



**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE
CONTROL DE VELOCIDAD, TRACCIÓN Y
FRENADO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO
REGISTRADOR DE VÍAS DE FCAB**

**Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos
para optar al título de:
Ingeniero Civil Industrial en Electrónica**

Profesor Guía: Jorge Kasaneva Reinoso

Gabriel Eduardo Tabilo Barraza

Antofagasta, Octubre 2016

**UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE
CONTROL DE VELOCIDAD, TRACCIÓN Y
FRENADO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO
REGISTRADOR DE VÍAS DE FCAB**

**Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos
para optar al título de:
Ingeniero Civil Industrial en Electrónica**

Profesor Guía: Jorge Kasaneva Reinoso

Gabriel Eduardo Tabilo Barraza

Antofagasta, Octubre 2016

**UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE
CONTROL DE VELOCIDAD, TRACCIÓN Y
FRENADO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO
REGISTRADOR DE VÍAS DE FCAB**

Gabriel Eduardo Tabilo Barraza

**Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos
para optar al título de:
Ingeniero Civil Industrial en Electrónica**

Jorge Kasaneva Reinoso
Profesor Guía

Ricardo Márquez Berasain
Director (S) del Departamento de Ingeniería Eléctrica

COMISIÓN EXAMINADORA

Mauricio Vallejos Briones

Yasmín Montenegro Maluenda

“Porque el Señor da la sabiduría; conocimiento y ciencia brotan de sus labios”

Proverbios 2:6 NVI

A Dios el Padre, a Jesucristo el Hijo y al Espíritu Santo.

A mis padres y hermanos.

A mi novia.

A mi familia y amigos.

AGRADECIMIENTOS

A Jesucristo el Señor, porque todas las cosas vienen de él, existen por él y para él. Todo lo que pudiese lograr en esta vida es por su favor y su gracia, para su honra y su gloria. Tu Señor mereces todo reconocimiento, porque lo diste todo por amor.

A mis padres Roberto y Marisol, por su apoyo y por depositar su confianza en mí desde el principio de esta etapa de mi vida, valoro su esfuerzo y reconozco que merecen toda la honra de mi parte, los aprecio como a nada en este mundo.

A mis hermanos Karen y Francisco, por su constante preocupación, sé que siempre puedo confiar en ustedes, así que les digo, ustedes también pueden confiar en mí.

A mis familiares y parientes en especial a mis abuelos Hernán y Luisa, por su constante apoyo y participación en todo lo que eh necesitado, muchas gracias.

A mi novia Madeline, por su amor, cariño, apoyo, comprensión y paciencia. Todo será recompensado y como siempre te lo he dicho eres un milagro y una gran bendición.

A mis profesores por su importante labor en mi formación académica, reconozco su importante contribución para formar profesionales para el desarrollo de este país, den lo mejor de ustedes.

A mis compañeros y amigos, por los momentos agradables y de risas que siempre fueron necesarios, por todos los tiempos compartidos que fueron una importante siembra de unidad.

A la Universidad por brindar sus espacios para la formación de mis aptitudes profesionales, en donde conocí a personas importantes y valiosas, gracias.

Resumen del trabajo de título presentado a la Universidad de Antofagasta como parte de los requisitos necesarios para la obtención del Título de Ingeniero Civil Industrial en Electrónica

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD, TRACCIÓN Y FRENADO PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO REGISTRADOR DE VÍAS DE FCAB

Gabriel Eduardo Tabilo Barraza

Octubre 2016

Profesor Guía: Jorge Kasaneva Reinoso, Doctor en física.

Palabras Clave: Vehículo eléctrico, motor eléctrico, convertidor cc-cc, control en lazo cerrado, PID.

Número de páginas: 120

Resumen: El presente trabajo aborda el diseño y la implementación de un sistema de control de velocidad, tracción y frenado para un vehículo eléctrico registrador de vías, propuesto para el Grupo FCAB. Se desea desarrollar e implementar este sistema en un vehículo prototipo con el fin de estudiar su comportamiento y validar las características planteadas en los objetivos. El sistema cuenta con un motor eléctrico de corriente continua y de imanes permanentes para la tracción, con un convertidor cc-cc reductor y reversible en corriente para lograr el frenado regenerativo con la inversión de la corriente de armadura, y con un banco de baterías de LiPo para captar la energía de la generación y también para energizar los dispositivos y componentes electrónicos que lo requieran, separando las tierras de las etapas de control y potencia para evitar el deterioro de estos últimos. El vehículo además debe seguir una velocidad de referencia constante, para lo cual se diseña e implementa un control PID en lazo cerrado en una tarjeta electrónica Arduino Mega 2560. Por último, se finalizan las pruebas uniando todas las características mencionadas en un solo sistema y se realizan las pruebas necesarias para validar los objetivos en una pista especialmente fabricada para el vehículo.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XII
ACRÓNIMOS.....	XIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Descripción de capítulos	2
1.2 Identificación de las necesidades	4
1.2.1 Objetivos general y específicos	5
1.3 Descripción del sistema	5
1.3.1 Fuente de energía receptiva	6
1.3.2 Motor eléctrico	8
1.3.3 Unidad de control y potencia	11
1.3.4 Sistema de transmisión de potencia mecánica	13
1.3.5 Carga mecánica	14
1.4 Dispositivos del sistema.....	15
CAPÍTULO 2. MODELAMIENTO DEL SISTEMA	16
2.1 Análisis de fuerzas utilizando diagrama de cuerpo libre	16
2.1.1 Introducción.....	16
2.1.2 Fuerzas opuestas al movimiento	18
2.1.3 Ecuación dinámica final del vehículo	21
2.2 Motor de corriente continua con imanes permanentes	23

2.2.1	Modelado del motor	23
2.2.2	Identificación del motor con entrada escalón	24
2.2.3	Simulación del motor en Simulink.....	30
2.3	Convertidor CC-CC reductor, reversible en corriente	33
2.3.1	Principio de operación	33
2.3.2	Modos de operación del convertidor	34
2.3.3	Simulación del motor con convertidor en Simulink.....	38
CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL		41
3.1	Introducción	41
3.1.1	Conceptos preliminares	42
3.1.2	Sistema de control clásico (lazo cerrado)	43
3.2	Controladores del tipo PID.....	44
3.2.1	Selección del controlador adecuado	47
3.3	Diseño del controlador PI en Matlab	47
3.4	Simulación del controlador PI en Simulink.....	48
CAPÍTULO 4. DISEÑO DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS.....		50
4.1	Plataforma de prototipo Arduino	50
4.1.1	Medición y registro de datos	50
4.1.2	Librería de controladores PID	54
4.1.3	Generación de PWM	55
4.2	Circuito final	56
4.2.1	Selección de componentes.....	56
4.2.2	Diagrama esquemático.....	61
CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS.....		63

5.1	Introducción	63
5.2	Desafíos de la implementación	65
5.2.1	Circuitos electrónicos.....	65
5.2.2	Mecanismos del vehículo	66
5.3	Pruebas y resultados obtenidos.....	68
5.3.1	Lazo abierto sin carga	68
5.3.2	Lazo abierto con variación en la carga	71
5.3.3	Lazo cerrado con variación en la carga	72
5.3.4	Análisis de la tensión de armadura en lazo cerrado.....	73
5.3.5	Análisis de la corriente de armadura en lazo cerrado	76
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....		80
BIBLIOGRAFÍA		82
ANEXO A. MEMORIA DE CÁLCULO DEL SISTEMA.....		86
ANEXO B. CÓDIGOS Y DIAGRAMAS DE BLOQUES PARA PROGRAMACIÓN PROCESAMIENTO Y SIMULACIÓN		98
ANEXO C. DATOS TÉCNICOS DE DISPOSITIVOS Y COMPONENTES		113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama del concepto general del prototipo	6
Figura 2.1. Diagrama de cuerpo libre del vehículo en subida.	22
Figura 2.2. Sistema electromecánico con motor CC de imán permanente, transmisión mecánica y carga.....	23
Figura 2.3. Señales A y B del codificador incremental del motor EMG30, obtenidas por osciloscopio Tektronik TDS 2012C.....	25
Figura 2.4. Respuesta de velocidad del motor ante una entrada escalón en la armadura	26
Figura 2.5. Respuesta a escalón del motor EMG30 real y del modelo.	27
Figura 2.6. Respuesta del motor EMG30 ante una tensión de 6 [V] con disturbio de escalones de torque.....	31
Figura 2.7. Funcionamiento del motor en dos cuadrantes. I) Modo tracción, II) Modo freno regenerativo	34
Figura 2.8. Convertidor reductor reversible en corriente con carga RLE	34
Figura 2.9. Formas de onda típicas del convertidor reductor reversible en corriente operando en modo tracción	35
Figura 2.10. Formas de onda típicas del convertidor reductor reversible en corriente operando en modo regeneración	36
Figura 2.11. Formas de onda típicas del convertidor reductor reversible en corriente operando en modo tracción/regeneración	37
Figura 2.12. Formas de onda del motor con el convertidor reductor reversible en corriente operando en modo tracción/regeneración.....	39
Figura 3.1. Diagrama de elementos básicos de una estructura de control	42
Figura 3.2. Respuesta de los sistemas de control según tecnología.	43
Figura 3.3. Lazo cerrado de control típico.....	44
Figura 3.4. Lazo cerrado de control PID clásico.	46
Figura 3.5. Sintonización del PI en Matlab con la herramienta pidtool.....	48

Figura 3.6. Formas de onda del motor EMG30 con convertidor reductor reversible en corriente operando en modo tracción/regeneración y controlador PI en lazo cerrado.....	49
Figura 4.1. Secuencia de datos de las señales A y B del codificador	51
Figura 4.2. Diagrama de circuito del transductor CAS 6-NP de LEM.....	52
Figura 4.3. Señales PWM de Arduino según ciclo de trabajo	56
Figura 4.4. Esquema del circuito integrado 74LS04	57
Figura 4.5. Esquema eléctrico del opto-acoplador 4N32	58
Figura 4.6. Curvas típicas de drenaje-fuente y esquema eléctrico del IRF540N ...	59
Figura 4.7. Circuito implementado en Multisim y resultados obtenidos.	59
Figura 4.8. Resultados obtenidos de la simulación en Multisim.....	60
Figura 4.9. Esquemático físico y conexionado eléctrico del LM317T.....	61
Figura 4.10. Esquema final del sistema de control PI de velocidad con tracción/regeneración, motor EMG30, convertidor reductor reversible en corriente y controlador Arduino.....	62
Figura 5.1. Estructura física del vehículo prototipo	64
Figura 5.2. Conexionado de los circuitos electrónicos y de las baterías LiPo.....	66
Figura 5.3. Ruedas y pista para la rodadura del vehículo prototipo	67
Figura 5.4. Engranajes de la transmisión motor-eje	68
Figura 5.5. Velocidad del vehículo en lazo abierto y sin carga	69
Figura 5.6. Filtros digitales del tipo IIR.....	70
Figura 5.7. Velocidad de referencia filtrada según tipo de filtro IIR.....	71
Figura 5.8. Velocidad del vehículo en lazo abierto.....	72
Figura 5.9. Velocidad del vehículo en lazo cerrado	73
Figura 5.10. Tensión de armadura cuando el vehículo se encuentra en subida	74
Figura 5.11. Tensión de armadura cuando el vehículo se encuentra en plano horizontal.	75
Figura 5.12. Tensión de armadura cuando el vehículo se encuentra en bajada	76

Figura 5.13. Formas de onda de la corriente de armadura y de la batería cuando el vehículo se encuentra en subida.	77
Figura 5.14. Formas de onda de la corriente de armadura y de la batería cuando el vehículo se encuentra en plano horizontal.....	78
Figura 5.15. Formas de onda de la corriente de armadura y de la batería cuando el vehículo se encuentra en plano horizontal.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Comparación de baterías eléctricas receptivas según tecnología	7
Tabla 1.2. Dispositivos a utilizar en el sistema.....	15
Tabla 2.1. Parámetros del modelo para el motor EMG30.....	26
Tabla 2.2. Mediciones realizadas para determinar la constante magnética del motor EMG30.....	28
Tabla 2.3. Parámetros del modelo para el motor EMG30	28
Tabla 2.4. Parámetros del motor para construir el modelo a simular.....	29
Tabla 2.5. Parámetros definitivos del modelo para el motor EMG30	29
Tabla 2.6. Estimación de fuerzas y torques del vehículo según pendiente.....	30
Tabla 4.1. Resistencia del primario según conexión.....	53
Tabla 4.2. Rangos de corriente y tensión del transductor CAS 6-NP de LEM	53
Tabla 4.3. Conexión de pines de la interfaz SD con el Arduino Mega	54

ACRÓNIMOS

- CC: Corriente continua
- CC-CC: De corriente continua a corriente continua
- CNC: Control numérico computarizado
- DING: Departamento de Ingeniería.
- FCAB: Ferrocarril de Antofagasta a Bolivia.
- LiPo: Polímero de ion de litio
- PID: Proporcional, Integrativo, Derivativo
- PMDC: CC de Imanes Permanentes (del inglés Permanent Magnet DC)
- PWM: Modulación por ancho de pulso (del inglés Pulse Width Modulation).
- SSE: Sección Sistemas Electrónicos.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Un vehículo registrador (auscultador) de vías férreas, es uno que valga la redundancia, realiza la auscultación de la vía férrea. En ingeniería la auscultación es el procedimiento por el cual se evalúa en qué condiciones se encuentra una infraestructura, cuando está en uso o en condiciones de estarlo y sin interferir demasiado con los usuarios normales de dicha infraestructura. En los ferrocarriles la auscultación se realiza a través de vehículos auscultadores que pueden ser manuales, autopropulsados o trenes laboratorio, también llamados dresinas. Estos son capaces de medir los parámetros geométricos y dinámicos de la infraestructura mientras circulan por ella [1].

Los valores que puede medir un vehículo auscultador son varios y pueden variar de uno a otro, algunos de ellos son la trocha, el peralte, el alabeo, etc. Los valores son medidos y luego son procesados para identificar aquellos que se salgan de lo establecido como parámetros normales. En aquellos puntos en los que la vía está fuera de rango, se realiza una reparación de la infraestructura para devolverla a su estado original y se vuelve a auscultar para ver si la solución adoptada fue la correcta. Para más información del tema puede consultar la referencia [2].

La empresa FCAB actualmente cuenta con un tren auscultador o dresina para realizar dicha labor, el inconveniente de este vehículo es que es muy antiguo y ocurren muchos problemas a la hora de ponerlo en operación. Los principales problemas son: interrumpe el tráfico de trenes incurriendo en pérdidas de tiempo que se traduce en costos; No posee velocidad cruce para una toma de datos lineal

y se suele perder información valiosa de tramos de vía férrea; Elevados costos por mantenciones mecánicas y combustible. Esto provoca que la planeación de mantención de la vía no sea económica, precisa y sustentable, generando pérdidas.

Con el propósito de dar solución a las principales problemáticas en el proceso de planeación de mantenciones, es que se propuso en conjunto con la Sección de Sistemas Electrónicos (SSE) del Departamento de Ingeniería (DING) de FCAB. Diseñar y construir un prototipo de un vehículo auscultador ligero, de fácil transporte para que interrumpa lo menos posible el tráfico de trenes, con velocidad crucero para una toma de datos lineal y sustentable con el uso de baterías eléctricas y frenado regenerativo para aprovechar la energía producida en el frenado.

1.1 DESCRIPCIÓN DE CAPITULOS

Este trabajo de titulación consta de 6 capítulos, de los cuales, el primero corresponde a la introducción general del trabajo de titulación, identificando las necesidades de la empresa FCAB en mejorar el proceso de auscultación de la vía férrea y a partir de estas necesidades se establecen el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo, luego se describe el sistema propuesto para resolver las necesidades y los dispositivos idóneos para dicha labor.

En el segundo capítulo, se desarrolla el modelamiento del sistema de tracción, para esto en primer lugar se realiza un análisis de las fuerzas resistentes al movimiento y se modela la dinámica del vehículo luego se realiza el modelo electromecánico del motor con todos los elementos de transmisión de potencia mecánica para finalmente modelar el dispositivo que servirá como actuador.

En el tercer capítulo, se diseña el sistema de control encargado de gobernar el vehículo, se comienza con una introducción de los conceptos básicos de los

sistemas de control clásicos, se selecciona el controlador adecuado y finalmente se realiza el diseño más óptimo y se simula su comportamiento.

En el cuarto capítulo, se diseñan los circuitos electrónicos para realizar todas las mediciones, registros de datos y señales de control a partir de una unidad de control, por último se seleccionan todos los componentes electrónicos necesarios para proteger la unidad de control y también para energizar el vehículo.

En el quinto capítulo, se implementan todos los diseños descritos en los capítulos anteriores, se comenta acerca de los desafíos de la implementación, se adquieren los resultados obtenidos a partir de un sistema registrador de datos con los respectivos sensores y se analizan estos resultados a partir de gráficas comparativas.

Por último en el sexto capítulo se describen las conclusiones obtenidas del trabajo de titulación, en donde se destaca la importancia del sistema de transmisión de potencia mecánico, como modificar la operación de una máquina eléctrica de motor a generador y viceversa al invertir la corriente de armadura, la importancia de sintonizar e implementar adecuadamente la estrategia de control y de los circuitos electrónicos.

Este documento a su vez contiene 3 anexos. El anexo A contiene toda la memoria de cálculo para modelar el sistema descrito en el capítulo 2. El anexo B contiene todos los códigos asociados a la estrategia de control y filtrado de los datos medidos. Y el anexo C contiene los datos técnicos de los dispositivos y componentes eléctricos y electrónicos.

1.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES

Las necesidades de este sistema nacen de acuerdo a los problemas detectados en el método actual de auscultación de la vía y está constituido por tres ejes: economía, precisión y sustentabilidad.

