



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA,
OPCIÓN INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

Tesis para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**“CONTROL COLABORATIVO DISTRIBUIDO Y
DISPARADO POR EVENTOS PARA LA SINCRONIZACIÓN
DE VELOCIDAD Y PAR DE MOTORES BLDC”**

Presenta:

Ing. Leonardo García Moreno*

Asesores de tesis:

Dr. José Fermi Guerrero Castellanos

Dr. Arturo Hernández Méndez

Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández

Agradecimientos

En primera instancia al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), la beca otorgada permitió realizar los estudios de Maestría en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE) por haberme permitido formarme en ella.

A los miembros del jurado y planta docente Dr. Gerardo Mino Aguilar, M.C. Nicolás Quiroz Hernández, Dr. Rodrigo Lucio Maya Ramírez, M.C. Ana María Rodríguez Domínguez.

En especial a mis asesores Dr. José Fermi Guerrero Castellanos, Dr. Arturo Hernández Méndez y Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados.

Finalmente a mi familia, por el apoyo diario.

Índice general

Resumen	V
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes y estado del arte	1
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	8
2. Fundamentos	9
2.1. Motores BLDC	9
2.1.1. Construcción de un motor BLDC	10
2.1.2. Fuerza contra-electromotriz	11
2.1.3. Principio de operación	11
2.2. Control de motor BLDC con sensores Hall	14
2.2.1. Inversor trifásico	14
2.2.2. Secuencia de conmutación	14
2.2.3. Lógica de conmutación con cambio de giro	16
2.2.4. Modulación por ancho de pulso (PWM)	17
2.3. Codificador incremental	17
2.3.1. Principio de funcionamiento	17
2.3.2. Identificación de la dirección	18
2.4. Transmisión por banda	18
3. Modelo del sistema	20
3.1. Modelo del motor BLDC y planitud diferencial	20
3.2. Modelo matemático de un codificador incremental	22
3.3. Modelo de la transmisión por banda	23
4. Desarrollo de la estrategia de control	25
4.1. Control por rechazo activo de perturbaciones	25
4.1.1. Estimador	25
4.1.2. Ley de control	26
4.2. Control colaborativo distribuido y disparado por eventos	26
4.2.1. Sincronización de velocidad angular	26
4.2.2. Sincronización de velocidad angular y repartición de par	27

5. Resultados experimentales	29
5.1. Control de motor BLDC con sensores Hall	31
5.2. Control ADRC	34
5.3. Control ADRC con transmisión por banda	37
5.4. Control ADRC de dos motores	39
5.5. Control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores . .	41
5.6. Control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores	45
6. Conclusiones	49
Bibliografía	54
A. Simulaciones	56
A.1. Control de motor BLDC con sensores Hall	56
A.2. Control ADRC	58
A.3. Control ADRC con transmisión por banda	60
A.4. Control ADRC de múltiples motores	61
A.5. Control ADRC con sincronización de velocidad angular de múltiples mo- tores	63
A.6. Control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de múltiples motores	65
A.6.1. Caso 1	65
A.6.2. Caso 2	67
B. Implementación de sistema	70
B.1. Sistema de tracción eléctrico multi-motor	70
B.2. Sistema de control distribuido	72
B.3. Diseño de circuito para agente seguidor	73
B.4. Inversor trifásico MP6540HGU-A	74
B.5. Diseño de circuito para agente líder	75

Resumen

Este trabajo presenta el diseño, simulación e implementación de un sistema de tracción eléctrico que tiene aplicación cuando un solo motor no puede cumplir el objetivo y es entonces cuando se requiere adoptar un enfoque multi-motor. Para ello se propone un sistema de control colaborativo descentralizado para la sincronización de velocidad angular y repartición de par de motores BLDC que cuyos ejes están acoplados a un eje principal mediante un sistema de bandas. El algoritmo de control se diseña a partir de la técnica de control por rechazo activo de perturbaciones, el cual permite estimar y cancelar en línea incertidumbres del modelo y perturbaciones externas. Esta propuesta de control resuelve el problema de consenso líder-seguidor del sistema multi-agente. Para el intercambio de información entre los agentes se propone una comunicación activada por eventos, la cual indica el instante en el que el i -ésimo agente transmite la información de su velocidad angular y su estimación de par al agente vecino. Esta función de eventos reduce significativamente el ancho de banda de la comunicación.

Organización del documento

Capítulo 1: Introducción. El capítulo da una introducción a la técnica de control por rechazo activo de perturbaciones, control colaborativo, comunicación basada en eventos y sus aplicaciones en sistemas de tracción de vehículos eléctricos y finaliza con el planteamiento de los objetivos de este trabajo.

Capítulo 2: Fundamentos. Este apartado explica el principio de operación los de motores BLDC. Se continua con principio de funcionamiento de los encoders incrementales. Finalmente se presenta el sistema de transmisión por banda/correa y el modelo que representa dicha configuración.

Capítulo 3: Modelo matemático del sistema. En esta sección se presentan los modelos matemáticos de los principales elementos que componen el sistema de tracción eléctrico.

Capítulo 4: Desarrollo de la estrategia de control. El capítulo define la estrategia de control por rechazo activo de perturbaciones para la regulación de velocidad angular en cada motor. Se continua agregando a esta ley de control los términos de sincronización de velocidad y repartición de par. Finalmente se describe el algoritmo de comunicación disparada por eventos.

Capítulo 5: Resultados experimentales. En este apartado se describe detalladamente las pruebas de control implementadas y se discuten los resultados.

Capítulo 6: Conclusiones. En esta sección se recopila las conclusiones generales, contribuciones del trabajo de tesis y propuestas de trabajo futuro.

Apéndice A: Simulaciones. Este apéndice presenta la simulación de modelos de los sistemas físicos y sistemas de control que corresponden a cada uno de los casos que se presentaron en el capítulo 5.

Apéndice B: Plataforma experimental. En este apartado se describe de forma detallada la implementación de la plataforma experimental en la cual se aplicaron las estrategias de control presentadas en este documento.

Índice de figuras

1.1. Esquema de control por ADRC.	3
1.2. Consumo de energía de uso final por sectores [2].	5
1.3. Venta anual de vehículos de pasajeros al 2040 en porcentaje compartido entre vehículos eléctricos y vehículos con motor de combustión interna. [1]	5
1.4. Venta de vehículos y la participación de modelos híbridos/eléctricos en total de ventas (%) en México [10].	6
2.1. FEM trapezoidal.	11
2.2. FEM sinusoidal.	11
2.3. Campo magnético generado en un motor BLDC [r18].	12
2.4. Seis combinaciones de conmutación [r18].	12
2.5. Campo magnético generado en un motor BLDC [14].	13
2.6. Campo magnético generado en un motor BLDC [14].	13
2.7. Inversor trifásico.	14
2.8. Pasos 1 y 2 de la secuencia de conmutación de un motor BLDC [8].	15
2.9. Pasos 3 y 4 de la secuencia de conmutación de un motor BLDC [8].	15
2.10. Pasos 5 y 6 de la secuencia de conmutación de un motor BLDC [8].	15
2.11. Principio de construcción de un codificador incremental [9]	18
2.12. Señales de salida de un codificador incremental [9]	18
2.13. Transmisión por bandas.	19
3.1. Sistema de transmisión de bandas con dos poleas conductoras.	23
4.1. Esquema de control por ADRC.	26
4.2. Esquema de control por ADRC con sincronización de velocidad angular.	27
4.3. Esquema de control por ADRC con sincronización de velocidad y repar- tición de par.	28
5.1. Diagrama control de motor BLDC con sensores Hall.	31
5.2. Plataforma experimental para control de motor BLDC con sensores Hall y control ADRC.	31
5.3. Respuesta de implementación de control de motor BLDC con sensores Hall (Velocidad angular y señal de control).	32
5.4. Respuesta de implementación de control de motor BLDC con sensores Hall (Velocidad angular y corriente).	33

5.5. Respuesta de implementación de control de motor BLDC con sensores Hall (Velocidad angular y corriente).	33
5.6. Diagrama control ADRC.	34
5.7. Respuesta de implementación de control ADRC (Velocidad angular y señal de control).	35
5.8. Respuesta de implementación de control ADRC (Velocidad angular y estimación de par).	36
5.9. Diagrama control ADRC con transmisión por banda.	37
5.10. Plataforma experimental para control ADRC con transmisión por banda.	38
5.11. Respuesta de implementación de control ADRC con transmisión por banda (Velocidad angular y señal de control).	38
5.12. Respuesta de implementación de control ADRC con transmisión por banda (Velocidad angular y estimación de par).	38
5.13. Diagrama control ADRC de dos motores.	39
5.14. Plataforma experimental para control ADRC de dos motores.	40
5.15. Respuesta de implementación de control ADRC de dos motores (Velocidad angular y señal de control).	40
5.16. Respuesta de implementación de control ADRC de dos motores (Velocidad angular y estimación de par).	40
5.17. Diagrama control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores.	41
5.18. Plataforma experimental para control ADRC con sincronización de velocidad de dos motores.	42
5.19. Topología de la comunicación para la sincronización de velocidad.	42
5.20. Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y eventos).	43
5.21. Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y señal de control).	43
5.22. Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y estimación de par).	44
5.23. Diagrama de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de múltiples motores.	45
5.24. Plataforma experimental para control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de múltiples motores.	46
5.25. Esquema de interconexión entre los agentes.	46
5.26. Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Velocidad angular y eventos).	47
5.27. Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Velocidad angular y señal de control).	47
5.28. Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Velocidad angular y estimación de par).	48
A.1. Simulación control de motor BLDC con sensores Hall.	56

A.2. Respuesta de simulación de control de motor BLDC con sensores Hall (Velocidad angular y corriente).	57
A.3. Respuesta de simulación de control de motor BLDC con sensores Hall (Voltajes).	57
A.4. Respuesta de simulación de control de motor BLDC con sensores Hall (Corrientes).	58
A.5. Simulación control ADRC.	58
A.6. Respuesta de simulación de control ADRC (Velocidad angular y señal de control).	59
A.7. Respuesta de simulación de control ADRC (Velocidad angular y par).	59
A.8. Respuesta de simulación de control ADRC (Velocidad angular y corriente).	59
A.9. Simulación control ADRC con transmisión por banda.	60
A.10. Respuesta de simulación control ADRC con transmisión por banda (Velocidad angular y señal de control).	60
A.11. Respuesta de simulación control ADRC con transmisión por banda (Velocidad angular y par).	61
A.12. Simulación control ADRC de dos motores.	61
A.13. Respuesta de simulación control ADRC de dos motores (Velocidad angular y señal de control).	62
A.14. Respuesta de simulación control ADRC de dos motores (Velocidad angular y par).	62
A.15. Simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores.	63
A.16. Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y señal de control).	63
A.17. Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y par).	64
A.18. Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y señal de eventos).	64
A.19. Simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de múltiples motores.	65
A.20. Esquema de interconexión entre los agentes (Caso 1).	65
A.21. Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 1) (Velocidad angular y señal de control).	66
A.22. Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 1) (Velocidad angular y par).	66
A.23. Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 1) (Velocidad angular y eventos).	67
A.24. Esquema de interconexión entre los agentes (Caso 2).	67
A.25. Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 2) (Velocidad angular y señal de control).	68

A.26.Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 2) (Velocidad angular y par).	68
A.27.Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 2) (Velocidad angular y eventos).	69
B.1. Plataforma experimental.	70
B.2. Sistema de tracción eléctrico multi-motor.	71
B.3. Sistema de control distribuido.	72
B.4. Agente seguidor.	73
B.5. Circuito diseñado para agentes seguidores.	74
B.6. Diseño de placa de circuito impreso para agentes seguidores.	74
B.7. Diagrama de aplicación típica del inversor trifásico MP6540HA.	75
B.8. Circuito diseñado para agente líder.	75
B.9. Diseño de placa de circuito impreso para agente líder.	76

Índice de cuadros

2.1. Secuencia de operación en sentido horario.	16
2.2. Tabla de lógica de conmutación.	16
2.3. Combinación de señales para detectar la dirección de la rotación [9] . . .	18
3.1. Parámetros del sistema	21
3.2. Parámetros del sistema de transmisión de bandas.	23

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes y estado del arte

El transporte siempre ha estado vinculado al desarrollo tecnológico. Tuvo sus inicios con tecnologías de propulsión a vapor, carbón y gas natural. A la fecha, se cuenta con una amplia gama de tecnologías vehiculares, las convencionales y, por supuesto, las que ocuparán un lugar relevante a mediano plazo, como el auto y autobús eléctricos, así como el híbrido eléctrico y el híbrido conectable [3].

Sin embargo, el transporte trae consigo tendencias en el suministro y uso de energía que actualmente son insostenibles en términos de medio ambiente, economía y sociedad. Por ejemplo, los embotellamientos, que se debe a la urbanización masiva que está surgiendo en todos los países en desarrollo. Ahora no solo hay más personas para transportar, sino que con un acceso más fácil a la financiación de vehículos de uso particular. Si las personas no cambian su estilo de vida, como en los patrones de trabajo y las opciones de transporte personal, entonces el alivio deberá provenir de las nuevas tecnologías de transporte [15].

Estas nuevas tecnologías consisten en vehículos impulsados por un tren motriz electrificado, incluidos los vehículos eléctricos de batería pura, los vehículos eléctricos híbridos, los vehículos eléctricos de pila de combustible, etc. (también conocidos como HEV, por sus siglas en inglés, *Hybrid Electric Vehicles*). Los HEV pueden contribuir significativamente a la protección del medio ambiente, al reducir el consumo de petróleo y otros altos niveles de CO₂ [6].

Las máquinas eléctricas encuentran un lugar en los vehículos convencionales como motores de arranque y alternadores. En vehículos eléctricos e híbridos, la máquina eléctrica es un componente clave. Por lo general, es una máquina reversible, que puede funcionar de dos maneras. La primera es para convertir la energía eléctrica de la batería en energía mecánica. Y la segunda es para convertir la energía mecánica del motor en energía eléctrica para recargar la batería, o para recuperar la potencia mecánica disponible en el tren de transmisión para recargar la batería (frenado regenerativo). En vehículos híbridos paralelos y en vehículos eléctricos, las dos funciones se pueden cumplir en principio con una sola máquina [5].

La tecnología actual de motores para aplicaciones HEV es básicamente motores síncronos de imán permanente (PMSM) y motores de corriente continua sin escobillas (BLDC); aunque a veces todavía se usan motores de inducción, y los motores de

reluctancia conmutada se consideran una oportunidad muy prometedora para el futuro cercano. Los motores PMSM y BLDC se caracterizan por una mayor eficiencia y potencia específica. La principal diferencia es la forma de onda de las corrientes del estator, que son rectangulares en los motores BLDC y sinusoidales en los PMSM [5]. En cuanto a su modo de operación, en un motor BLDC se controla la corriente que circula por las fases del motor, excitando un par simultáneamente y manteniendo la tercera desconectada. Sucesivamente se va alternando el par de terminales a excitar, hasta completar las seis combinaciones posibles. Tres sensores de efecto hall situados en el motor permiten proporcionar la posición aproximada del rotor del motor al controlador para que este pueda determinar el próximo par de bobinados que debe ser excitado.

Por otro lado, la investigación y el desarrollo (I+D) juegan un papel crucial en el proceso de desarrollo de tecnologías alternativas de energía. Un tema en particular de control automático, que puede aportar a la optimización de vehículos electrificados, es la sincronización de velocidad angular y el intercambio de carga, es decir, cuando la cantidad de par aplicado a la carga es prescrita y llevada a cabo por cada conjunto de accionamiento y motor. Como consecuencia, se deben desarrollar algoritmos de control descentralizados y colaborativos para sincronizar la velocidad y el par de los motores participantes de manera robusta, para cumplir con los diferentes requisitos para operar [4].

En el contexto de la estimación y el rechazo de perturbaciones, el control con rechazo activo de perturbaciones (ADRC) constituye una metodología para el control de sistemas inciertos tanto lineales como no lineales, que permite la estimación precisa de la parte dinámica desconocida del sistema a controlar mediante un Observador de Estado Extendido (ESO), denominada observador de perturbación, y proceder a cancelar sus efectos mediante la complementación de la ley de control adaptable [7][3].

En los últimos años, ADRC se ha aplicado para resolver este problema de sincronización y seguimiento de la velocidad angular entre motores eléctricos para vehículos eléctricos (EV), donde se utilizan motores síncronos de imanes permanentes. Sin embargo, el enfoque mencionado no considera un eje rígido común ni una carga compartida [4].

El control colaborativo basado en ADRC para la sincronización de velocidad angular y repartición equitativa de cargas ha sido implementado en un servomecanismo accionado por dos motores de DC con escobillas en [4] y posteriormente con motores BLDC en una plataforma experimental a escala en [7]. Estos trabajos son la base para el presente proyecto, la implementación tecnológica eléctrica para vehículo todo terreno con motores BLDC a escala real, además de un sistema de control crucero adaptivo, que al mismo tiempo, corresponde a un nivel 2 de en la clasificación para vehículos autónomos de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) en la especificación J3016 [18].

Control por rechazo activo de perturbaciones (ADRC)

El control PID es el controlador más utilizado durante más de 90 años, sobretodo en procesos industriales. Debido a las exigencias de un control más preciso, con una

velocidad de respuesta más rápida, pero sobre todo, la capacidad de adaptarse a los cambios del entorno es necesario ir más allá del PID. El ADRC se hereda del PID, que utiliza una ley de control basada en errores, ya que en la práctica el error es fácil de obtener.

Entre las características técnicas y conceptuales del ADRC que se mejoran con respecto al PID son: una ecuación diferencial simple como generador de perfiles transitorios, un TD tolerante al ruido, la capacidad de control tanto lineal como no lineal y la estimación, así como el rechazo de la perturbación total. Dichas características forman un control que no depende de un modelo dinámico preciso de la planta. El ADRC es un reemplazo capaz del PID en términos de precisión, rechazo de perturbaciones y practicidad [19].

El ADRC puede estimar y compensar en tiempo real las perturbaciones internas (endógenas) y externas (exógenas) desconocidas del sistema, es una estrategia de control no lineal mejora los rendimientos estáticos y dinámicos, tiene una gran robustez y adaptabilidad. Dado que no depende de un modelo preciso del sistema, es muy robusto frente a variaciones de parámetros, perturbaciones y ruidos [13], [12] y [19].

Tiene las ventajas de una buena robustez a las perturbaciones externas del sistema, una respuesta dinámica rápida sin sobreimpulso. La única desventaja requiere una mayor capacidad de cómputo que el PID y una mayor complejidad de sintonización del sistema controlador-observador.

Estructura del ADRC

El ADRC consiste en tres partes: un Diferenciador de seguimiento (TD), un Observador de Estado Extendido (ESO) y una ley de control.

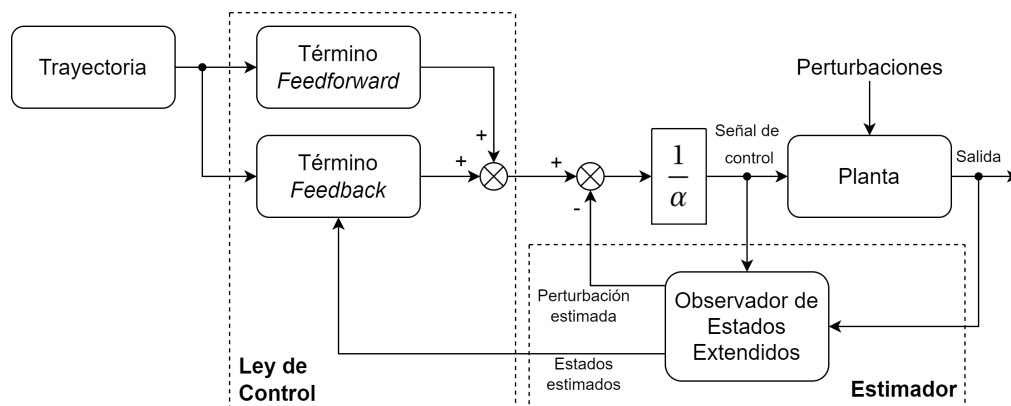


Figura 1.1: Esquema de control por ADRC.

- **Observador de estado extendido (ESO).** El ESO es el núcleo del ADRC. A través del ESO, se puede obtener el valor estimado de cada variable de estado, estimar la cantidad de modelo de incertidumbre en tiempo real y perturbación externa y compensar en la retroalimentación.

- **Ley de control.** Es una combinación no lineal de las variables de estado estimadas producidas por el ESO.

El ADRC juega un papel muy importante en el mundo de la industria hoy en día. Tiene aplicaciones en diferentes problemas de control tales como: control de vuelo, control de buques, sistemas robóticos, problemas de misión, plantas de energía energías renovables, giroscopios, control de movimiento, control de vehículos y claro, control de motores y servo systems, entre otras aplicaciones [19].

1.2. Justificación

Probablemente por primera vez en la historia, los seres humanos se enfrentan al hecho de que la movilidad física está retrocediendo. Durante las horas pico, los residentes de las grandes ciudades pueden perder hasta 4 horas en embotellamientos y las cosas empeorarán. Debido al proceso de densificación los problemas de transporte están aumentando exponencialmente [15]. Como el innegable agotamiento de los recursos naturales petroleros como fuente de energía, así como la inestabilidad mundial que esto genera, la inocultable contaminación ambiental y el calentamiento global. Por lo que la obligación de mantener la viabilidad de la humanidad, es una de las principales preocupaciones de las generaciones que actualmente habitamos en el planeta [2].

Fundamentando estas preocupaciones el Balance Nacional de Energía publicado por la Secretaría de Energía en noviembre de 2017, se identifican cuatro sectores en el consumo de uso final energético total (Figura 1.2): agropecuario; industrial; residencial, comercial y público; y el transporte. Este último sector representa el 44 % y de ese porcentaje sólo en 0.2 % se usa la electricidad [2].

Hoy se nos presenta la oportunidad de corregir el daño a la naturaleza por la utilización excesiva de máquinas térmicas ineficientes, reimpulsar el desarrollo tecnológico y la economía de las naciones, así como mejorar la calidad de vida [1]. En la búsqueda de una solución sostenible para estos desafíos, la energía eléctrica es la clave del éxito, especialmente cuando se trata de movilidad [6]. La tendencia apunta a que los vehículos híbridos son un producto de transición hacia la prevalencia de los vehículos totalmente eléctricos. Existe plena confianza en que la tecnología irá perfeccionándose para subsanar los temas que hoy limitan un poco su implementación, como el kilometraje con autonomía o el cambio de baterías [10]. Cabe aclarar que no se puede hablar con firmeza de beneficios, si la electricidad utilizada en estos vehículos proviene de una planta de generación basada en la quema de carbón, o una termoeléctrica con baja eficiencia. Tampoco se puede rehuir totalmente del problema de las baterías que se habrán que desechar, así como los desafíos para lograr una producción de baterías más limpias [2]. A pesar de esto, los especialistas vaticinan un crecimiento acelerado de la venta de vehículos eléctricos, incluyendo buses, y el desplazamiento de los que utilizan hidrocarburos para su operación (Figura 1.3) [3].

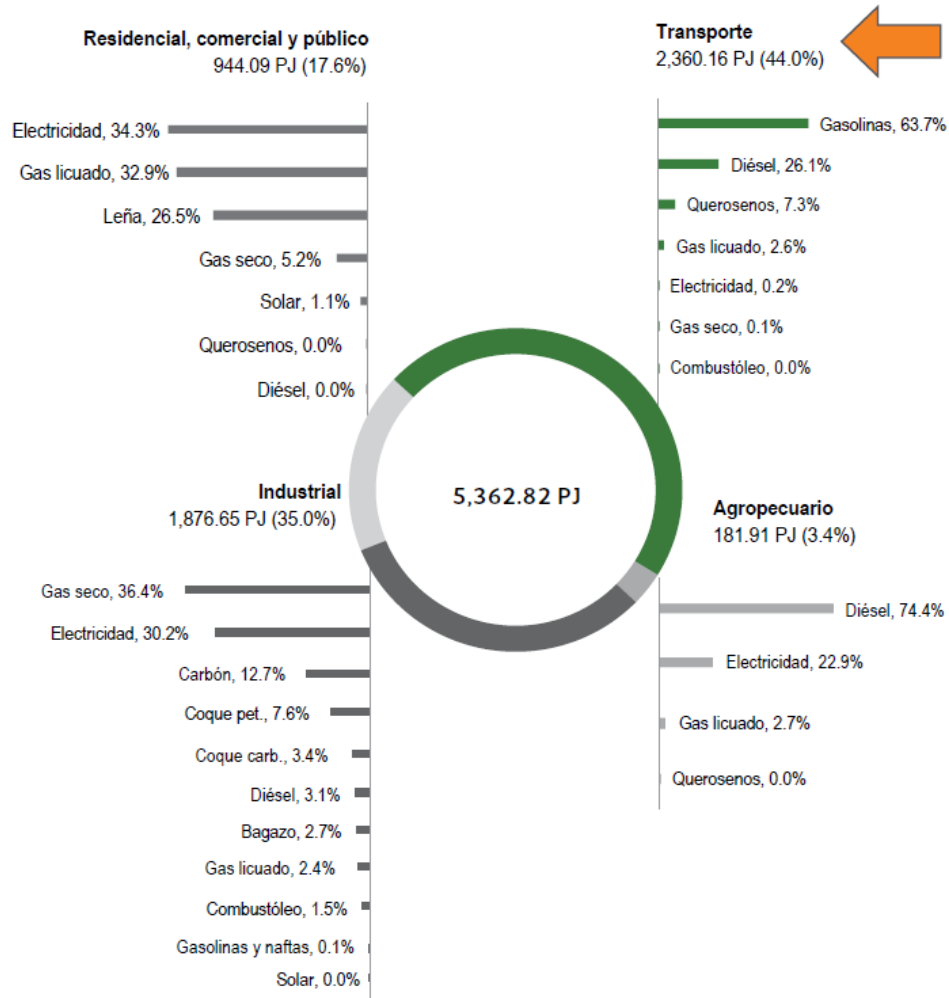
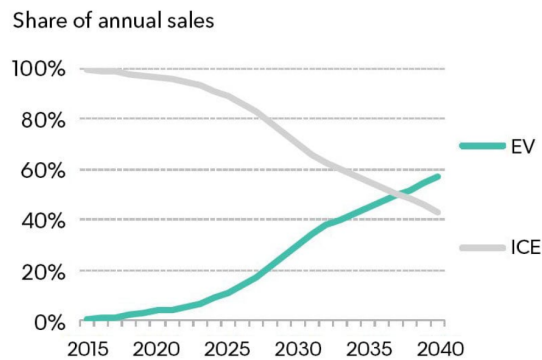


Figura 1.2: Consumo de energía de uso final por sectores [2].

Global EV and ICE share of long-term passenger vehicle sales



Source: BloombergNEF

Figura 1.3: Venta anual de vehículos de pasajeros al 2040 en porcentaje compartido entre vehículos eléctricos y vehículos con motor de combustión interna. [1]

Es de suma importancia el rol que juegan los gobiernos en la Investigación y el Desarrollo (I+D) en la Industria Automotriz, ya que estos deben de emitir políticas públicas que permitan alcanzar metas reales de reducción de consumos de energía, a través de la actualización o creación de normas o acuerdos que, por un lado, faciliten el desarrollo tecnológico y por otro, brinden al consumidor la posibilidad de elegir productos más eficientes con precios competitivos [2]. Por esta razón, México cuenta con la Ley General de Cambio Climático en donde se han fijado objetivos de reducción de gases contaminantes. No obstante, se vislumbra que la meta establecida para este 2020 no será alcanzada. La venta de vehículos híbridos y eléctricos en nuestro país (Figura 1.4) apunta un incremento importante en la comercialización de este tipo de vehículos: La proporción a ventas totales de vehículos ha ido de 0.04% en 2006 a 1.25% en 2018 y 1.6% en el primer semestre de 2019. Asimismo, los incentivos con que cuentan los vehículos híbridos y eléctricos son la exención del Impuesto sobre Automóviles Nuevos, del Impuesto Sobre Tenencia o Uso de Vehículos y una deducción en el Impuesto Sobre la Renta de hasta \$250,000.00. Además, se cuenta con una red de electrolinerías gratuitas en la zona metropolitana, lugares preferenciales con cargador en estacionamientos privados participantes, exención de proceso de verificación vehicular en los estados que la realizan, así como la garantía de circular todos los días, incluyendo aquellos en los que se declara contingencia ambiental [10].

