered communications. *Sensors* 19 (24), 1–26.
DOI: 10.3390/s19245498
- Guinaldo, M., Dimarogonas, D. V., Johansson, K. H., Sánchez, J., Dormido, S., 2013. Distributed event-based control strategies for interconnected linear systems. *Control Theory & Applications, IET* 7 (6), 877–886.
DOI: 10.1049/iet-cta.2012.0525
- Guzey, H. M., Dumlu, A., Guzey, N., Alpay, A., April 2018. Optimal synchronizing speed control of multiple dc motors. In: *2018 4th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*. pp. 1–5.
DOI: 10.1109/ICOA.2018.8370508
- Han, J., 2009. From pid to active disturbance rejection control. *Transactions on Industry Electronics* 56 (3), 900–906.
DOI: 10.1109/TIE.2008.2011621
- Hebertt Sira-Ramírez, Alberto Luviano-Juárez, M. R.-N., Zurita-Bustamante, E.-W., 2017. *Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems*. Butterworth-Heinemann.
- Hernández-Méndez, A., Linares-Flores, J., Sira-Ramírez, H., Guerrero-Castellanos, J., Mino-Aguilar, G., 2017. A backstepping approach to decentralized active disturbance rejection control of interacting boost converters. *Transactions on Industry Applications* 53 (4), 4063–4072.
DOI: 10.1109/TIA.2017.2683441

- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.-A., 2015. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* 3, 18–23.
DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
- Lewis, F. L., Zhang, H., Hengster-Movric, K., Das, A., 2013. Cooperative control of multi-agent systems: optimal and adaptive design approaches. Springer Science & Business Media.
- Marchand, N., Durand, S., Guerrero-Castellanos, J. F., 2013. A general formula for event-based stabilization of nonlinear systems. *Automatic Control, IEEE Transactions on* 58 (5), 1332–1337.
DOI: 10.1109/TAC.2012.2225493
- Miskowicz, M., 2015. Event-Based Control and Signal Processing. CRC Press.
- Neenu, T., Poongodi, P., 07 2009. Position control of dc motor using genetic algorithm based pid controller. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science* 2177.
- Olfati-Saber, R., Murray, R. M., 2004a. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *Automatic Control, IEEE Transactions on* 49 (9), 1520–1533.
DOI: 10.1109/TAC.2004.834113
- Olfati-Saber, R., Murray, R. M., Sep. 2004b. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control* 49 (9), 1520–1533.
DOI: 10.1109/TAC.2004.834113
- Ren, W., Beard, R. W., 2008. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control. Springer.
- Sánchez-Santana, J., Guerrero-Castellanos, J., Villarreal-Cervantes, M., Ramírez-Martínez, S., 2018. Control distribuido y disparado por eventos para la formación de robots móviles tipo (3, 0)*. In: Congreso Nacional de Control Automático.
- Seyboth, G. S., Dimarogonas, D. V., Johansson, K. H., 2013. Event-based broadcasting for multi-agent average consensus. *Automatica* 49 (1), 245–252.
DOI: 10.1016/j.automatica.2012.08.042
- Shi, T., Liu, H., Geng, Q., Xia, C., 2016. Improved relative coupling control structure for multi-motor speed synchronous driving system. *IET Electric Power Applications* 10 (6), 451–457.
DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0515
- Sira-Ramírez, H., Hernández-Méndez, A., Linares-Flores, J., Luviano-Juarez, A., 2016. Robust flat filtering dsp based control of the boost converter. *Control Theory and Technology* 14 (3), 224–236.
DOI: 10.1007/s11768-016-6025-6
- Sira-Ramírez, H., Linares-Flores, J., Luviano-Juárez, A., Cortés-Romero, J., 2015. Ultramodelos globales y el control por rechazo activo de perturbaciones en sistemas no lineales diferencialmente planos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial {RIAI}* 12 (2), 133–144.
DOI: 10.1016/j.riai.2015.02.001
- Song, H., Rawat, D. B., Jeschke, S., Brecher, C., 2017. Front matter. In: *Cyber-Physical Systems. Intelligent Data-Centric Systems*. Academic Press, Boston, pp. i–ii.