A. Economía

El vehículo dresina es en simples palabras “una pequeña locomotora” y es difícil de transportar de un lugar a otro, por ejemplo, si se quiere medir un tramo en un ramal que esté en la zona alta de la Región de Antofagasta, el vehículo va a interferir en el tráfico de trenes desde el KM 0 en Antofagasta hasta el KM 400 en Ollague. Esos tiempos de interrupción generan pérdidas económicas por el retraso del transporte de materiales de los clientes.

La idea es que la solución de este proyecto interfiera lo menos posible en el tráfico de trenes. Esto se resuelve construyendo un vehículo ligero, que se pueda transportar en una camioneta hasta el punto de medición, medir y luego retirar de la vía.

B. Sustentable

El vehículo dresina cuenta con un motor de combustión que necesita de elevados costos por concepto de combustible, y debe ser recargado continuamente lo cual también influye en el tráfico de trenes. Ahora bien, uno de los propósitos de la nueva solución es contar con un sistema de energía sustentable que ahorre estos costos y que a su vez vaya en pro del medio ambiente.

C. Velocidad crucero

El vehículo dresina debe ser operado por un conductor que debe tratar de mantener la velocidad lo más constante posible para la toma de datos, puesto que el sistema de adquisición de datos trabaja a una velocidad constante y un cambio en la velocidad del vehículo impacta con la pérdida de tramos de medición, es por esto que el sistema debe contar con una velocidad crucero y así evitar la pérdida de datos importantes.

1.2.1 Objetivos general y específicos

Diseñar e implementar un sistema de control de velocidad crucero para un vehículo eléctrico prototipo, con el uso de tracción y frenado regenerativo

- Seleccionar un motor adecuado que satisfaga las condiciones de funcionamiento del vehículo.
- Diseñar una estrategia de control para la velocidad crucero del vehículo.
- Diseñar una etapa de potencia que permita el trabajo del motor en tracción y en frenado regenerativo.
- Diseñar una fuente de alimentación para el vehículo, basado en el uso de frenado regenerativo.
- Diseñar un sistema de frenado del vehículo que interrumpa al motor directamente
- Implementar las etapas de diseño mencionadas anteriormente en un solo sistema

1.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La descripción del sistema se elabora a partir de los objetivos. El diagrama de concepto básico para describir el sistema se observa en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Diagrama del concepto general del prototipo

Se debe tener en cuenta que el proyecto requiere de una implementación en un prototipo de tamaño reducido con una relación de 1:7. Con una trocha de 15 [cm]. Este criterio es fundamental a la hora de evaluar y seleccionar los dispositivos y componentes del prototipo.

1.3.1 Fuente de energía receptiva

Una fuente de energía receptiva bastante conocida es la batería eléctrica. En esencia consiste en un dispositivo de celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad, cada celda consta de un electrodo positivo llamado cátodo, y un electrodo negativo llamado ánodo. Su funcionamiento consiste en una diferencia de potencial eléctrico entre cátodo y ánodo, además de poseer electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, facilitando que la corriente eléctrica fluya por la batería al circuito externo a energizar, denominado carga eléctrica.

En el proceso de energizar la carga externa, la batería sufre una descarga eléctrica debido a que la composición química se altera y los electrones almacenados son intercambiados y se aprovechan como corriente eléctrica por la carga externa. Algunas tecnologías de fabricación de baterías también permiten la carga eléctrica de la misma, y se debe también a la interacción electroquímica que ocurre con el circuito externo.

En los momentos de frenado la máquina opera como generador, es decir, es una fuente de energía que genera una tensión y una corriente eléctrica a una

carga conectada a ella, por esto es necesario el uso de una fuente de energía receptiva como las baterías eléctricas. Solo algunas tecnologías permiten la recarga de la misma, las más conocidas son: Acido-Pb, Ni-Fe, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion, LiPo, etc. [3]. A partir de la Tabla 1.1. se comparan las diversas tecnologías para seleccionar una que esté acorde a los requisitos de ligereza del vehículo.

Tabla 1.1. Comparación de baterías eléctricas receptivas según tecnología

Tipo	Energía/peso	Tensión por celda (V)	N° de recargas	Tiempo carga	Auto-descarga por mes (%)
Plomo	30-40 Wh/kg	2 V	1000	8-16h	5 %
Ni-Fe	30-55 Wh/kg	1,2 V	+10000	4-8h	10 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	500	10-14h	30 %
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2h-4h	20 %
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,7 V	4000	2h-4h	25 %
LiPo	100-130 Wh/kg	3,7 V	5000	1h-1,5h	10 %

La mejor opción debido a que optimiza su capacidad energética, tamaño y peso es una batería de LiPo [4].

A. Batería de LiPo [4]

Las baterías de polímero de litio “LiPo” Son una variación de las baterías de iones de litio “Li-ion”. Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes. Cada celda tiene un voltaje nominal de 3,7 V, máximo de 4,2 V y mínimo 3,0 V.

Las baterías de litio fueron propuestas por primera vez por M.S. Whittingham, actualmente en la Universidad de Binghamton. Whittingham utilizó

sulfuro de titanio y metal de litio como electrodos. En 1985, Akira Yoshino ensambló un prototipo de batería usando material carbonoso en el que se podían insertar los iones de litio como un electrodo y óxido de litio cobalto (LiCoO_2), que es estable en el aire, como el otro. Al emplear materiales sin litio metálico, se incrementó espectacularmente la seguridad sobre las baterías que utilizaban el litio metal. El uso de óxido de litio cobalto posibilitó que se pudiera alcanzar fácilmente la producción a escala industrial. Este fue el nacimiento de la actual batería Li-ion.

Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, junto con el poco efecto memoria que sufren, o su capacidad para funcionar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido diseñar acumuladores ligeros, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados a las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo. Desde la primera comercialización de un acumulador basado en la tecnología Li-ion a principios de los años 1990, su uso se ha popularizado en aparatos como teléfonos móviles, agendas electrónicas, ordenadores portátiles y lectores de música. Con la irrupción de las baterías de LiPo se obtuvieron principalmente dos ventajas sobre las clásicas Li-ion, lo primero es que tienen mayor densidad de carga, por tanto, tamaño reducido, lo segundo es que tienen una buena tasa de descarga, de hecho, bastante superior. Su única desventaja es que si las celdas se descargan por debajo de los 3,0 [V] se deterioran.

1.3.2 Motor eléctrico

Un motor eléctrico es un dispositivo que puede convertir energía eléctrica en energía mecánica, cuando este dispositivo convierte energía mecánica en energía eléctrica se denomina generador eléctrico. Un dispositivo que puede funcionar como motor y generador se denomina máquina eléctrica.

Puesto que puede convertir energía eléctrica en mecánica o viceversa una maquina eléctrica puede utilizarse como generador o como motor. Casi todos los motores y generadores útiles convierten la energía de una a otra forma a través de la acción de campos magnéticos, con ciertas excepciones [5].

Por lo general, una máquina eléctrica opera como motor o como generador sin necesidad de cambiar de un modo de operación a otro en una misma aplicación. Las máquinas eléctricas utilizadas en locomotoras y automóviles eléctricos operan en ambos modos, para la tracción opera como motor eléctrico, y en los momentos de frenado opera como generador, aprovechando la energía mecánica producida durante este último momento. Esto se realiza por medio de una etapa de potencia que invierte el torque electromagnético de la máquina. A partir de a Tabla 1.1 se comparan las diversas tecnologías para seleccionar la más acertada para esta aplicación.

A la hora de escoger el motor se debe tener en cuenta primero el tamaño de su aplicación, para este caso no tiene sentido seleccionar una máquina de CA debido a que la fuente de energía es una batería eléctrica y se elevaría el costo del controlador y también la dificultad de la estrategia de control, además que esta tecnología es más utilizada para aplicaciones de mayor potencia en donde sus beneficios destacan frente a la máquina de CC.

Ahora bien, la máquina de CC adecuada para esta aplicación debe optimizar el costo, la eficiencia y la simplicidad de control. La máquina de CC de excitación separada sería una buena opción, pero se descarta debido a su baja eficiencia frente a una máquina CC de imanes permanentes que también posee un flujo de campo constante. Otra alternativa que se descarta para esta aplicación es la máquina CC sin escobillas que, a pesar de tener una alta eficiencia, su costo aumenta y también la complejidad del control.

Debido a todo lo expresado en el párrafo anterior es que la mejor tecnología para el prototipo es una máquina de CC de imanes permanentes [6].

A. Motor CC de imanes permanentes

Un motor CC de imán permanente (PMDC), es un motor CC cuyos polos están hechos de imanes permanentes. En algunas aplicaciones, los motores CC de imán permanente ofrecen muchos más beneficios que los motores CC en derivación. Puesto que estos motores no requieren circuito de campo externo y no tienen las pérdidas en el cobre del circuito de campo asociadas con los motores CC en derivación, en consecuencia, son más eficientes. Debido a que no requieren devanados de campo, estos motores pueden ser más pequeños que los correspondientes motores CC en derivación, en consecuencia, son más pequeños y ligeros. Los motores PMDC son muy comunes en tamaños pequeños de caballaje fraccional y subfraccional, en los cuales no puede justificarse el costo y espacio de un circuito separado de campo. Sin embargo, los motores PMDC tienen algunas desventajas porque los imanes permanentes no pueden producir tan alta densidad de flujo como la de un campo externo en derivación. En consecuencia, el motor PMDC tendrá un par inducido, por amperio de corriente de inducido o armadura, menor que el de un motor en derivación del mismo tamaño y construcción.

Un motor CC de imán permanente es básicamente la misma máquina que un motor CC en derivación, excepto que el flujo de un motor PMDC es fijo. Por tanto, no es posible controlar la velocidad de un motor PMDC variando la corriente o el flujo de campo. Los únicos métodos de control de velocidad disponibles para un motor PMDC son los de control de voltaje de inducido y control de la resistencia del inducido [6].

1.3.3 Unidad de control y potencia

A. Control de máquina CC

El control de velocidad de una máquina eléctrica depende mucho de su naturaleza, es decir, si una máquina es de CC o de CA. Para la máquina de CC el control de velocidad se puede realizar de dos maneras, primero usando convertidores estáticos para controlar la tensión de armadura, y segundo con los mismos convertidores para controlar la tensión de campo [7], [8]. El uso de uno de estos métodos depende mucho de la tecnología de la máquina CC las cuales pueden ser de campo o de imanes permanentes, en el caso de ser de campo pueden ser conectados por excitación separada, en derivación, en serie o en compuesto [7]. En el caso de un motor PMDC solo es factible realizar el control de la tensión de armadura, dado que no posee circuito de campo.

Controlador

El control de una máquina debe estar operado por un cerebro, este es el controlador, su tarea es ejecutar una estrategia de control previamente configurada para mantener una salida referencial constante, en este caso la velocidad deseada. Dicho control se suele realizar con dispositivos electrónicos llamados microcontroladores, existe una gran variedad de estos dispositivos, siendo los más conocidos y populares los PIC de Microchip y los AVR de Atmel [10].

En la actualidad los AVR de Atmel presentan una ventaja frente a los PIC y es específicamente por el desarrollo de un hardware libre de bajo costo, alta eficiencia y simplicidad de programación llamado Arduino. Es por eso que para simplificar esta etapa de desarrollo es que se escoge este hardware para desarrollar el control.

Plataforma de prototipos Arduino [11]

Arduino es una plataforma para la creación de prototipos de código abierto, con un hardware y software fáciles de usar. Las tarjetas Arduino son capaces de leer señales de entrada como la luz de un sensor, un dedo sobre un botón o un mensaje de Twitter, y lo convierten en una señal de salida como la activación de un motor, encender un LED, publicar algo en línea, etc. Para realizar estas instrucciones, Arduino hace uso de un microcontrolador que gestiona todas las tareas. Para introducir las instrucciones se utiliza el lenguaje de programación de Arduino (basado en Wiring), y el software de Arduino (IDE).

A través de los años Arduino ha sido el cerebro de miles de proyectos, desde aplicaciones cotidianas a los instrumentos científicos más complejos. Una comunidad mundial de fabricantes, estudiantes, aficionados, artistas, programadores y profesionales ha realizado proyectos en torno a esta plataforma de código abierto, sus contribuciones han añadido una increíble cantidad de conocimiento accesible que puede ser de gran ayuda para los principiantes tanto como para expertos.

Todas las placas Arduino son completamente de código abierto, permitiendo a los usuarios programar de forma independiente y adaptarlos a sus necesidades particulares. El software también es de código abierto, y está creciendo a través de las contribuciones de los usuarios en todo el mundo.

B. Potencia

Como ya se mencionó anteriormente existen importantes aplicaciones en donde se desea controlar el flujo de la energía en forma de corriente eléctrica de una fuente de alimentación a la carga y vice-versa, como por ejemplo las aplicaciones de tracción y frenado regenerativo de vehículos eléctricos, donde

durante el frenado de la máquina se desea almacenar la energía cinética del movimiento transformándola en energía eléctrica que luego se almacena en una fuente de alimentación receptiva como una batería eléctrica.

Para realizar esta operación en una máquina CC, por lo general se utiliza un convertidor CC-CC reductor reversible en corriente entre la fuente de alimentación y la máquina de CC. Normalmente una máquina CC es utilizada en excitación separada a fin de permitir la inversión de corriente de armadura manteniendo el flujo de campo en el mismo sentido. Este procedimiento genera un torque negativo que posibilita el frenado regenerativo del motor u operación de la máquina como generador [12].

Convertidor CC-CC reductor reversible en corriente

En la industria se destacan las aplicaciones que exigen convertidores CC-CC reductores reversibles en corriente para el control de velocidad, posición y en el accionamiento de vehículos eléctricos.

La reversibilidad en corriente básicamente consiste en dos etapas. La primera etapa durante la tracción, el flujo de corriente circula desde una fuente de alimentación receptiva hacia el motor. En la segunda etapa se invierte el sentido de la corriente y ahora fluye la energía desde el motor operando como generador hacia la fuente de energía receptiva [13].

1.3.4 Sistema de transmisión de potencia mecánica

La transmisión de potencia mecánica consiste en un proceso en que cierto mecanismo, es encargado de transmitir potencia entre dos elementos, reduciendo, manteniendo o aumentando su velocidad y en proporción inversa el torque.

Muchas maquinarias y aplicaciones industriales necesitan ser alimentadas mediante máquinas o motores eléctricos. Cuando la aplicación requiere que se entregue potencia a una menor velocidad que la que suministra el motor, se utiliza un reductor de velocidad, el cual debe transmitir la potencia desde el motor a la aplicación con tan poca energía como resulte práctico, mientras reduce la velocidad y en consecuencia se incrementa el par de torsión o torque [14].

Un medio eficiente para transmitir la potencia es a través del movimiento rotatorio de un eje, soportado por rodamientos. Se pueden incorporar engranes, bandas, poleas o catarinas de cadena a fin de proporcionar cambios de velocidad y par de torsión entre ejes. La mayoría de los ejes son cilíndricos (sólidos o huecos) e incluyen diámetro de paso con hombros para alojar la posición y soporte de los cojinetes, engranes, etc. [15]

Para la implementación del prototipo la mejor manera de transmitir el movimiento es con el uso de un tren de engranes, debido a que es más fácil de encontrar en el mercado, también se pueden diseñar y fabricar sin mayor complicación.

1.3.5 Carga mecánica

La carga mecánica no es más que el peso del vehículo. Se debe tener en cuenta para esto que el vehículo va a tener dos tipos de cargas [16]:

1. Carga inercial: Aparece cuando el vehículo está acelerando y desaparece cuando el vehículo se encuentra a velocidad constante.
2. Carga gravitacional: Siempre esta presente debido al peso del vehículo.

1.4 DISPOSITIVOS DEL SISTEMA

Conforme a todo lo sintetizado anteriormente y a lo otorgado por el grupo FCAB se seleccionan los siguientes dispositivos para ser parte del prototipo:

Tabla 1.2. Dispositivos a utilizar en el sistema

Función	Dispositivo	Fuente
Fuente de energía	Baterías de LiPo de 12V	Grupo FCAB
Unidad de control	Arduino Mega 2560	Grupo FCAB
Unidad de potencia	Convertidor CC-CC reversible en corriente	Elaboración propia
Motor eléctrico	Motor CC de imanes permanentes EMG30	Grupo FCAB
Transmisión mecánica	Tren de engranes	Elaboración propia
Carga mecánica	Estructura vehicular	Elaboración propia

CAPÍTULO 2.

MODELAMIENTO DEL SISTEMA

El capítulo que se presenta a continuación tiene el propósito de hacer un modelo aproximado del sistema, para luego realizar simulaciones en el software Simulink que verifiquen que el motor seleccionado es apto para ser implementado, que permite tanto la tracción y el frenado regenerativo del vehículo invirtiendo la corriente de armadura y dar cumplimiento a ese objetivo. También cimenta las bases para las etapas de diseño, realizando simulaciones del convertidor cc-cc a implementar.

2.1 ANÁLISIS DE FUERZAS UTILIZANDO DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE

2.1.1 Introducción

Un diagrama de cuerpo libre es una representación gráfica utilizada a menudo por físicos e ingenieros para analizar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo libre. El diagrama de cuerpo libre es un elemental caso particular de un diagrama de fuerzas.

Estos diagramas son una herramienta para descubrir las fuerzas desconocidas que aparecen en las ecuaciones del movimiento de un cuerpo. El diagrama facilita la identificación de las fuerzas y momentos que deben tenerse en cuenta para la resolución del problema.

A. Segunda ley de Newton

La segunda ley de Newton responde la pregunta de qué acontece a un objeto que tiene una o más fuerzas que actúan sobre él, con el enunciado de que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza que actúa sobre él, además, se conoce que la aceleración de un cuerpo es inversamente proporcional a la masa del mismo de estas dos relaciones es que se expresa de manera matemática la segunda ley de Newton por la ecuación 2.1.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad 2.1$$

Donde:

- F: Fuerza [N]
- m: Masa [kg]
- a: Aceleración [m/s²]

La ecuación 2.1 es una expresión vectorial que tiene tres componentes en los ejes X, Y, y Z.