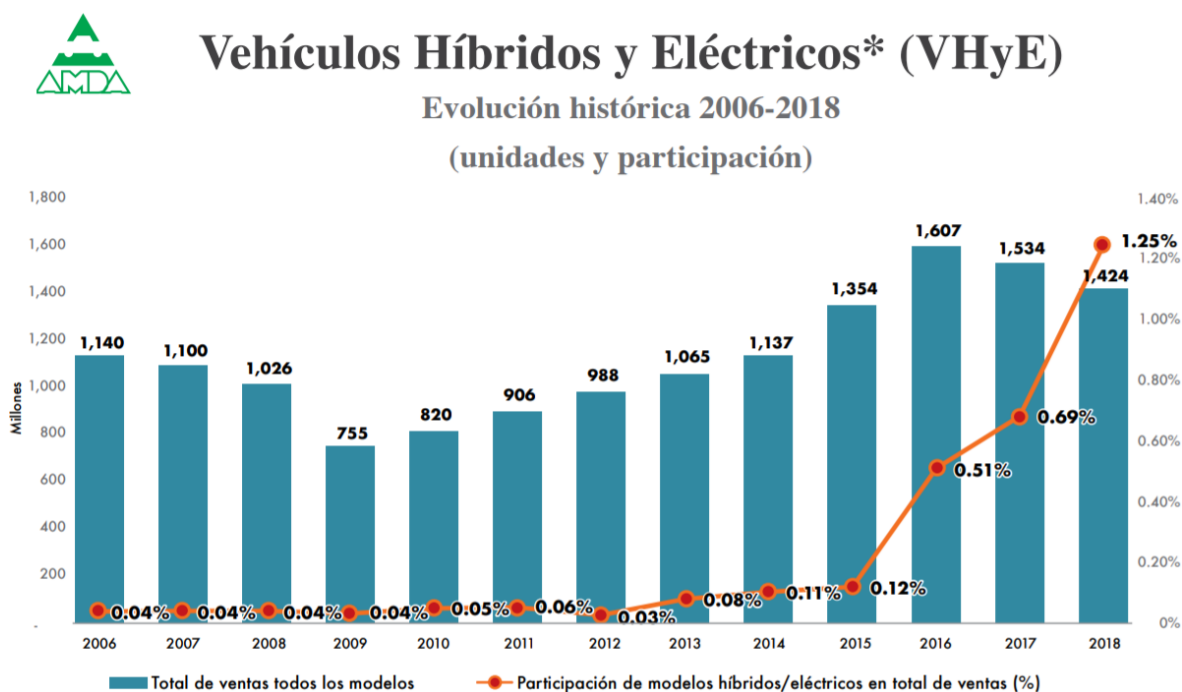


Figura 1.4: Venta de vehículos y la participación de modelos híbridos/eléctricos en total de ventas (%) en México [10].

El motor eléctrico ya se ha utilizado en importantes espacios en todo el mundo, y sus aplicaciones han sido extraordinarias. En nuestro país, por ejemplo, en los tranvías a principios del siglo XX; en el trolebús; en el tren ligero y en los sistemas Metro de la ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. Así como, en grandes locomotoras para el transporte ferroviario de carga y pasajeros con una configuración híbrida; en trenes

eléctricos autónomos; en pequeños camiones eléctricos de repartición de mercancías en los centros históricos; en los carritos de golf, en scooters y en bicicletas eléctricas [1]. En lo que respecta a la industria automotriz, al paso del tiempo cada vez habrá más opciones de elección de modelos en el mercado y poco a poco los precios se volverán más accesibles [10].

Con el salto de la tecnología sin conductor de otras industrias (como en el transporte ferroviario) los fabricantes de autos y los gobiernos no pueden ignorar el hecho de que quedarse sin conductor salvará millones de vidas cada año [15]. Actualmente, la tecnología en vehículos autónomos se ha convertido en un área de investigación de rápido crecimiento. Por lo que militares, centros de investigación, universidades y la industria automotriz se encuentran trabajando en el desarrollo de nuevos vehículos terrestres no tripulados y técnicas de control. Estas investigaciones tienen el objetivo de que los vehículos sean capaces de manipular automáticamente su accionamiento para seguir una trayectoria desde un punto inicial hasta un punto final con el mínimo de error y con una velocidad adecuada a la superficie regular [15]. El flujo continuo de nuevas tecnologías más seguras se resentirá en el mercado, que van desde la clasificación basada en controles, semi-autónomas, hasta no tripuladas.

En general, el control autónomo en la movilidad eléctrica está emergiendo actualmente como una tecnología prometedora que reduce los costos, los accidentes, la pérdida de vidas, las primas de seguros y aumenta la productividad de los trabajadores en tránsito y potencialmente elimina la conducción en estado de ebriedad y las pérdidas asociadas [15].

1.3. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar e implementar una estrategia de control colaborativo distribuido con comunicación disparada por eventos para la sincronización de velocidad y repartición equitativa de par de motores BLDC.

Objetivos Específicos

- Analizar el modelo matemático del motor BLDC e implementar una simulación en MATLAB/Simulink para el tipo de motor usado en el trabajo de tesis.
- Desarrollar una estrategia de control con rechazo activo de perturbaciones para el control de velocidad de un motor.
- Establecer el esquema mecánico del sistema cooperativo usando poleas y bandas como medio de comunicación mecánica y obtener el modelo matemático del mismo.
- Proponer un esquema de control cooperativo distribuido y disparado por eventos para sincronización de velocidad y repartición de par.
- Diseñar una plataforma experimental para comprobar los esquemas de control propuestos.

Capítulo 2

Fundamentos

En este capítulo se describen los fundamentos técnicos necesarios para el control del sistema de tracción eléctrico propuesto tanto en simulación como en implementación. Empezamos describiendo los motores BLDC, enfocándonos en su principio de operación y la conmutación electrónica que requieren. En seguida, presentamos uno de los métodos más comunes de control de estos motores, el cuál requiere el uso de sensores Hall para determinar la posición del rotor y entonces aplicar el patrón de voltaje adecuado, y al mismo tiempo, modulado por ancho de pulso a cada una de las fases del motor. Posteriormente, se describe el principio de funcionamiento de los codificadores incrementales, los cuales nos permitirán identificar la dirección a la que gira el rotor con una mayor resolución y cerrar el lazo de control de cada agente con esta información. Por último se introduce el mecanismo de transmisión que permitirá que múltiples motores muevan un eje común.

2.1. Motores BLDC

Actualmente, el motor de corriente directa (CD) sin escobillas, también conocidos como Motor BLDC por sus siglas en inglés (*Brushless Direct Current Motor*), ganan popularidad rápidamente por sus aplicaciones en diversos campos, como aeroespacial, robótica, control de procesos industriales, máquinas herramienta de precisión, electrónica automotriz, de consumo, medicina, y aplicaciones domésticas [8].

Si recordamos el funcionamiento de un motor de CD con escobillas, al pasar una corriente continua a través de los devanados de la bobina, se genera un electroimán con dos polos. Estos polos interactúan con los polos del imán permanente y hacen girar el rotor. Con el fin de mantener girando el rotor, es necesario cambiar los polos del electroimán, esto se hace al cambiar la polarización de los devanados de la bobina. A esto se le llama conmutación. En un motor de CD con escobillas, la conmutación se realiza mecánicamente, donde las escobillas entran en contacto con el conmutador del rotor cuando el motor está girando. Debido a este contacto físico, las escobillas se desgastan con el tiempo, afectando el rendimiento del motor.

En cambio, en un motor BLDC se reemplaza la conmutación mecánica con la conmutación accionada electrónicamente, como se describirá más adelante en la sección del controlador del motor. Esto lleva a que los imanes permanentes ahora se convierten en el rotor, mientras que los devanados de las bobinas se convierten en el estator.

Los motores BLDC tienen muchas ventajas sobre los motores DC con escobillas y los motores de inducción. [16], [7]. Algunos de estos son:

- Mejores características en su curva velocidad - torque
- Alta respuesta dinámica
- Alta eficiencia
- Larga vida útil
- Operación silenciosa
- Rangos de velocidad más altos
- Tamaño optimizado

Un inconveniente del remplazo de un motor de CD por un motor BLDC es que demanda tanto un circuito de control, como un algoritmo de control más complejo. Sin embargo esto se contra resta con todas las ventajas antes mencionadas, sin mencionar la constante caída de los precios de los dispositivos semiconductores y circuitos de control [16].

2.1.1. Construcción de un motor BLDC

Los motores BLDC son motores síncrono, donde los campos magnéticos generados por el estator y el rotor giran a la misma frecuencia. Los principales componentes de estos motores son el estator, el rotor y los sensores de efecto hall [7], [11] y [16].

Estator

El estator de un motor BLDC consta de láminas de acero apiladas con ranuras en la periferia interior. Los devanados del estator se pueden organizar en dos conexiones: estrella y delta. La mayoría usa la configuración en estrella, en esta forma el par es alto y la velocidad es baja.

Rotor

El rotor de un motor BLDC no está conectado a la fuente y está hecho de acero de imán permanente. El número de polos y la densidad de campo magnético varían dependiendo la aplicación. Normalmente se usan imanes de ferrita, aunque actualmente se desarrollan aleaciones del neodimio, el cobalto samariano, la ferrita de neodimio y el boro aprovechando su alta coercitividad e intensidad de remanencia con el fin de reducir el tamaño y/o aumentar torque.

Sensores de efecto Hall

Los sensores de efecto Hall (H_a , H_b , H_c) informan la posición aproximada del rotor para que se pueda determinar el próximo par de terminales a excitar, todo esto con el fin de que el rotor gire de acuerdo con la lógica de conmutación que se presentará con más detalle en la sección del controlador del motor. Estos sensores están desplazados en un ángulo de cambio de fase de 120° .

2.1.2. Fuerza contra-electromotriz

Hoy en día existen motores BLDC con diferentes disposiciones de imanes, el estator puede tener un número diferente de devanados y el rotor múltiples pares de polos. Además de estas diferentes configuraciones, es conveniente mencionar un motor con una estructura similar, el cual en la literatura a veces se usa indistintamente y puede llegar a causar confusión, tal es el caso del motor síncrono de imán permanente o PMSM por sus siglas en inglés.

Ambos motores, los BLDC y los PMSM se definen como motores síncronos con imanes permanentes en sus rotores. La diferencia clave es la forma de los voltajes contra-electromotriz. Es decir, los motores actúan como un generador cuando están girando. Esto significa que se induce una tensión contra-electromotriz en los devanados del estator que se opone a la tensión de accionamiento del motor. Esta tensión contra-electromotriz identifica el tipo de motor y al mismo tiempo, dicta el tipo de algoritmo de control que se requiere para su control. En los BLDC la tensión contra-electromotriz tienen una forma trapezoidal (ver figura 2.1) y comúnmente se controlan mediante control trapezoidal, el cual se hablará más adelante, mientras que en la tensión contra-electromotriz en los PMSM es de forma sinusoidal (ver figura 2.2) y se implementa el control orientado al campo. Estos últimos tienen menos rizado y un comportamiento más preciso y suave, sin embargo su electrónica de potencia es más compleja [7], [11], [16] y [14].



Figura 2.1: FEM trapezoidal.

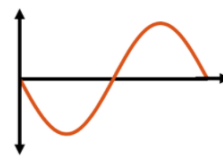


Figura 2.2: FEM sinusoidal.

2.1.3. Principio de operación

Al igual que los motores de DC con escobillas, los motores BLDC funcionan según el mismo principio, en el que el movimiento de rotación se genera a través de la atracción y repulsión de los polos magnéticos de imanes permanentes o electroimanes. Sin embargo, la forma en que se controlan estos motores es muy diferente.

Los motores BLDC requieren un controlador complejo para convertir la alimentación CD en voltajes trifásicos, mientras que un motor con escobillas se puede controlar fácilmente mediante un voltaje de CD.

Para simplificar el principio de operación de un motor BLDC se elige una configuración simple en la que el rotor sólo consta de un par de polos y el estator constan de tres bobinas espaciadas 120° (figura 2.3). Aquí, las bobinas se pueden energizar pasando una corriente a través de ellas, en las terminales A , B y C . El polo norte se muestra en rojo y el polo sur en azul. Al aplicar un voltaje en dos fases, A y C genera un campo magnético combinado a lo largo de una línea discontinua en amarillo. Como resultado de esto el rotor ahora comienza a girar con el campo magnético del estator como se muestra en la figura 2.3.

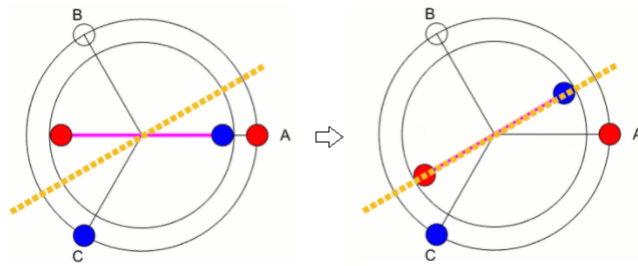


Figura 2.3: Campo magnético generado en un motor BLDC [r18].

Hay seis formas posibles de energizar los pares de bobinas. Al conmutar dos fases a la vez, se puede hacer que el campo magnético del estator gire, lo que hará que el rotor gire y termine en las posiciones que se muestra en la figura 2.4.

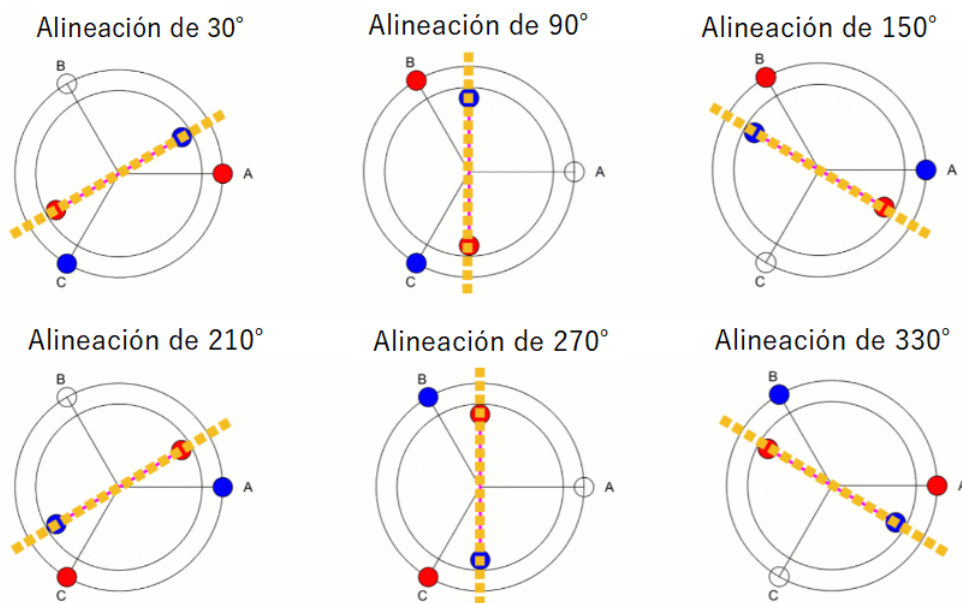


Figura 2.4: Seis combinaciones de conmutación [r18].

El ángulo del rotor se mide con respecto al eje horizontal. Hay seis alineaciones de rotor diferentes, cada uno con 60° de diferencia entre sí. Lo que significa que si se conmuta las fases correctas cada 60° se puede hacer girar el rotor. A esto se le llama conmutación de seis pasos o conmutación trapezoidal [16] y [14].

Hay que tener en cuenta que con más pares de polos, la conmutación se produce con más frecuencia. Es decir, con dos pares de polos la conmutación ocurre cada 30° y con 4 pares de polos cada 15° (figura 2.5).

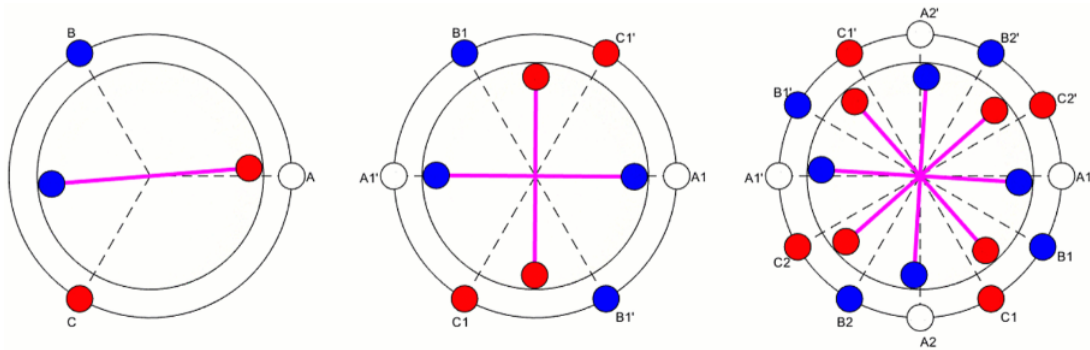


Figura 2.5: Campo magnético generado en un motor BLDC [14].

Para conmutar correctamente el motor en los momentos correctos con las fases correctas, es necesario conocer la posición del rotor, que generalmente se mide usando sensores efecto Hall.

Durante la conmutación, cuando los campos magnéticos de rotor y el estator se alinean perfectamente, el motor crea un par cero, por lo que se tiene que evitar que se alineen. En contra parte, el par máximo se produce cuando los campos están a 90° entre sí (figura 2.6). Así que el objetivo es acercar ese ángulo a los 90° , aunque en la práctica nunca se logran 90° con un control trapezoidal [16] y [14].

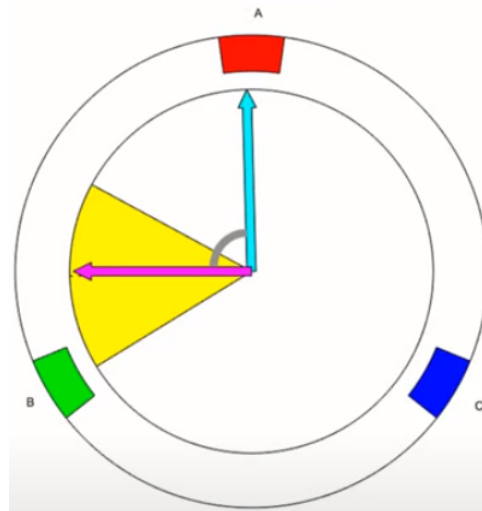


Figura 2.6: Campo magnético generado en un motor BLDC [14].

A diferencia de los BLDC, los PMSM permiten generar un par mayor al lograr 90° entre los campos magnéticos del estator y del rotor con técnicas como el control orientado al campo.

2.2. Control de motor BLDC con sensores Hall

2.2.1. Inversor trifásico

Para controlar las fases de la conmutación de seis pasos o control trapezoidal, se utiliza un inversor trifásico para convertir la alimentación DC a trifásica como se muestra en la figura 2.7.

Para suministrar corriente positiva a una de las fases, es necesario encender un interruptor conectado a esa fase en el lado alto, es decir, Q1, Q3 y Q5 para las fases A, B, y C, respectivamente. Y para suministrar corriente negativa es necesario activar un interruptor del lado bajo, es decir, Q4, Q6 y Q2 para las fases A, B, y C, respectivamente. Siguiendo la secuencia lógica de conmutación que se describe a continuación.

Los tres sensores de efecto Hall (H_a , H_b y H_c) situados en el motor permiten proporcionar la posición aproximada del rotor para que se pueda determinar el próximo par de terminales a excitar.

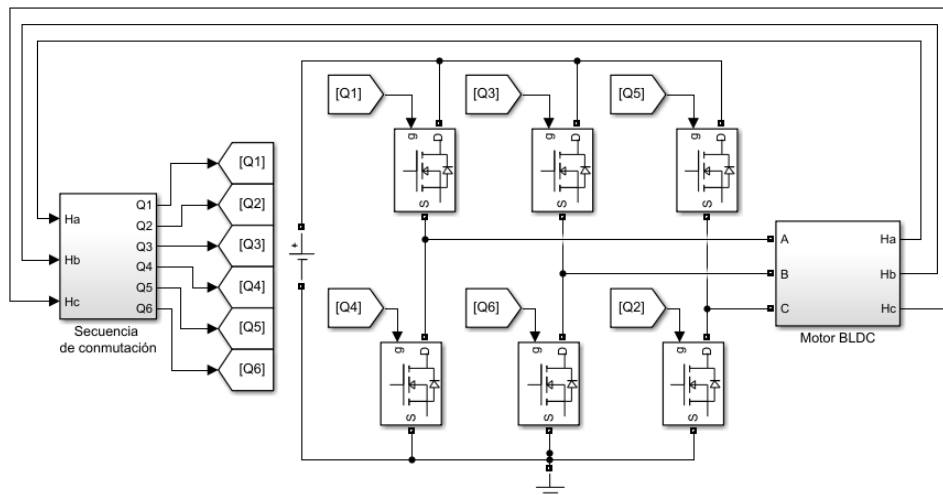


Figura 2.7: Inversor trifásico.

2.2.2. Secuencia de conmutación

A fin de controlar un motor BLDC, primero se debe medir la posición y velocidad angular del rotor mediante el uso de los sensores de efecto Hall. Hay que tener en cuenta que los sensores de efecto Hall no proporcionan información sobre dónde se encuentra el rotor dentro de uno de los seis sectores, pero en cambio permiten detectar cuándo el rotor pasa de un sector a otro. En la práctica sólo se necesita saber el sector para determinar cuándo conmutar el motor.

Las figuras 2.8, 2.9 y 2.10 muestran los seis escenarios posibles en la conmutación de un motor BLDC en sentido horario. Por ejemplo, en la figura 2.8 (a), el cual es el primer paso en la secuencia de conmutación que se repite cíclicamente, es la sección donde el ángulo eléctrico θ_e está en un principio en $0 - \pi/6$ y al último en $11\pi/6 - 2\pi$, aquí el sensor H_c ha sido accionado previamente y se está conmutando las fases C+ y B- que corresponden respectivamente con los interruptores Q5 y Q6 en alto, manteniendo la

fase A desconectada. Siguiendo este mismo procedimiento se obtienen los siete pasos de la secuencia de operación la tabla 2.2.2, dónde en realidad el paso 1 y 7 se repiten. Este caso es resultado sobre el supuesto de que el ángulo θ_e inicia en 0.

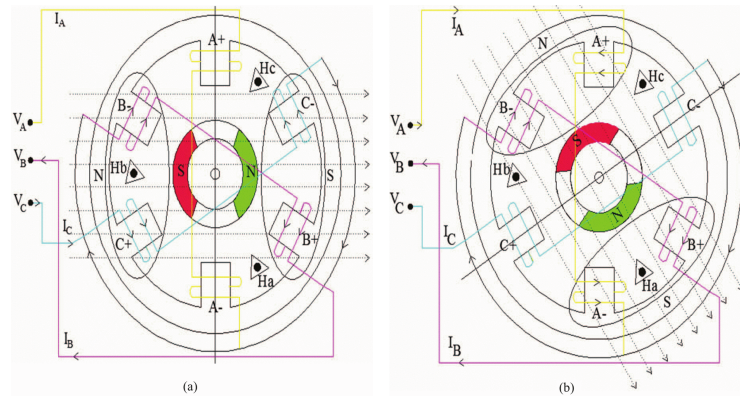


Figura 2.8: Pasos 1 y 2 de la secuencia de conmutación de un motor BLDC [8].

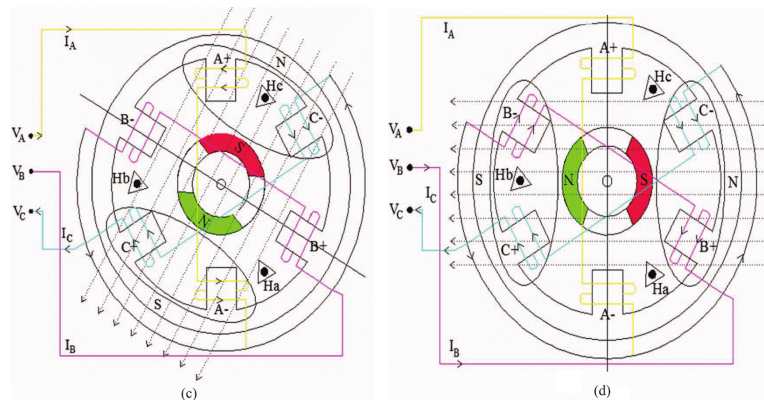


Figura 2.9: Pasos 3 y 4 de la secuencia de conmutación de un motor BLDC [8].

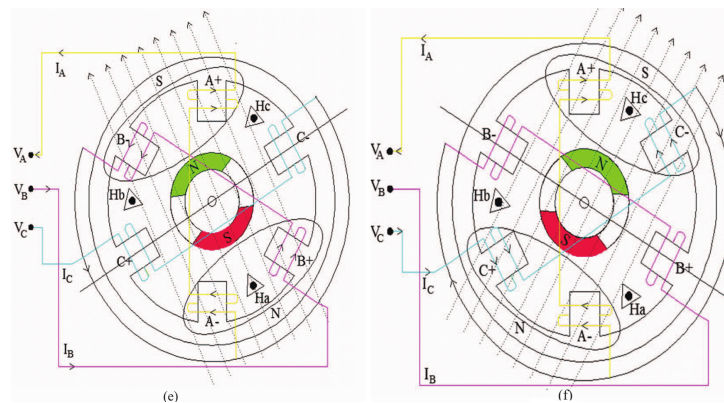


Figura 2.10: Pasos 5 y 6 de la secuencia de conmutación de un motor BLDC [8].

Paso	θ_e	H_a	H_b	H_c	Fases Energizadas
1	$0 - \pi/6$	0	0	1	C+ B-
2	$\pi/6 - \pi/2$	0	1	0	B- A+
3	$\pi/2 - 5\pi/6$	0	1	1	A+ C-
4	$5\pi/6 - 7\pi/6$	1	0	0	C- B+
5	$7\pi/6 - 9\pi/6$	1	0	1	B+ A-
6	$9\pi/6 - 11\pi/6$	1	1	0	A- C+
7	$11\pi/6 - 2\pi$	0	0	1	C+ B-

Tabla 2.1: Secuencia de operación en sentido horario.

2.2.3. Lógica de conmutación con cambio de giro

En la práctica, para saber las fases correctas a conmutar se usa la lógica de combinatorial que se muestra en la tabla 2.2.3, la cual es una versión ordenada ahora con respecto a la codificación de los sensores. Esta lógica combinatorial selecciona el patrón de conmutación que dicta el estado de encendido para los interruptores del inversor. Conforme se hace una transición a otros sectores, se selecciona un patrón de conmutación en consecuencia y se envía al inversor trifásico. Se puede observar que que se agrega una cuarta entrada de dirección *Dir* como el bit de entrada más significativo, con el fin de que si este está en bajo, el giro es en sentido horario, y si está en alto, el giro es en sentido contrario a las manecillas del reloj. Aquí, cabe destacar que las combinaciones 0, 7, 8 y 15 no se ocuparán. También se propone una variable selectora *Sel* que corresponde a la codificación de las entradas y de esta forma multiplexar el vector de salidas que corresponde a los interruptores.

Angulo de rotor		Paso		Entradas			Salidas					
<i>Sec</i>	θ_e	<i>Dir</i> ₁	<i>Dir</i> ₂	H_a	H_b	H_c	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
1	$0^\circ < \theta_e \leq 60^\circ$	1	4	1	0	1	1	0	0	1	0	0
2	$60^\circ < \theta_e \leq 120^\circ$	2	5	0	0	1	0	0	0	1	1	0
3	$120^\circ < \theta_e \leq 180^\circ$	3	6	0	1	1	0	1	0	0	1	0
4	$180^\circ < \theta_e \leq 240^\circ$	4	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0
5	$240^\circ < \theta_e \leq 300^\circ$	5	2	1	1	0	0	0	1	0	0	1
6	$300^\circ < \theta_e \leq 360^\circ$	6	3	1	0	0	1	0	0	0	0	1

Tabla 2.2: Tabla de lógica de conmutación.

2.2.4. Modulación por ancho de pulso (PWM)

El inversor trifásico con un voltaje constante mantiene el motor a una velocidad constante con una relación proporcional. Por lo que para controlar el motor a diferentes velocidades es necesario construir un control que ajuste el voltaje aplicado. Una forma de hacerlo es usar la modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés), la cual es una técnica digital empleada de forma habitual para controlar la potencia eléctrica hacia una carga mediante pulsos de onda cuadrada en un determinado ciclo de trabajo. Un control adecuado de la modulación por ancho de pulsos garantiza la eficiencia y la precisión en aplicaciones de control de motores BLDC.

Existen dos arquitecturas comunes para la implementación del PWM.

La primera arquitectura consiste en usar un convertidor reductor, también conocido como *Buck converter*, el cual tiene como salida un voltaje regulado que alimenta el inversor trifásico y como entrada, la fuente de voltaje y el ciclo de trabajo del PWM al que se desea trabajar.

Por otro lado, la segunda arquitectura modula los voltajes de las fases directamente en el circuito de conmutación.