- Sun, J., Liu, R., Luo, Y., Sun, W., 2009. Research on multi-motor synchronization control for cutter head of shield machine based on the ring coupled control strategy. In: Xie, M., Xiong, Y., Xiong, C., Liu, H., Hu, Z. (Eds.), *Intelligent Robotics and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 345–354.
DOI: 10.1007/978-3-642-10817-434
- Tao, L., Chen, Q., Nan, Y., Dong, F., Jin, Y., 09 2018. Speed tracking and synchronization of a multimotor system based on fuzzy adrc and enhanced adjacent coupling scheme. *Complexity* 2018, 1–16.
DOI: 10.1155/2018/5632939
- Torres, F. J., Guerrero, G. V., García, C. D., Gomez, J. F., Adam, M., Escobar, R. F., Sep. 2016. Master-slave synchronization of robot manipulators driven by induction motors. *IEEE Latin America Transactions* 14 (9), 3986–3991.
DOI: 10.1109/TLA.2016.7785923
- Valenzuela, A., Lorenz, R., 02 2001. Electronic line-shafting control for paper machine drives. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 37, 158–164.
DOI: 10.1109/28.903141
- Xia, C. L., 2012. Permanent magnet brushless DC motor drives and controls. John Wiley & Sons.
- Xie, D., Xu, S., Zhang, B., Li, Y., Chu, Y., 2016. Consensus for multi-agent systems with distributed adaptive control and an event-triggered communication strategy. *IET Control Theory Applications* 10 (13), 1547–1555.
DOI: 10.1049/iet-cta.2015.1221
- Yang, D., Ren, W., Liu, X., Dec 2014. Decentralized consensus for linear multi-agent systems under general directed graphs based on event-triggered/self-triggered strategy. In: *53rd IEEE Conference on Decision and Control*. pp. 1983–1988.
DOI: 10.1109/CDC.2014.7039689
- Yu, H., Xi, J.-Q., Zhang, F., Hu, Y.-h., 02 2014. Research on gear shifting process without disengaging clutch for a parallel hybrid electric vehicle equipped with amt. *Mathematical Problems in Engineering* 2014, 1–12.
DOI: 10.1155/2014/985652
- Zhang, C., Wu, H., He, J., Xu, C., 2015. Consensus tracking for multi-motor system via observer based variable structure approach. *Journal of the Franklin Institute* 352 (8), 3366–3377, special Issue on Advances in Nonlinear Dynamics and Control.
DOI: 10.1016/j.jfranklin.2015.01.035
- Zhang, C.-H., Shi, Q.-S., Cheng, J., 01 2007. Design of fuzzy neural network controller for synchronization drive in multi-motor systems 22, 30–34.
- Zhang, X., Zhang, J., 2014. Distributed event-triggered control of multiagent systems with general linear dynamics. *Journal of Control Science and Engineering* 2014, 7.
DOI: 10.1155/2014/698546
- Zhao, D., Li, C., Ren, J., 12 2009a. Speed synchronization of multiple induction motors with adjacent cross coupling control. pp. 6805–6810.
DOI: 10.1049/iet-cta.2008.0238
- Zhao, D.-Z., wen LI, C., REN, J., 2009b. Speed synchronization of multiple induction motors with total sliding mode control. *Systems Engineering - Theory & Practice* 29 (10), 110–117.
DOI: https://doi.org/10.1016/S1874-8651(10)60077-4
- Zhao, G., Zhuang, B., Zheng, G., Zhao, Y., 09 2017. Cross-coupling control method for five-axis computer numerical control machine with dual rotary tables. *Advances in Mechanical Engineering* 9.
DOI: 10.1177/1687814017733689
- Zhou, F., Huang, Z., Yang, Y., Wang, J., Li, L., Peng, J., 2017. Decentralized event-triggered cooperative control for multi-agent systems with uncertain dynamics using local estimators. *Neurocomputing* 237, 388–396.
DOI: 10.1016/j.neucom.2017.01.029