B. Fuerza gravitacional

Todos los objetos son atraídos hacia la Tierra. La fuerza de atracción que ejerce la tierra sobre un objeto se llama fuerza gravitacional “F_g”. Esta fuerza se dirige hacia el centro de la tierra y su magnitud se llama peso.

Un cuerpo en caída libre posee una aceleración “g” en el eje “Y” (de un plano cartesiano “XY”) debido al peso. Aplicando la segunda ley de newton sobre un cuerpo en caída libre se obtiene la ecuación 2.2.

$$W = mg \quad 2.2$$

Donde:

- W: Peso [N]
- g: Aceleración de gravedad [m/s²]
- m: Masa [kg]

C. Tercera ley de Newton

A partir del efecto de la fuerza gravitacional sobre una superficie solida se plantea que las fuerzas son interacciones entre dos objetos: Si un dedo empuja sobre un libro, el libro empuja de vuelta sobre el dedo. Este importante principio se conoce como tercera ley de Newton. Un ejemplo claro es considerando un objeto que está sobre una mesa, el objeto no acelera, pero ejerce una fuerza sobre la mesa debido a su peso, a su vez la mesa ejerce una fuerza de reacción conocida como fuerza normal “N”. Esta fuerza evita que el objeto caiga a través de la mesa. Por tanto, en un objeto que está sobre una superficie existe una normal que evita su caída (en el eje Y) a través de dicha superficie, de aplicar la segunda ley de Newton se obtiene la ecuación 2.3.

$$\sum F = N - W = 0 \quad 2.3$$

Donde:

- N: Fuerza normal [N]

2.1.2 Fuerzas opuestas al movimiento

A. Fuerzas de fricción debido a la rodadura

Cuando un objeto está en movimiento ya sea sobre una superficie o en un medio viscoso como el aire o el agua, existe una resistencia al movimiento porque

el objeto interactúa con su entorno. A tal resistencia se le llama fuerza de fricción. Las fuerzas de fricción son muy importantes en la vida cotidiana. Permiten caminar o correr y son necesarias para el movimiento de los vehículos con ruedas.

Existen dos tipos de fuerzas de fricción, la fuerza estática y la cinética. La diferencia entre ambas radica en que la fuerza estática surge de aplicar una fuerza “F” en una masa “m” en la cual no se logra iniciar el movimiento, en cambio, la fuerza cinética surge de una fuerza “F” sobre una masa “m” que si logra iniciar el movimiento.

En el caso de un vehículo rodante siempre está presente la fuerza estática, puesto que cada punto del perímetro de la rueda es distinto y el vehículo debe volver a vencer la fricción para iniciar el movimiento. Esta fuerza ahora se denomina como fuerza resistente a la rodadura [17] y viene dada por la ecuación 2.4

$$F_r = C_r mg \cos(\alpha) \quad 2.4$$

Donde:

- F_r : Fuerza resistente debido a la rodadura [N]
- C_r : Coeficiente de rodadura
- α : Angulo de inclinación del plano [°]

B. Fuerza resistente debido al plano inclinado

Es la fuerza que se crea debido al peso del vehículo en su eje de avance, provocado por la inclinación del plano y que es contrario al movimiento [18]. En esencia este valor debe ser el más pequeño posible, para que esto sea así se debe disminuir el ángulo de inclinación del plano “ α ”. Esta fuerza viene determinada por la ecuación 2.5.

$$F_{pi} = mg \sin(\alpha) \quad 2.5$$

Donde:

- F_{pi} : Fuerza resistente debido al plano inclinado [N]

C. Fuerza resistente debido a la aerodinámica

Esta es la fuerza resistente que sufre un cuerpo al moverse a través del aire y que impide su avance [19], en un vehículo esta resistencia viene dada por la ecuación 2.6.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a S_f C_x v^2 \quad 2.6$$

Donde:

- F_a : Fuerza resistente debido a la aerodinámica [N]
- ρ_a : Densidad del aire [kg/m^3]
- S_f : Superficie frontal [m^2]
- C_x : Coeficiente aerodinámico
- v : Velocidad tangencial [m/s]

D. Fuerza resistente debido a la curvatura para vehículo ferroviario

Esta resistencia se debe al mayor rozamiento de las ruedas sobre los rieles al acomodarse el rodado a la curvatura de los rieles, la pestaña de la rueda anterior-externa de la base rígida frota contra la cara interna del riel externo, además la base rígida gira y el bicono se desplaza hacia el riel externo, esto provoca que la rueda externa ruede sobre un radio mayor que la interna. Esta resistencia se calcula con la fórmula empírica de Desdoutit [20] de la ecuación 2.7.

$$F_{cf} = \frac{1}{2} \frac{T_{if}}{R_c} W \quad 2.7$$

Donde:

- $F_{c\phi}$: Fuerza resistente debido a la curvatura [N]
- T_{if} : Trocha [m]
- R_c : Radio de curvatura [m]

E. Fuerza resistente debido a la inercia

Esta resistencia se presenta al momento de iniciar el movimiento de un cuerpo e implica el esfuerzo para vencer la inercia gravitacional debido al peso y la inercia de rotación debido a las masas rotantes como pueden ser los ejes, ruedas y demás masas rotantes [20], se calcula según muestra la ecuación 2.8.

$$F_i = ma + \frac{J_{Cr} \alpha_x}{R} \quad 2.8$$

Donde:

- F_i : Fuerza resistente debido a la inercia [N]
- J_{Cr} : Inercia rotacional de la carga [$\text{kgf} \cdot \text{m}^2$]
- R : Radio de la sección transversal [m]
- α_x : Aceleración angular [rad/s]

2.1.3 Ecuación dinámica final del vehículo

Según el estudio realizado previamente se puede describir el diagrama de cuerpo libre como muestra la Figura 2.1.

La suma de fuerzas del diagrama de la Figura 2.1 llega a la ecuación 2.9.

$$F_C = F_r + F_{pi} + F_a + F_{c\phi} + F_i$$

2.9

Donde:

- F_C : Fuerza total de la carga mecánica [N]

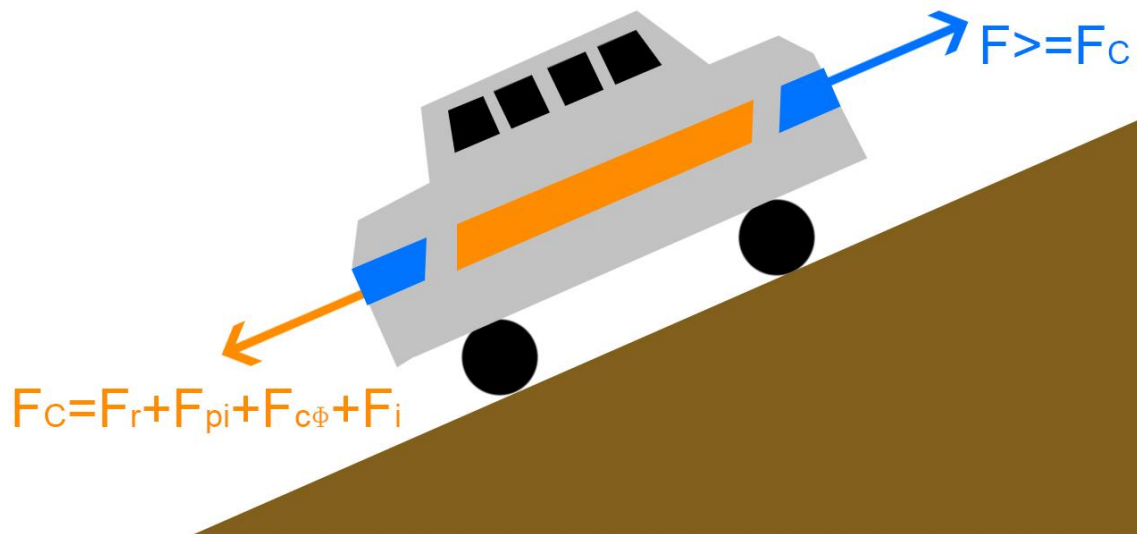


Figura 2.1. Diagrama de cuerpo libre del vehículo en subida.

“ F_C ” es la fuerza que el sistema motriz debe vencer para iniciar el movimiento, mientras mayor sea dicha fuerza la aceleración del vehículo aumentará de manera proporcional.

El torque a vencer por el sistema motriz viene dado por la relación de esta fuerza con el radio “ R ” de las ruedas del vehículo, por tanto, el torque de la carga será

$$\tau_C = F_C R$$

2.10

Donde:

- τ_C : Torque de la carga [N·m]

2.2 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA CON IMANES PERMANENTES

2.2.1 Modelado del motor

Un motor CC de imanes permanentes está formado por un estator o inductor (imanes permanentes) y también por una parte fija llamada rotor o inducido (armadura) que es la parte móvil. La parte móvil del motor posee un eje que puede ser conectado a un tren de engranes para transmitir la potencia mecánica del motor a una carga externa. Este sistema electromecánico se puede modelar como muestra el esquema de la Figura 2.2.

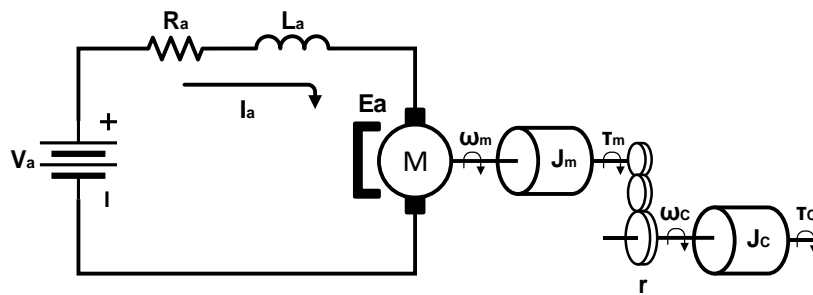


Figura 2.2. Sistema electromecánico con motor CC de imán permanente, transmisión mecánica y carga.

El modelo de este sistema se puede dividir en dos. El primero es un sistema eléctrico, correspondiente a la armadura del motor con sus respectivas resistencia, inductancia, fuerza electromotriz y tensión aplicada en la armadura. El segundo es un sistema mecánico que comprende los momentos de inercia del eje, del tren de engranes y de la carga, además del peso gravitacional de la carga. El efecto de la viscosidad se desprecia en este caso.

La función de transferencia que gobierna la velocidad angular en la carga respecto de la tensión aplicada en la armadura viene dada por la ecuación 2.11.

$$G_T(s) = \frac{\Omega_C(s)}{V_a(s)} = \frac{1/k_{mr}}{(s\gamma_{mT} + 1)(s\gamma_e + 1)} \quad 2.11$$

Donde:

- G_T : Función de transferencia total del motor en s [rev/(min·V)]
- Ω_C : Velocidad del motor en s [rev/min]
- V_a : Tensión de armadura en s [V]
- k_{mr} : Constante electromagnética del motor-reductor [V·min/rev]
- γ_{mT} : Constante mecánica total del motor
- γ_e : Constante eléctrica del motor

Las ecuaciones para hallar “ G_T ” se encuentran en el punto A1 del Anexo A.

2.2.2 Identificación del motor con entrada escalón

El motor EMG30 cuenta con un tren de engranes reductor de 1:30 (más características en apartado C1.1 del Anexo C). Este reductor será considerado como la relación de transmisión de potencia mecánica. Considerando una carga mecánica nula, el modelo electromecánico que se obtiene viene dado por 2.12. Este modelo es similar al de 2.11, pero, con la diferencia en el valor de la constante mecánica que influye en el tiempo de respuesta del motor debido a la inercia. Se puede revisar la obtención de este modelo en el punto A1.2 del Anexo A.

$$G_{mr}(s) = \frac{1/k_{mr}}{(s\gamma_{mr} + 1)(s\gamma_e + 1)} \quad 2.12$$

Donde:

- G_{mr} : Función de transferencia del motor-reductor en s [rev/(min·V)]
- γ_{mr} : Constante mecánica total del motor
- “ k_{mr} ” y “ γ_e ” se encuentran descritos en ecuación 2.11

Una vez se tiene considerado el modelo de 2.12, para lograr la identificación del motor, se debe estudiar el comportamiento de la velocidad angular de su eje en el tiempo. Respecto de aplicación de una tensión en la armadura. Esto se realiza con una tensión de armadura de tipo escalón que varía de 0 a 5 [V]. Para medir la velocidad el motor se cuenta con un codificador de cuadratura incremental que entrega dos señales A y B, las cuales tienen un desfase entre sí de 90° y generan 90 pulsos por vuelta en la práctica, estas señales se pueden observar en la Figura 2.3.

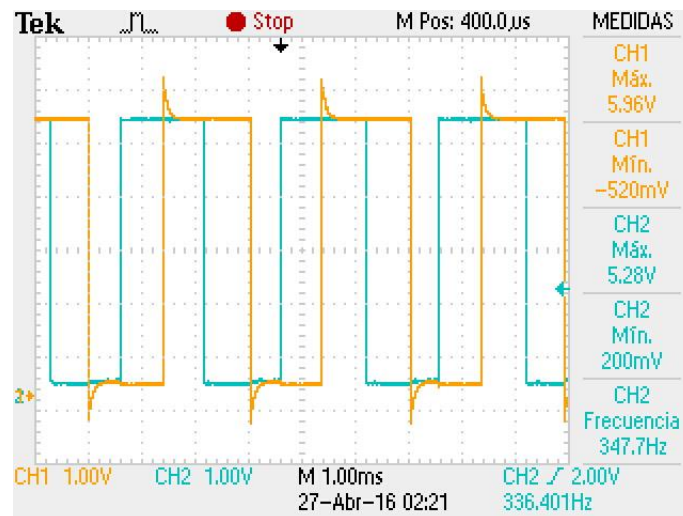


Figura 2.3. Señales A y B del codificador incremental del motor EMG30, obtenidas por osciloscopio Tektronik TDS 2012C.

Para interpretar dichos pulsos se utiliza la plataforma de prototipos Arduino con el código mostrado en el apartado B1.1 del Anexo B.

Luego de aplicar un escalón de tensión en la armadura. Por medio del puerto serial de Arduino se registran los datos obtenidos y se grafica la respuesta de velocidad del motor en función del tiempo. Los datos obtenidos se ven en las Figura 2.4.

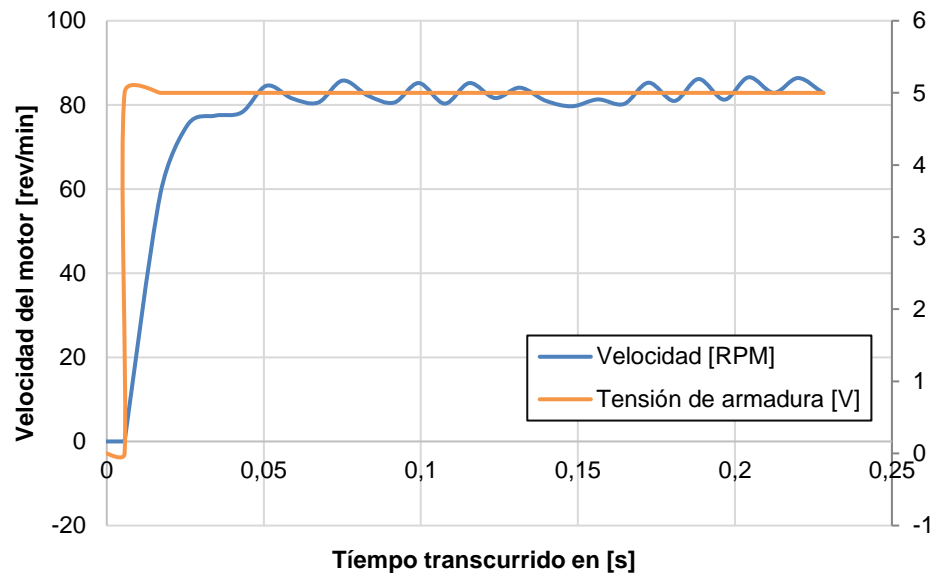


Figura 2.4. Respuesta de velocidad del motor ante una entrada escalón en la armadura

Estos datos fueron guardados en un archivo Excel de nombre emg30.xlsx para ser procesado con el software Matlab y la función “Ident” siguiendo el procedimiento adecuado en el punto B2.1 del Anexo B, de la cual se obtienen los parámetros mostrados en la Tabla 2.1. La respuesta del modelo se puede observar en la Figura 2.5.

Tabla 2.1. Parámetros del modelo para el motor EMG30

Parámetro	Valor
Constante $K=1/k_{mr}$ [min/rev]	16,525
Constante mecánica γ_{mr}	0,00671
Constante eléctrica γ_e	0,000176

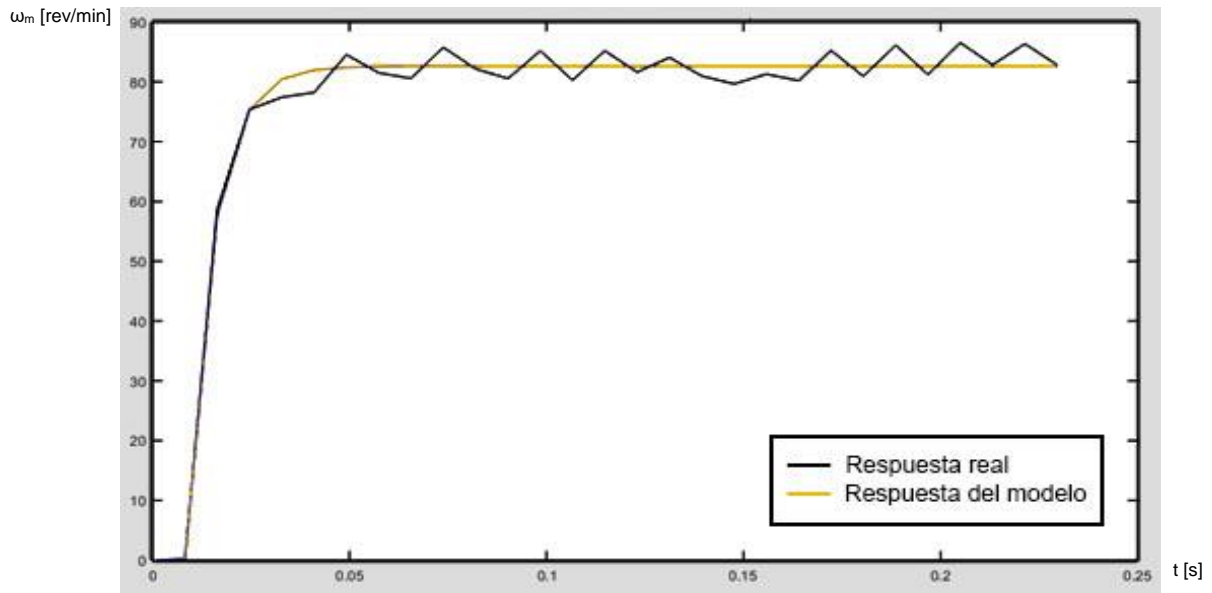


Figura 2.5. Respuesta a escalón del motor EMG30 real y del modelo.