2.3. Codificador incremental

Los sensores digitales de posición que emplean los más comunes son los codificadores o *encoders* construidos con tecnología optoelectrónica y se les denominan encoders ópticos los cuales a su vez se clasifican en incrementales y absolutos.

Los accionamientos eléctricos utilizan con frecuencia codificadores incrementales (también conocidos como codificadores relativos) como sensor de posición, los cuales son dispositivos que proporcionan impulsos eléctricos si su eje está girando. El número de pulsos generados es proporcional a la posición angular del eje.

2.3.1. Principio de funcionamiento

El principio de un codificador incremental óptico se presenta en la Fig. 2.11. Este consta básicamente de rayos de luz emitidos por una fuente de luz colocada en un lado del disco giratorio con ranuras. En el lado opuesto, los haces de luz modulados son detectados por sensores ópticos, lo que genera una ondas cuadradas digitales (figura 2.12) que se acopla directamente a un microprocesador o interfaz electrónica de un sistema mínimo para ser empleada por algoritmos de control.

Las dos salidas del codificador, *A* y *B*, generarán pulsos cuando el eje gire un ángulo igual al paso angular de graduación θ_p .

El número de pulsos es proporcional a la posición angular del eje. Debido a que los haces de luz se colocan desplazados entre sí con un ángulo igual $\theta_p/4$, los pulsos de las dos salidas también se desplazarán, posibilitando la determinación del sentido de rotación. En este caso θ se determina positivo en la dirección con sentido antihorario (CCW por sus siglas en inglés) y negativo en sentido horario (CW).

Un tercer haz de luz es modulado por otra pista con una sola graduación. La señal de salida *Z* asociada a este tercer haz proporciona un solo pulso en el curso de

una rotación completa, 360°. La posición del eje correspondiente a este pulso puede considerarse como posición de referencia.

La resolución del codificador está determinada en función de los ciclos por revolución (CPR).

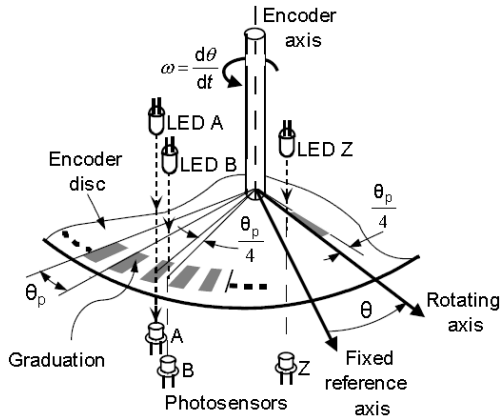


Figura 2.11: Principio de construcción de un codificador incremental [9]

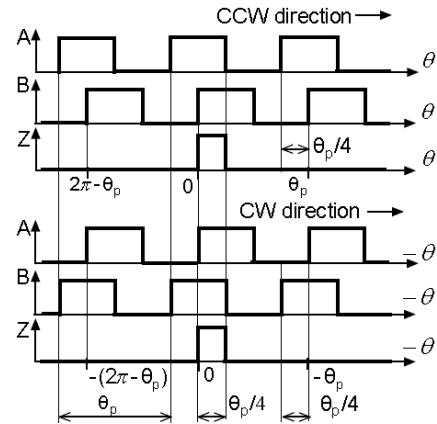


Figura 2.12: Señales de salida de un codificador incremental [9]

2.3.2. Identificación de la dirección

La dirección de rotación se identificará comparando la posición relativa de las salidas A a B. Esto se puede lograr de diferentes maneras. Un enfoque más preciso se muestra en la tabla 2.3.2, donde \downarrow representa una transición de nivel ALTO a BAJO y \uparrow una transición de nivel BAJO a ALTO. Esta estrategia permite la detección del cambio de dirección en todos los casos durante una rotación de $\theta_p/4$, es decir, en un incremento o decremento del ángulo de rotación mínimo detectable.

De CCW a CW \Rightarrow Q \downarrow		De CW a CCW \Rightarrow Q \uparrow	
A	B	A	B
0	\uparrow	\uparrow	0
\uparrow	1	0	\downarrow
\downarrow	0	1	\uparrow
1	\downarrow	\downarrow	1

Tabla 2.3: Combinación de señales para detectar la dirección de la rotación [9]

2.4. Transmisión por banda

Los transformadores de movimiento en forma de mecanismos, se utilizan cuando se requiere un cambio en el tipo de movimiento o un cambio de velocidad o par.

Existe una gran variedad de mecanismos de transmisión. En este caso se usará una transmisión por banda debido a que es rentable, requiere poco mantenimiento y su

instalación es flexible. Este mecanismo, en su configuración más simple, consta de un par de poleas cilíndricas conectadas por una banda para transmisión del movimiento.

En este mecanismo, el par transmitido es la diferencia entre la tensión que se produce en el lado apretado y el lado flojo de la banda. Tiene ventaja de que la longitud de la banda puede ajustarse a una amplia gama de distancias entre eje impulsor y conducido, sin embargo, la relación de transmisión se limita a aproximadamente tres para mantener un arco de contacto adecuado.

En la figura 2.13 se muestra el esquema de la transmisión por banda. Donde la banda forma un lazo entre el eje impulsor con el eje conducido. Donde se crean las fuerzas periféricas en los discos que generan los pares y las velocidades de rotación de las poleas a partir de la diferencia entre la fuerza de carga del lado tenso $F_1(t)$ y el lado flojo $F_2(t)$. La banda se puede considerar como un elemento transformador con comportamiento resorte-amortiguador.

En las transmisiones por bandas se distinguen dos tipos:

- *Transmisión de banda por fricción*

Como su nombre lo dice, sigue el principio de fricción por cable. La transformación de velocidad se alcanza para un diseño correcto con deslizamiento bajo dependiente de la carga y una relación de transmisión casi constante.

- *Transmisión de banda dentada*

En este caso, las fuerza tangenciales se generan sin deslizamiento y por lo tanto se tiene una relación de transmisión constante.

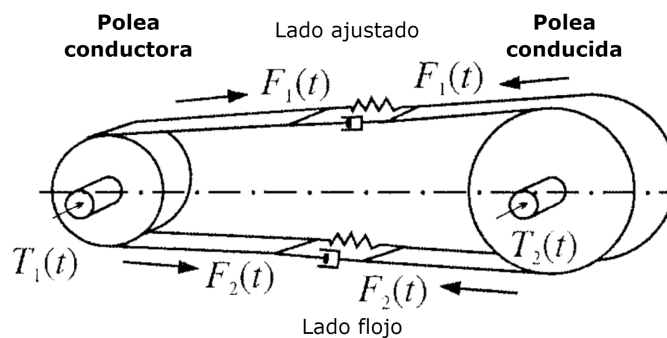


Figura 2.13: Transmisión por bandas.

Capítulo 3

Modelo del sistema

En este capítulo se presenta los modelos matemáticos de los principales elementos que componen el sistema de tracción eléctrico. Primero se desarrolla el modelo matemático de un motor BLDC a partir de los voltajes de cada fase. Este modelo nos permitirá más adelante proponer una estrategia de control por rechazo activo de perturbaciones. Se continúa con el modelo matemático de un codificador incremental ya que es el punto de partida para la selección de las unidades de control. Por último, presenta el modelo matemático de un sistema de transmisión por banda con dos poleas conductoras, considerándolo como un elemento transformador con un comportamiento resorte-amortiguador.

3.1. Modelo del motor BLDC y planitud diferencial

El modelo matemático de un motor de CD sin escobillas se puede desarrollar de manera similar al de una máquina síncrona trifásica. A continuación se presenta tal modelo con la tabla 3.1 que describe todos los parámetros involucrados [7], [17] y [16].

Considerando el circuito eléctrico del motor el voltaje en cada fase es el siguiente:

$$v_x = R_x i_x + e_x \quad (3.1)$$

donde x representa las fases A, B, C , v_x el voltaje de fase, I_x , la corriente de fase, e_x es la fuerza electromotriz inducida (FEM) en cada fase y R_x es la resistencia en cada devanado.

A partir de la ecuación 3.1 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:

$$\begin{cases} v_a = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_a \\ v_b = R_b i_b + L_s \frac{di_b}{dt} + e_b \\ v_c = R_c i_c + L_s \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (3.2)$$

En esta ecuación, $L_s = L - M$, 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 $L_s \frac{di_x}{dt} \rightarrow 0$ entonces se tiene:

Parámetro	Descripción
v_a, v_b, v_c	Voltajes de fase terminal [V]
R_s	Resistencia del estator [Ω]
L_s	Inductancia del estator [H]
i_a, i_b, i_c	Corrientes de fase de entrada [A]
e_a, e_b, e_c	Fuerzas electromotrices de motor [V]
K_e	Constante de fuerza electromotriz [V*s/rad]
θ_e	Ángulo del rotor eléctrico [rad]
ω	Velocidad del rotor [rad/s]
θ_m	Ángulo del rotor mecánico [rad]
p	Polos
T_e	Par electromagnético desarrollado por el motor [N*m]
T_L	Par aplicado al eje del motor [N*m]
J	Momento de inercia del rotor [Kg*m ²]
B	Constante de fricción de Coulomb [N*m*s/rad]

Tabla 3.1: Parámetros del sistema

$$\begin{cases} i_a = \frac{v_a - e_a}{R_s} \\ i_b = \frac{v_b - e_b}{R_s} \\ i_c = \frac{v_c - e_c}{R_s} \end{cases} \quad (3.3)$$

La fuerza electromotriz está en función de la posición del rotor y cada fase tiene una diferencia de 120° , como se describe en seguida.

$$\begin{cases} e_a = K_e f(\theta_e) \omega \\ e_b = K_e f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \omega \\ e_c = K_e f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \omega \end{cases} \quad (3.4)$$

donde f es una función sinusoidal o trapezoidal dependiendo del motor. Para este trabajo se mostrará más adelante su implementación como una función trapezoidal.

El ángulo del rotor eléctrico se relación de la siguiente manera.

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m \quad (3.5)$$

El par de salida total se obtiene de la siguiente relación.

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (3.6)$$

Por último, utilizando las leyes de movimiento de Newton se relacionan dinámicas eléctrica y mecánica del motor con la siguiente ecuación.

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3.7)$$

El modelo dinámico del motor BLDC en términos de la velocidad angular se obtiene al sustituir las ecuaciones 3.3 y 3.6 en 3.7 y considerando $e_{a,b,c} = K_e \omega$:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{K_{eb}^2}{R_s} + \frac{K_{ec}^2}{R_s} + \frac{K_{ea}^2}{R_s} + B \right) \omega + T_L = \left(\frac{K_{eb}}{R_s} v_a + \frac{K_{ec}}{R_s} v_b + \frac{K_{ea}}{R_s} v_c \right) \quad (3.8)$$

Para realizar la parametrización diferencial del modelo dinámico se define $\omega = F$, $\gamma = \frac{K_{eb}^2}{R_s} + \frac{K_{ec}^2}{R_s} + \frac{K_{ea}^2}{R_s} + B$ y $K_{e(a,b,c)} = K_e$, con el fin de simplificar el diseño del controlador. De esta forma se obtiene:

$$J\dot{F} + \gamma F + T_L = \frac{K_e}{R_s} (v_a + v_b + v_c) \quad (3.9)$$

$$\frac{JR_s}{K_e} \dot{F} + \frac{\gamma R_s}{K_e} F + \frac{R_s}{K_e} T_L = U \quad (3.10)$$

donde $U = v_a + v_b + v_c$ es entrada de control.

3.2. Modelo matemático de un codificador incremental

La señal de entrada del codificador incremental es la posición angular θ de su eje con respecto al eje de referencia fijo. Las señales de salida son los dos pulsos desfasados $\theta_p/4$, $A(\theta)$ y $B(\theta)$, así como la señal de referencia $Z(\theta)$, como se muestra a continuación.

$$A(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < \text{módulo}_{\theta_p}(\theta) < \frac{\theta_p}{2} \\ 0 & \text{si } \frac{\theta_p}{2} < \text{módulo}_{\theta_p}(\theta) < \theta_p \end{cases} \quad (3.11)$$

$$B(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < \text{módulo}_{\theta_p}(\theta - \frac{\theta_p}{4}) < \frac{\theta_p}{2} \\ 0 & \text{si } \frac{\theta_p}{2} < \text{módulo}_{\theta_p}(\theta - \frac{\theta_p}{4}) < \theta_p \end{cases} \quad (3.12)$$

$$Z(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \text{módulo}_{\theta_p}(\theta) = 0 \\ 0 & \text{si } \text{módulo}_{\theta_p}(\theta) \neq 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

Durante un ángulo de rotación del eje, igual al paso angular de graduación θ_p , hay cuatro eventos de conmutación en los pulsos de salida; por lo tanto, el incremento del ángulo de rotación mínimo detectable por el codificador es θ_p . Por lo que el número de pulsos por revolución (PPR) es:

$$N_r = \frac{2\pi}{\theta_p} \quad (3.14)$$

La frecuencia de las señales de salida del codificador es:

$$f_A = f_B = \frac{\omega}{2\pi} N_r \quad (3.15)$$

donde ω es la velocidad angular del eje de rotación.

3.3. Modelo de la transmisión por banda

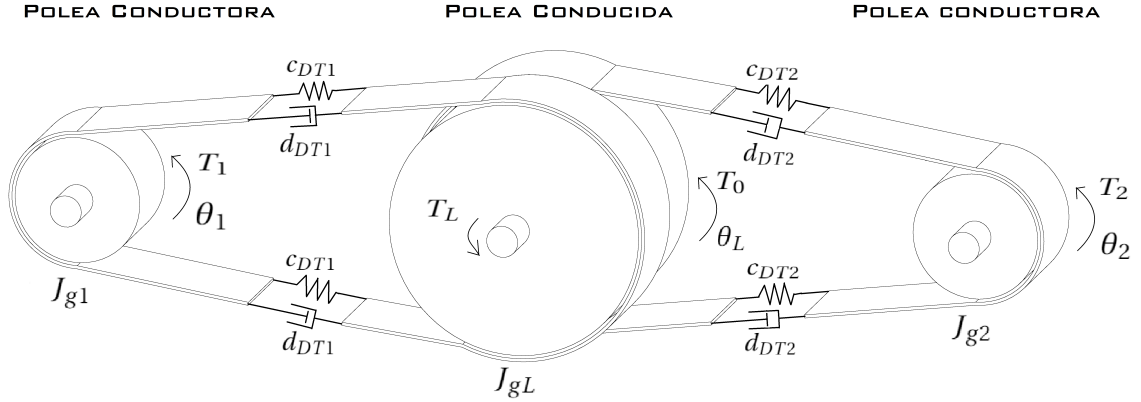


Figura 3.1: Sistema de transmisión de bandas con dos poleas conductoras.

Para este trabajo con el fin de realizar implementar una estrategia de control colaborativo se usará un sistema de tracción de bandas dentadas, siendo más específico, bandas de sincronización en donde habrá dos poleas conductoras y una polea conducida (figura 3.1).

El modelo matemático de este sistema de tracción es el que se muestra en la ecuación 3.16, donde el subíndice i es 0 para la polea conducida y 1 y 2 para las poleas conductoras. La descripción de los parámetros se detallan en la tabla 3.2.

$$\begin{cases} J_{g1}\ddot{\theta}_1 = -d_{DT1}(\dot{\theta}_1 - j_1\dot{\theta}_0) - c_{DT1}(\theta_1 - j_1\theta_0) + T_1 \\ J_{g2}\ddot{\theta}_2 = -d_{DT2}(\dot{\theta}_2 - j_2\dot{\theta}_0) - c_{DT2}(\theta_2 - j_2\theta_0) + T_2 \\ J_{g0}\ddot{\theta}_L = j_1 [d_{DT1}(\dot{\theta}_1 + j_1\dot{\theta}_0) + c_{DT1}(\theta_1 - j_1\theta_0)] \\ \quad + j_2 [d_{DT2}(\dot{\theta}_2 - j_2\dot{\theta}_0) + c_{DT2}(\theta_2 - j_2\theta_0)] + T_L - T_0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Parámetro	Descripción
θ_i	Posición angular [rad]
J_{gi}	Momento de inercia [N]
T_i	Par par generado polea i [Nm]
T_L	Par de carga aplicado en polea principal [Nm]

Tabla 3.2: Parámetros del sistema de transmisión de bandas.

donde

$$c_{DTi} = \frac{d_{wi}^2}{2} c_R \quad (3.17)$$

$$d_{DTi} = \frac{d_{wi}^2}{2} d_R \quad (3.18)$$

son la rigidez de torsión dinámica y el factor de amortiguamiento, respectivamente. La relación de transmisión de banda es

$$j_i = \frac{d_{w0}}{d_{wi}} \quad (3.19)$$

La rigidez del resorte de la correa c_{R_i} se puede estimar como

$$c_{R_i} = \frac{EA_i}{l_{R_i}} \quad (3.20)$$

donde EA_i es el factor de rigidez de la banda y l_{R_i} es la longitud en el lado apretado o flojo de la banda.

El coeficiente de amortiguamiento de la banda d_{R_i} se puede calcular como

$$d_{R_i} = \frac{\Upsilon_i c_{R_i}}{2\pi\dot{\theta}_i} \quad (3.21)$$

donde Υ_1 es la amortiguación relativa de la banda y $\dot{\theta}_i$ es la velocidad angular de la polea motriz en el punto de operación.

Capítulo 4

Desarrollo de la estrategia de control

Este capítulo define la propuesta de control para el sistema de tracción multi-motor. Primero se diseña el lazo de control con rechazo activo de perturbaciones con una ley de control de velocidad en regulación de un motor BLDC. Posteriormente se agregan las características de sincronización de velocidad angular, repartición de par y comunicación disparada por eventos para múltiples motores.

4.1. Control por rechazo activo de perturbaciones

Reordenando el modelo del motor BLDC que se muestra en la ecuación 4.1 se tiene:

$$\dot{F} = \frac{K_e}{JR} U - \frac{\gamma}{J} F - \frac{1}{J} T_L \quad (4.1)$$

En esta ecuación, $\zeta = -\frac{\gamma R}{K_e} F - \frac{R}{K_e} T_L$ contiene la dinámica de las perturbaciones tanto endógenas como exógenas desconocidas. Por otro lado simplificando $\alpha = \frac{K_e}{JR}$ el modelo se reduce a:

$$\dot{F} = \alpha U + \zeta \quad (4.2)$$

4.1.1. Estimador

Puesto que no se conoce el término ζ se propone un observador de estado extendido (*ESO*) como se muestra a continuación:

$$\begin{cases} \dot{\hat{F}}_i = \alpha_i U_i + \eta_{1,i} + l_{2,i} (F_i - \hat{F}_i) \\ \dot{\eta}_{1,i} = \eta_{2,i} + l_{1,i} (F_i - \hat{F}_i) \\ \dot{\eta}_{2,i} = l_{0,i} (F_i - \hat{F}_i) \end{cases} \quad (4.3)$$

donde \hat{F} es la estimación de la velocidad, η_1 y η_2 son estimaciones de la perturbación, en cuanto a l_0 , l_1 y l_2 se les conoce como ganancias del observador, las cuales son constantes positivas y se obtienen con un polinomio Hurwitz. Por último el subíndice i se refiere al i -ésimo agente.

Además del observador de estado extendido se propone estimar el par aplicado al motor mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{T}_{L_i} = \frac{K_{e_i}}{R_i} \left(\eta_{1,i} - \left(3K_{e_i} + \frac{B_i R_i}{K_{e_i}} \hat{F}_i \right) \right) \quad (4.4)$$

4.1.2. Ley de control

Por último, se propone la señal de control de velocidad:

$$U_i = \frac{u_i - \eta_{1,i}}{\alpha_i} \quad (4.5)$$

donde u_i se define de siguiente forma:

$$u_i = k_i (F_d - F_i) \quad \text{en regulación} \quad (4.6)$$

donde F_d es la velocidad de referencia y k_i es la ganancia de control.

En la ecuación 4.6, el término $k_i (F_d - F_i)$ es la retroalimentación (o *Feedback*).

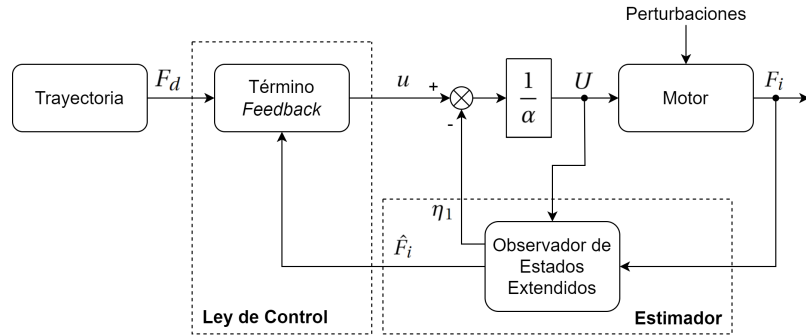


Figura 4.1: Esquema de control por ADRC.

4.2. Control colaborativo distribuido y disparado por eventos

Para el caso de control colaborativo de múltiples motores se proponen las siguientes leyes de control:

4.2.1. Sincronización de velocidad angular

$$u_i = k_i \sum_{j=1}^{N_i} (m_j - m_i) + g_i (F_d - m_i) \quad (4.7)$$

donde k y g son las ganancias de control, m la memoria de la estimación de la velocidad, i representa el i -ésimo agente y j el j -ésimo agente.

La función de evento está dada por:

$$e_i(\hat{F}_i, m_i) = |\bar{e}_i| - \delta \quad (4.8)$$

con $\bar{e}_i = m_i - \hat{F}_i$, siendo δ el umbral de activación de la función de evento para la sincronización de velocidad angular.

Entonces, cuando la función de evento se cumple, es decir, $e_i > 0$, el estado del agente i (\hat{F}_i) es guardado como una memoria m_i y se transmite a los agentes vecinos.

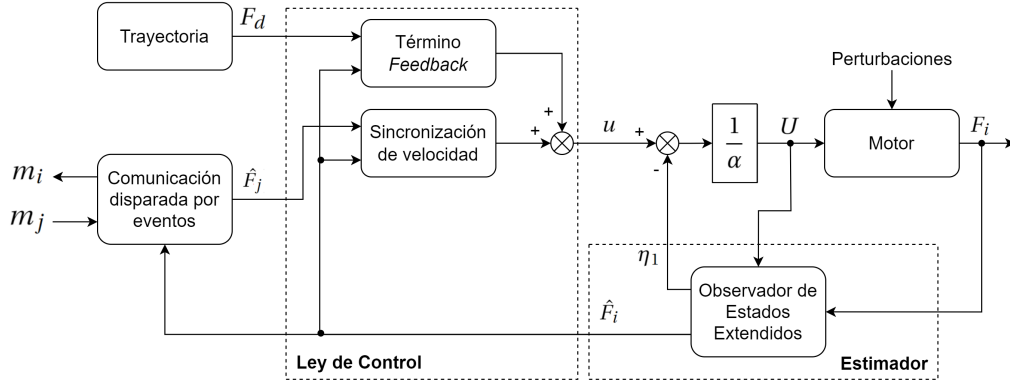


Figura 4.2: Esquema de control por ADRC con sincronización de velocidad angular.

4.2.2. Sincronización de velocidad angular y repartición de par

$$u_i = \sum_{j=1}^{N_i} [k_i (m_{F,j} - m_{F,i}) + s_i (m_{T,j} - m_{T,i})] + g_i (F_d - m_{F,i}) \quad (4.9)$$

donde k , g y s son las ganancias de control, m_F la memoria de la estimación de la velocidad, m_T la memoria de la estimación de par, i representa el i -ésimo agente y j el j -ésimo agente.

La función de evento está dada por:

$$\begin{cases} e_{F,i}(\hat{F}_i, m_{F,i}) = |\bar{e}_{F,i}| - \delta_F \\ e_{T,i}(\hat{T}_{L,i}, m_{T,i}) = |\bar{e}_{T,i}| - \delta_T \end{cases} \quad (4.10)$$

con $\bar{e}_{F,i} = m_{F,i} - \hat{F}_i$, $\bar{e}_{T,i} = m_{T,i} - \hat{T}_{L,i}$, siendo δ_F el umbral de activación de la función de evento para la sincronización de velocidad angular y δ_T el umbral de activación de la función de evento para la sincronización de par.

Entonces, cuando la función de evento se cumple, es decir, $e_{F,i} > 0$ ó $e_{T,i} > 0$, los estados del agente i (\hat{F}_i y $\hat{T}_{L,i}$) son almacenados como una memoria $m_i = [m_{F,i}, m_{T,i}]$ y se transmite a los agentes vecinos.

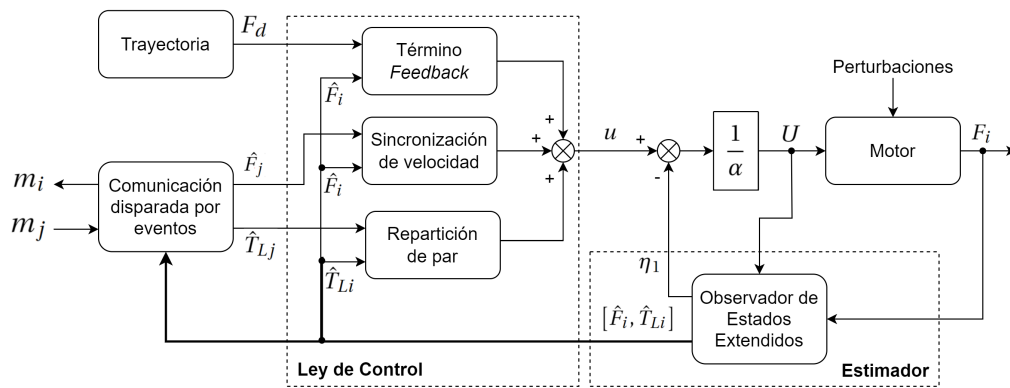


Figura 4.3: Esquema de control por ADRC con sincronización de velocidad y repartición de par.

Capítulo 5

Resultados experimentales

En este capítulo se describen detalladamente las diferentes pruebas de control que se realizaron, así como se muestran y se discuten brevemente sus respectivos resultados. Estos casos de control presentan de forma creciente en cuanto hardware, complejidad de control, número de agentes y elementos mecánicos hasta tener un sistema de control que cumpla con los requerimientos.

Se aborda el proyecto desde un enfoque distribuido y con comunicación basada en eventos. Por lo que se propone una interfaz de comunicación que está integrada en la mayoría de los microcontroladores modernos que simplifica el cableado y reduce el costo.

Además de enfoque distribuido, se utilizó un sistema operativo de tiempo real (RTOS) que nos permitió ejecutar varias tareas en paralelo. En general se usaron tres subprocesos: el primero para el control, el segundo para la comunicación entre los agentes y el tercero para la comunicación con la PC.

Los casos de control presentados en este documento corresponden a un control de velocidad en regulación. Por lo que todos los casos la trayectoria se define como una función definida a trozos. Esto en un principio reducirá el ancho de banda de la comunicación y los recursos computacionales de las unidades de control para evaluar en primera instancia las leyes de control propuestas.

En general se tienen respuestas de velocidad sub-amortiguada pueden mejorar significativamente en términos de sobrepaso máximo, tiempo de asentamiento y tiempo de subida, tan sólo con sintonizar las ganancias del observador. Sin embargo, mantenemos la sintonización de las ganancias de observador que se especifican más adelante para no comprometer la fuente y los inversores.

Vídeos

A continuación se desglosan las pruebas de control realizadas junto con enlaces de vídeos que ilustran su implementación. Los mismos casos de control se presentan en el anexo de simulaciones.

1. Control de motor BLDC con sensores Hall
<https://youtu.be/IEdHIkNRx3s>
<https://youtu.be/F-4Rogu4c00>
2. Control ADRC
https://youtu.be/wkzcl_DlvFk
3. Control ADRC con transmisión por banda
<https://youtu.be/Xmv2Asm7WXE>
4. Control ADRC de múltiples motores
<https://youtu.be/LCo7nGBpDDI>
5. Control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores
<https://youtu.be/Iu3Tt2m-VRI>
6. Control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores
https://youtu.be/XydcS_GcDoo

5.1. Control de motor BLDC con sensores Hall

Como primer caso de implementación conviene empezar con el control un motor BLDC con sensores, cuyo diagrama a bloques se detalla en la figura 5.1. El objetivo principal de este control es conmutar adecuadamente las fases del motor para controlar su velocidad y dirección de giro.

En un principio se observa un motor BLDC cuyo eje está acoplado a un encoder incremental de eje hueco 5.2, el cual simplifica el ensamble. Este encoder está configurado a 120 PPR. Además se aplicará voltaje a las fases del motor por medio de un inversor trifásico en función de 6 señales PWM. También se observa que se tiene un sensor de corriente en la alimentación del inversor.