El modelo obtenido tiene una exactitud del 89,52%, por ende, es un modelo bastante cercano al motor, pero, este modelo no considera el comportamiento de la corriente del motor. Se puede mejorar el modelo si se obtiene el valor del “ k_{mr} ” a partir de la corriente en la armadura. Para realizar esto se aplica una tensión de armadura variable desde 5 [V] hasta 12 [V] en pasos de 1 [V], luego se mide la tensión, la corriente y la resistencia de armadura con el multímetro digital MASTECH MS8217, este último con un valor de 4,1 [Ohm]. La velocidad angular se mide con el codificador incremental y Arduino. Se ingresan estos valores en la ecuación 2.13 que corresponde a la respuesta del sistema eléctrico en régimen permanente (ver apartado A1.1 del Anexo A), y se construye la Tabla 2.2.

$$k_{mr} = \frac{v_a(t) - R_a i_a(t)}{\omega_m(t)} \quad 2.13$$

Donde:

— $v_a(t)$: Tensión de armadura dependiente del tiempo [V]

- $i_a(t)$: Corriente de armadura dependiente del tiempo [A]
- R_a : Resistencia de armadura [Ω]
- ω_m : Velocidad angular del eje motriz [rad/s]

Tabla 2.2. Mediciones realizadas para determinar la constante magnética del motor EMG30

Va [V]	Ia [mA]	N [RPM]	W [rad/s]	Km [Nm/A]
12,01	0,105	223,9	23,4	0,512
10,98	0,102	204,7	21,4	0,512
10,06	0,100	186,4	19,5	0,515
8,98	0,099	166,4	17,4	0,515
8,03	0,098	146,3	15,3	0,524
7,02	0,096	127,6	13,4	0,525
6,01	0,094	108,3	11,3	0,530
4,98	0,092	88,0	9,2	0,541
			Promedio	0,522

Ahora dado que se tiene el valor ajustado a 0,552 se obtiene un valor actualizado del “K” del motor de 18,294. Por tanto, los parámetros definitivos son los mostrados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros del modelo para el motor EMG30

Parámetro	Valor
Constante $K=1/k_{mr}$ [min/rev]	18,294
Constante mecánica γ_{mr}	0,00671
Constante eléctrica γ_e	0,000176

De la Tabla 2.3, de la ecuación 2.12 y del apartado A1 del Anexo A. se construye la Tabla 2.4 que corresponde al modelo electromecánico del motor, el cual se usa para simular el comportamiento del motor en el software Simulink.

Tabla 2.4. Parámetros del motor para construir el modelo a simular

Parámetro	Valor
Constante K_{mr} [V·seg/rad]	0,522
Resistencia armadura [Ω]	4,1
Inductancia armadura [mH]	0,722
Momento de inercia del rotor [mkgf·m ²]	0,446

El momento de inercia obtenido en la Tabla 2.4. solo considera el momento de inercia al interno del motor, y no considera los momentos de inercia de las masas rotantes (engranes, ejes y ruedas). Con ayuda del software Inventor 3D se estima el momento de inercia de estos componentes a un valor de 1 [mkgf·m²]. Este valor se debe sumar al momento de inercia del rotor para obtener los parámetros definitivos del modelo como muestra la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Parámetros definitivos del modelo para el motor EMG30

Parámetro	Valor
Constante $K=1/k_{mr}$ [min/rev]	18,294
Constante mecánica γ_{mr}	0,0218
Constante eléctrica γ_e	0,000176

Por último y según la hoja de datos del motor EMG30 (apartado A1.1 del Anexo A), el torque nominal es de 0,15 [kgf·cm], se considera este dato como torque

máximo a realizar por el motor. Con ayuda del software Mathcad se calcularon los parámetros necesarios para obtener la fuerza y el torque el vehículo, de lo cual se observa que el ángulo de inclinación del plano es la variable que más afecta en el diseño, con ángulo de inclinación de 10° , un peso de 3,5 [kg] y las fuerzas involucradas de la Figura 2.1, se obtiene la Tabla 2.6

Tabla 2.6. Estimación de fuerzas y torques del vehículo según pendiente

Situación	Fuerza [kgf]	Torque [kgf·cm]
Pendiente de subida	0,608	1,52
Sin pendiente	0,0000529	0,0001324
Pendiente de bajada	-0,608	-1,52

2.2.3 Simulación del motor en Simulink

La simulación del motor se realiza con la herramienta Simulink del software Matlab. Para esto se construye el modelo del motor con el uso de la librería “Simscape” que viene por defecto en el software, además para estudiar el comportamiento del modelo, se deben conectar herramientas virtuales de medición para la tensión, corriente, velocidad y el torque. El software consta con sensores virtuales que se conectan de manera similar a como se realiza en la vida real, este instrumento manda el valor medido como una variable “PS” (variable física) que debe ser transformada a una variable “S” (variable de Simulink), para luego ser observada en un osciloscopio virtual.

La simulación consiste en estudiar el comportamiento del motor cuando este debe subir una pendiente, luego sin pendiente y finalmente con una pendiente negativa. Se estudiará el comportamiento de la corriente, la velocidad y el torque del motor a través de observar las curvas respectivas en función del tiempo, con una

tensión aplicada a la armadura de 6 [V]. Las curvas obtenidas se pueden observar en la Figura 2.6. El diagrama de bloques de la simulación se puede revisar en el apartado B3.1 del Anexo B.

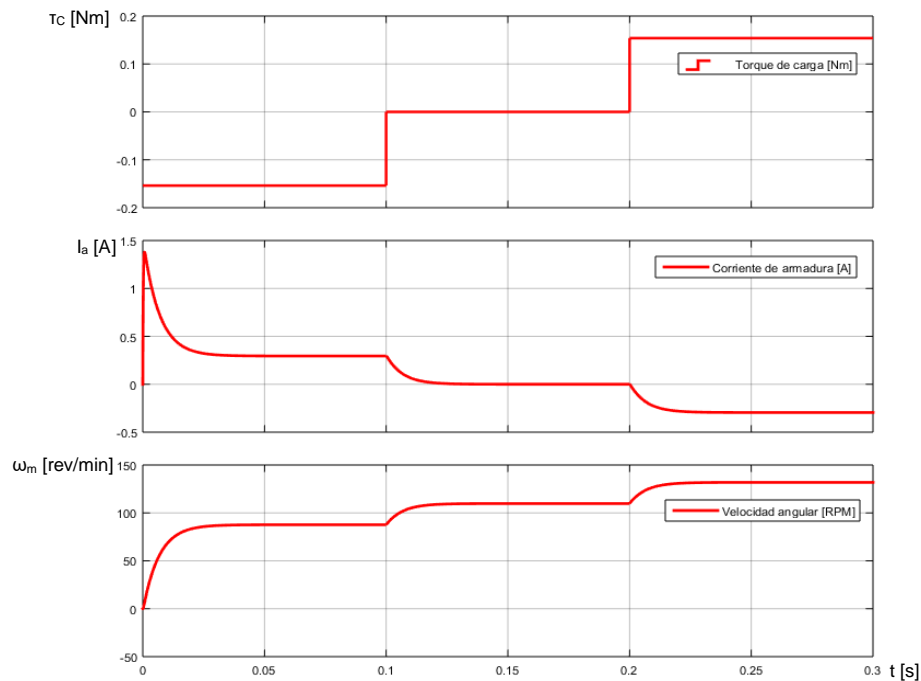


Figura 2.6. Respuesta del motor EMG30 ante una tensión de 6 [V] con disturbio de escalones de torque

A. Análisis en el tramo $0 < t < 0,1$

Como se ve en la figura anterior, en este tramo el torque de la carga es negativo e implica que la carga se opone al movimiento rotacional del motor, por este motivo el motor debe aplicar un torque mayor que el de la carga para iniciar el movimiento. Luego se puede observar en la curva de la corriente, que inicialmente se tiene un sobre-impulso debido a la fuerza resistente de la inercia, sucesivamente este sobre-impulso comienza a disminuir hasta estabilizarse a un valor constante (300 [mA]). Finalmente se observa en la curva de velocidad, que el motor alcanza

una velocidad de 90 [RPM] al mismo tiempo que la corriente se estabiliza, esto es porque en ese intervalo se vence la inercia y el motor se encuentra acelerando hasta que llega a una velocidad constante exigiendo una alta corriente.

B. Análisis en el tramo $0,1 < t < 0,2$

En este tramo se puede observar que el torque de la carga es nulo y el motor debe realizar un pequeño torque para iniciar el movimiento, esto se debe porque este último se encuentra en una superficie horizontal y las fuerzas opuestas al movimiento son prácticamente nulas. De la curva de corriente se observa que esta también se anula dado que es directamente proporcional al torque del motor. Con respecto a la curva de velocidad se observa que esta aumenta al valor de 110 [RPM], debido a que el motor ahora debe realizar un menor esfuerzo para desplazarse.

C. Análisis en el tramo $0,2 < t < 0,3$

Por último, se observa de la curva del torque de la carga que es positivo y está a favor del movimiento, por lo que el motor ahora debe realizar un torque contrario al movimiento para frenarse, esto provoca que el motor actúe como generador e introduce el concepto de frenado regenerativo. Se observa que la corriente es negativa y de un valor de -300 [mA], la inversión de la corriente significa que esta invierte su sentido de circulación y ahora es el motor el que entrega energía eléctrica, es decir, se confirma que ahora el motor opera como generador. De la curva de velocidad del motor se observa que se dispara y llega a ser de 130 [RPM], esto por el efecto gravitacional del peso.

En conclusión, se observa que la máquina opera como motor y generador realizando variaciones en la carga, lo cual se demuestra principalmente con la

inversión de la corriente de armadura, la cual es directamente proporcional al torque del motor, hasta aquí se puede observar el concepto de frenado regenerativo, pero, no se tiene un control de la velocidad que varía según la carga aplicada.

2.3 CONVERTIDOR CC-CC REDUCTOR, REVERSIBLE EN CORRIENTE

2.3.1 Principio de operación

Este tipo de convertidores CC-CC son utilizados para controlar la tracción y el frenado regenerativo de una máquina de CC. El principio de operación de estos convertidores se detalla a continuación. Consideremos un motor de CC de imanes permanentes en donde el torque y la potencia mecánica vienen dadas por las ecuaciones 2.14 e 2.15.

$$P_m = \tau_m \omega_m \quad 2.14$$

$$\tau_m = k_m i_a \quad 2.15$$

Donde:

- P_m : Potencia del motor [W]
- τ_m : Torque electromagnético del motor [N·m]
- ω_m : Velocidad angular del motor [rad/s]
- i_a : Corriente de armadura [A]

La transición de motor a generador ocurre a través de la inversión de la corriente de armadura, en consecuencia, se invierte el sentido del torque y también de la potencia. La aplicación de una potencia mecánica negativa mientras el motor gira a una velocidad ω_m , resulta en un frenado forzado por el torque negativo, por tanto, para efectuar un frenado regenerativo es necesario invertir la señal del torque invirtiendo la corriente de armadura y manteniendo la corriente de campo constante,

en el caso de un motor CC de imán permanente, esta ya es constante por naturaleza. En la Figura 2.7 se puede observar lo recientemente explicado.

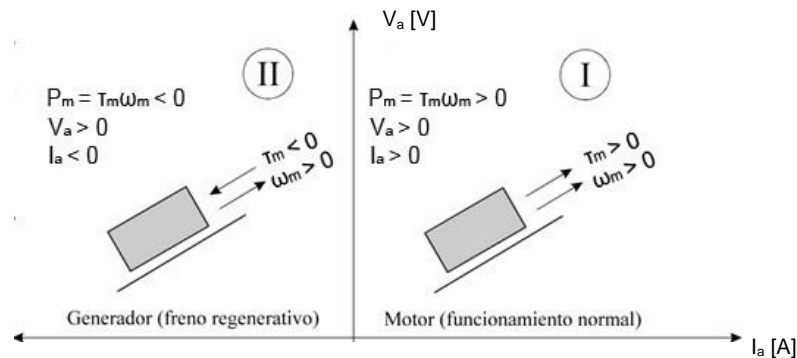


Figura 2.7. Funcionamiento del motor en dos cuadrantes.

I) Modo tracción, II) Modo freno regenerativo

El convertidor reversible en corriente más básico es del tipo reductor, como muestra la Figura 2.8. Este convertidor es el que se va a utilizar para realizar la labor de invertir la corriente del motor y hacer que opere como generador.

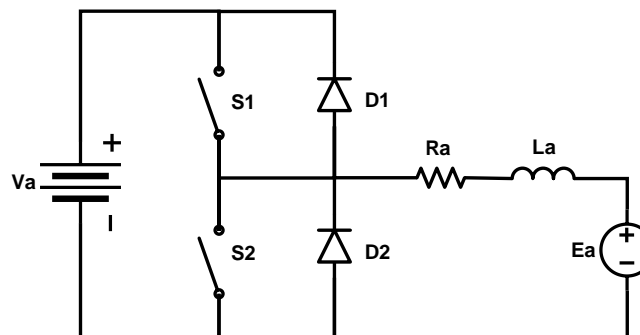


Figura 2.8. Convertidor reductor reversible en corriente con carga RLE

2.3.2 Modos de operación del convertidor

Para entender la operación de este convertidor se realiza un estudio de su comportamiento en tres operaciones: modo tracción, modo regeneración y ambos modos.

A. Modo tracción

Ocurre cuando el interruptor S2 está cerrado y S1 abre y cierra cíclicamente, por consiguiente, existen dos etapas de operación, una de carga y otra de descarga del consumo de energía. En la Figura 2.9 se pueden observar las formas de onda típicas de este convertidor operando en tracción.

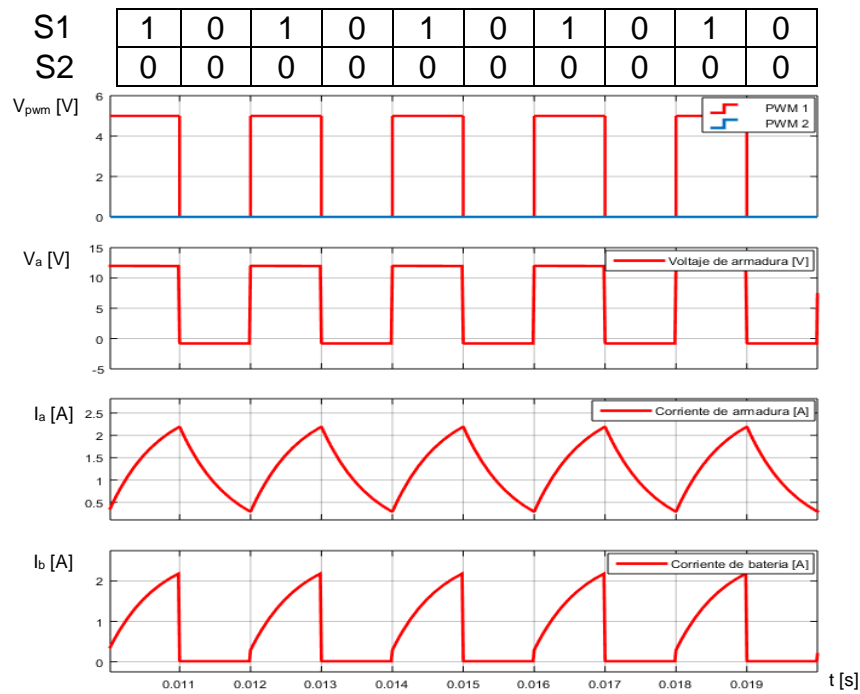


Figura 2.9. Formas de onda típicas del convertidor reductor reversible en corriente operando en modo tracción

Como se puede observar de la figura anterior, en el tramo $0,010 < t < 0,011$ el interruptor S1 está cerrado y permite la circulación de la corriente desde la fuente de energía hacia la carga RLE. Luego en el instante $0,011 < t < 0,012$ cuando S1 está abierto, la energía acumulada en la carga RLE se descarga por el diodo D2. Cabe recalcar que en el instante que la corriente se descarga por D2, la batería se encuentra en circuito abierto, por eso la corriente en la armadura es distinta a la

corriente en la batería. Una explicación más detallada se encuentra en el apartado A2.1 del Anexo A.

B. Modo regeneración

En este modo el interruptor S1 está siempre abierto y S2 abre y cierra continuamente, por consiguiente, tiene dos etapas de operación, una de carga y otra de descarga de generación de energía. En la Figura 2.10 se puede observar las formas de onda típicas de este convertidor operando en regeneración.

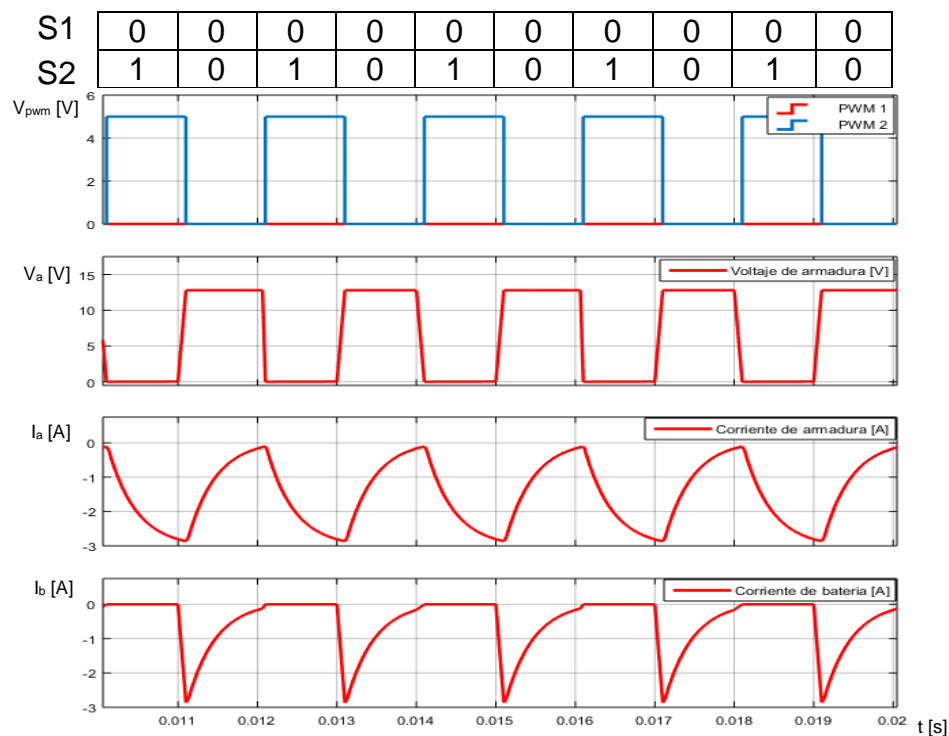


Figura 2.10. Formas de onda típicas del convertidor reductor reversible en corriente operando en modo regeneración

Como se puede observar de la figura anterior, en el tramo $0,010 < t < 0,011$ el interruptor S2 está cerrado y la carga RLE genera energía eléctrica. Luego en el instante $0,011 < t < 0,012$ cuando S2 está abierto, la energía acumulada en la carga

RLE se descarga por el diodo D1 y la corriente circula desde la carga hacia la fuente. Cabe recalcar que cuando S2 está cerrado la batería se encuentra en circuito abierto, por eso la corriente en la armadura es distinta a la corriente en la batería. Una explicación más detallada se encuentra en el apartado A2.2 del Anexo A.

C. Alternando ambos modos

Este modo de funcionamiento es el más empleado, los interruptores S1 y S2 abren y cierran complementariamente con una variación en el ciclo de trabajo “ δ ”, esto implica que la máquina alterna su operación como motor y generador continuamente. Este modo combina los dos anteriores y posee cuatro etapas, las primeras dos de carga y descarga del consumo de energía, y otras dos de carga y descarga de generación de energía. En la Figura 2.11 se puede observar las formas de onda típicas de este convertidor operando en ambos modos.

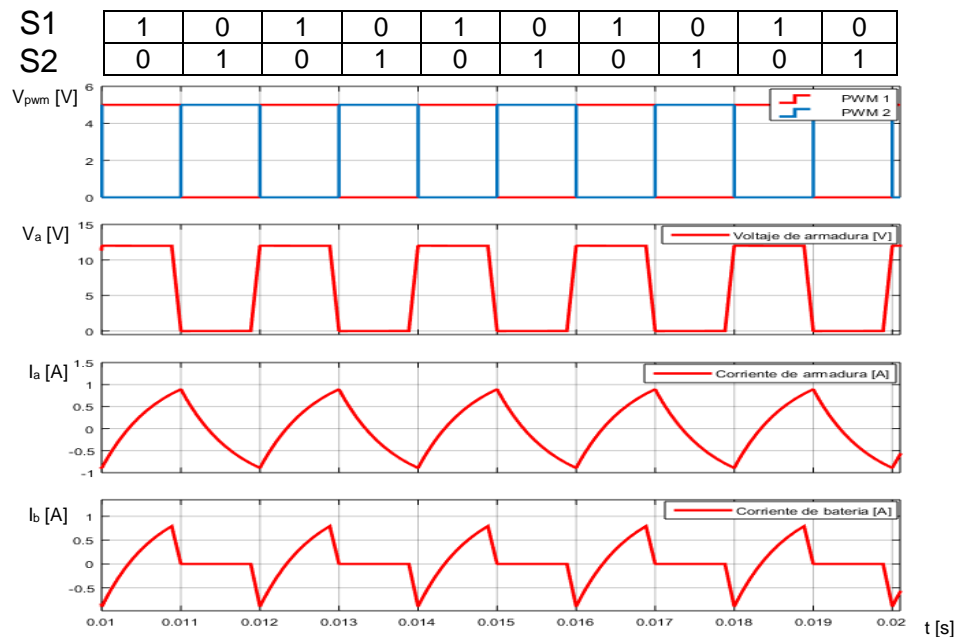


Figura 2.11. Formas de onda típicas del convertidor reductor reversible en corriente operando en modo tracción/regeneración

Como se puede observar de la figura anterior, en el tramo $0,010 < t < 0,011$ el interruptor S1 está cerrado y S2 está abierto y la corriente pasa de ser negativa a ser positiva, es decir en el primer instante la carga RLE se encuentra entregando energía a la fuente a través del diodo D1, pero se comienza a descargar y cuando se ve superada por la fuente, esta última es la que entrega energía a la carga RLE ahora a través del interruptor S1. Luego en el instante $0,011 < t < 0,012$ cuando S1 está abierto y S2 está cerrado la energía acumulada en la carga RLE se descarga por el diodo D2 y cuando la corriente se anula el interruptor S2 permite que la carga genere energía hasta que se vuelva a repetir el ciclo. Cabe recalcar que cuando S1 está abierto y S2 está cerrado la batería se encuentra en circuito abierto, por eso la corriente en la armadura es distinta a la corriente en la batería. Una explicación más detallada se encuentra en el apartado A2.3 del Anexo A.

2.3.3 Simulación del motor con convertidor en Simulink

La simulación del motor con carga ya se estudió anteriormente, ahora solo hace falta añadir la etapa del convertidor reductor. Las formas de onda del convertidor con el motor se pueden observar en la Figura 2.12, el diagrama de bloques de Simulink se puede revisar en los apartados B3.2 y B3.3 del Anexo B.

La primera curva de la Figura 2.12 corresponde a las señales de comando para abrir y cerrar los interruptores S1 y S2, ambas son del tipo “Modulación por ancho de pulso” también conocido por su inglés “PWM” (Pulse-Width Modulation). Ambas señales tienen la particularidad que una es el complemento de la otra, puesto que si ambas se cerraran al mismo tiempo se produciría un cortocircuito y los interruptores tanto como el motor podrían descomponerse.

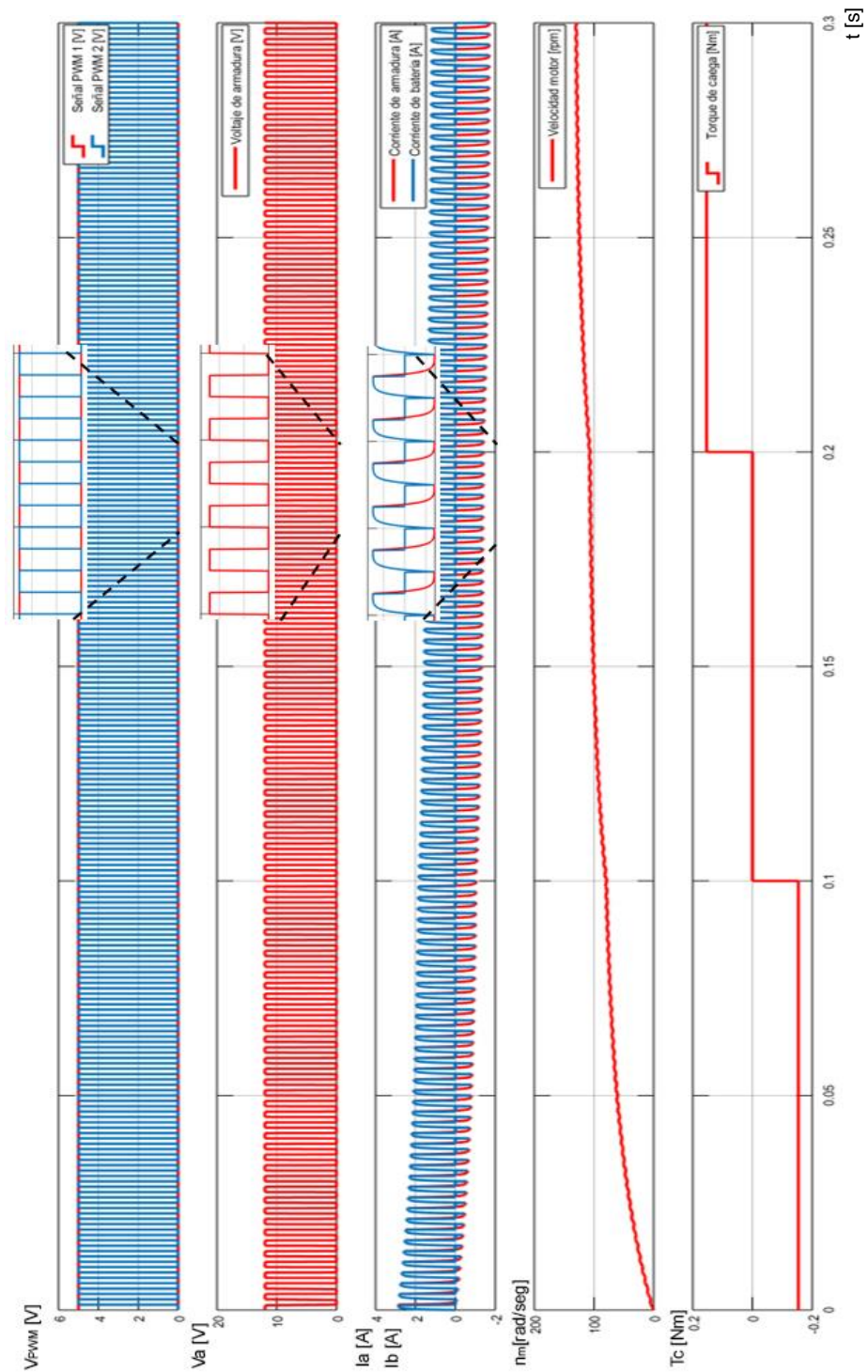


Figura 2.12. Formas de onda del motor con el convertidor reductor reversible en corriente operando en modo tracción/regeneración

La segunda curva corresponde a la tensión de armadura a partir de una fuente externa y del ciclo de trabajo del interruptor S1. En este caso el ciclo de trabajo es del 50% para ambos interruptores, pero como se dijo anteriormente una es el complemento de la otra, por tanto, si el ciclo de trabajo del interruptor S1 es del 75%, el de la tensión de armadura también y el ciclo de S2 sería del 25%.

La tercera curva corresponde a la corriente de armadura y a la de batería, se puede observar que tiene el comportamiento esperado para el modo de operación alternado. Pero a medida que el torque en la carga sea contrario al movimiento del motor, este último consume más corriente y genera menos, pero, a medida que el torque de la carga esté a favor del movimiento del motor, este último consume menos corriente y genera más.

Por último y no menos importante la cuarta y quinta curva corresponden a la velocidad y al torque del motor, que básicamente son similares a los obtenidos en la Figura 2.6 y se puede concluir lo mismo de ellas, con la diferencia de que la velocidad del motor ahora tiene una cierta ondulación natural, debido a la misma ondulación de la corriente.

En la práctica los elementos que realizan la labor de interruptor son semiconductores, como los tiristores o transistores, en este caso para la simulación se utilizaron transistores MOSFET que contienen un diodo en paralelo [21].

CAPÍTULO 3.

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En este capítulo se presenta el cumplimiento del objetivo de diseñar una estrategia de control de velocidad que siga una referencia. Para lograr esto se diseña un controlador a partir de los modelos obtenidos en el Capítulo 2 con el software Matlab, luego se implementa en un lazo cerrado de control en el software Simulink para estudiar su comportamiento en conjunto con el motor y el convertidor CC-CC.

3.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos interconectados, encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de un proceso, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados incluso en presencia de posibles perturbaciones. Por lo general, se usan en sistemas de control industrial en procesos de producción industriales para controlar equipos o máquinas.

Existen tres clases comunes de sistemas de control, primero los sistemas de lazo abierto o de control manual, luego sistemas de lazo cerrado o de control automático clásico y por último sistemas multi-variables o de control automático avanzado.

En los sistemas de control de lazo abierto el control de la planta la realiza un operador humano, ya sea de forma directa, o de forma remota, con la ayuda de

controladores y equipamiento. En un sistema de lazo cerrado o de control clásico, el control de la planta se realiza de forma autónoma, sin la participación del humano, con la ayuda de controladores y equipamiento. En un sistema multi-variables o de control avanzado, el control se realiza por cálculos de algoritmos avanzado de varias variables de entrada y de salida por medio de computadores de alta velocidad.

3.1.1 Conceptos preliminares

Todo sistema de control debe tener los elementos mostrados en el diagrama del sistema de la Figura 3.1.

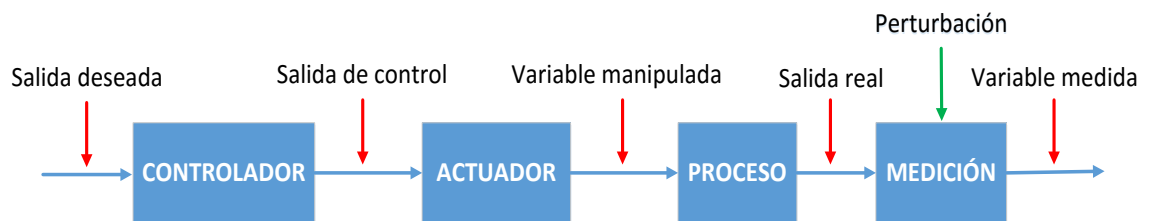


Figura 3.1. Diagrama de elementos básicos de una estructura de control

Como ya se introdujo anteriormente existen tres tipos de control: el control manual, el control clásico y el control avanzado, como se observa de la Figura 3.2. A medida que se aumenta la calidad del control se disminuya la incerteza y se aumenta la producción, pero, todo sujeto a una mayor inversión en el control.

Ahora bien, el sistema de control manual no se justifica simplemente porque el control de una máquina eléctrica requiere de una alta velocidad, el tiempo de establecimiento es muy rápido al igual que las perturbaciones que recibe, como para que un operador los ajuste a tiempo. El sistema de control avanzado tampoco se justifica en este caso, debido a que solo se requiere un lazo de control para la velocidad. El sistema de control clásico de un lazo cerrado es idóneo y más que suficiente para satisfacer los requerimientos de este trabajo.

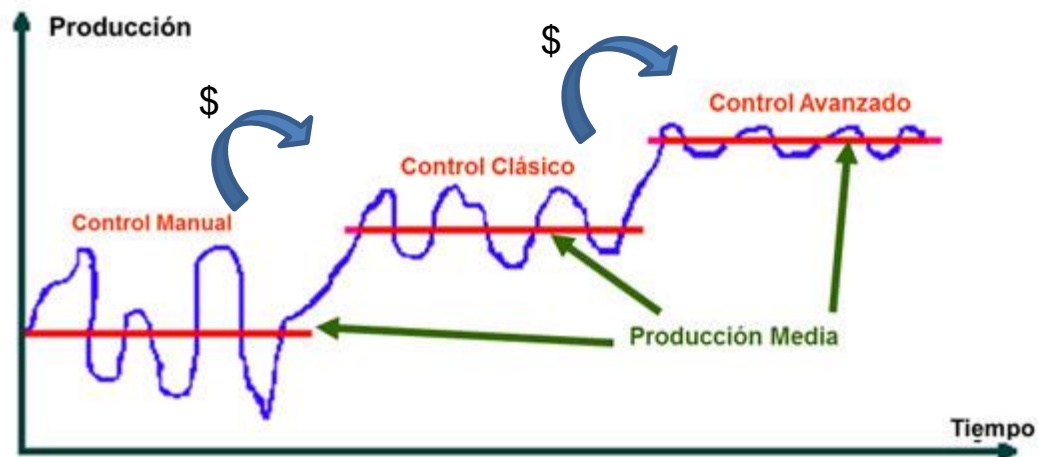


Figura 3.2. Respuesta de los sistemas de control según tecnología.

3.1.2 Sistema de control clásico (lazo cerrado)

Su uso está enfocado en procesos simples, de pocas variables involucradas y con el objetivo de obtener una salida deseada “SP” fija ante la variación de las perturbaciones de una planta en el caso de ser un lazo cerrado regulable, o, que la salida de la planta siga la referencia de una salida deseada “SP” variable. El diagrama de bloques de un control clásico se puede observar en la Figura 3.3.

Para diseñar un control clásico solo hace falta un modelo fenomenológico o una identificación empírica del proceso y del actuador. Su complejidad teórica es baja, pero con alta confiabilidad, su manejo es limitado y los datos por lo general son simples, con corriente en unidades de [mA]. Algunos ejemplos de este tipo de control son los controladores PID, Dahlin, Kalman, Deadbeat, cascada, pre alimentado, etc. A pesar de las diversas técnicas mencionadas el más utilizado en la industria actual es el PID porque han demostrado ser robustos y muy beneficiosos.