La unidad de control está distribuida en dos microcontroladores ARM de 32-bit con el fin de repartir las tareas del sistema en general, y al mismo tiempo, para que sea apto para otros motores en el mercado que se ofertan con su propio controlador o *driver*, el cual incluye el inversor trifásico, así como su control de velocidad y dirección por diferentes módulos de comunicación.

El CPU Cortex-M4 se encarga de tres subprocesos que no cambian en los diferentes casos de control que se presentan: (1) Leer la señal de control U mediante comuni-

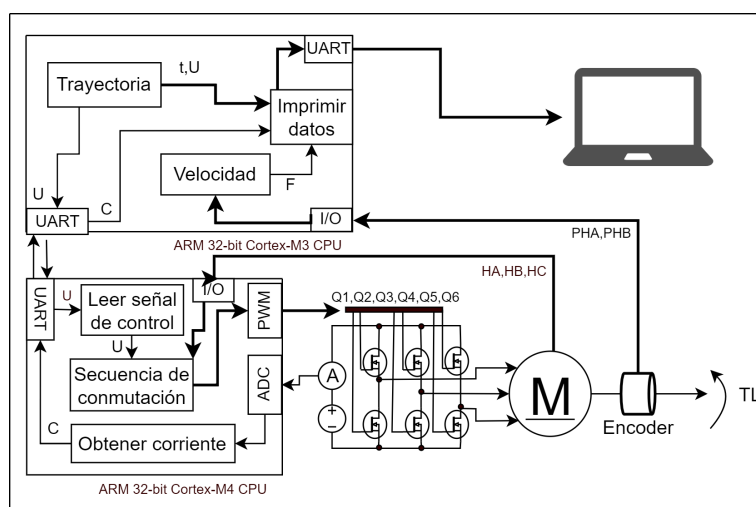


Figura 5.1: Diagrama control de motor BLDC con sensores Hall.

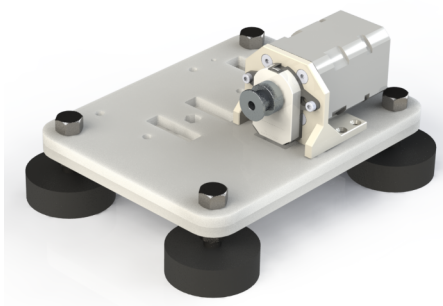


Figura 5.2: Plataforma experimental para control de motor BLDC con sensores Hall y control ADRC.

cación serial. (2) Ejecutar la secuencia de conmutación activada por interrupciones y variando el ciclo de trabajo de los módulos PWM (a 20KHz) que controlan el inversor trifásico en función de la señal de control U . (3) Calcular la corriente aplicando un filtro que consiste en la media aritmética de 600 muestras obtenidas mediante un convertidor analógico-digital y enviar ese dato por comunicación serial al CPU Cortex-M3.

El CPU Cortex-M3 que se encarga de tres subprocesos: (1) Definir y enviar trayectoria al CPU Cortex-M4, así como leer el valor de la corriente por comunicación serial. (2) Realizar la lectura del encoder mediante interrupciones ocupando los 4 flancos de subida y bajada de las fases PHA y PHB para obtener la posición relativa e implementando una derivada filtrada discreta para calcular la velocidad del eje del motor. (3) Enviar los datos: tiempo t , señal de control U , velocidad F y corriente C , mediante comunicación serial, a la PC con el fin de reportar los datos.

En las figuras 5.3 a 5.5 se muestra la respuesta de implementación de control de motores BLDC con sensores Hall con los dos motores disponibles para este proyecto. Como trayectoria de referencia se tiene una señal de control definida a trozos para mostrar la respuesta del motor ante impulsos escalón con los valores de 24V, 18V y 12V.

La respuesta en modo sin carga corresponde a la establecida en las hoja de datos del fabricante. Se puede notar la diferencia de respuesta de velocidad cuando la señal de control es 18V y 12V, mientras que la diferencia de corriente se nota en los tres escalones.

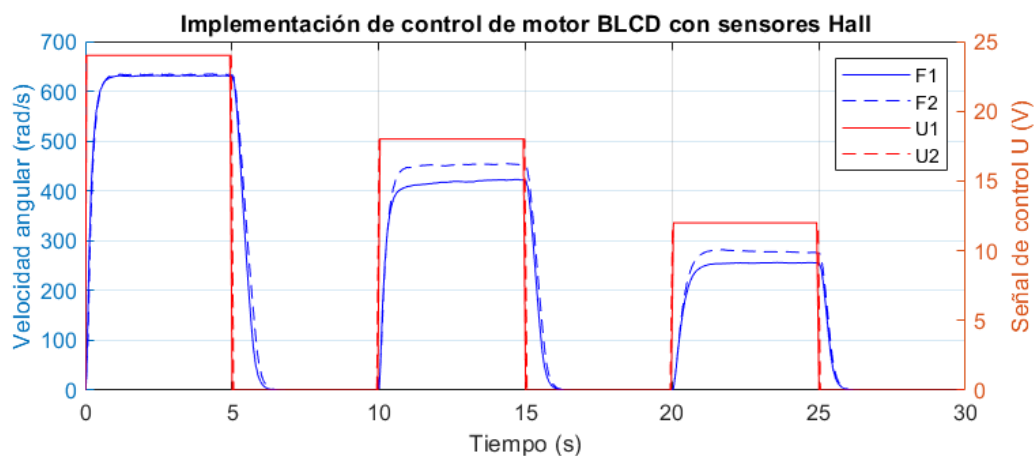


Figura 5.3: Respuesta de implementación de control de motor BLDC con sensores Hall (Velocidad angular y señal de control).

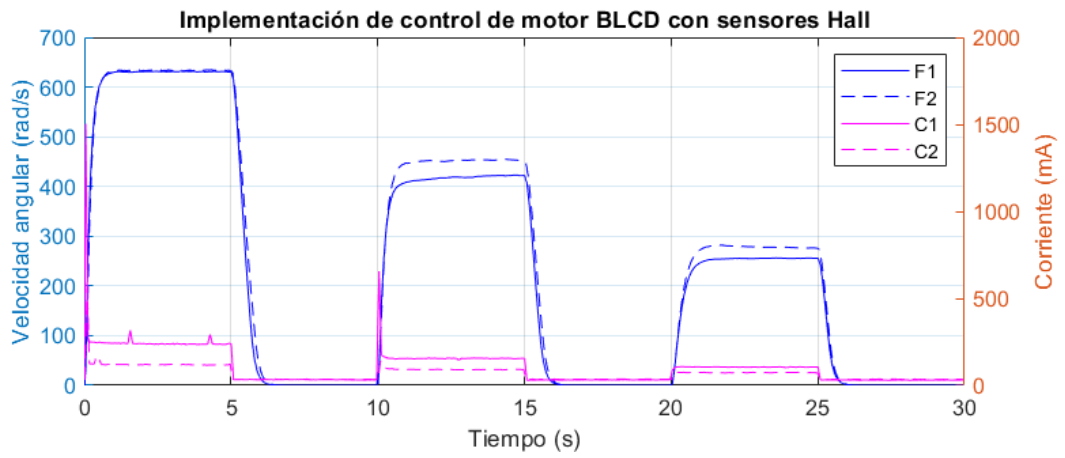


Figura 5.4: Respuesta de implementación de control de motor BLDC con sensores Hall (Velocidad angular y corriente).

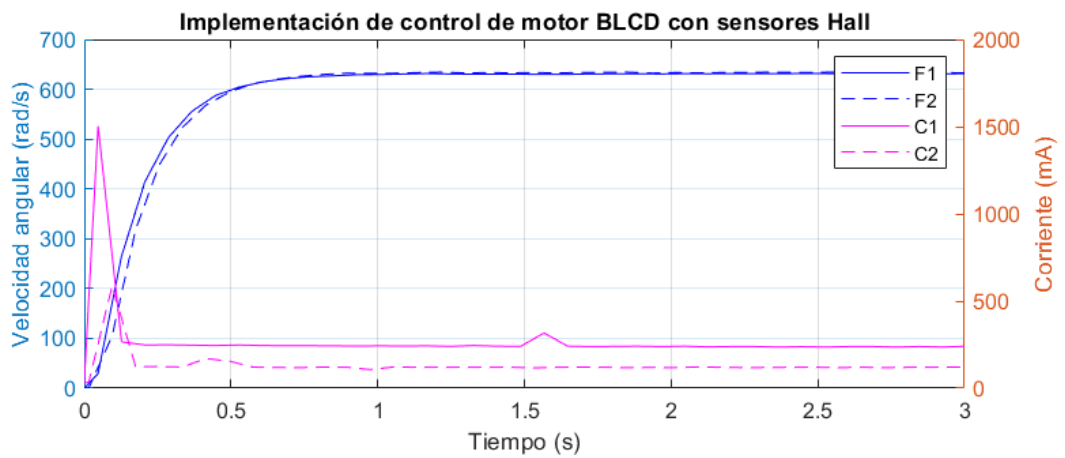


Figura 5.5: Respuesta de implementación de control de motor BLDC con sensores Hall (Velocidad angular y corriente).

5.2. Control ADRC

En esta segunda prueba de control se introduce principalmente el rechazo activo de perturbaciones y la comunicación basada en eventos (figura 5.6). Aunque es un sólo motor conviene introducir los conceptos de agente líder-seguidor debido a que se propone que la trayectoria la dicte como líder un CPU Cortex-M3 diferente.

Este agente líder empezará con dos subprocesos. En el primero transmitirá la trayectoria de velocidad de referencia Fd activada por eventos y mediante un mensaje en un bus de comunicación CAN con un umbral de activación $\delta = 1 \text{ rad/s}$. Y al mismo tiempo, usará una pin digital como bandera para sincronización de los vectores de tiempo de los microcontroladores que enviarán información a PC (Esta sincronización de tiempo es sólo para la adquisición de datos). El segundo subproceso se encarga de enviar los datos a la PC.

El agente seguidor (CPU Cortex-M3) se encarga de tres subprocesos. El primero se encarga de recibir el valor de la velocidad de referencia mediante comunicación CAN. El segundo se encarga del control por rechazo activo de perturbaciones, el cual tiene como entrada la velocidad de referencia Fd y la velocidad del eje de motor F calculada como se describió anteriormente a partir de las fases del encoder, mientras que como salida tiene la señal de control U , la cual envía por comunicación serial al CPU Cortex-M4. Por último, el tercer subproceso se encarga de enviar a la PC los datos: tiempo t_0 , velocidad deseada Fd , velocidad del eje del motor F_1 , señal de control U y estimación de par \hat{T}_{L1} .

En este caso la ganancia de control en la ecuación 4.6 es $k = 10$, por otro lado, como

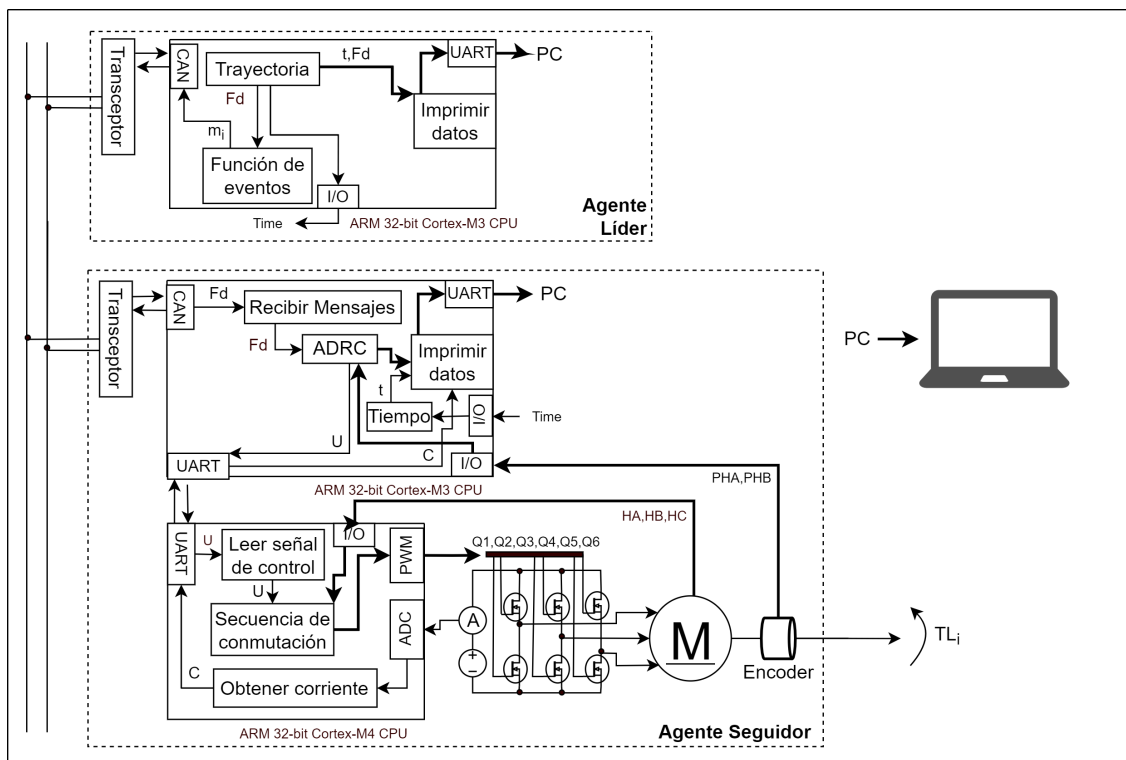


Figura 5.6: Diagrama control ADRC.

ganancias del observador de estado extendido de la ecuación 4.3 se tiene $l_0 = 915,06$, $l_1 = 665,50$, $l_2 = 181,50$.

En las figuras 5.7 a 5.8 se muestra la respuesta de implementación de control ADRC. Lo primero que podemos observar es que tiene una respuesta sub-amortiguada ante la trayectoria tipo escalón de 0 a 90 rad/s .

Esta respuesta del sistema puede mejorar significativamente en términos de sobrepaso máximo, tiempo de asentamiento y tiempo de subida, tan sólo con sintonizar las ganancias del observador. Sin embargo, mantenemos la sintonización de las ganancias de observador propuestas anteriormente para no comprometer la fuente y los inversores.

Otra forma de mejorarla sería reducir los tiempos de ejecución involucrados, es decir, el tiempo de transmisión de la trayectoria Fd , el tiempo de ejecución del ADRC, el tiempo de transmisión de la señal de control y la ejecución de la secuencia de conmutación.

Otro aspecto importante a observar es la respuesta a velocidad cero, la cual se suele omitir en la literatura. En la primera parte de 0 – 10s los estados del observador están inicializados en cero y sólo cambiarían ante una perturbación, por lo que la señal de control continua en cero. Sin embargo en el tiempo de 30 a 40 s el observado de estado extendido ya cuenta con información y parece estar intentando bloquear el eje a velocidad cero. Esto causa una variación en la respuesta escalón de 0 a -100 rad/s . Es más si se continuara la trayectoria en velocidad cero crecería más y más la señal de control hasta hacer un pequeño impulso en la respuesta de velocidad. En general vale la pena estudiar más este caso, puede que incluso sea ruido en alguna señal. Sin embargo, más adelante se propone una solución más práctica.

En la figura 5.8 se observa la estimación de par \hat{T}_L , la cual está en función de la perturbación y la velocidad, por lo que también hay que estudiar más el caso de velocidad cero.

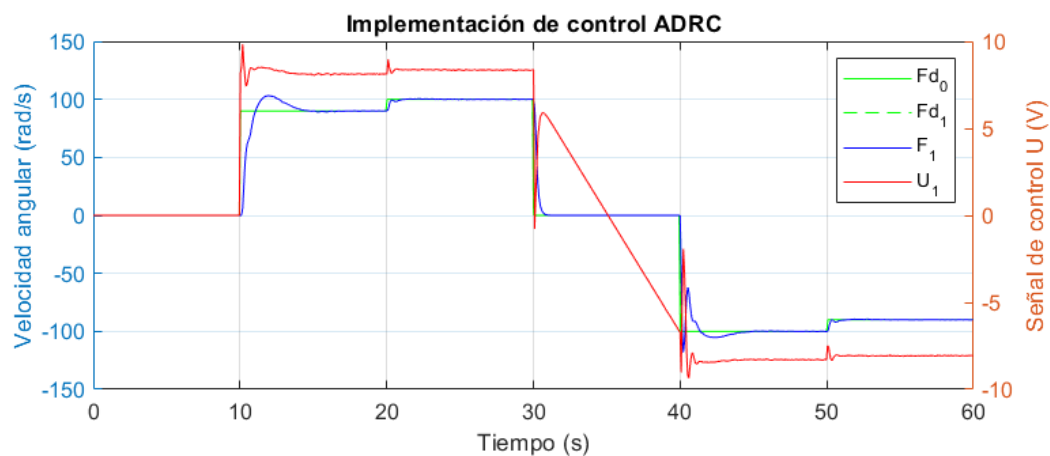


Figura 5.7: Respuesta de implementación de control ADRC (Velocidad angular y señal de control).

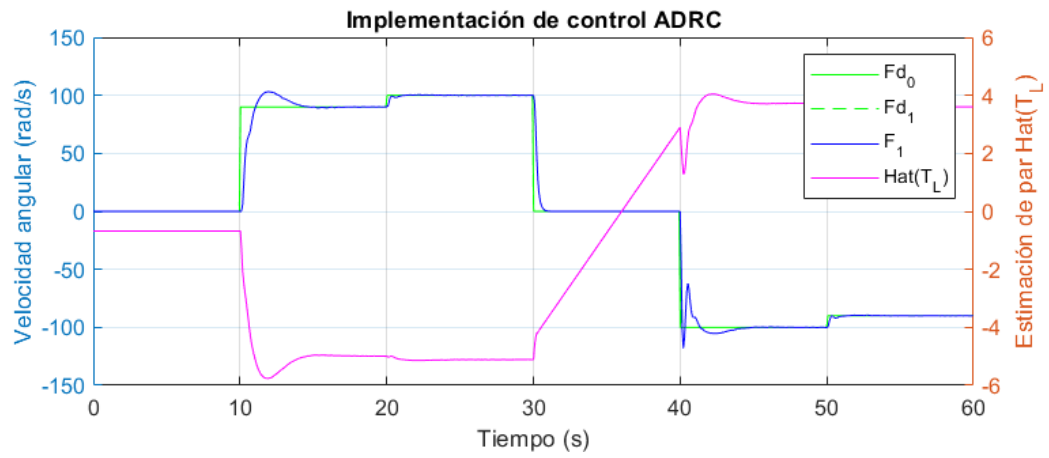


Figura 5.8: Respuesta de implementación de control ADRC (Velocidad angular y estimación de par).

5.3. Control ADRC con transmisión por banda

En este caso de control se agrega la transmisión por banda para mover el eje principal (figuras 5.9 y 5.10). Este eje también tendrá un encoder incremental acoplado y será el agente líder quien se encargue de calcular la velocidad para finalmente enviarla a la PC.

En las figuras 5.11 a 5.12 se muestra la respuesta de implementación de control ADRC con transmisión por banda. El control es el mismo con respecto al caso anterior, por lo que la respuesta es casi la misma, sólo que ahora se agrega la velocidad angular del eje principal F_0 y aumenta la magnitud, tanto de la señal de control, como la estimación de la perturbación. Esto se debe al incremento de par aplicado al motor por el acoplamiento del sistema de tracción.

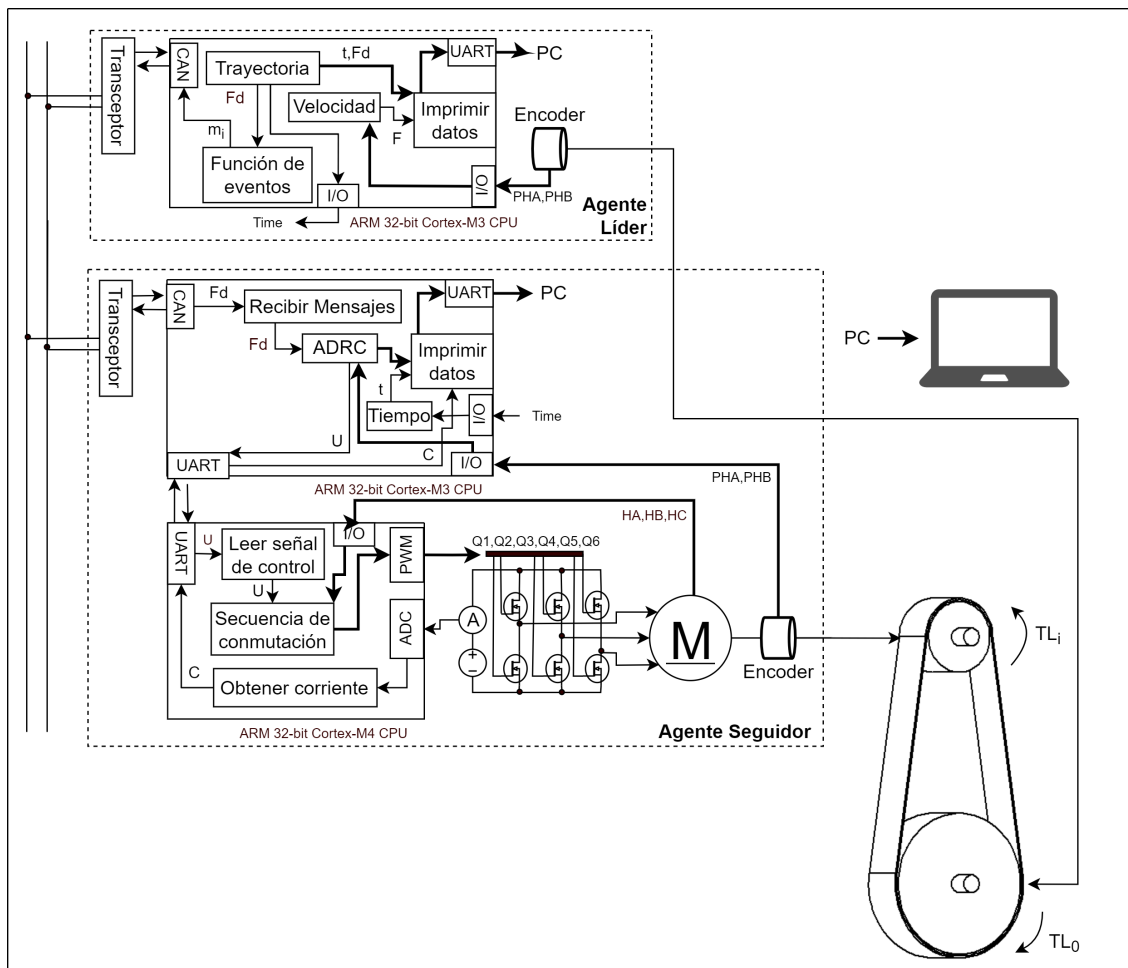


Figura 5.9: Diagrama control ADRC con transmisión por banda.

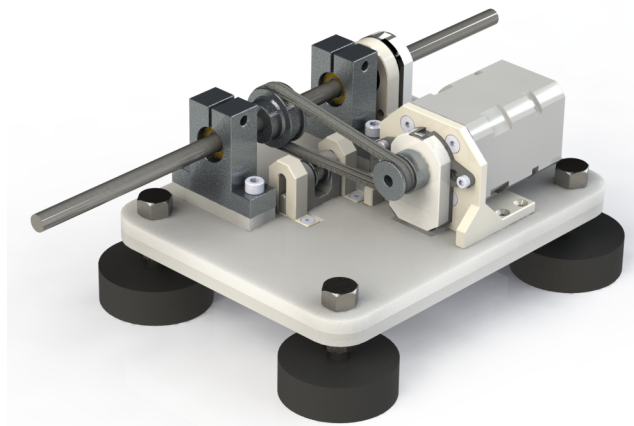


Figura 5.10: Plataforma experimental para control ADRC con transmisión por banda.

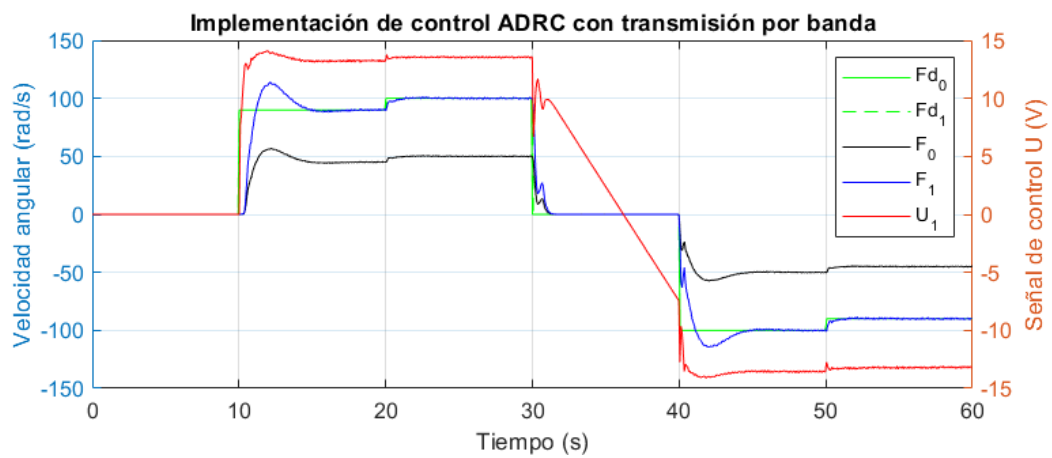


Figura 5.11: Respuesta de implementación de control ADRC con transmisión por banda (Velocidad angular y señal de control).

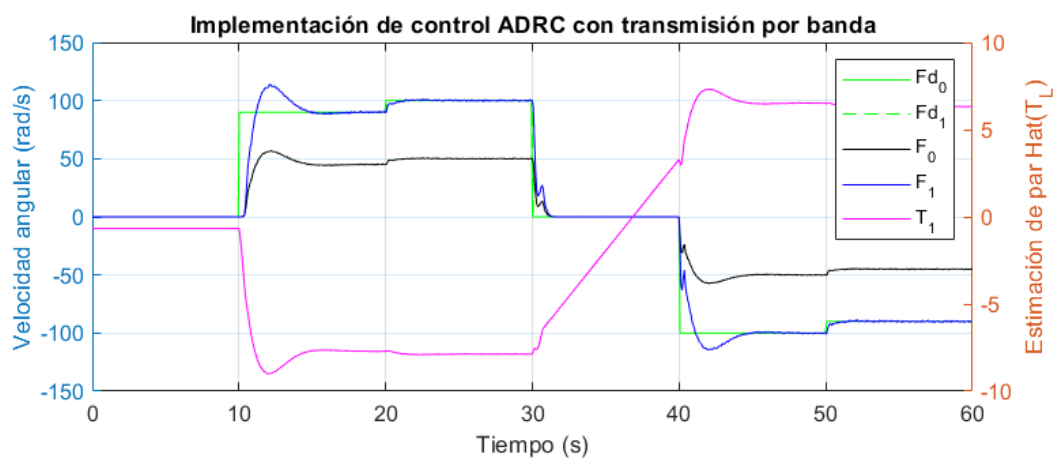


Figura 5.12: Respuesta de implementación de control ADRC con transmisión por banda (Velocidad angular y estimación de par).

5.4. Control ADRC de dos motores

Este cuarto caso de control (figura 5.13 y 5.14) es similar al control de la subsección 5.2, sólo que ahora se tienen tres agentes conectados al mismo bus CAN (un líder y dos seguidores). En este caso no hay un sistema de transmisión por banda y la trayectoria de referencia la reciben los dos agentes seguidores.

Debido a que los dos motores presentaron una pequeña diferencia de respuesta en la subsección 5.1 se cerró el lazo de control con diferentes ganancias en el observador de estado extendido (4.3) para obtener la misma respuesta de velocidad. Para el agente 1 se usaron: $l_0 = 915,06$, $l_1 = 665,50$, $l_2 = 181,50$. Mientras que para el agente 2 se usaron: $l_0 = 703,44$, $l_1 = 546,36$, $l_2 = 159,14$.