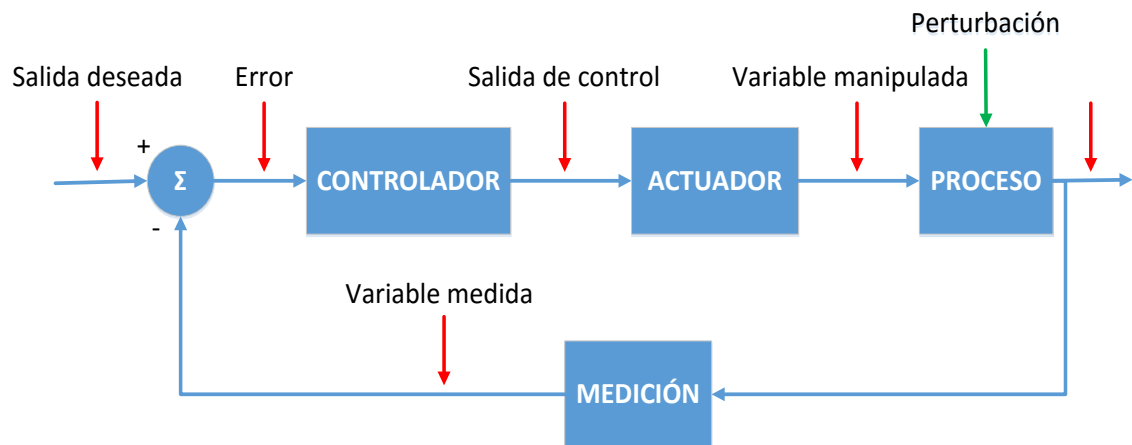


Figura 3.3. Lazo cerrado de control típico.

3.2 CONTROLADORES DEL TIPO PID

Un controlador PID es un mecanismo de control por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial orientado a procesos simples del tipo SISO (una entrada, una salida).

El algoritmo del control PID consiste de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional depende del error actual, el Integral depende de los errores pasados y el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio del actuador.

. Un controlador PID puede ser llamado también PI, PD, P o I en la ausencia de las acciones de control respectivas. Los controladores PI son particularmente comunes, ya que la acción derivativa es muy sensible al ruido, y la ausencia del proceso integral puede evitar que se alcance al valor deseado debido a la acción de control.

Prácticamente todos los controladores continuos usados en la industria son del tipo PID. Cada una de las acciones de control proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), se pueden ajustar en forma independiente, pudiéndose obtener combinaciones entre ellas estableciendo controladores PI, PID, PD u otras. Un controlador del tipo PID ideal queda expresado matemáticamente como muestra la ecuación 3.1 y su diagrama de bloques del sistema como muestra la Figura 3.4. La ecuación 3.2 muestra la expresión de un PID luego de aplicar la transformada de Laplace.

$$m_{PID}(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad 3.1$$

$$M_{PID}(s) = K_P \left[1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right] E(s) = \left[K_P + \frac{K_I}{s} + sK_D \right] E(s) \quad 3.2$$

Donde:

- $m_{PID}(t)$: Señal de control PID en el tiempo
- $M_{PID}(s)$: Señal de control PID en s
- $e(t)$: Error de la señal de referencia con la medida en el tiempo
- $E(s)$: Error de la señal de referencia con la medida en s
- T_i : Constante de tiempo integral [s]
- T_d : Constante de tiempo derivativa [s]
- K_P : Constante proporcional
- K_I : Constante integral
- K_D : Constante derivativa

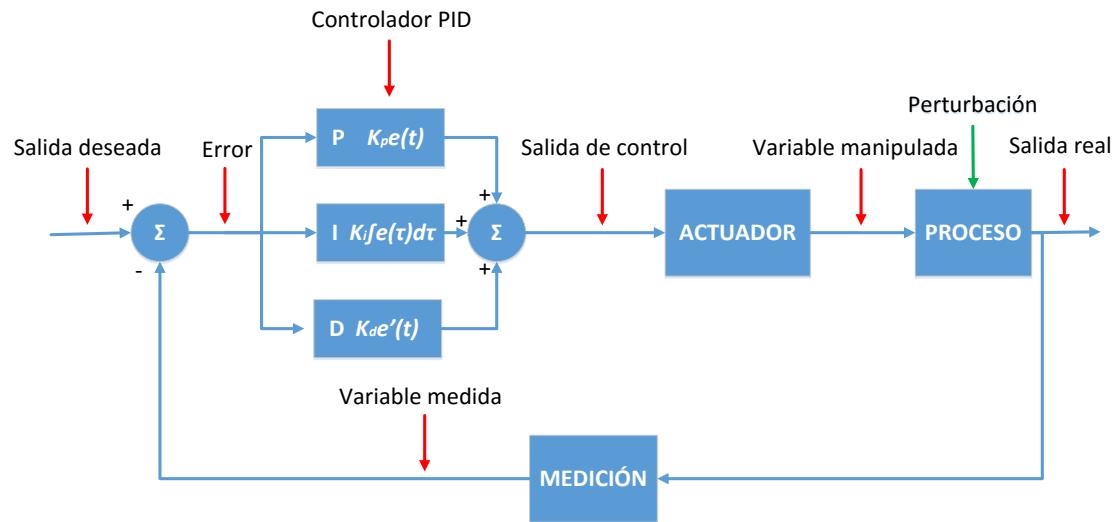


Figura 3.4. Lazo cerrado de control PID clásico.

Una correcta selección del controlador para un proceso depende principalmente del efecto que éste realizara sobre el proceso. En un controlador PID ello pasa por conocer el efecto que producen los tres modos de control.

El control proporcional “P” consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional para lograr que el error en estado estacionario se aproxime a cero, pero en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango.

El control integral “I” tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un período determinado; Luego es multiplicado por una constante K_i . Posteriormente, la respuesta integral es

adicionada al modo Proporcional para formar el control $P + I$ con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

El control derivativo mantiene el error al mínimo con una corrección proporcional a la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error incremente. Se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante K_D y luego se suma a las señales anteriores ($P+I$). Es importante adaptar la respuesta de control a los cambios en el sistema ya que una mayor derivada corresponde a un cambio más rápido y el controlador puede responder acordemente.

3.2.1 Selección del controlador adecuado

Un problema de los controladores PID ocurre en la parte derivativa, el ruido puede afectar al sistema, haciendo que esas pequeñas variaciones, hagan que el cambio a la salida sea muy grande. Generalmente un Filtro Pasa Bajo (FPB) ayuda, ya que elimina las componentes de alta frecuencia del ruido. Sin embargo, un FPB y un control derivativo pueden hacer que se anulen entre ellos. Alternativamente, el control derivativo puede ser sacado en algunos sistemas sin mucha pérdida de control. Esto es equivalente a usar un controlador PID como PI solamente.

En el caso del motor EMG30 controlado por un convertidor CC reversible en corriente ocurre justamente que existe mucho ruido debido a la frecuencia de conmutación de los transistores que afecta a la corriente y a la velocidad. Es por esto que la mejor opción para realizar el control del motor es con un controlador PI.

3.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR PI EN MATLAB

Para realizar el diseño del controlador PI en Matlab se utiliza la función “pidtool” (el código se puede revisar en el apartado B2.2 del Anexo B). Para diseñar el controlador, solo es necesario definir la función de transferencia del motor, y

luego, ejecutar la función `pidtool(nombre de la planta)`. Esta herramienta permite ajustar el PI para que sea rápido o lento, agresivo o robusto, y muestra una gráfica de su comportamiento. La curva obtenida del controlador PI se puede observar en la Figura 3.5. Los parámetros del PI son $K_P=0,3115$ y $K_I=7,37$.

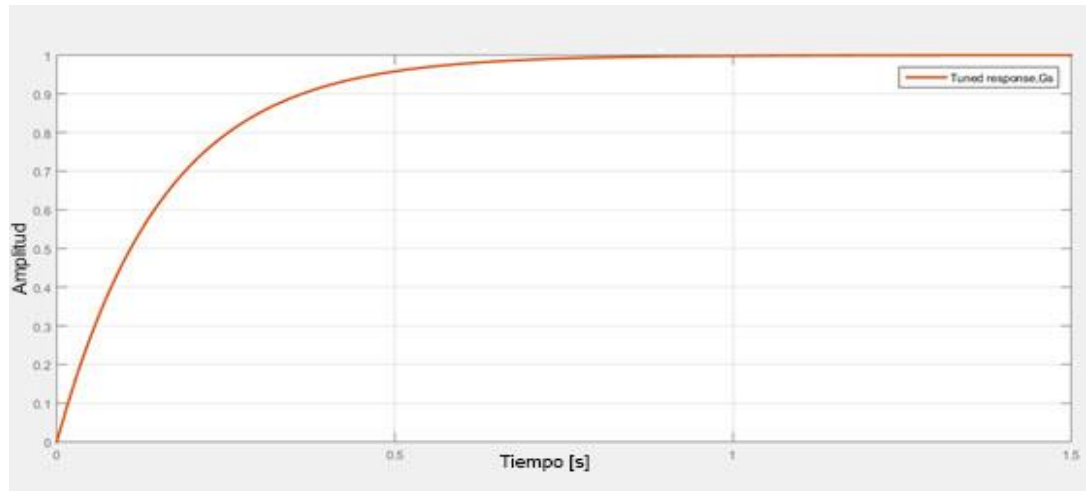


Figura 3.5. Sintonización del PI en Matlab con la herramienta `pidtool`

3.4 SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR PI EN SIMULINK

La simulación del controlador se realiza utilizando el esquema del apartado B3.4 del Anexo B. Este esquema es similar al utilizado en la simulación anterior, pero, se le añade un lazo cerrado de control PI. Es importante recalcar que el modelo de la planta debe considerar el convertidor, y que la salida del PI va a ser el valor de referencia de una señal PWM. Tal como se observa en la Figura 3.6.

En esta ocasión la velocidad del vehículo sigue la referencia establecida a pesar de las variaciones que se realizan en la carga mecánica en el motor. Se observa que el ancho del pulso de la tensión de armadura disminuye a medida que la carga también lo hace.

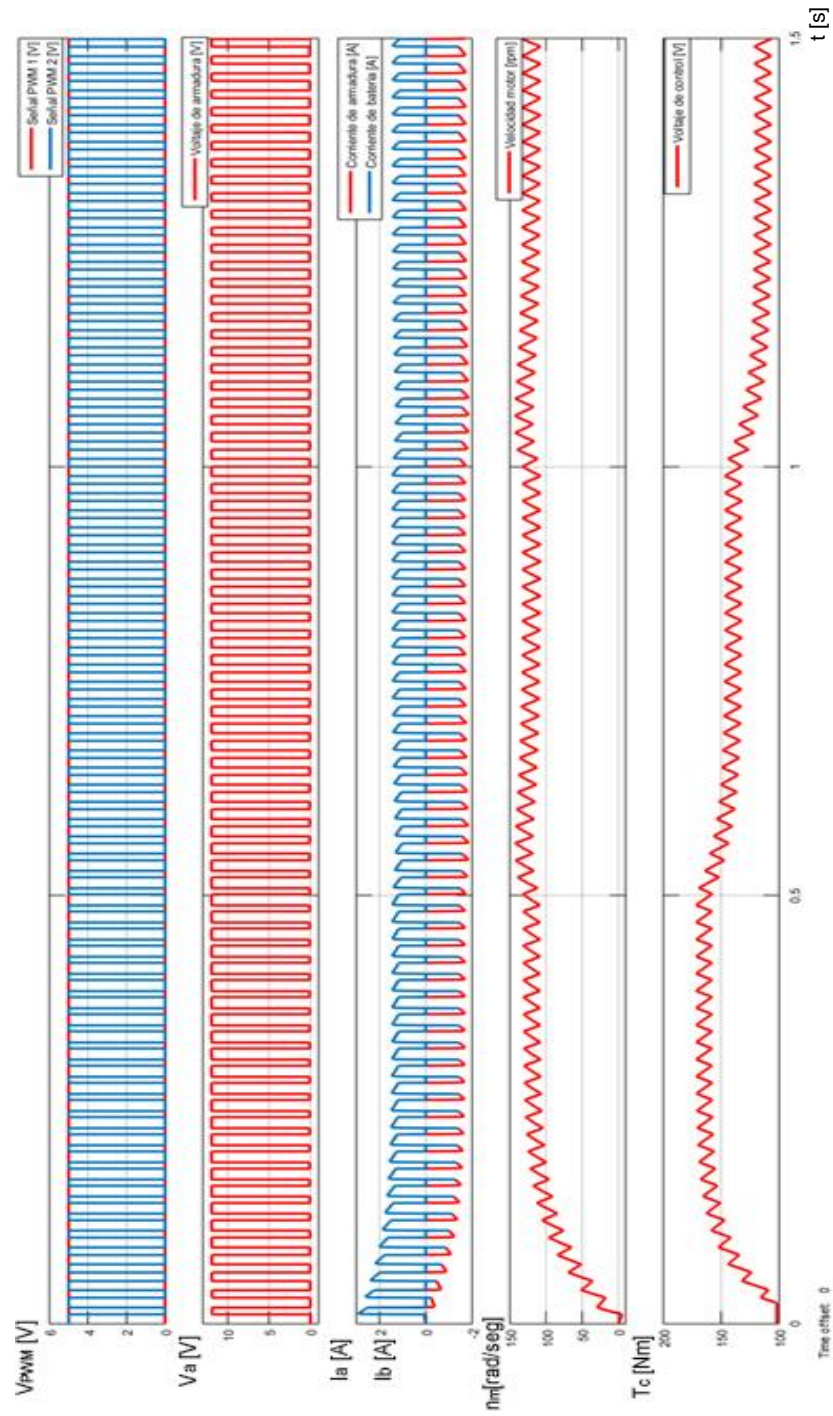


Figura 3.6. Formas de onda del motor EMG30 con convertidor reductor reversible en corriente operando en modo tracción/regeneración y controlador PI en lazo cerrado

CAPÍTULO 4.

DISEÑO DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

En el capítulo que se presenta a continuación se da cumplimiento a los objetivos de diseñar una etapa de potencia capaz de lograr el frenado regenerativo del vehículo, esta etapa contempla el diseño de circuitos electrónicos que son necesarios para acoplar la etapa de control con la de potencia. Además, se da cumplimiento al objetivo de diseñar una fuente de energía capaz de captar la energía generada en el freno y de energizar los otros dispositivos y componentes electrónicos

4.1 PLATAFORMA DE PROTOTIPO ARDUINO

El Arduino utilizado para el diseño de los circuitos electrónicos y la posterior implementación es el modelo Mega 2560. Más información de este dispositivo se puede consultar en el apartado C1.2 del Anexo C.

4.1.1 Medición y registro de datos

A. Medición de velocidad

Como ya fue previsto en 2.2.1 el motor EMG30 posee un codificador de cuadratura incremental que genera dos señales A y B, desfasadas 90° entre sí, cada señal consta de un tren de 360 pulsos por vuelta. Con la lectura de una sola de estas señales se dispone de la información correspondiente a la velocidad de

rotación, mientras que si se captan e interpretan ambas señales se puede conocer el sentido de rotación en base a la secuencia de datos que producen ambas señales, ver Figura 4.1.

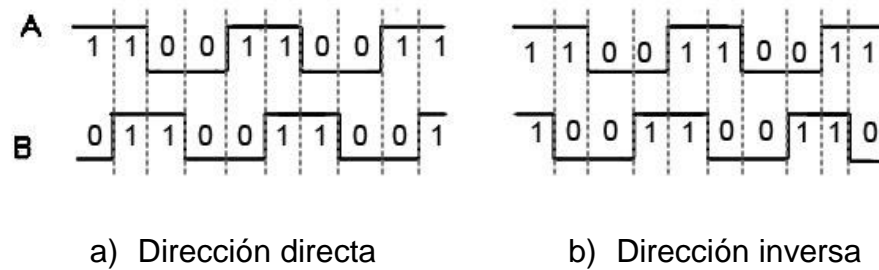


Figura 4.1. Secuencia de datos de las señales A y B del codificador

Ahora bien, para este proyecto no hace falta conocer el sentido de giro del vehículo, dado que opera de manera unidireccional y no es necesario aplicar una tensión negativa para cambiar el sentido de giro. El análisis de la velocidad de rotación es sencillo, solo hace falta medir el tren de pulsos de una de las señales, en esta ocasión se medirá la señal A por el pin D6 de Arduino y la función `pulseIn()`. esta función lo que hace es medir el tiempo de duración en microsegundos de un “1” analógico de 5 [V]. Como es conocido, el tiempo de duración del pulso es la mitad del periodo, además sabiendo que el codificador genera 90 pulsos por vuelta, se puede conocer la velocidad de rotación implementando las ecuaciones 4.1 y 4.2. en códigos.

$$\omega_m = \frac{1}{90T_A} [\text{rev/seg}] = \frac{60}{90T_A} [\text{rev/min}] \quad 4.1$$

$$T_A = 2t_p \cdot 10^{-6} [\text{s}] \quad 4.2$$

Donde:

- T_A : Periodo de la señal A [s]
- t_p : Tiempo de duración del pulso [μs]

B. Medición de corriente

Para medir la corriente que circula por la armadura del motor y por la batería se considera el uso de dos transductores de corriente de la serie CAS de LEM. Dentro de sus muchas aplicaciones, destaca el uso en convertidores estáticos para disparadores de motor y posee un diseño reducido y compacto.

El modelo más acorde es el CAS 6-NP, el cual debe ser alimentado con una tensión continua de 5 [V], y cuyo circuito primario soporta una corriente nominal de 6 [A·rms] en un rango de -20 a 20 [A], con una salida de tensión en un rango 0,375 a 4,625 [V], donde para una corriente de 0 [A] la salida de tensión es 2,5 [V]. El diagrama del circuito se muestra en la Figura 4.2.

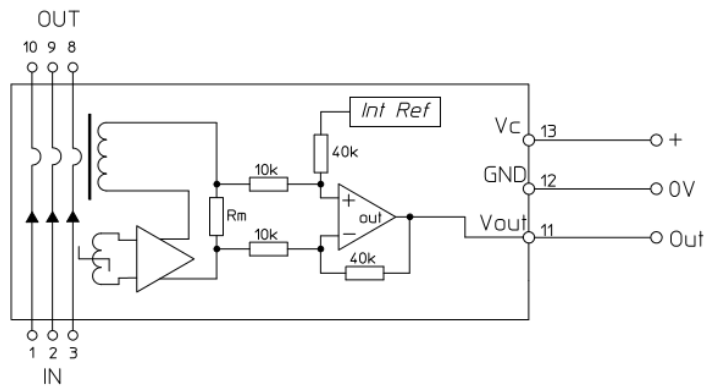
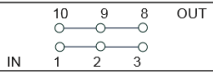




Figura 4.2. Diagrama de circuito del transductor CAS 6-NP de LEM

Ahora bien, el rango de corriente que mide el sensor por defecto es muy amplio y dificulta la medición de la corriente de armadura, esto se puede solucionar aumentando la resistencia del primario que originalmente es de 0,72 [mΩ], realizando una conexión específica de los conductores del primario. Estas se pueden observar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resistencia del primario según conexión

Number of primary turns	Primary resistance R_p [mΩ]	Recommended connections
1	0.24	
2	1.08	
3	2.16	

Realizando la conexión de tres vueltas en el primario, la resistencia del mismo se aumenta el triple, es decir a 2,16 [mΩ]. En consecuencia, el rango de corriente a medir se disminuye en proporción inversa, la cual resulta ser de $\pm 6,67$ [A]. Para traducir el valor medido se confecciona la Tabla 4.2. Considerando la fórmula de una ecuación lineal, se obtienen las ecuaciones 4.3. y 4.4 que sirven para interpretar los valores medidos de la corriente de la armadura y de la batería respectivamente.

$$I_a = 3,14V_{CAS} - 7,85 \quad 4.3$$

$$I_b = 3,14V_{CAS} - 7,85 \quad 4.4$$

Donde:

- V_{CAS} : Tensión medida por el sensor CAS 6-NP [V]
- I_b : Corriente de la batería [V]

Tabla 4.2. Rangos de corriente y tensión del transductor CAS 6-NP de LEM

Valor	Intervalo tensión medida [V]	Intervalo corriente medida [A]
Mínimo	0,375	-6,67
Medio	2,5	0
Máximo	4,625	6,67

C. Registro de datos

Para realizar el registro de las mediciones de la velocidad del motor se hace uso de la tecnología SD con comunicación SPI. Arduino tiene la capacidad de comunicarse con este tipo de tecnología por ciertos pines específicos. Para que el programa considere el almacenamiento de la información en una tarjeta SD se utiliza el comando `SD.begin()`, con la previa carga de la librería SD. Para crear un archivo para guardar datos se utiliza el comando `File` y para almacenar un dato `Serial`. El mercado ofrece tarjetas electrónicas adaptadas para operar con las tarjetas Arduino, en esta ocasión se hará uso de una interfaz de memoria SD con comunicación SPI. Los pines de Arduino que se utilizan se adjuntan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Conexión de pines de la interfaz SD con el Arduino Mega

Pin de SD	Pin de Arduino Mega
GND	GND
+3,3V	+5V
+5V	+5V
CS	D53 (SS)
MOSI	D51 (MOSI)
SCK	D52 (CSK)
MISO	D50 (MISO)
GND	GND

4.1.2 Librería de controladores PID

La configuración de un PID en Arduino es bastante sencilla, solo es necesario incluir la librería `PID_v1.h` y definir la estructura del PID con el comando

myPID(&Entrada, &Salida, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, Modo de funcionamiento). Los valores del Kp, Ki y Kd se ingresan de manera inicial, y se pueden ajustar con el comando myPID.SetMode(AUTOMATIC), finalmente cuando el programa esté operando en void loop() se debe ejecutar el comando myPID.Compute() para operar el código del PID. Los parámetros del PID se describen según la ecuación 4.5.

$$\begin{cases} K_p \\ K_i = \frac{K_p}{T_i} \\ K_d = K_p T_d \end{cases} \quad 4.5$$

4.1.3 Generación de PWM

Para realizar la conmutación de los transistores MOSFET del convertidor se utilizará una señal PWM a partir del pin D2 del Arduino Mega. Una señal PWM es muy utilizada para obtener un resultado analógico con medios digitales o para realizar un control digital por medio de una onda cuadrada que realiza la conmutación (encendido – apagado) de un dispositivo eléctrico-electrónico [22].

En una PWM por lo general la frecuencia o periodo de la señal es constante, pero, varia el ancho del pulso, en otras palabras, la duración en que el tren de pulso se encuentra en un “1” lógico. El parámetro utilizado para conocer la relación entre el ancho del pulso y el periodo se denomina ciclo de trabajo y viene dada por la ecuación 4.6.

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_{pwm}} \quad 4.6$$

Donde:

- δ : Ciclo de trabajo en %

- t_{on} : Tiempo de duración del pulso del PWM [s]
- T_{PWM} : Periodo de la señal PWM [s]

En el gráfico de la Figura 4.3 se puede observar cómo opera la señal PWM de Arduino, para una frecuencia o periodo constante varía el ancho del pulso por medio del comando `analogWrite(N)`, donde N tiene una escala de 0-255, en donde 0 corresponde a un ciclo de trabajo de 0, el 127 a uno de un 50%, y el 255 a uno de 100%.

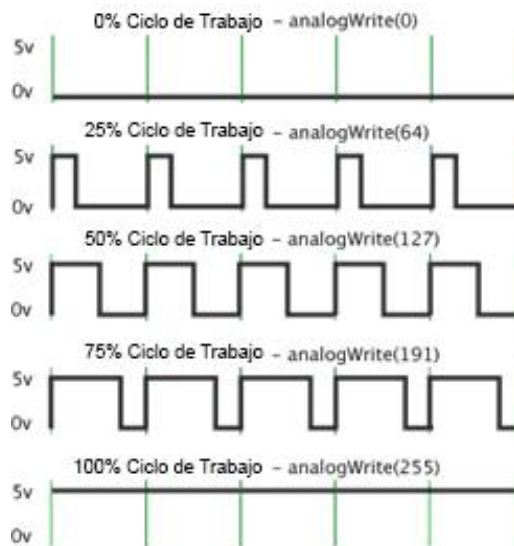


Figura 4.3. Señales PWM de Arduino según ciclo de trabajo

4.2 CIRCUITO FINAL

4.2.1 Selección de componentes

A continuación, se hace mención a los criterios más importantes para la selección de componentes. Las hojas de datos del fabricante de todos los componentes se pueden revisar en apartado C2 del Anexo C.

A. Compuerta lógica NOT 74LS04

Como ya se estudió con anterioridad es necesario generar dos señales del tipo PWM para realizar la conmutación del convertidor, siendo una de ellas la negación de la otra. Esta labor se realiza con el uso de una compuerta lógica NOT que invierte la señal PWM generada por el pin D2 del Arduino. La compuerta lógica NOT a utilizar es la clásica 74LS04, muy conocida y utilizada en los sistemas electrónicos digitales. Este integrado solo necesita ser energizado con una tensión continua de 5 [V], posee seis compuertas NOT de las cuales se usará solo una. De sus características eléctricas solo se debe considerar que el rango de salida de la compuerta es de 0,25 [V] para el “0” lógico y de 3,4 [V] para el “1” lógico. En la Figura 4.4 se puede observar un esquema de dicha compuerta.

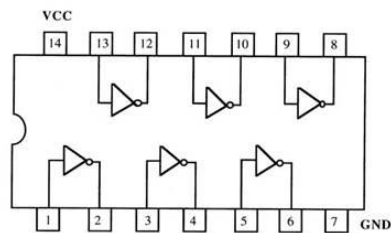


Figura 4.4. Esquema del circuito integrado 74LS04

B. Opto-acoplador 4N32

El opto-acoplador tiene la función principal de aislar las tierras de la etapa de control (Arduino) y de la etapa de potencia (Motor con convertidor) para evitar que las altas corrientes de esta última etapa, en algún caso de falla deteriore la etapa de control. Para solucionar esto, se utiliza un opto-acoplador 4N32. El esquemático de este opto-acoplador se puede observar en la Figura 4.5.

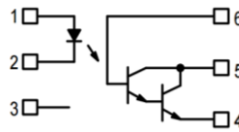


Figura 4.5. Esquema eléctrico del opto-acoplador 4N32

De revisar la hoja de datos del opto-acoplador se observan dos cosas principalmente, primero la corriente máxima que puede circular por el fotodiodo es de 60 [mA] con una caída de tensión de 3[V]. Utilizando tres resistencias de 100 [Ω] de ¼ [w] de potencia y resolviendo la ecuación 4.7 se obtiene una tensión máxima de 4,8 [V], lo cual significa que el ciclo de trabajo máximo en el que se puede hacer la conmutación de los transistores es del 96%.

$$V_{PWM} = I_F R_F + V_R \quad 4.7$$

Donde:

- V_{PWM} : Tensión media de la PWM [V]
- I_F : Corriente de Forward del fotodiodo interno = 60 [mA]
- R_f : Resistencia para limitar la corriente de Forward [Ω]
- V_R : Tensión inversa del fotodiodo = 3 [V]

La salida del opto-acoplador posee un fototransistor tipo Darlington que permite una corriente máxima de 150 [mA]. Para eso se debe obtener la tensión y resistencia para realizar el disparo del transistor. Este valor se debe obtener en cuenta cuando se calculen los valores definitivos del transistor.

C. Transistor MOSFET IRF540N

El transistor MOSFET a utilizar es un IRF540N, el cual satisface los requerimientos del sistema propuesto. La tensión que se debe aplicar a la armadura para lograr los 100 [RPM] del motor en vacío es de 6 [V], con esta información y por

las curvas “drenaje-fuente” se puede verificar la relación entre la tensión aplicada en la “puerta-fuente” y la corriente de “drenaje”. En una fase inicial se considera el uso de una batería de 12 [V] para alimentar el motor y para disparar los IRF540N a un ciclo de trabajo del 50%. Esto quiere decir que $V_{DS}=V_{GS}=6[V]$. Esto según la Figura 4.6 debiese permitir el paso de corrientes cercana a los 70 [A].

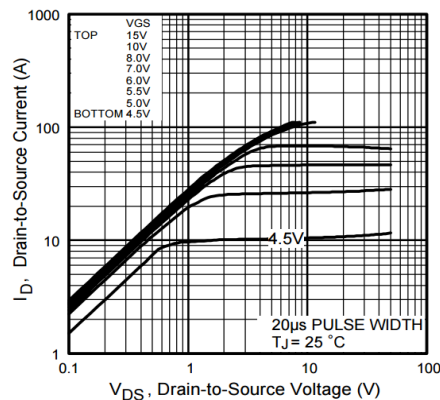


Figura 4.6. Curvas típicas de drenaje-fuente y esquema eléctrico del IRF540N

A pesar de este análisis se realiza una simulación en el software Multisim para obtener resultados más concretos. El circuito implementado y los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 4.7.

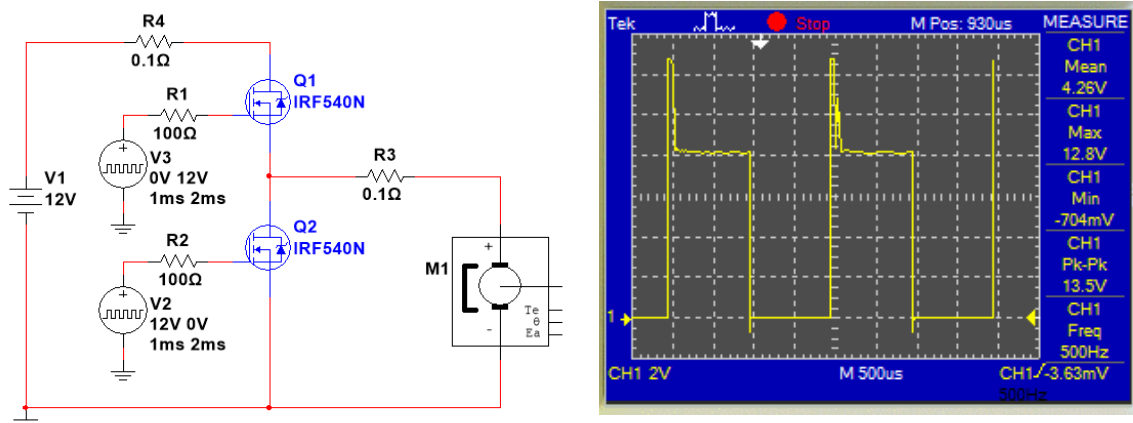
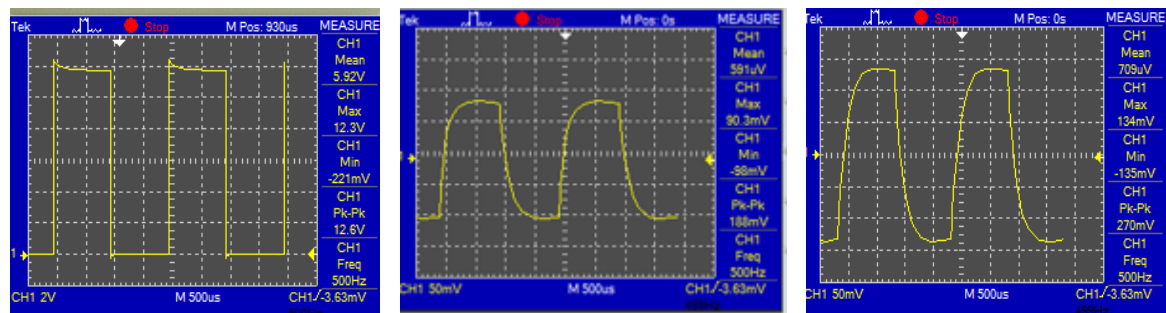


Figura 4.7. Circuito implementado en Multisim y resultados obtenidos.

Como se puede observar, existe una caída de tensión a un valor de 8,1 [V], esto es un problema dado que la tensión se encuentra limitada a un valor inferior al requerido y no es eficiente.

Este problema se solucionó al aumentar la tensión de la “puerta-fuente” de los IRF540N a un valor de 16 [V], una tensión menor a 16 [V] limita la corriente de armadura que consume el motor y por ende cae la tensión de armadura. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 4.8.



a) Tensión de armadura con disparo de 16 [V] b) Corriente de armadura con disparo de 12 [V] c) Corriente de armadura con disparo de 16 [V]

Figura 4.8. Resultados obtenidos de la simulación en Multisim.

D. Regulador LM317T

Con el propósito de ajustar la tensión de la puerta-fuente de los IRF540N se hace uso de un regulador ajustable LM317T cuyo esquema se puede ver en la Figura 4.9.

La tensión de salida se debe ajustar de acuerdo a la ecuación 4.7, técnicamente solo es necesario ajustar el valor del potenciómetro R_2 .

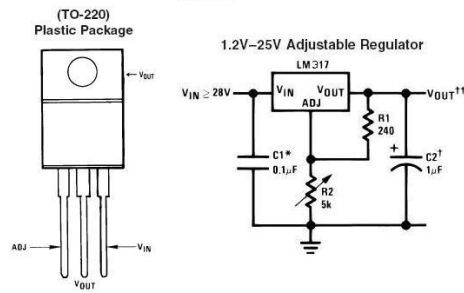


Figura 4.9. Esquemático físico y conexionado eléctrico del LM317T

$$V_{OUT} = 1,25 \left(\frac{R_2}{R_1} \right) + I_{ADJ} (R_2) \quad 4.8$$

Donde:

- V_{OUT} : Tensión a la salida del regulador [V]
- R_1 : Resistencia fija externa del regulador [Ω]
- R_2 : Resistencia variable externa del regulador [Ω]
- I_{ADJ} : Corriente parasita del ajuste [μA]

E. Fuentes de alimentación

El circuito final contemplará tres fuentes de energía independientes entre sí que consiste en baterías de LiPo. Una batería se utiliza para energizar la tarjeta Arduino. Otra batería se utiliza para energizar el motor EMG30 a través del convertidor. Por último, dos baterías en serie energizan las puertas de los IRF540N a través del regulador LM317T.

4.2.2 Diagrama esquemático

De los capítulos anteriores se pasa a dibujar el esquemático final para comenzar con la implementación del proyecto, obsérvese la Figura 4.10.

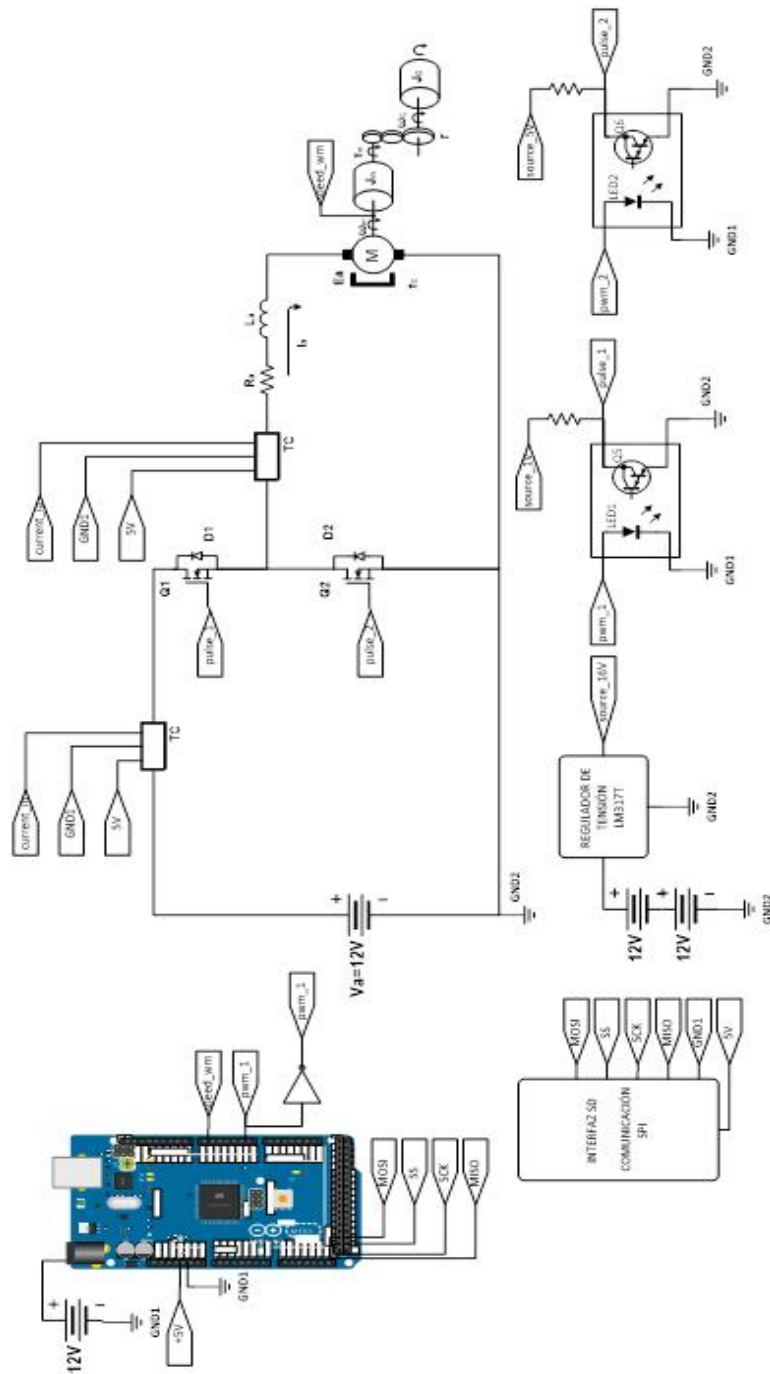


Figura 4.10. Esquema final del sistema de control PI de velocidad con tracción/regeneración, motor EMG30, convertidor reductor reversible en corriente y controlador Arduino.