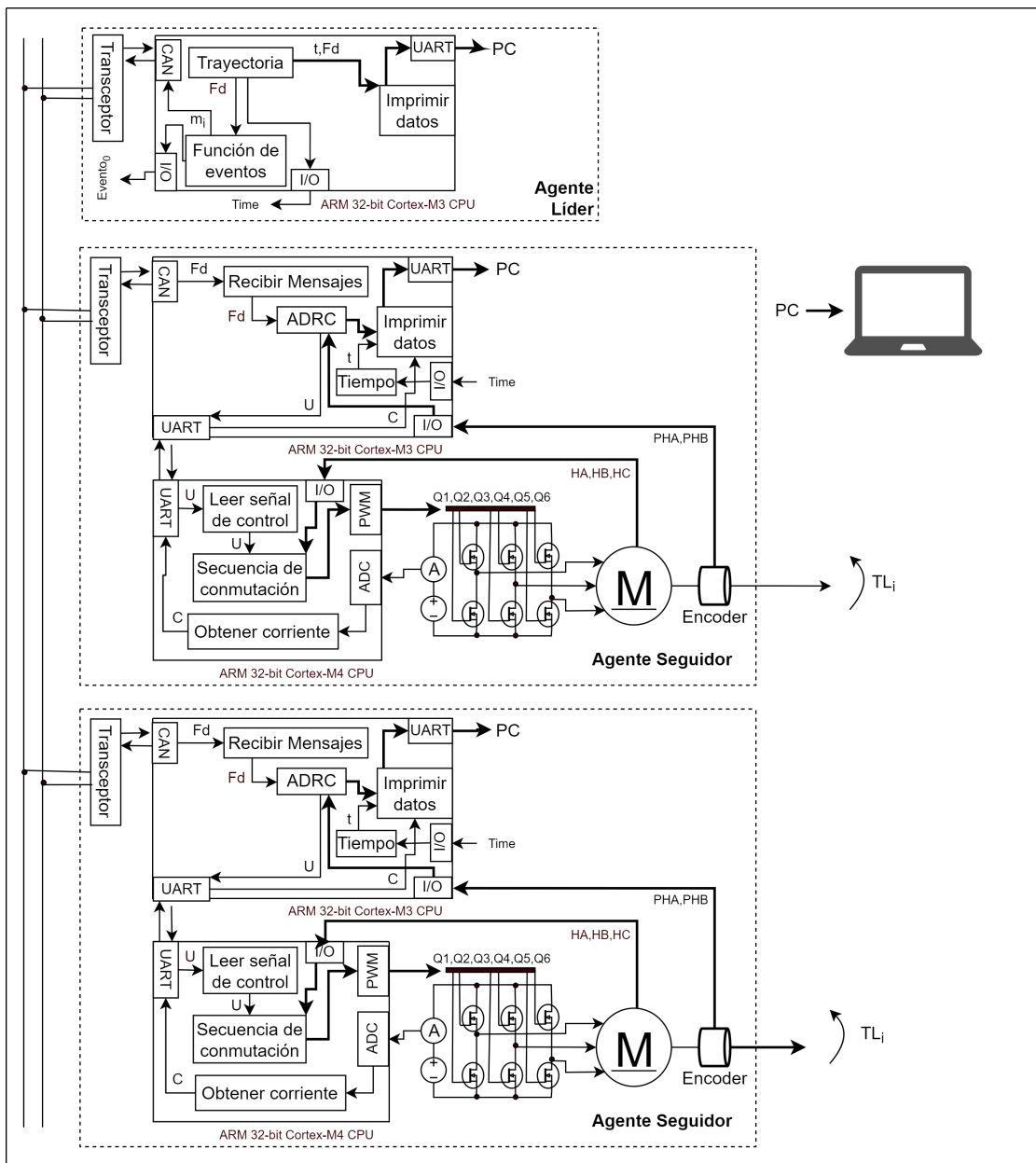


Figura 5.13: Diagrama control ADRC de dos motores.

En las figuras 5.15 a 5.16 se muestra la respuesta de implementación de control ADRC de dos motores. En este caso de control se observa que se obtiene la misma respuesta de velocidad para los dos motores. Sin embargo, se observa una pequeña diferencia entre los dos motores, en cuanto la señal de control y la estimación de par.



Figura 5.14: Plataforma experimental para control ADRC de dos motores.

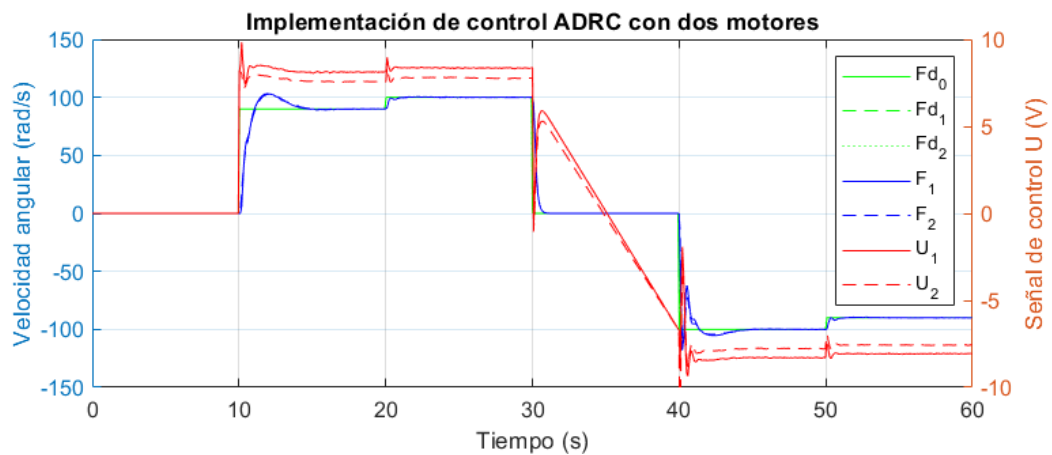


Figura 5.15: Respuesta de implementación de control ADRC de dos motores (Velocidad angular y señal de control).

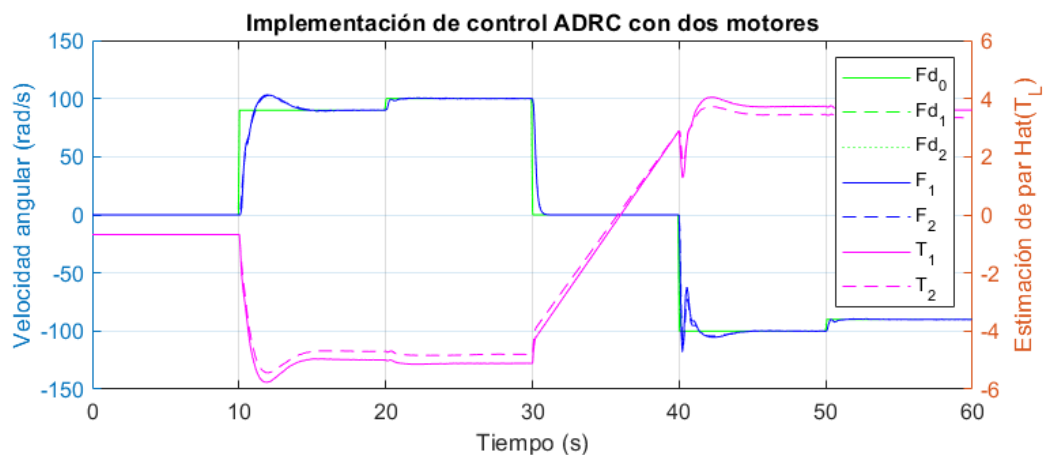


Figura 5.16: Respuesta de implementación de control ADRC de dos motores (Velocidad angular y estimación de par).

5.5. Control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores

En este quinto caso de control (figuras 5.17 y 5.18) se agrega la característica de sincronización de velocidad angular, lo que a su vez involucra que aumente la complejidad del sistema.

Lo primero que se hace es agregar a la ley de control (4.7) un término en función del error con respecto a la velocidad de lo agente vecino. Como ganancias de control para el agente 1 se tiene $k_1 = 1$ y $g_1 = 10$. Para el agente 2 se tiene $k_2 = 40$ y $g_2 = 0$.

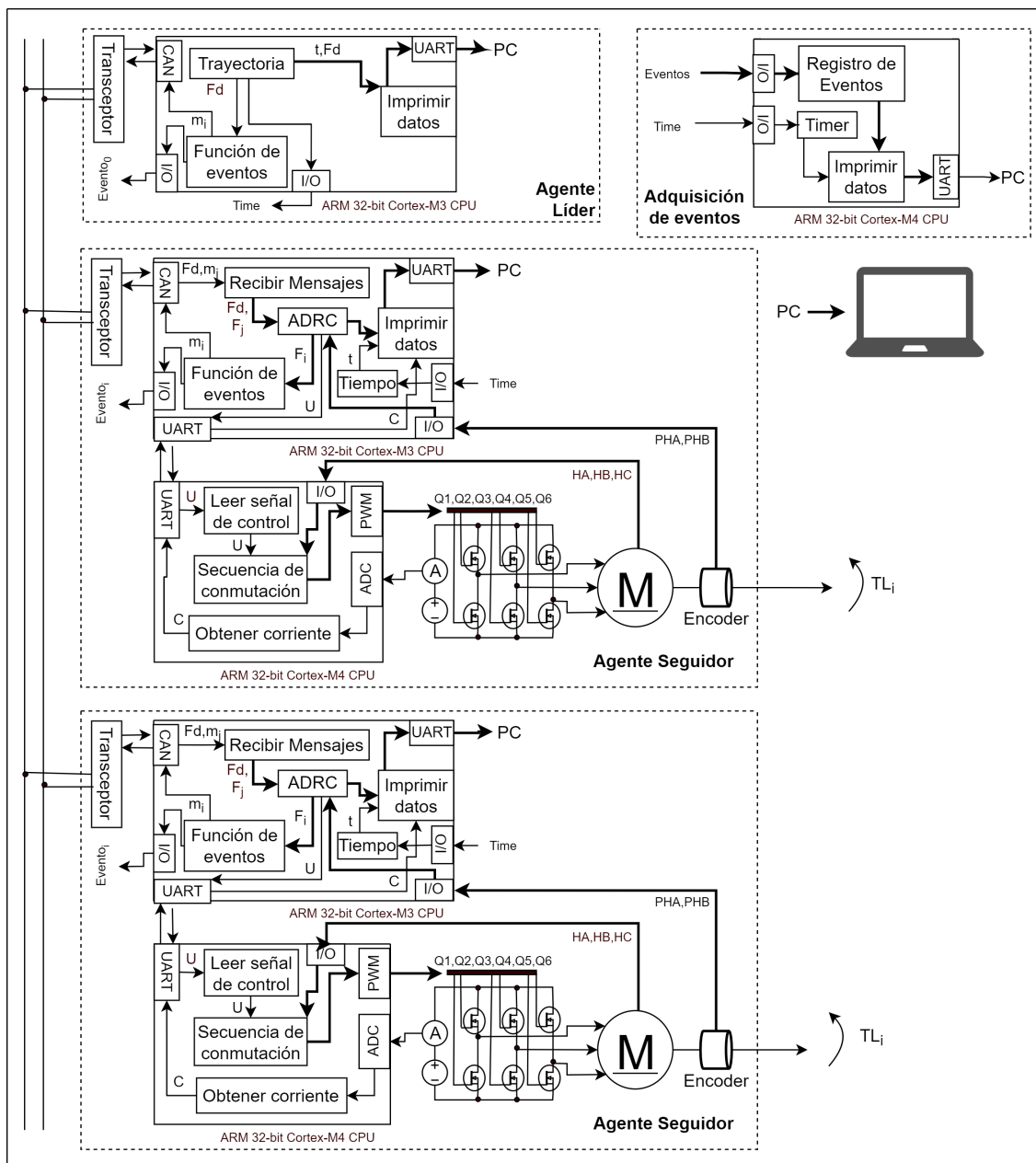


Figura 5.17: Diagrama control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores.



Figura 5.18: Plataforma experimental para control ADRC con sincronización de velocidad de dos motores.

En el i -ésimo agente, la velocidad del j -ésimo agente se recibe por el mismo bus de comunicación CAN empleado para transmitir la trayectoria. Por ende, el i -ésimo agente también necesita compartir su velocidad angular con comunicación basada en eventos con un umbral de activación $\delta = 1 \text{ rad/s}$.

En total en la red hay tres agentes que necesitan compartir la memoria de su estado, es decir $m_0 = Fd$, $m_1 = F_1$ y $m_2 = F_2$ y estos en el bus de comunicación equivalen a tres mensajes diferentes con prioridad de alta a baja, respectivamente.

Esta prioridad se define con un identificador, el cual es un encabezado que se envía antes que los datos. Este identificador se elige para identificar de forma única qué tipo de datos transporta cada mensaje. Los nodos que envían anteponen el identificador a los datos y los nodos que reciben inspeccionan el identificador para ver si el mensaje es de interés y de esta forma asignan el valor recibido a la variable adecuada.

Para propósitos de saber cada cuando se transmiten los mensajes en la red es necesario que cada agente active una bandera de evento ($Event_i$) con un pin digital, de forma que con un sexto microcontrolador se lean los eventos de cada uno de los agentes y se relacionen con un vector de tiempo para posteriormente enviarlos a la PC.

A pesar de que la red CAN permita la transmisión de la trayectoria Fd a cada uno de los agentes, esta estrategia de control propuesta ofrece simplificar la topología de la comunicación eliminando el enlace del agente líder al agente seguidor 2 (figura 5.19) y aún así manteniendo un error de sincronización cercano a cero. Esto se implementa por software en la ley de control del agente haciendo la ganancia $g_2 = 0$.

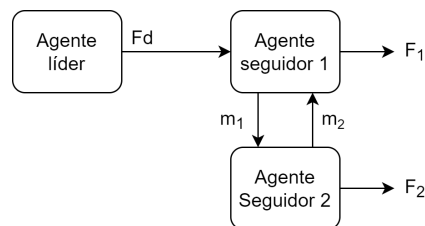


Figura 5.19: Topología de la comunicación para la sincronización de velocidad.

En las figuras 5.20 a 5.22 se muestra la respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores. Aquí se observa que el agente 2 se sincroniza con el agente 1, sin embargo, la simplificación de la topología de la comunicación produce un pequeño retardo de seguimiento. Este pequeño retardo puede ser reducido mejorando la sintonización de las ganancias de la ley de control.

En la figura 5.20 se muestran los eventos en donde el bus de comunicación es usado por cada agente. El agente líder sólo usa el bus en 6 ocasiones, mientras que los agentes seguidores ocupan el bus principalmente cuando se realiza una transición de velocidad y cuando el error converge a cero dejan de usar el bus CAN. Esto definitivamente reduce el ancho de banda con respecto a una comunicación periódica.

Por otro lado, en este caso de control se propone una propuesta práctica para mejorar la respuesta a velocidad cero. Esto se hace igualando a cero los estados estimados del observador de estado extendido cuando se cumple la condición $Fd = 0$ y $F_i = 0$. Esto mejora el sobre paso de la velocidad en el segundo 40 que se presenta en los casos anteriores y mantiene la señal de control en cero el tiempo que la trayectoria es cero.

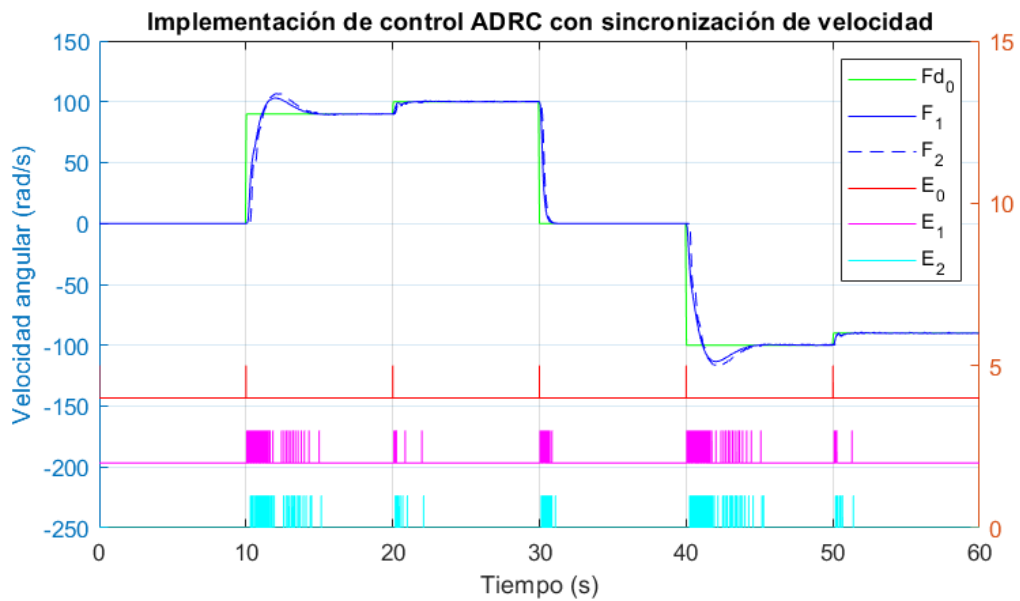


Figura 5.20: Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y eventos).

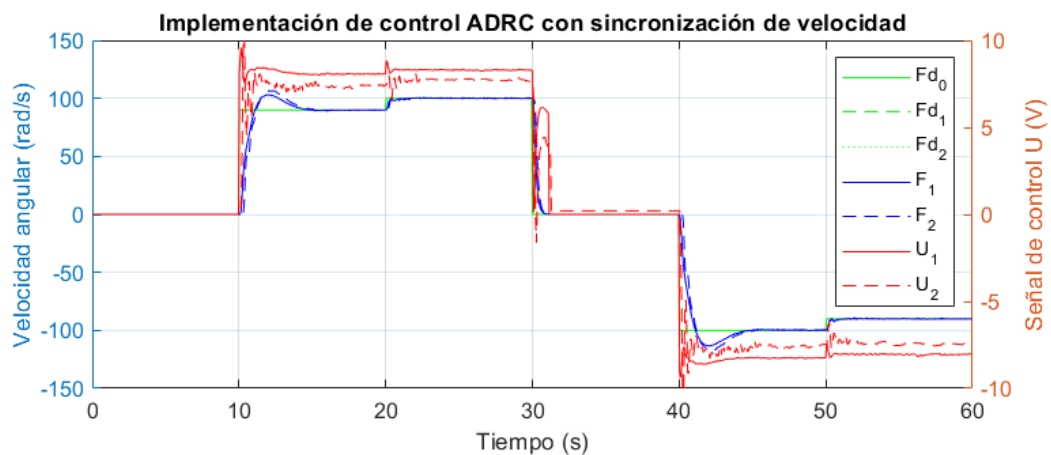


Figura 5.21: Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y señal de control).

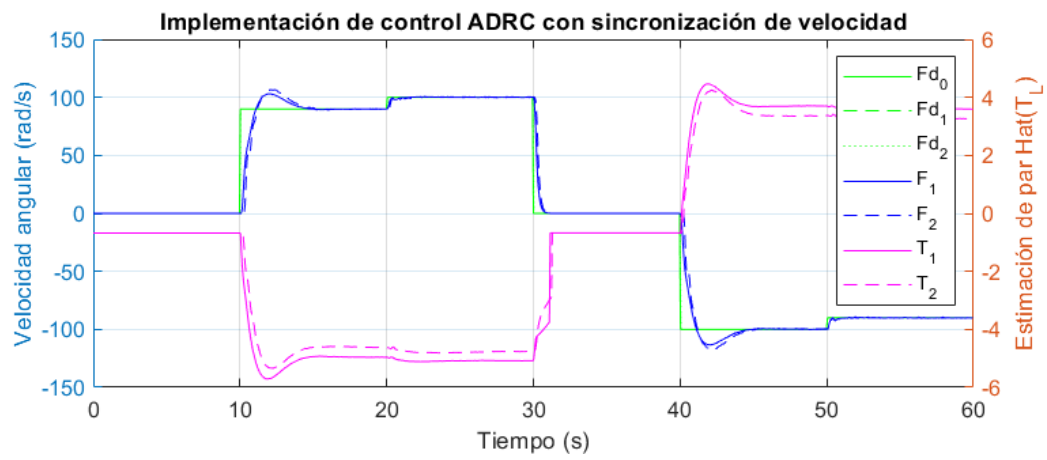


Figura 5.22: Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y estimación de par).

5.6. Control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores

En este último caso de control (figuras 5.23 y 5.24) se agrega la característica de repartición de par entre dos motores que impulsarán un mismo eje por medio de un sistema de tracción multi-motor. Aquí además de que se sincroniza la velocidad angular por software mediante la ley de control, también se sincronizan mecánicamente los motores mediante transmisiones de banda dentada, la cual no genera deslizamiento.

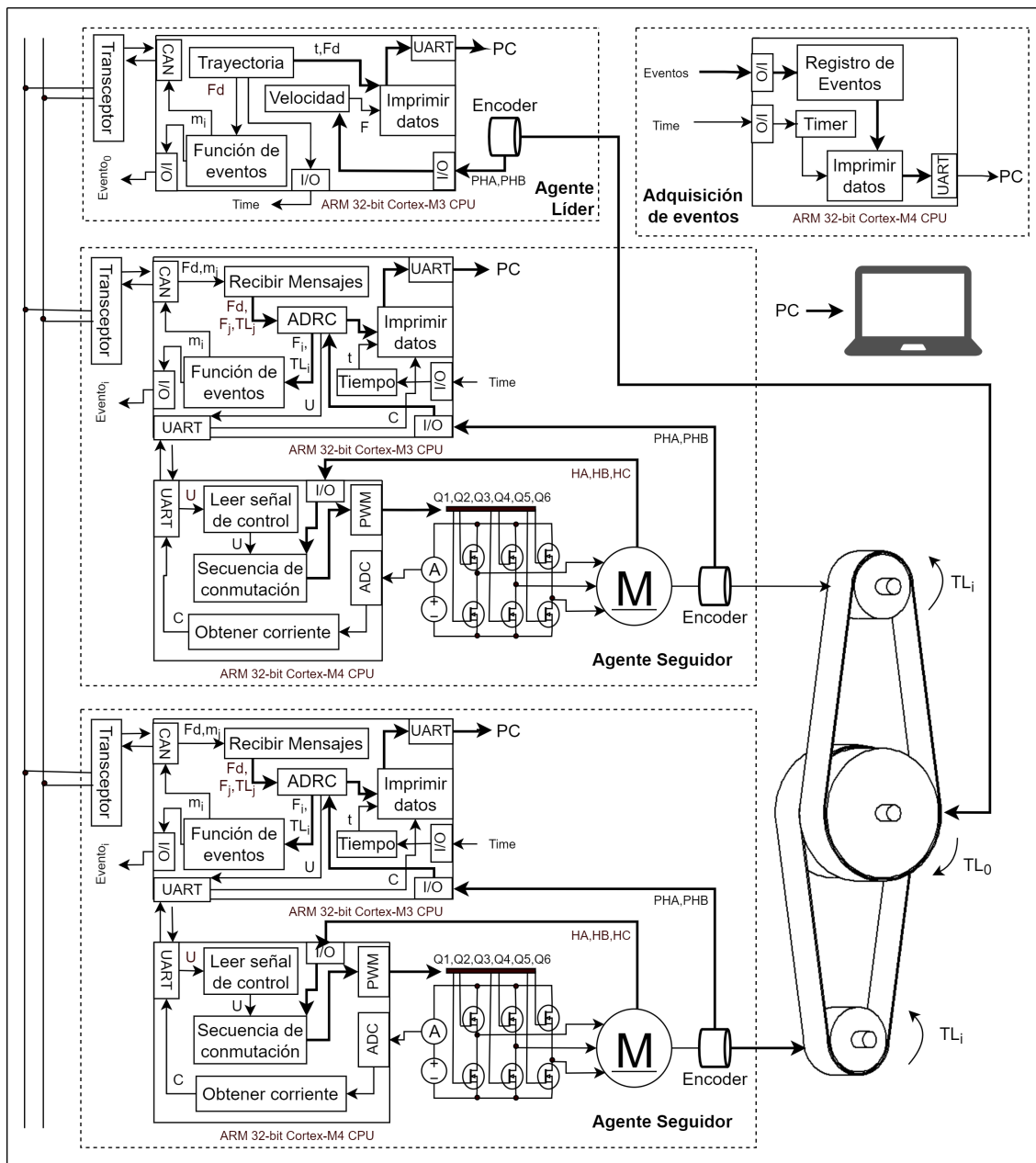


Figura 5.23: Diagrama de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de múltiples motores.

En este caso es necesario agregar a la ley de control (4.9) un término en función del error con respecto a la estimación de par del agente vecino. Como ganancias de control para el agente 1 se tiene $k_1 = 1$, $g_1 = 10$ y $s_1 = 0,1$. Para el agente 2 se tiene $k_2 = 1$, $g_2 = 10$ y $s_2 = 0,1$. Con esta configuración de ganancias establecemos la topología de comunicación que se muestra en la figura 5.25, donde la trayectoria es tomada en cuenta por todos los agentes. Esto con el fin de lograr una mejor sincronización de velocidad por control y no comprometer la fuente e inversores en pruebas tempranas ahora que se agrega el sistema de tracción.

Otro cambio importante es que la función de comunicación disparada por eventos (ecuación 4.10) ahora tiene dos umbrales de activación, $\delta_F = 1 rad/s$ y $\delta_T =$ para ambos agentes. Cada que se activa esta comunicación, se actualizan y se transmiten las memorias $m_{F,i} = \hat{F}_i$ y $m_{T,i} = \hat{T}_{L,i}$. Estas memorias se envían en un sólo mensaje $m_i = [m_{F,i}, m_{T,i}]$ mediante el bus de comunicación.

Otra opción sería, usar dos funciones de eventos, una para cada estado del agente, con su respectivo umbral de activación, en mensajes por separado y con diferente prioridad en el bus CAN. Pero como un sólo paquete CAN puede transportar desde cero hasta 8 bytes de datos y cada estado equivale a 4 byte, resultó conveniente actualizar y enviar los dos estados en el mismo paquete CAN.

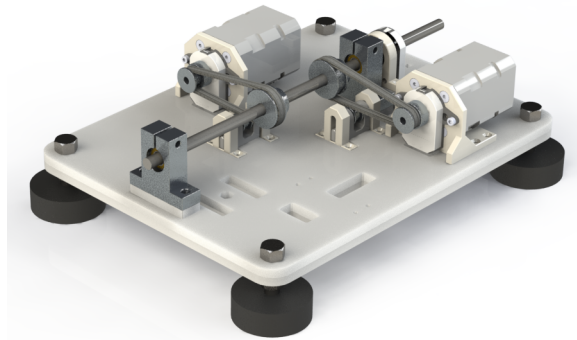


Figura 5.24: Plataforma experimental para control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de múltiples motores.

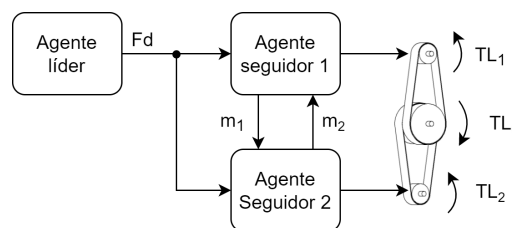


Figura 5.25: Esquema de interconexión entre los agentes.

En las figuras 5.26 a 5.28 se muestra la respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores.

En este caso de control se observa una mejor sincronización de velocidad angular gracias a la sincronización mecánica. También se puede observar que el par introdu-

cido por el sistema de tracción hace que demande una señal de control mayor al caso anterior.

También podemos observar que el sistema mantiene una diferencia de par entre los dos motores. Pero como en simulación si se logró la repartición equitativa de par se concluye que sólo hace falta una mejor sintonización de ganancias de control, así como disminuir el umbral de activación para la estimación de par.

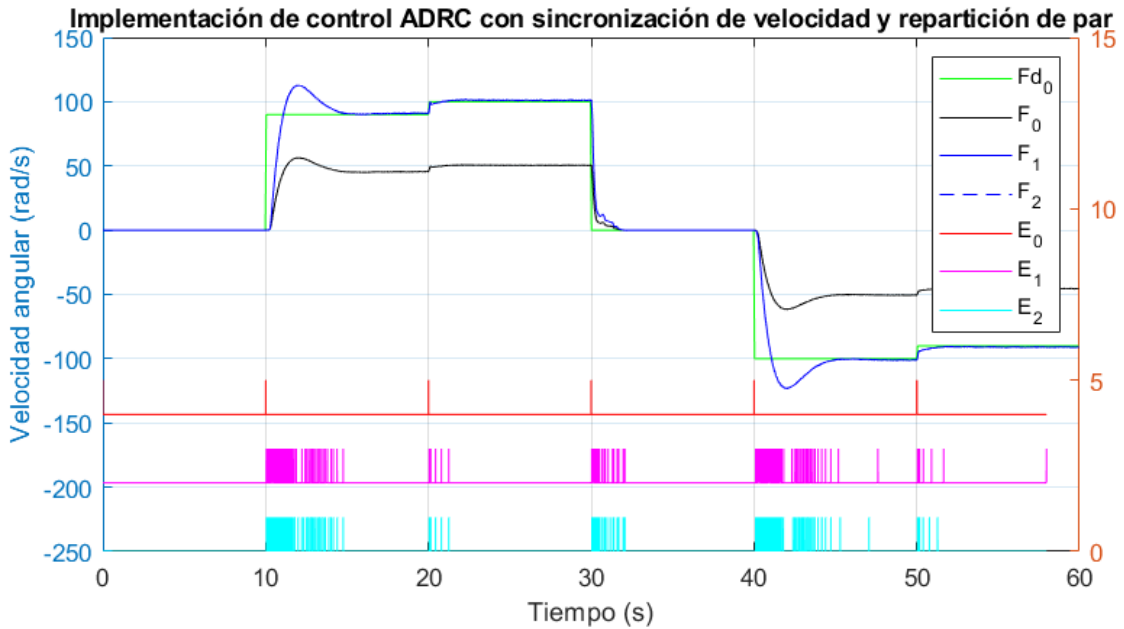


Figura 5.26: Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Velocidad angular y eventos).

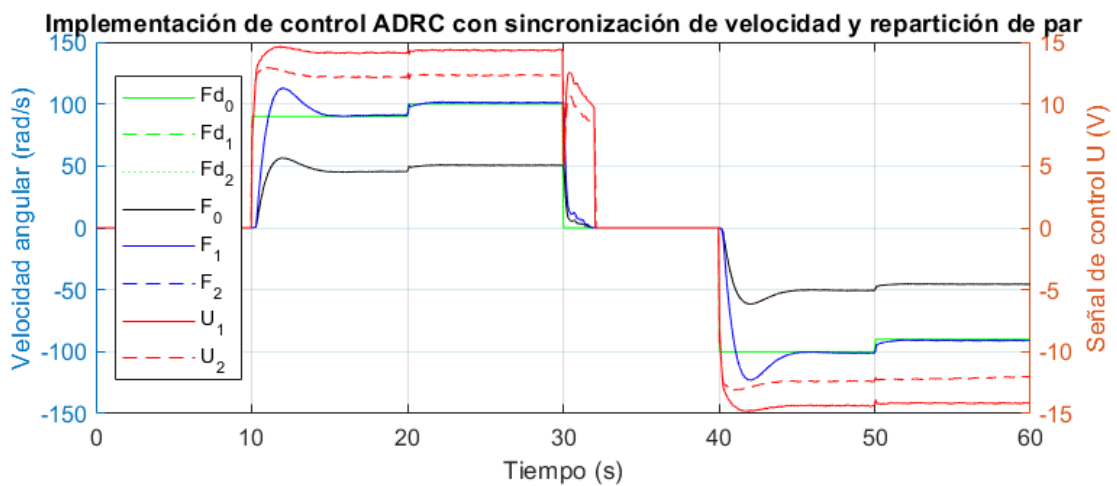


Figura 5.27: Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Velocidad angular y señal de control).

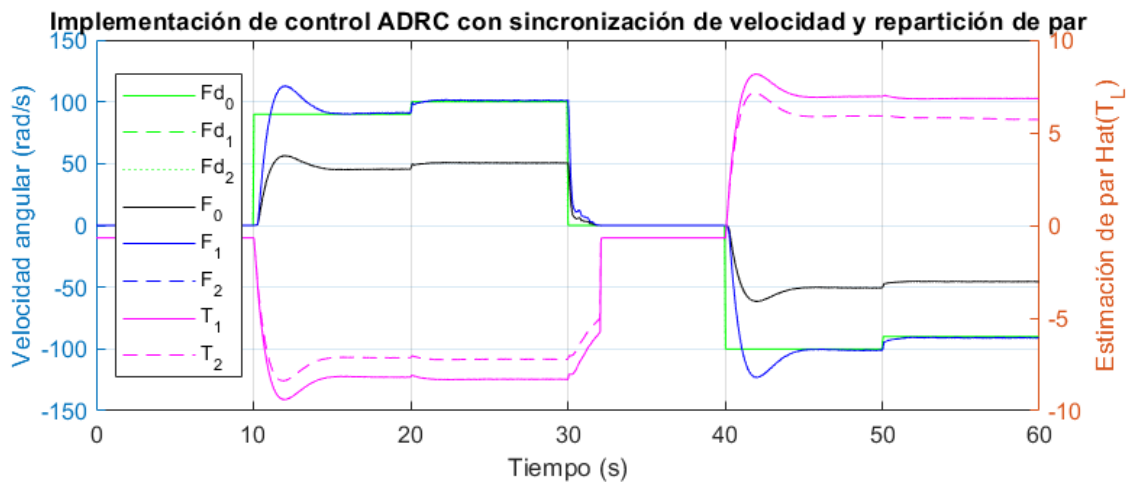


Figura 5.28: Respuesta de implementación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Velocidad angular y estimación de par).

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el control de un sistema de tracción impulsado por múltiples motores BLDC mediante algoritmos de control colaborativo descentralizado, el cual tiene como función resolver el problema de sincronización de velocidad angular y repartición de par entre los agentes de la red.

En un principio, los controladores de los agentes se diseñaron mediante la metodología ADRC para la tarea de regulación de velocidad, la cual consiste estimar en línea la dinámica desconocida del sistema, al igual que las perturbaciones externas por medio de un observador de estado extendido y procede a compensar sus efectos mediante un apropiado término de retroalimentación en la ley de control. Dicha técnica de control, simplifica significativamente el modelo matemático del motor BLDC, resulta ser robusta ante variaciones de parámetros de la planta, iguala la respuesta de motores con curvas características diferentes con sólo ajustar sus ganancias, pero sobre todo es capaz de adaptarse a los cambios de su entorno.

Después, en la ley de control, se añaden los términos que resuelven la sincronización de velocidad y par entre los actuadores. Los cuales se proponen en función de los estados de propio agente y de los agentes vecinos. De esta forma, se logró que la diferencia de velocidad y la estimación de par entre los agentes se mantuviera en una vecindad cercana a cero.

Otro aspecto importante que contribuyó a la sincronización de velocidad, pero sobre todo actuó como medio para compartir la carga fue el sistema de transmisión por banda. En la práctica, este sistema propuesto demostró ser formidable para la colaboración de múltiples motores que conduzcan un eje en común, esto debido a la simplicidad de su diseño y su instalación flexible.

Por otro lado, el algoritmo de comunicación basada en eventos para la transmisión de información entre los agentes, cuyo principio es transmitir sólo cuando es necesario, constató reducir el tráfico de información en la red de comunicación sin degradar la respuesta del sistema en lazo cerrado.

Los modelos matemáticos de los sistemas físicos y sistemas de control permitieron

la simulación y por consiguiente, permitieron la validación de los algoritmos de control propuestos. Incluso se plantearon escenarios donde se estimuló al sistema aplicando impulsos de par controlados en cada una de las poleas. Sin duda, este proceso aceleró el desarrollo del sistema implementado.

La arquitectura distribuida entre los agentes es la característica más importante de este trabajo, puesto que reduce la complejidad de los sistemas embebidos, es decir, se propone el hardware y software para un sólo agente en una red. En consecuencia el sistema es escalable en cuanto a número de agentes, sólo con replicar el hardware y software cuantos agentes sean necesarios.

La distribución del control trapezoidal (o secuencia de conmutación) en otro microcontrolador brinda compatibilidad con motores comerciales que incluyen su propio controlador o *driver*, el cual comúnmente realiza la secuencia de conmutación e incluye el inversor trifásico en un mismo componente. Esto ahorra el tiempo de desarrollo al no ser necesario el diseño de la unidad de potencia.

Los sistemas embebidos basados en procesadores ARM Cortex-M demostraron ser capaces de implementar los algoritmos de control propuestos para velocidades angulares de 100rad/s con una resolución de encoder de 120 PPR (x4 tomando los 4 flancos de subida y de bajada de las señales de salida). Sin embargo, el algoritmo es sencillo de adaptar a procesadores con mejores prestaciones, debido a que la única característica particular que requiere es el módulo CAN.

La implementación de un sistema operativo de tiempo real (RTOS) simplificó los algoritmos y permitió ejecutar múltiples tareas en paralelo. Estas tareas se dividieron en control, comunicación entre los agentes y comunicación con la PC.

Para la comunicación entre los agentes se propuso una interfaz de comunicación CAN de alta velocidad, la cual se basa en un par de cables trenzados que permiten la comunicación con tasas de transferencia de hasta 1 Mb/s. Donde para esta configuración de velocidad permite hasta 25m. Por lo que su implementación demostró ser conveniente para este sistema por su simplicidad, velocidad, longitud del bus y costo.

Los circuitos necesarios como los son: el inversor, el transceptor CAN, el sensor de corriente, los convertidores de niveles lógicos y reguladores de tensión fueron diseñados, fabricados y ensamblados con componentes de montaje superficial, en un PCB por agente. Con ello se logró reducir significativamente el tamaño y al mismo tiempo simplificó las conexiones con los demás componentes.

Finalmente, con el diseño CAD del sistema de tracción se posibilitó la fabricación de sus componentes por corte láser, impresión 3D y mecanizado CNC. En consecuencia, se obtuvieron piezas con resoluciones del orden de micras, esto simplificando así el ensamble del sistema, reduciendo en gran medida las fricciones de acoplamiento. Lo que se traduce en una mejor respuesta del sistema desde un enfoque mecánico.

Contribuciones

El presente trabajo se enfoca en la propuesta de un sistema de control colaborativo descentralizado para un sistema de tracción eléctrica con las siguientes características:

- Enfoque multi-motor
- Arquitectura distribuida
- Comunicación de disparada por eventos
- Compensación de perturbaciones
- Sincronización de velocidad angular
- Repartición de par
- Escalabilidad en numero de agentes
- Escalabilidad en potencia de los accionamientos
- Escalabilidad en cuanto a recursos computacionales

Trabajo futuro

A pesar de haber cumplido satisfactoriamente con los objetivos de propuestos en primera instancia, se plantean múltiples formas de mejorar el sistema desde distintos aspectos, realizar pruebas con diferentes configuraciones y estímulos, así como proponer diferentes casos de aplicación. Todo esto se en lista a continuación.

- **Control de velocidad en seguimiento**

En este trabajo se presentó el control de velocidad en regulación, el cual fue evaluado con una función definida a trozos como trayectoria. Sin embargo, si se deseara implementar una trayectoria más compleja es necesario cambiar a una tarea de seguimiento, por lo que es necesario agregar el término de pre-compensación (o *Feedforward*) en la ley de control.

- **Control de posición**

Otro caso de control con muchas aplicaciones, es el control de posición, tanto en regulación como en seguimiento, para ello es necesario realizar la estimación de un cuarto estado en el observador de estado extendido y agregar un segundo término de retroalimentación (o *Feedback*) en función de este último estado a la ley de control.

- **Sintonización del controlador**

Proponer un método más sofisticado para la sintonización del controlador.

- **Velocidad cero**

En este trabajo se propone una propuesta práctica para mejorar la respuesta a velocidad cero. Sin embargo, el trabajo puede extenderse a hacer un análisis más exhaustivo de este caso en particular.

- **Múltiples agentes**

Aunque la estrategia de control es válida para múltiples agentes, sólo se probó el sistema experimentalmente dos agentes. Sería interesante agregar más agentes a la red.

- **Estimular el sistema aplicando par controlado**

Esta planteamiento se realizó en simulación. Una opción para realizarlo experimentalmente es acoplar al sistema de tracción un motor que actúe como generador perturbación.

- **Sistema embebido basado en procesadores ARM**

Este trabajo fue desarrollado usando microcontroladores con núcleos ARM Cor-

tex M3 y M4. Sin embargo, para mejorar la capacidad y funcionalidad de rendimiento es necesario implementar microcontroladores ARM Cortex-R los cuales están optimizados para sistemas de tiempo real.

- **Sistema embebido basado en FPGA**

Otra opción elegante sería implementar el control propuesto en procesadores ARM Cortex M1 y M3 dentro de la lógica programable FPGA, aprovechando que el control de motor BLDC con sensores Hall y la decodificación de los encoders incrementales pueden implementarse por hardware.

- **Aplicación en vehículos eléctricos**

Ahora que se ha validado el sistema de tracción eléctrico, el siguiente paso es implementarlo en un vehículo eléctrico con funciones de navegación autónoma como control crucero.

Bibliografía

- [1] F. Bojóquez y J. Hernández. “Eficiencia Energética en la movilidad: el gran reto”. En: *Eficiencia Energética* 6.24 (2019), págs. 37-40.
- [2] Secretaría de Energía. “Balance Nacional de Energía 2017”. En: (2017).
- [3] F. J. García. “Evolución del uso de la energía y la búsqueda de la eficiencia energética en el transporte”. En: *Eficiencia Energética* 6.24 (2019), págs. 5-14.
- [4] J. F. Guerrero-Castellanos y col. “A collaborative ADRC-based approach for angular velocity synchronization and load-sharing in servomechanisms”. En: (Diciembre de 2019).
- [5] L. Guzzella y A. Sciarretta. *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. Ed. por Springer. 1er. Zurich, 2013.
- [6] M. Nikowitz. *Advanced Hybrid and Electric Vehicles - System Optimization and Vehicle Integration*. Ed. por Springer. 1er. Vienna, 2016.
- [7] T. Orozco. “Control Colaborativo con Rechazo Activo de Perturbaciones para la Tracción Eléctrica de Vehículos Terrestres”. Puebla, Pue.: BUAP, 1905.
- [8] M. Poovizhi y col. “Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor (BLDC) drives by using MATLAB-SIMULINK”. En: *2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC)* (2017), págs. 178-183. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081083>.
- [9] M. Poovizhi y col. “Modeling and Simulation of an Incremental Encoder Used in Electrical Drives”. En: *10th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics* (2019).
- [10] G. Rosales y É. Ruiz. “De vehículos híbridos y eléctricos”. En: *Eficiencia Energética* 6.24 (2019), págs. 37-40.
- [11] R. Saltaren y col. *Robótica Aplicada: Análisis y Diseño de robots paralelos y seriales con Matlab*. Ed. por DEXTRA. 1er. Madrid, 2018.
- [12] Sira-Ramírez y col. “Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems”. En: (2017).
- [13] Sira-Ramírez y col. “Ultramodelos globales y el control por rechazo activo de perturbaciones en sistemas no lineales diferencialmente planos”. En: *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)* 12.2 (2015), págs. 133-144.
- [14] Inc. The MathWorks. *Introduction to Brushless DC Motor Control*. 2020. URL: <https://explore.mathworks.com/brushless-dc-motors-introduction>.

- [15] S. Van Themsche. *The Advent of Unmanned Electric Vehicles: The Choices between E-mobility and Immobility*. Ed. por Springer. 1er. Berlín, 2016.
- [16] B. Tibor, V. Fedák y F. Durovský. “Modeling and simulation of the BLDC motor in MATLAB GUI”. En: *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (2011), págs. 1403-1407. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984365>.
- [17] M. Tsai y col. “Model construction and verification of a BLDC motor using MATLAB/SIMULINK and FPGA control”. En: *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* (2011), págs. 1797-1802. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIEA.2011.5975884>.
- [18] O. C. Wanless y col. “Education and Licensure Requirements for Automated Motor Vehicles”. En: *2019 IEEE International Symposium on Technology and Society (ISTAS)* (1905).
- [19] Xia Y. y Fu M. *Overview of ADRC. In: Compound Control Methodology for Flight Vehicles*. Control and Information Science. Heidelberg: Springer, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36841-7_2.

Apéndice A

Simulaciones

En este capítulo se presenta la simulación de modelos de los sistemas físicos y sistemas de control que corresponden a cada uno de los casos que se presentaron en el capítulo 5 *Resultados experimentales*.

Se continua con una trayectoria Fd similar a la de las pruebas experimentales, es decir una función definida a trozos, pero los cambios son cada 2 segundos.

A diferencia de la mayoría de la pruebas en la plataforma experimental, el sistema en simulación sí se estimuló aplicando pequeños impulsos de par en las poleas involucradas, los resultados validan el rechazo activo de perturbaciones, la sincronización de velocidad y la repartición de par.

La comunicación disparada por eventos se emuló usando memorias de almacenamiento de datos, una para cada estado que comparten los agentes. Esta memoria siempre se lee, pero sólo se actualiza si sucede un evento.

En general se obtienen respuestas de velocidad críticamente amortiguadas. Los tiempos de subida y de asentamiento son significativamente mejores que los experimentales.

A.1. Control de motor BLDC con sensores Hall

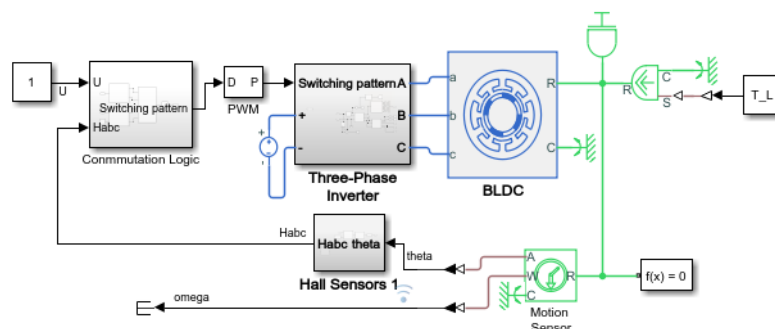


Figura A.1: Simulación control de motor BLDC con sensores Hall.

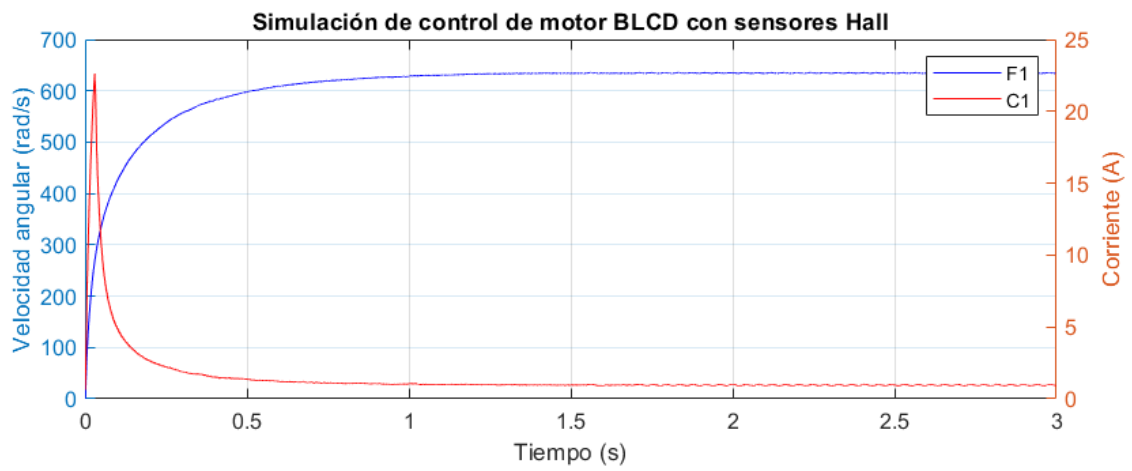


Figura A.2: Respuesta de simulación de control de motor BLDC con sensores Hall (Velocidad angular y corriente).

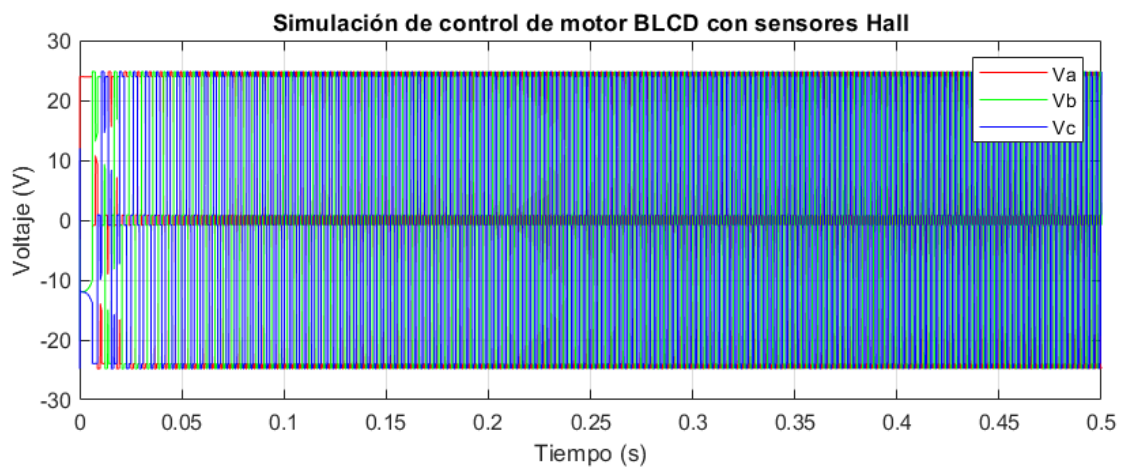


Figura A.3: Respuesta de simulación de control de motor BLDC con sensores Hall (Voltajes).

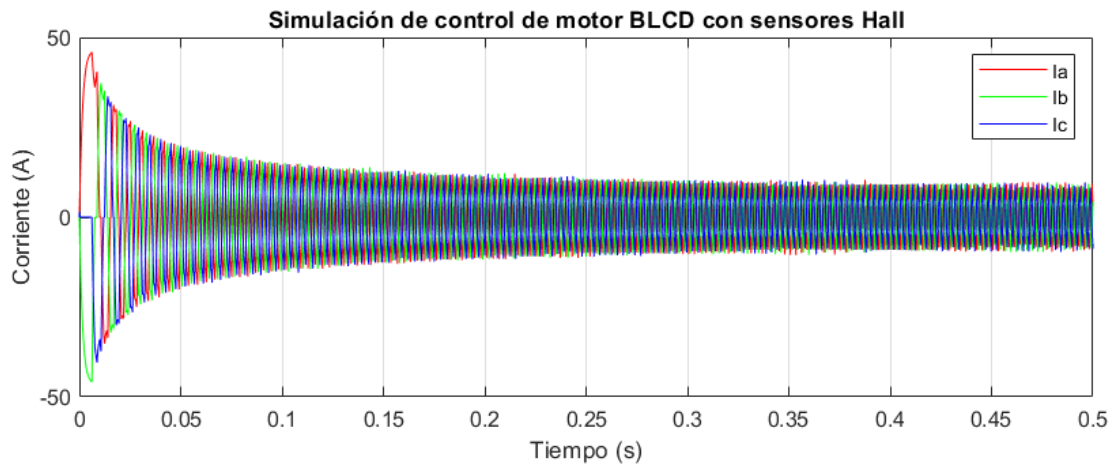


Figura A.4: Respuesta de simulación de control de motor BLDC con sensores Hall (Corrientes).

A.2. Control ADRC

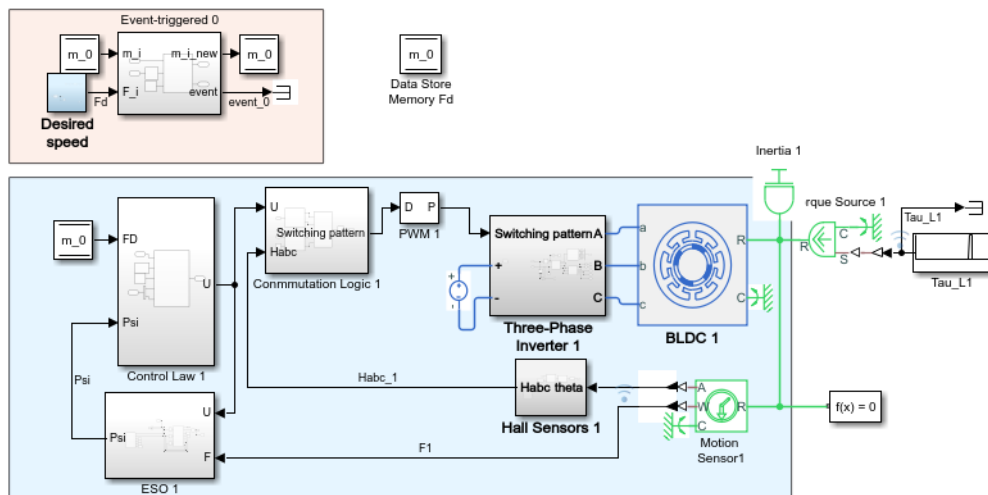


Figura A.5: Simulación control ADRC.

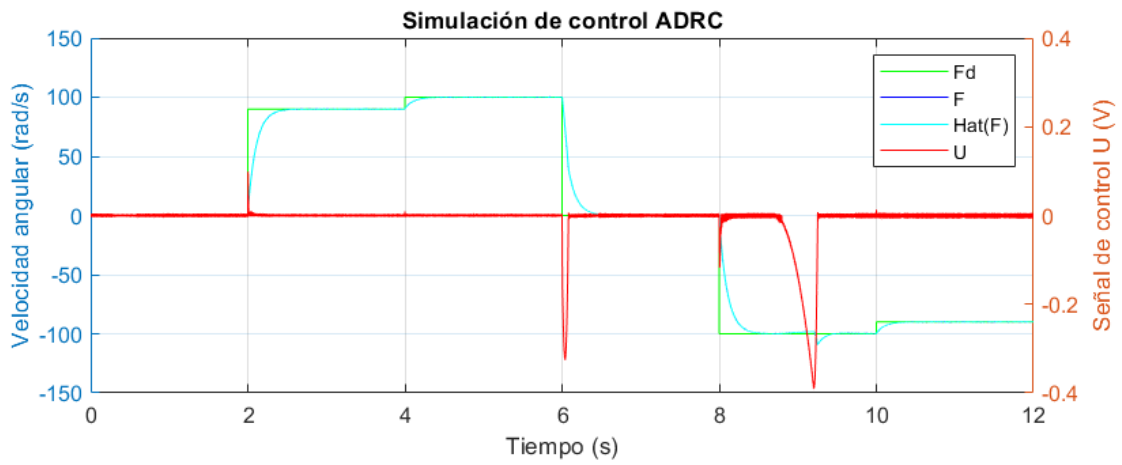


Figura A.6: Respuesta de simulación de control ADRC (Velocidad angular y señal de control).

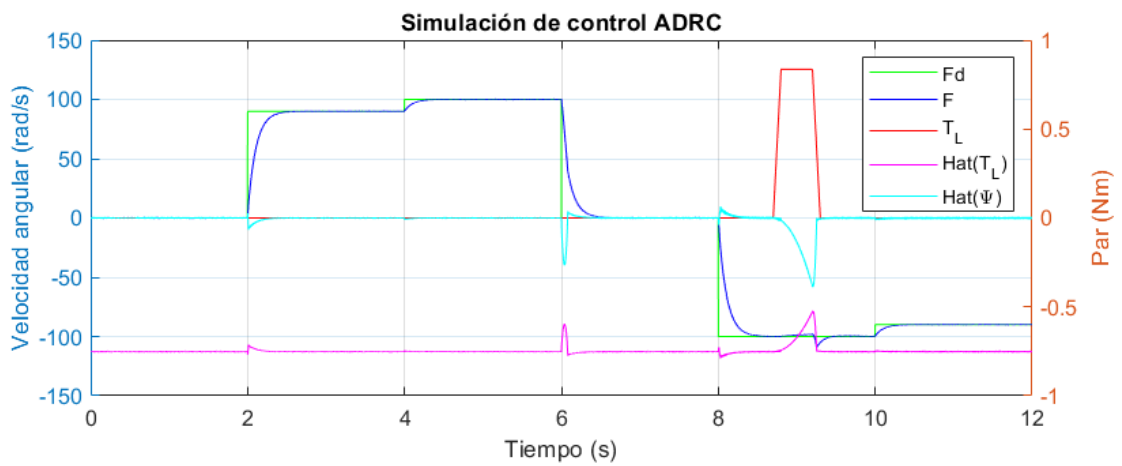


Figura A.7: Respuesta de simulación de control ADRC (Velocidad angular y par).

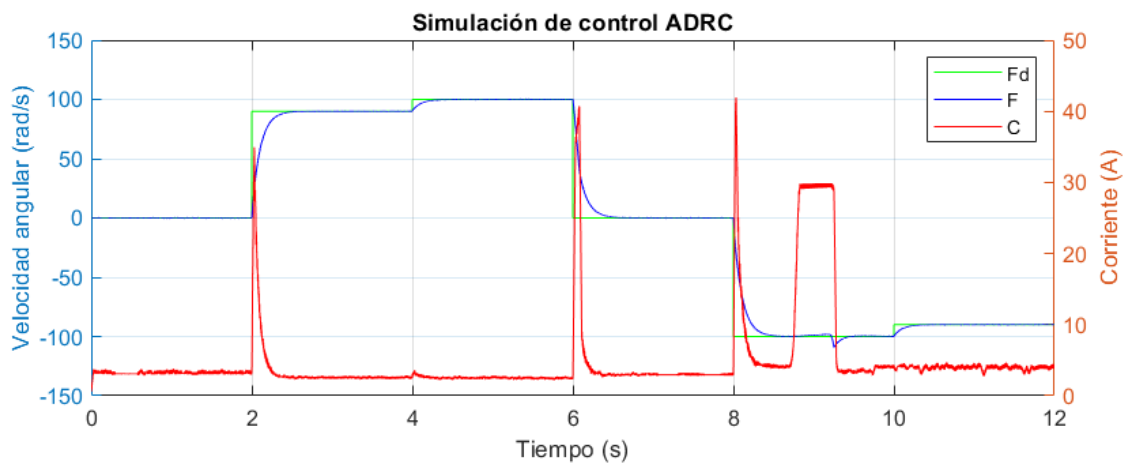


Figura A.8: Respuesta de simulación de control ADRC (Velocidad angular y corriente).

A.3. Control ADRC con transmisión por banda

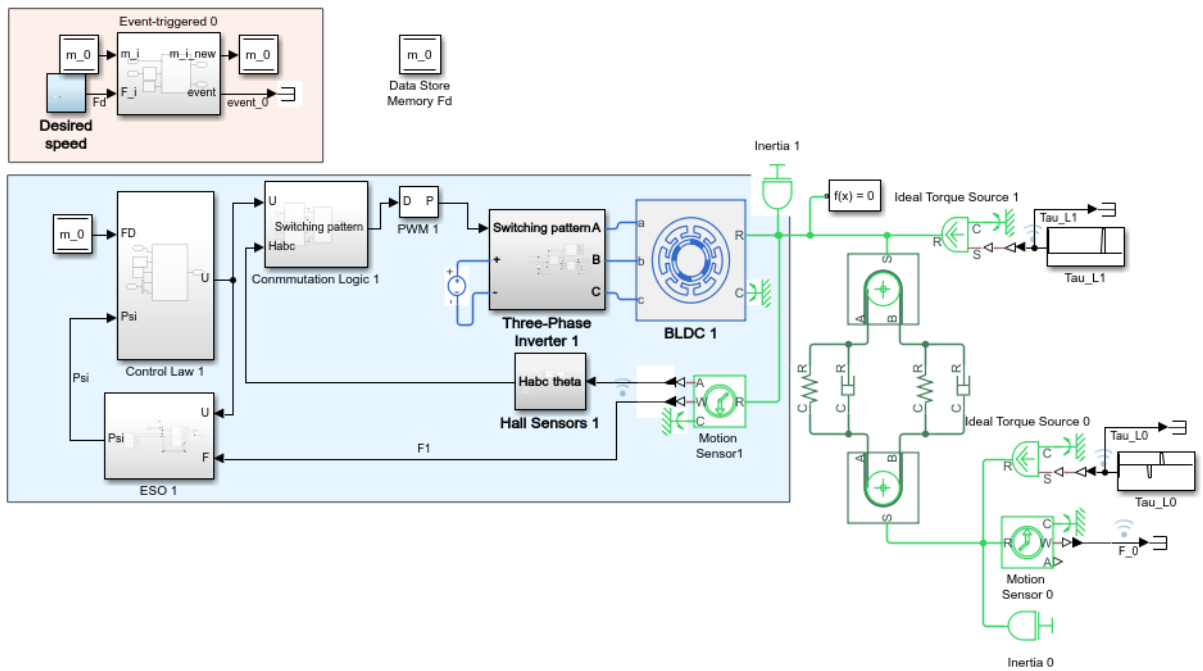


Figura A.9: Simulación control ADRC con transmisión por banda.

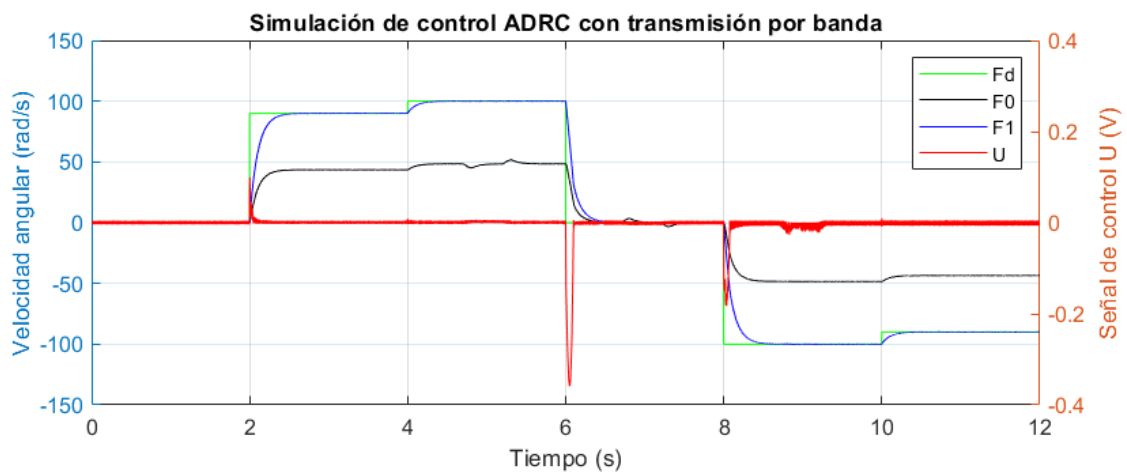


Figura A.10: Respuesta de simulación control ADRC con transmisión por banda (Velocidad angular y señal de control).

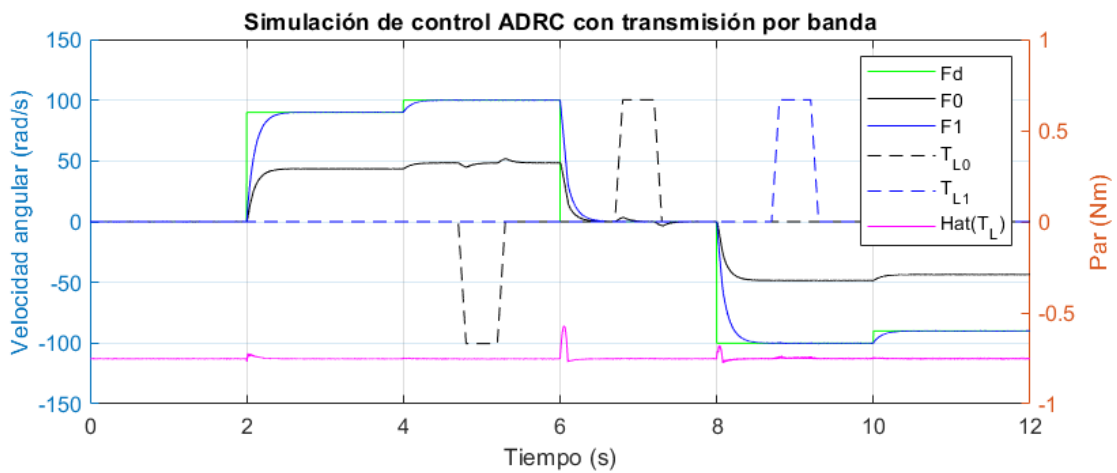


Figura A.11: Respuesta de simulación control ADRC con transmisión por banda (Velocidad angular y par).

A.4. Control ADRC de múltiples motores

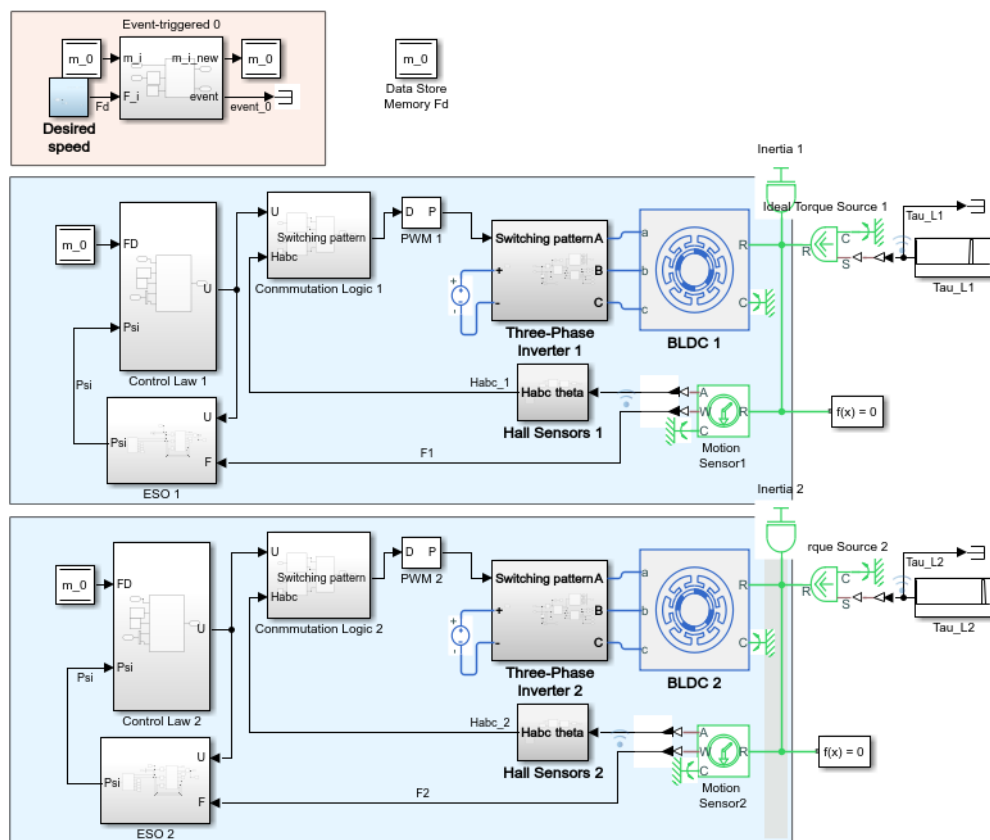


Figura A.12: Simulación control ADRC de dos motores.

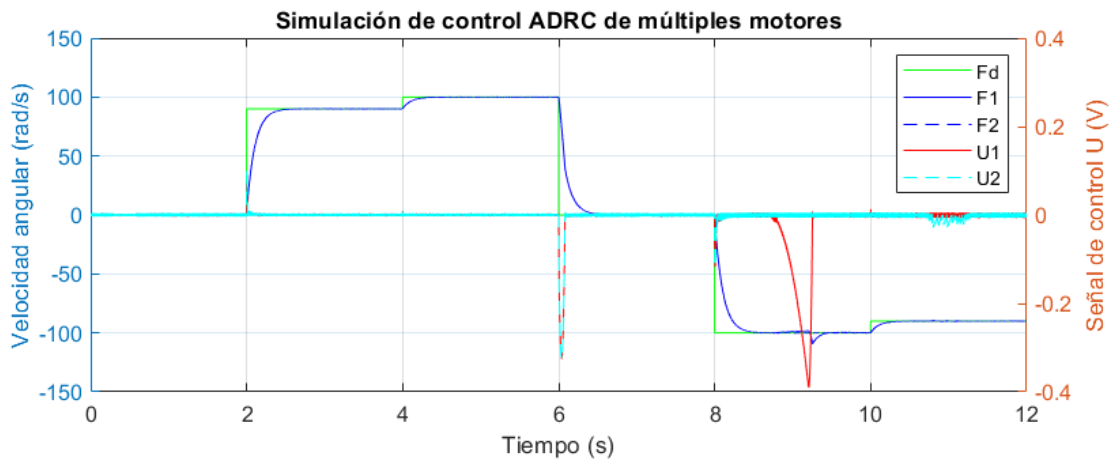


Figura A.13: Respuesta de simulación control ADRC de dos motores (Velocidad angular y señal de control).

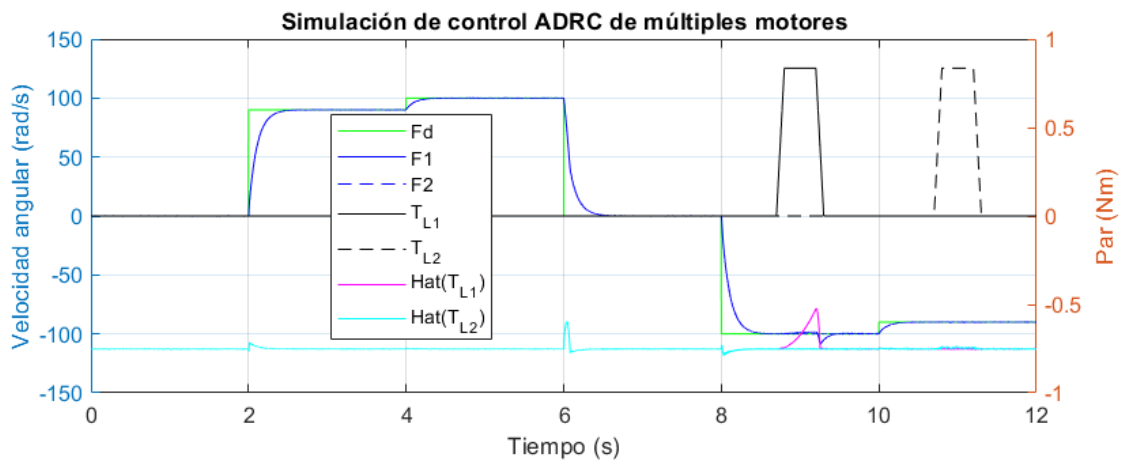


Figura A.14: Respuesta de simulación control ADRC de dos motores (Velocidad angular y par).

A.5. Control ADRC con sincronización de velocidad angular de múltiples motores

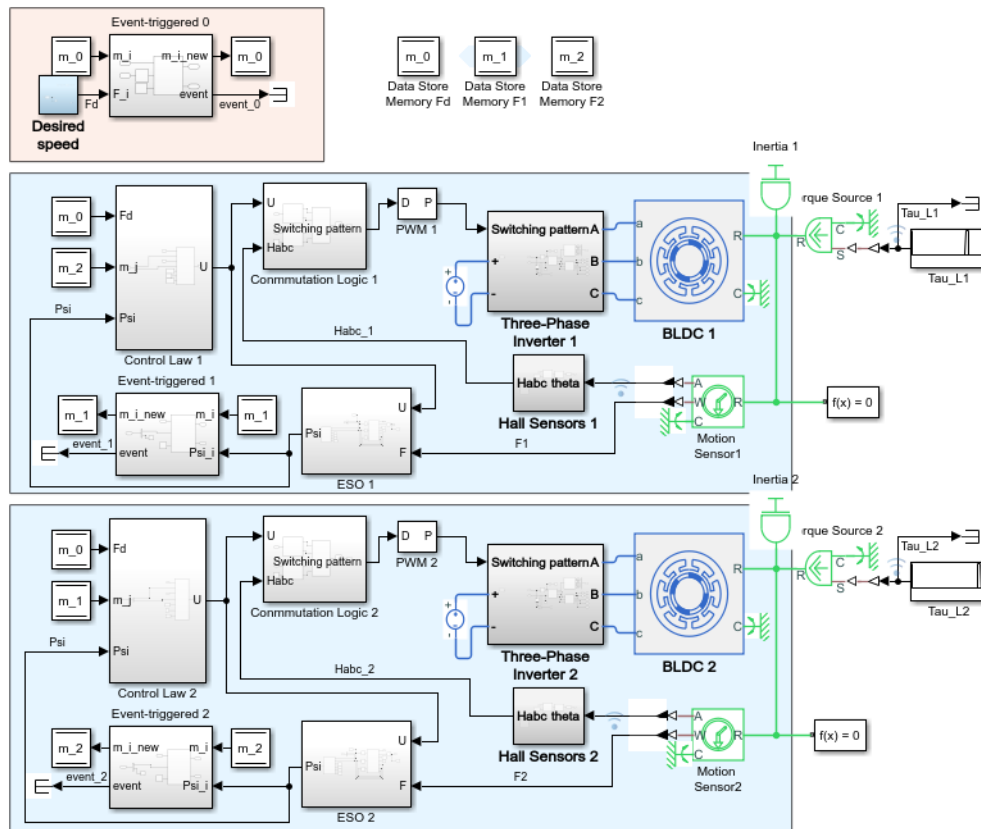


Figura A.15: Simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores.

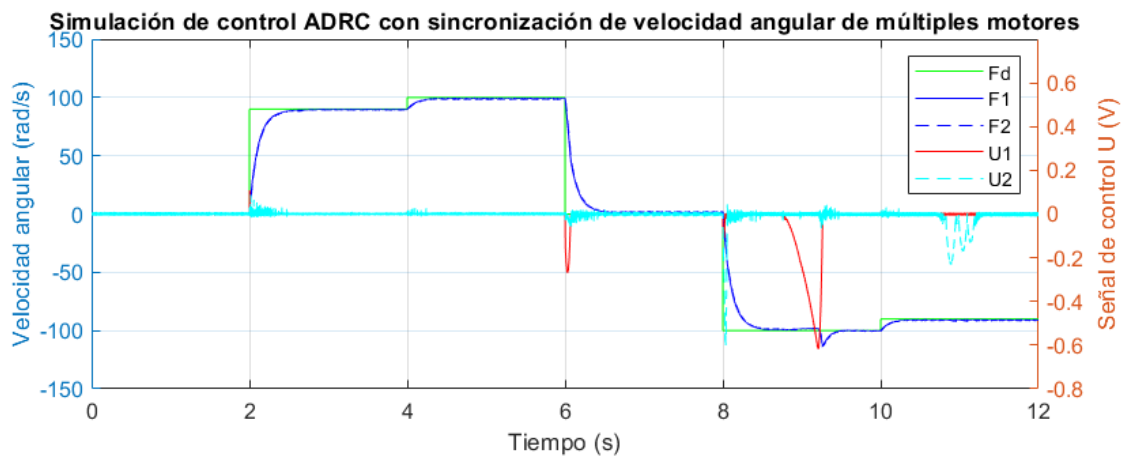


Figura A.16: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y señal de control).

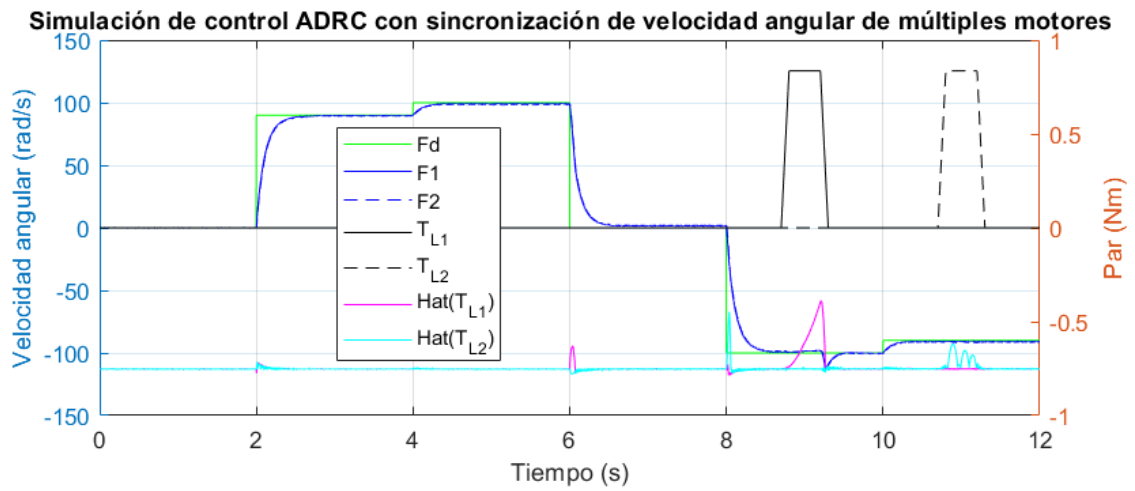


Figura A.17: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y par).

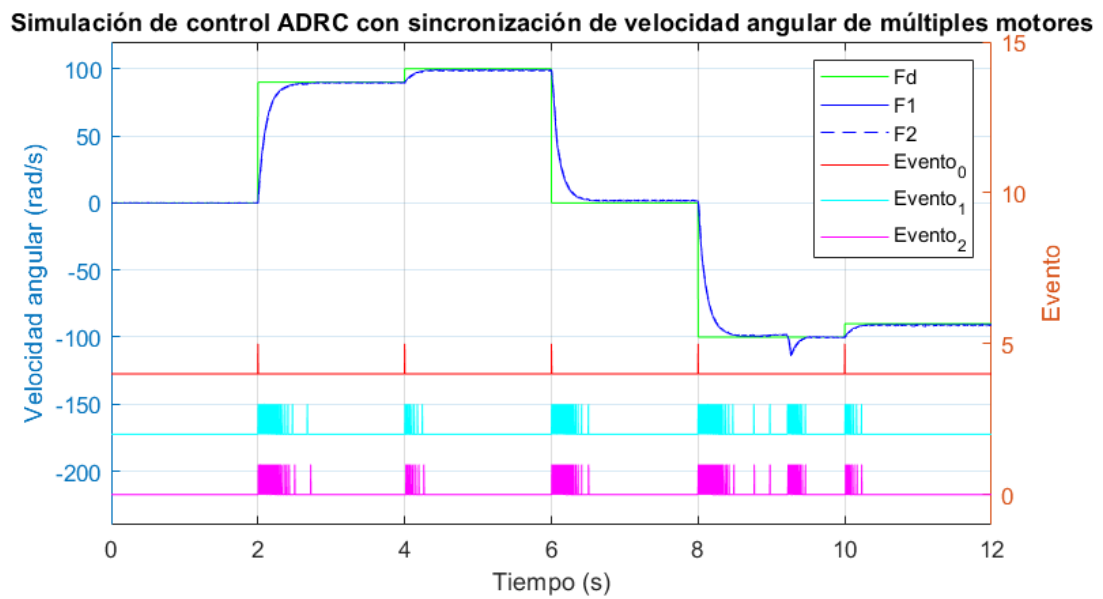


Figura A.18: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular de dos motores (Velocidad angular y señal de eventos).

A.6. Control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de múltiples motores

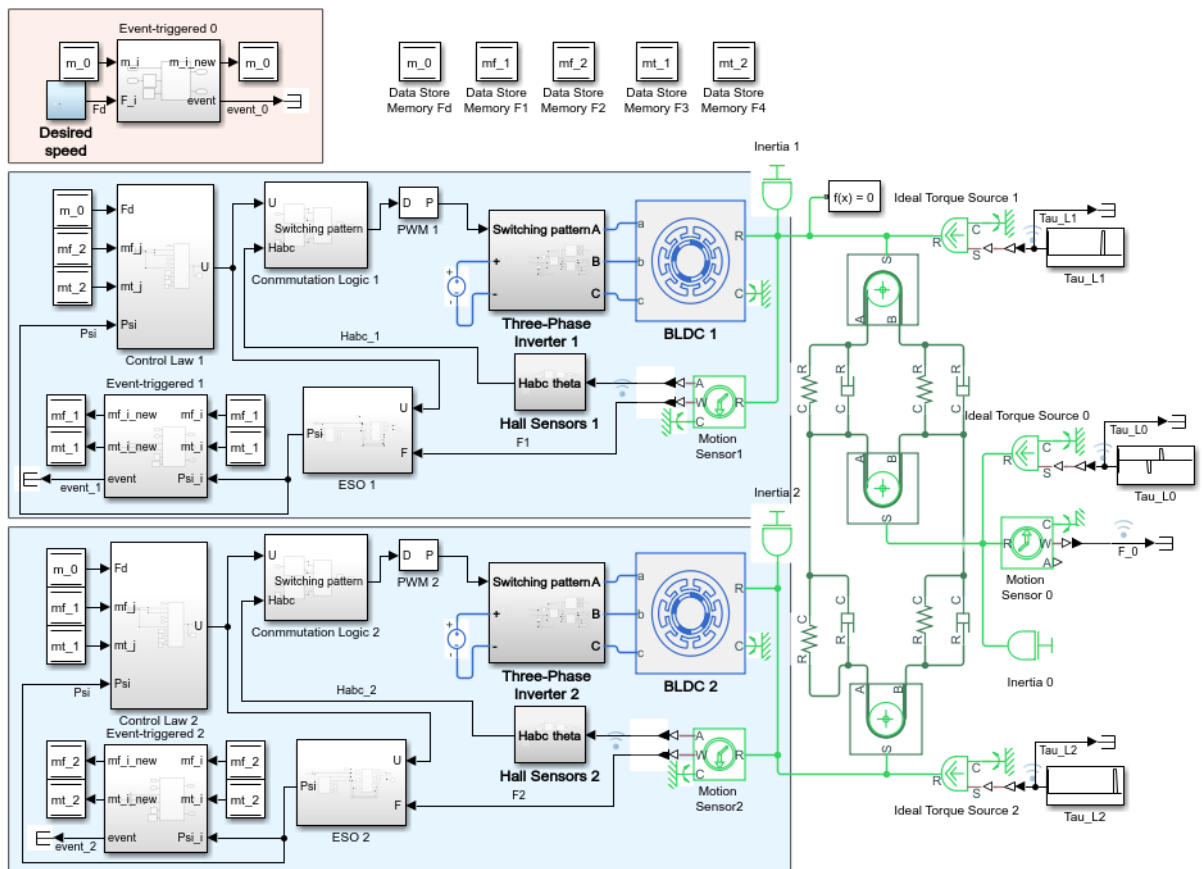


Figura A.19: Simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de múltiples motores.

A.6.1. Caso 1

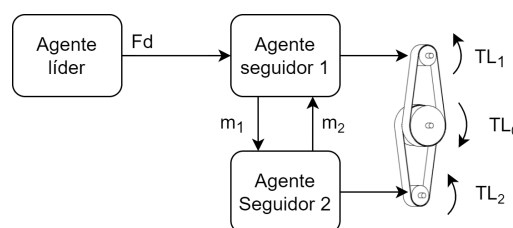


Figura A.20: Esquema de interconexión entre los agentes (Caso 1).

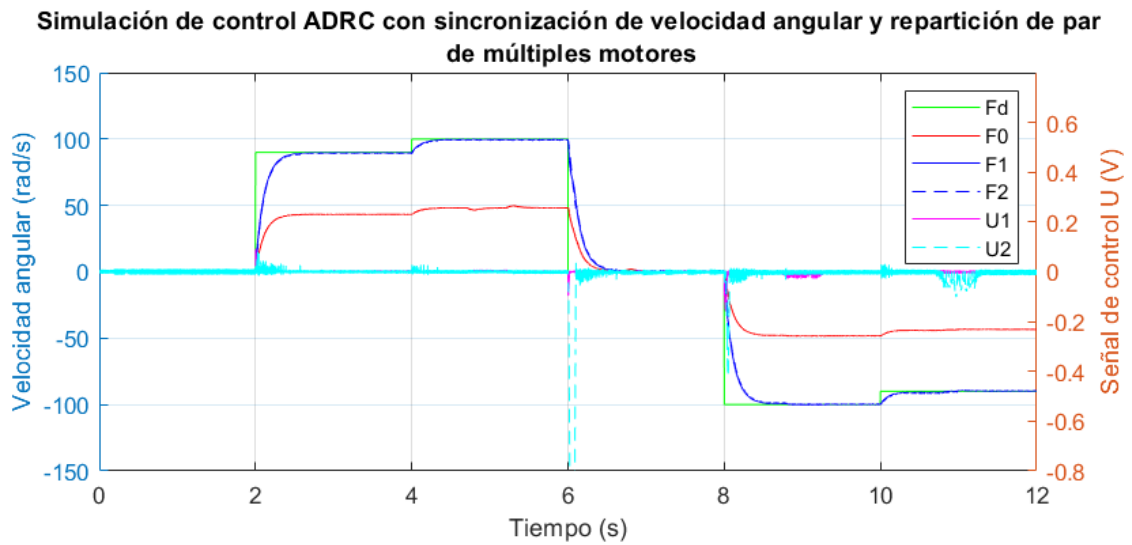


Figura A.21: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 1) (Velocidad angular y señal de control).

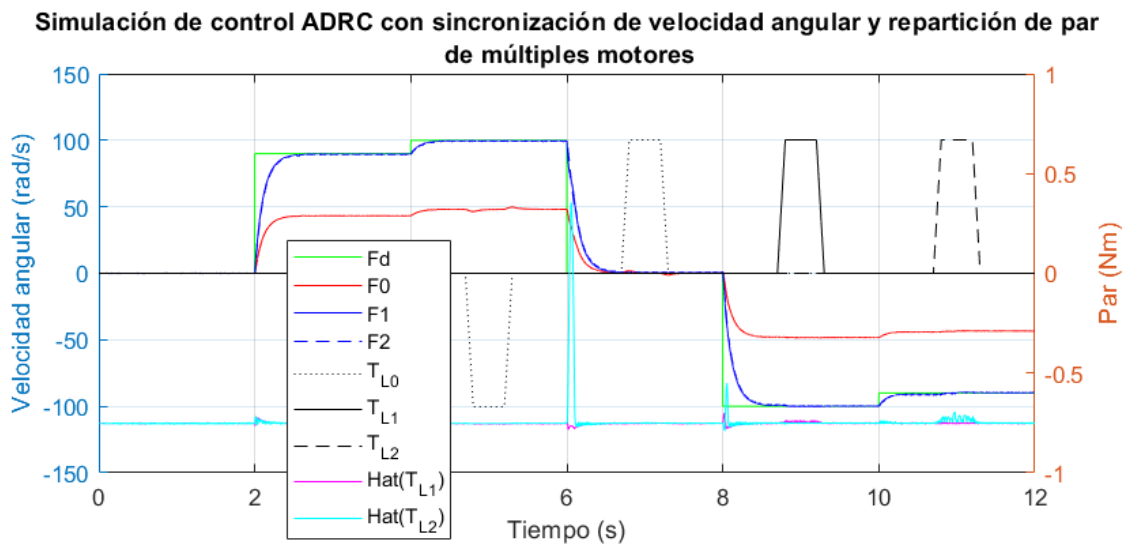


Figura A.22: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 1) (Velocidad angular y par).

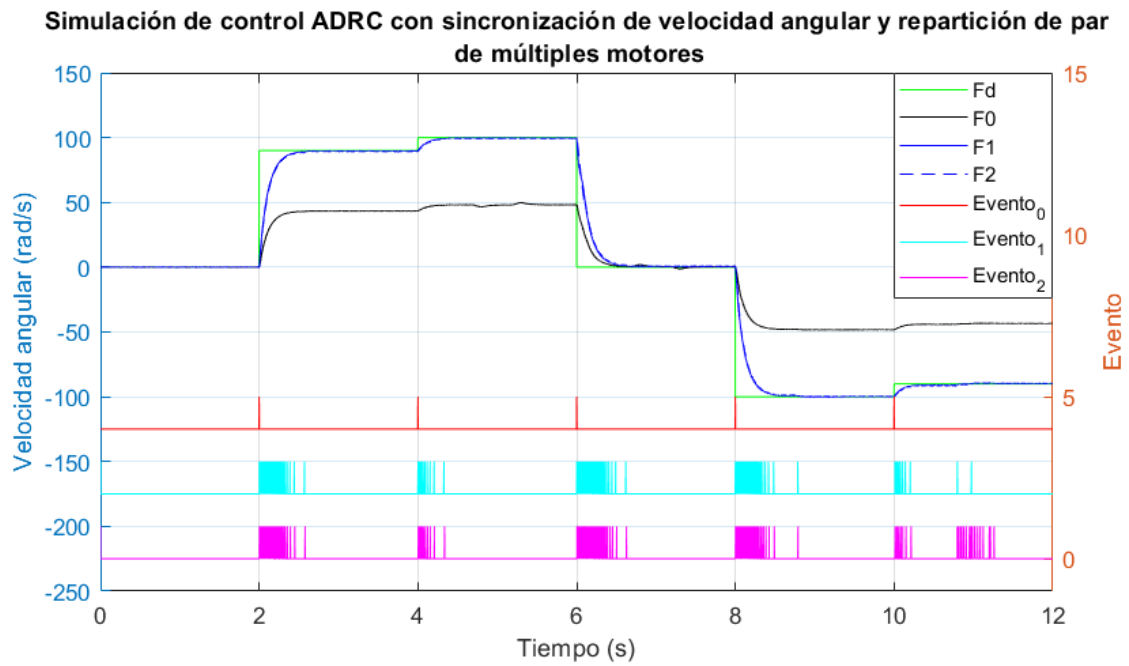


Figura A.23: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 1) (Velocidad angular y eventos).

A.6.2. Caso 2

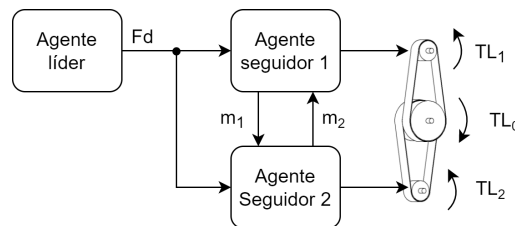


Figura A.24: Esquema de interconexión entre los agentes (Caso 2).

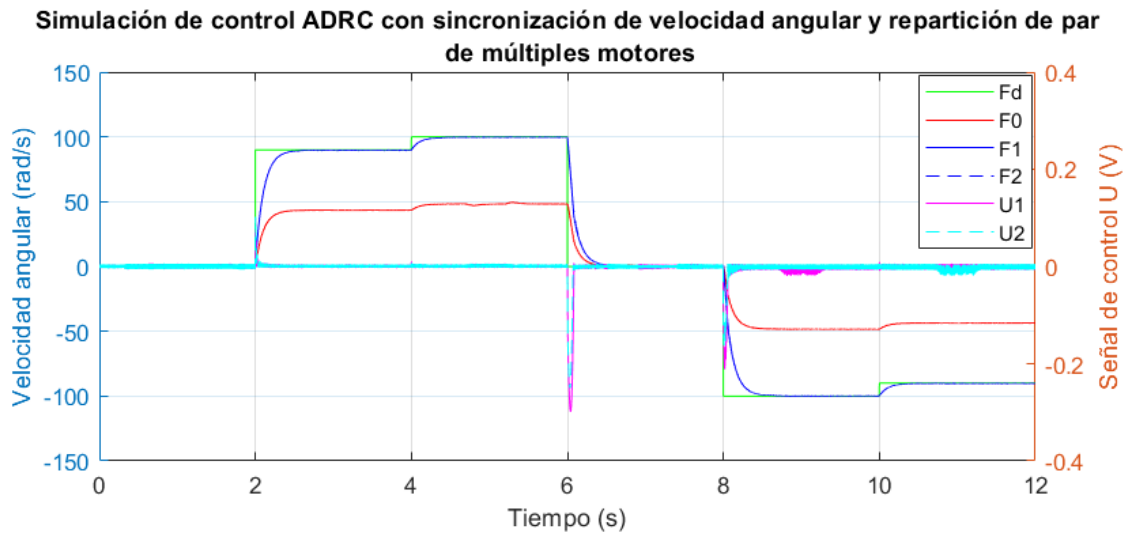


Figura A.25: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 2) (Velocidad angular y señal de control).

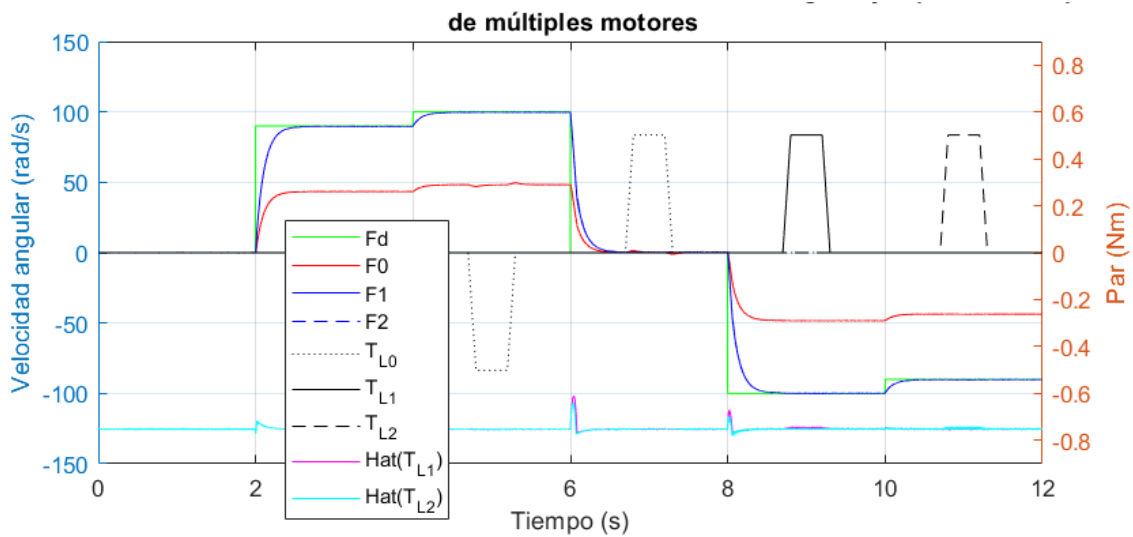


Figura A.26: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 2) (Velocidad angular y par).

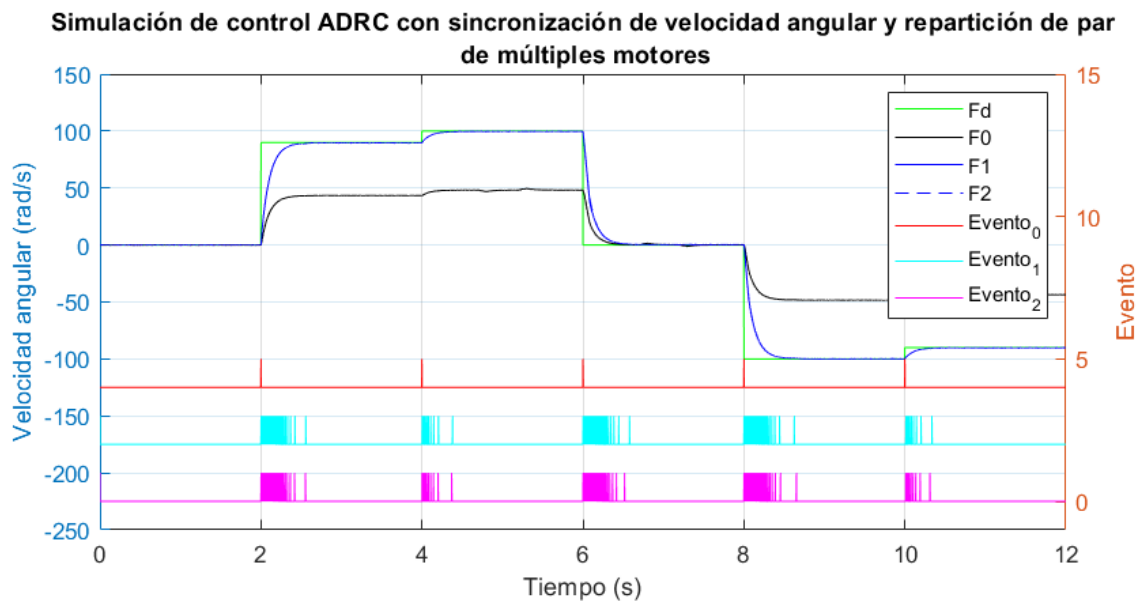


Figura A.27: Respuesta de simulación de control ADRC con sincronización de velocidad angular y repartición de par de dos motores (Caso 2) (Velocidad angular y eventos).

Apéndice B

Implementación de sistema

En este capítulo se describe a detalle la plataforma experimental en la cual se implementaron las estrategias de control presentadas en el capítulo anterior.

Comenzamos presentando el sistema de tracción eléctrico resaltando las características más importantes de sus componentes. Continuamos con especificando el hardware del sistema de control distribuido y sus características principales. Por último describimos los circuitos impresos diseñados que involucran los inversores, sensores de corriente, transceptores CAN y convertidores de niveles lógicos.

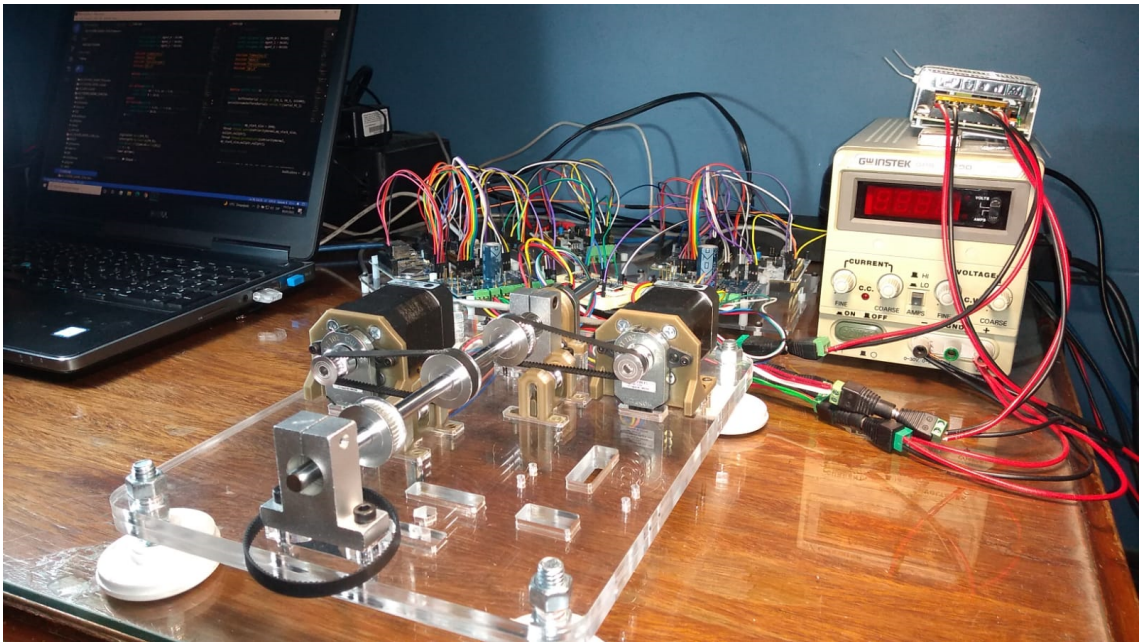


Figura B.1: Plataforma experimental.

B.1. Sistema de tracción eléctrico multi-motor

El sistema de tracción eléctrico propuesto se muestra en la figura B.2. Este sistema se diseñó en un software CAD para modelado mecánico en 3D. La base se fabricó mediante corte láser con acrílico de 6mm y las bases de los motores y los sensores se

imprimieron en 3D con filamento PLA.

Los elementos que lo componen se describen a continuación.

- **Motores BLDC**

Modelo DT4260 con los siguientes parámetros nominales: potencia nominal $12W$, voltaje nominal $24V$, par máximo $0,38Nm$, número de polos, $R = 0,8\Omega$, $L = 1,2mH$, $K_t = K_e = 0,4249$, $J = 0,0048Kg\,m^2$ y eje $5mm$.

- **Encoders incrementales**

Serie AMT10E el cual es un encoder de eje hueco, con 9 opciones de diámetro para su montaje, voltaje operación $3,1 - 5,5V$, canales A , B y X (index) y es configurable a 16 resoluciones diferentes desde $120 - 5120PPR$.

- **Eje principal** Eje de acero de $8mm \times 285mm$ montado sobre soportes SK16 ($16mm$) de aluminio con orificio para la sujeción de un rodamiento tipo balero $8mm \times 16mm \times 5mm$.

- **Banda de sincronización**

Banda dentada GT2 $6mm \times 200mm$.

- **Polea conducida**

Polea GT2 de 40 dientes, $8mm$ diámetro interno, $24,8mm$ diámetro externo de dentadura, para correa GT2 $6mm$ de ancho, prisionero de sujeción.

- **Poleas conductoras**

Polea GT2 de 20 dientes, $5mm$ diámetro interno, $12mm$ diámetro externo de dentadura, para correa GT2 $6mm$ de ancho, prisionero de sujeción.

- **Tensor**

Polea pasiva GT2 $6mm$ sin dientes.

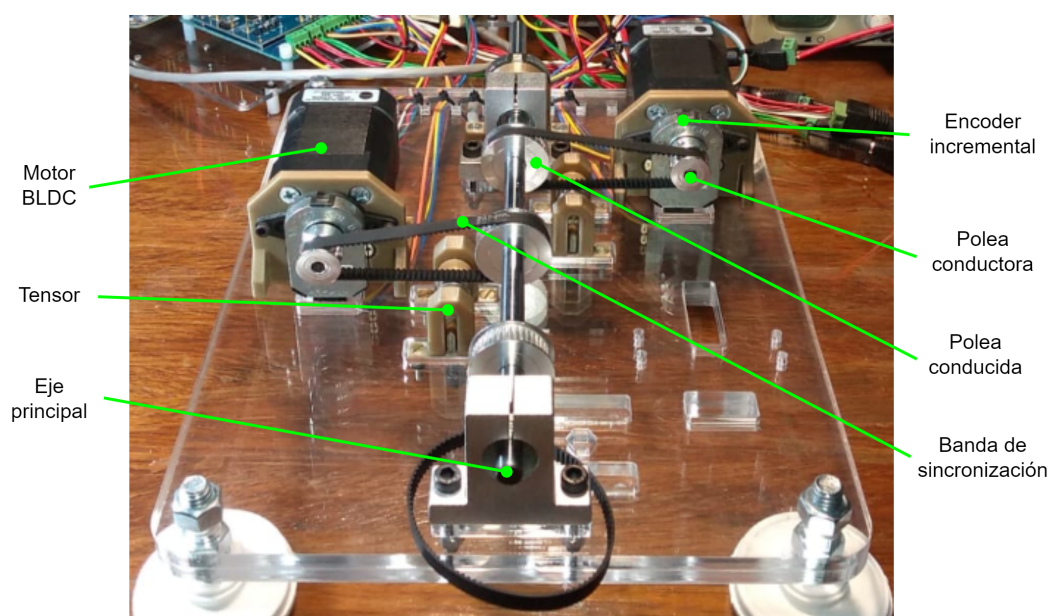


Figura B.2: Sistema de tracción eléctrico multi-motor.

B.2. Sistema de control distribuido

Como uno de los principales requerimientos de este trabajo, se presenta un sistema de control distribuido para el sistema multi-agente (figura B.3). En primera instancia se puede observar un agente líder, dos agentes seguidores y una tarjeta de desarrollo para la adquisición de los eventos.

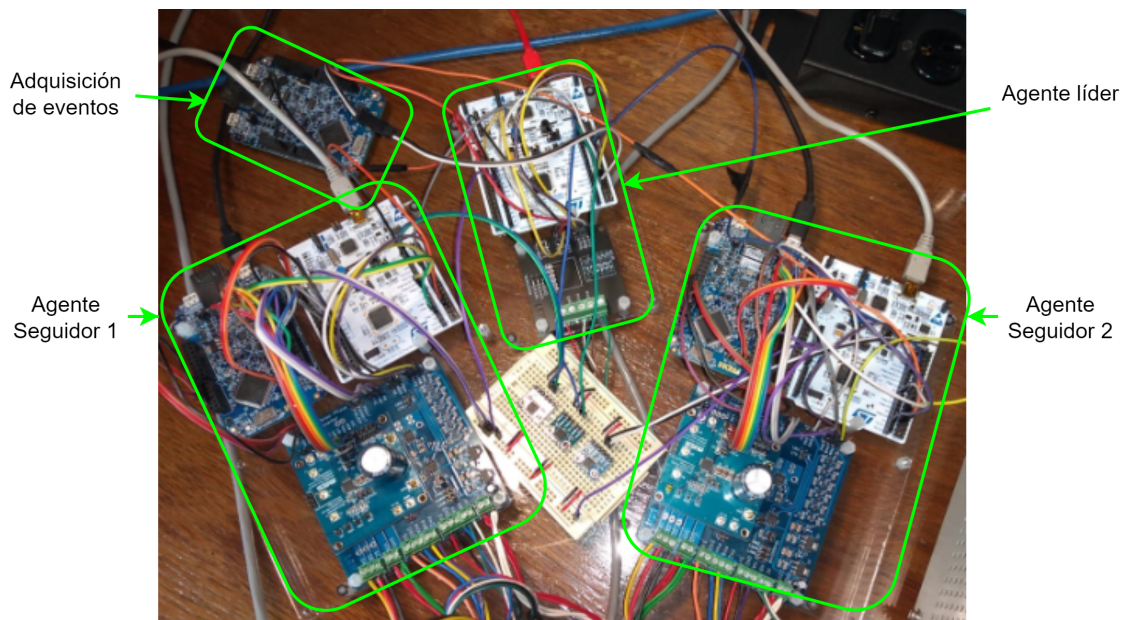


Figura B.3: Sistema de control distribuido.

En la figura B.4 se muestran las unidades de control, potencia e instrumentación de un agente seguidor. En cuanto a las unidades de control, se usaron dos modelos de tarjetas de desarrollo, de las cuales se describen sus principales características a continuación:

- **NXP FRDM-K64F**

Utiliza un MCU Kinetis K64F de bajo consumo con un núcleo ARM Cortex-M4 de 32-bits con instrucciones DSP y unidad de punto flotante (FPU). Se ejecuta hasta 120MHz. Tiene módulos analógicos (ADC's de 16 bits y DAC), interfaces (Ethernet, USB, CAN, UART) y timers con características enfocadas al control de motores y decodificador de cuadratura.

- **NUCLEO-F103RB**

Utiliza un microcontrolador STM32 con un núcleo ARM Cortex-M3 de 32-bits. Se ejecuta hasta 72MHz. Tiene ADC's de 12 bits, interfaces (Ethernet, USB, CAN, UART) y timers con características enfocadas al control de motores y decodificador de cuadratura.

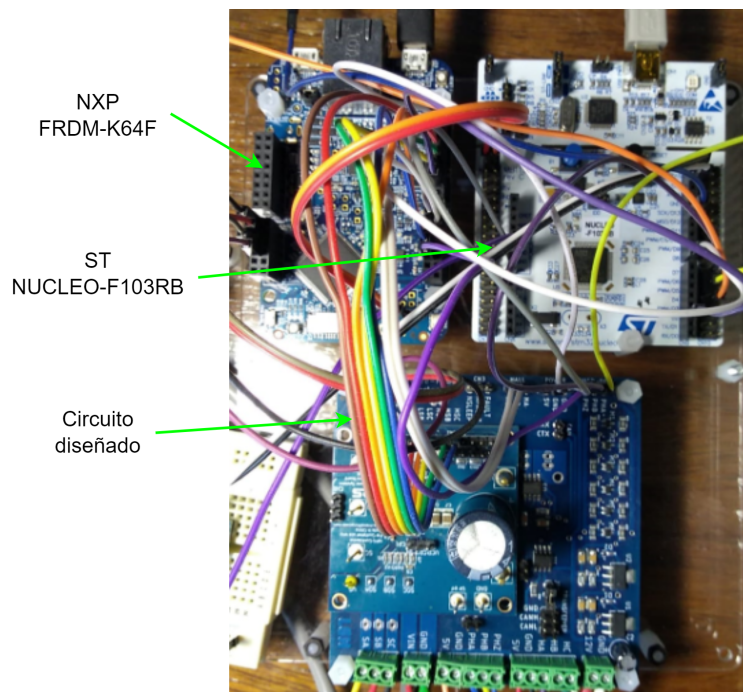


Figura B.4: Agente seguidor.

B.3. Diseño de circuito para agente seguidor

El circuito diseñado para un agente seguidor (figuras B.5 y B.6) se realizó utilizando un software de diseño de PCBs y diagramas eléctricos. Los principales componentes son:

- **Convertidores de niveles lógicos**
Estos constan de transistores FET BSS138 con resistencias pullups. Se usan convertir los niveles de voltaje del encoder y sensores Hall.
- **Sensor de corriente**
Es un sensor de corriente de efecto Hall ACS711 para monitorear la corriente que demanda el motor.
- **Reguladores de tensión**
Son reguladores de tensión ajustables LM317 para suministrar los voltajes de 3.3V y 5V.
- **Transceptor CAN**
Con matrícula SN65HVD230. Este es necesario para la comunicación CAN.
- **Inversor trifásico**
Con matrícula EV6540HA-U-00A. Es una tarjeta de evaluación del integrado MP6540HGU-A.



Figura B.5: Circuito diseñado para agentes seguidores.

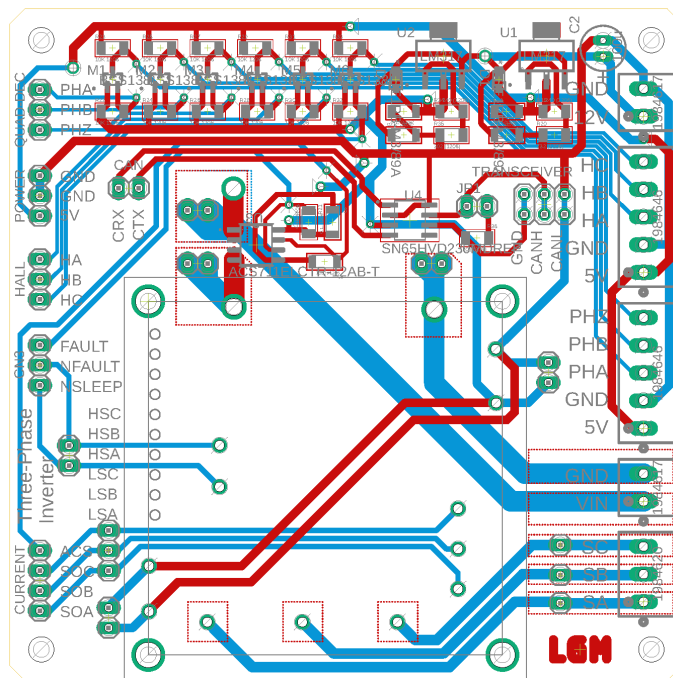


Figura B.6: Diseño de placa de circuito impreso para agentes seguidores.

B.4. Inversor trifásico MP6540HGU-A

Este dispositivo integran tres medios puentes que constan de seis MOSFET de potencia de canal N y amplificadores de detección de corriente. Sus características prin-

principales son las siguientes: Voltaje de operación 5.5V a 50V, corriente pico 6A, frecuencia de conmutación de 196kHz.

Cabe destacar estos inversores no satisfacen la demanda completa de corriente de los motores implementados, sin embargo se eligieron por economía y la simplicidad de su diagrama de aplicación (figura B.7). Además de que la fuente de alimentación disponible es de 30V a 3A para ambos inversores. Para que esto no cause problema sólo se limitó la velocidad de trayectoria y se sintonizaron las ganancias tanto del observador como de las leyes de control adecuadamente, para que no causen picos de corriente.

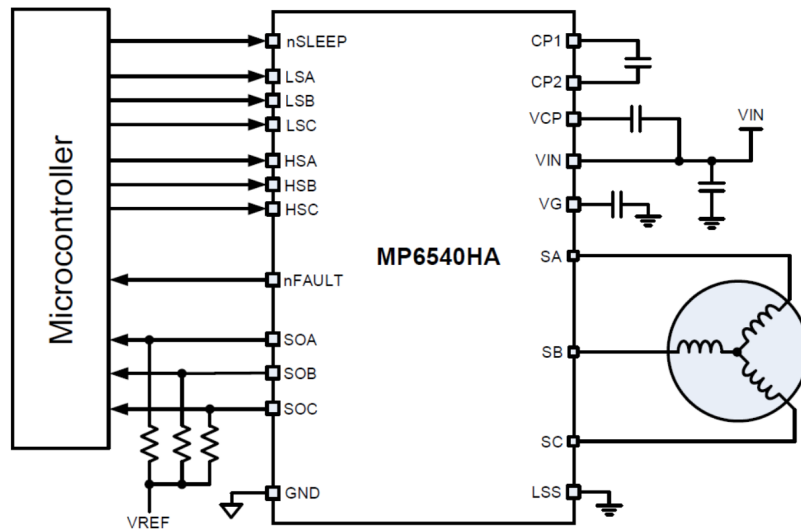


Figura B.7: Diagrama de aplicación típica del inversor trifásico MP6540HA.

B.5. Diseño de circuito para agente líder

El diseño del circuito para el agente líder (figuras B.8 y B.9) resultó ser más simple ya que se tenían los módulos de transceptor CAN y los convertidores de nivel lógico para la lectura del encoder incremental del eje principal.

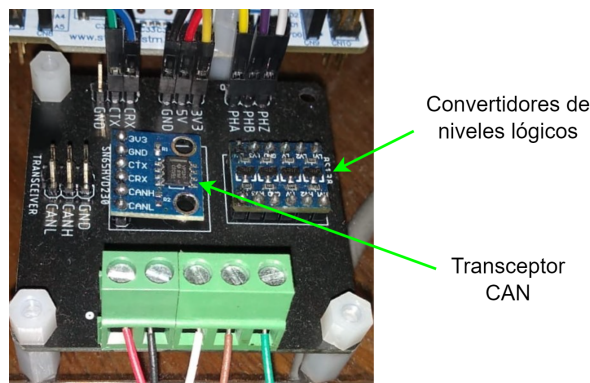


Figura B.8: Circuito diseñado para agente líder.

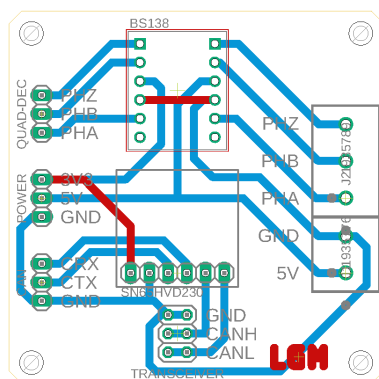


Figura B.9: Diseño de placa de circuito impreso para agente líder.