CAPÍTULO 5.

IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS OBTENIDOS

En el capítulo que se presenta a continuación se da cumplimiento al objetivo de implementar todos los objetivos anteriores de diseño en un vehículo físico en tamaño prototipo. Se validan los objetivos planteados con diversas pruebas de estrategias de control y de variaciones en la carga mecánica del vehículo. También se considera una etapa de frenado para detener el vehículo transcurridos 15 [s] en el código de programación de Arduino (Apartado B1.3 del Anexo B) y así evitar accidentes por la no detención del mismo.

5.1 INTRODUCCIÓN

A partir de lo modelado y diseñado en los capítulos anteriores, se procede a la implementación del vehículo prototipo y a la fase de pruebas para demostrar el cumplimiento del último objetivo, que a su vez valida a todos los anteriores. La Figura 5.1. Muestra el aspecto físico que tiene el vehículo.

Para darle mayor ligereza al vehículo su estructura física está basada en dos componentes, el primero es una madera especial que se usó como base principal donde se pondrán los circuitos electrónicos y las baterías, el segundo material es cartón piedra para las partes que son más secundarias y sirven solo como detalle. Además, fue pintado de color blanco con franjas azul y naranja para representar los colores del Grupo FCAB.

Dentro del vehículo existen dos compartimentos, uno para los circuitos electrónicos y otro para las baterías. El compartimento de circuitos electrónicos posee la etapa de control y de potencia implementados en una placa de prototipos con excepción de la tarjeta Arduino.



Figura 5.1. Estructura física del vehículo prototipo

El sistema de transmisión de potencia mecánica se encuentra en la base inferior del vehículo, este sistema consiste en el motor EMG30, los engranes de transmisión, soportes, ejes y ruedas. El engrane principal fue conseguido de una motocicleta de juguete al igual que los ejes, el engrane del motor fue diseñado en el software AutoCAD y fabricado en acrílico con el uso de una CNC laser. A los ejes se les realizaron hilos con un juego de terrajas para luego apernar las ruedas. Por

último, las ruedas y los rieles fueron obtenidas de ventanales móviles, y los rieles se montaron sobre unas pistas de madera.

5.2 DESAFÍOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

5.2.1 Circuitos electrónicos

La implementación de los circuitos electrónicos se puede observar en la Figura 5.2. El verdadero desafío de esta etapa fue la conmutación de los IRF540N. Como ya se mencionó en 2.3.3. estos transistores que operan como interruptores no pueden estar activos al mismo tiempo, puesto que esto significa que la batería se cortocircuite y se deterioren los transistores.

Por tanto, al momento de implementar se tiene que ser muy riguroso con las conexiones e idealmente antes de conectar el motor, hacerle pruebas al convertidor con una resistencia en serie en el lazo principal, y así limitar la corriente en caso de activarse los transistores simultáneamente.

Este problema ocurrió por des-energizar la etapa de control antes que la etapa de potencia, lo que provocó que la compuerta NOT del 74LS04 también se des-energizara y por ende no funcionase invirtiendo la señal. En definitiva, ambos opto-acopladores se encontraban con un "0" lógico en su entrada, y como la salida es a lógica inversa, se activaron ambos IRF540N simultáneamente provocando el cortocircuito.

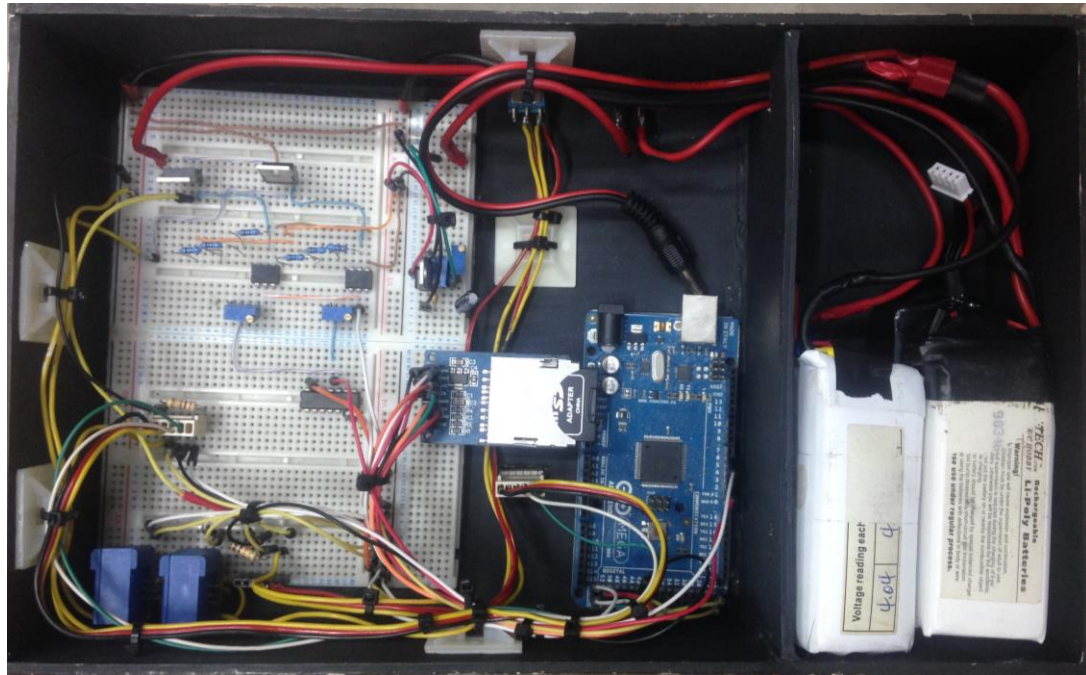


Figura 5.2. Conexión de los circuitos electrónicos y de las baterías LiPo

5.2.2 Mecanismos del vehículo

Los sistemas mecánicos implementados junto con el motor EMG30 se pueden observar en la Figura 5.3. En esta etapa se presentaron dos desafíos importantes, el primero asociado a la rodadura del vehículo y el segundo a los engranes de transmisión

A. Rodadura del vehículo

El problema de la rodadura se presentó principalmente cuando el vehículo se encontraba en pendiente de subida o de bajada. En las subidas el vehículo rodaba, pero no avanzaba, es decir, deslizaba. De la misma manera en las bajadas el vehículo rodaba y avanzaba a muy alta velocidad, es decir, patinaba. Esto se debió a que las superficies de contacto rueda-riel eran de acero-aluminio de manera

inicial y el coeficiente de roce entre estos materiales no era suficiente para realizar una rodadura sin deslizamiento.

Para aumentar el rozamiento se cambiaron las superficies de contactos de la rueda-riel por goma-lija, elementos que son de similares características al caucho-concreto. Ver Figura 5.3.



Figura 5.3. Ruedas y pista para la rodadura del vehículo prototipo

B. Engranajes de la transmisión

El problema de los engranes fue que tenían distinto tamaño del paso (las distancias entre los dientes eran distintas para cada engrane), por tanto, la transmisión no engranaba, sino que, golpeteaba e iniciaba el movimiento, pero con mucho ruido para la señal a controlar.

Esto se solucionó diseñando el engrane del motor en Autocad para luego ser fabricado en acrílico por medio de una máquina CNC láser disponible en el Laboratorio de Investigación, Desarrollo e Innovación de Tecnologías del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Antofagasta. Ver Figura 5.4.

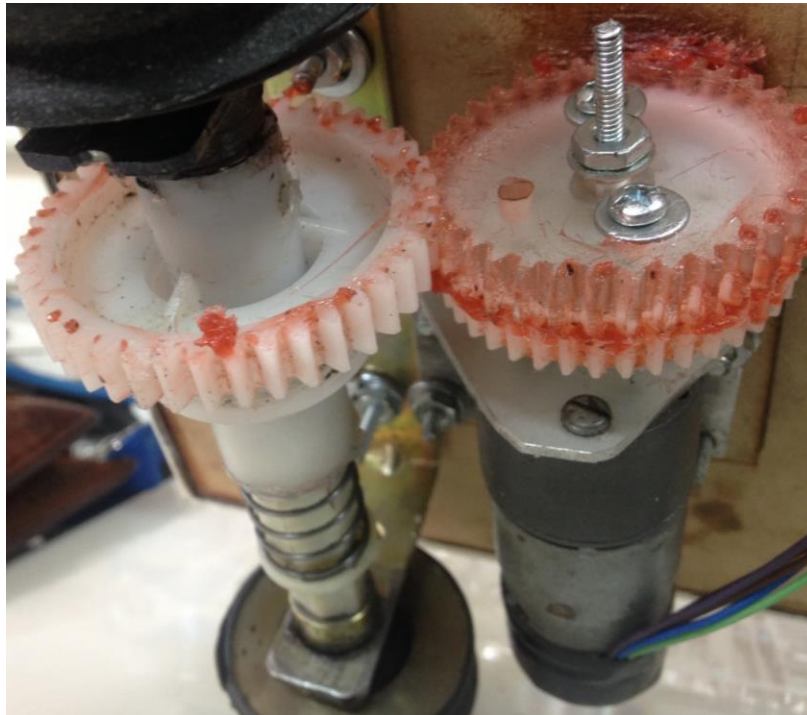


Figura 5.4. Engranajes de la transmisión motor-eje

5.3 PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

5.3.1 Lazo abierto sin carga

Esta prueba consiste en hacer funcionar el motor en lazo abierto y sin carga (las ruedas en contacto con el aire) a una velocidad de referencia de 25 [cm/s]. Cuando se realizaron las primeras pruebas de medición se identificó física y eléctricamente la presencia de un ruido en la señal de velocidad del vehículo, debido a que los engranes cada cierto tiempo se desencajan y tienen que volver a acomodarse. Este problema se puede visualizar como un ruido eléctrico que posee una cierta amplitud y una frecuencia en la Figura 5.5.

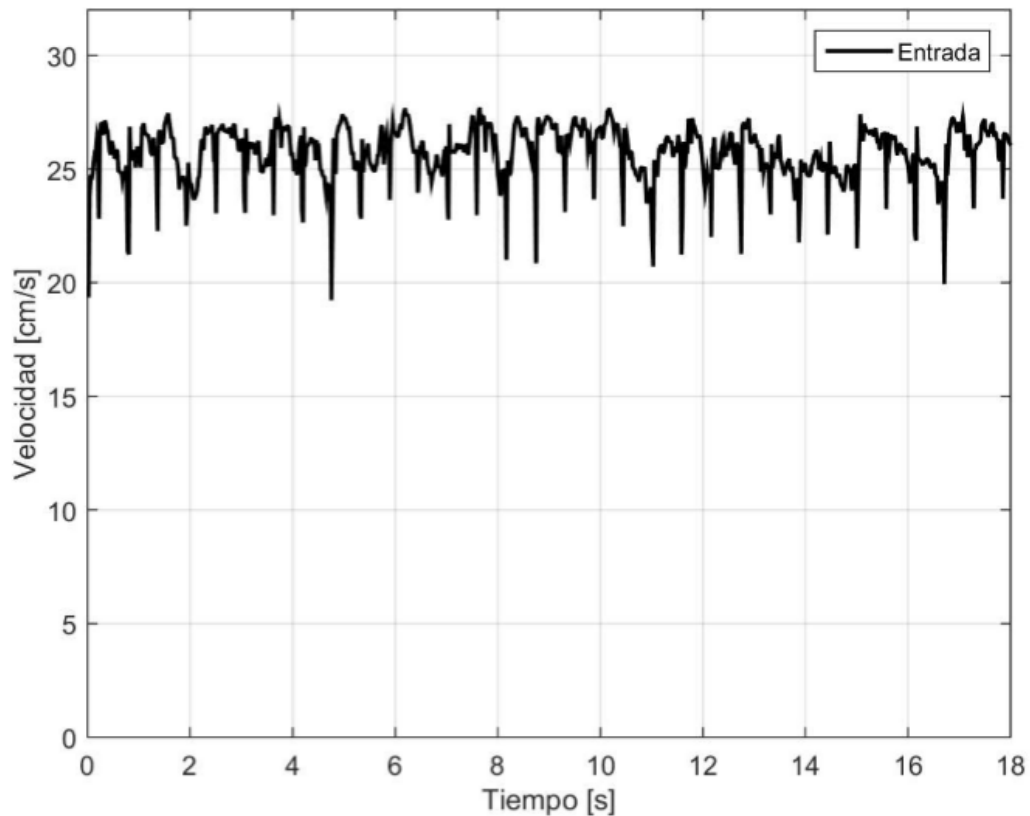


Figura 5.5. Velocidad del vehículo en lazo abierto y sin carga

La frecuencia de este ruido está en un rango de 1,7 a 1,8 [Hz], por tanto, para eliminarlo se diseñan tres filtros digitales pasa-bajos del tipo IIR [23] con una frecuencia de pasa-banda de 1[Hz], una frecuencia de para-banda de 2[Hz], una oscilación en la banda pasante de 0,1 [dB] y una atenuación en la banda de rechazo de 20 [dB]. Los tipos de filtros implementados consisten en tres, el primero es el de Butterworth, el segundo es un Chebyshev de primer orden, y ultimo un Chebyshev de segundo orden, los cuales se pueden observar en la Figura 5.6.

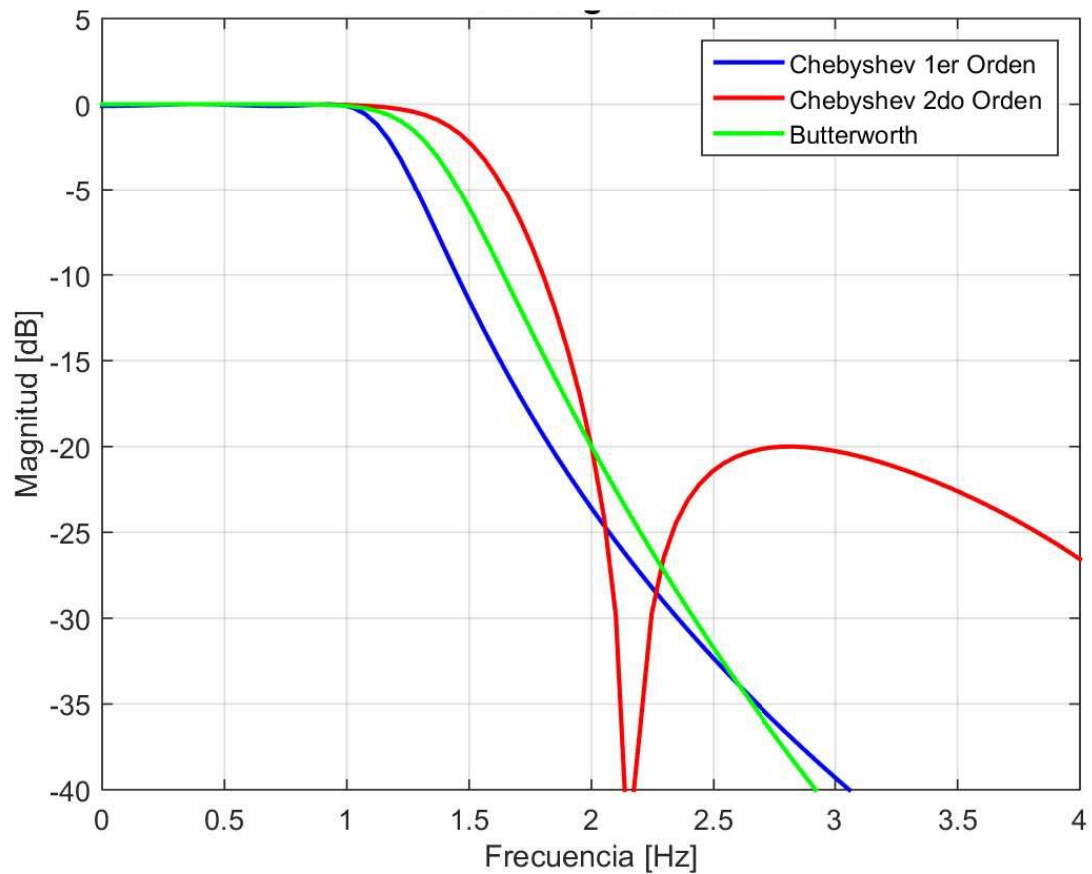


Figura 5.6. Filtros digitales del tipo IIR

Se aprecia que todos los filtros cumplen las especificaciones de diseño, pero aun así son diferentes. El filtro de Chebyshev de segundo orden posee una caída más tardía y abrupta a diferencia de las otras dos que poseen una caída más temprana y menos abrupta, sobre todo el Chebyshev de primer orden. Para verificar cual es el mejor filtro se implementan los tres y se observa la salida de la señal filtrada en la Figura 5.7. El código de procesamiento se puede ver en el apartado B2.3 del Anexo B.

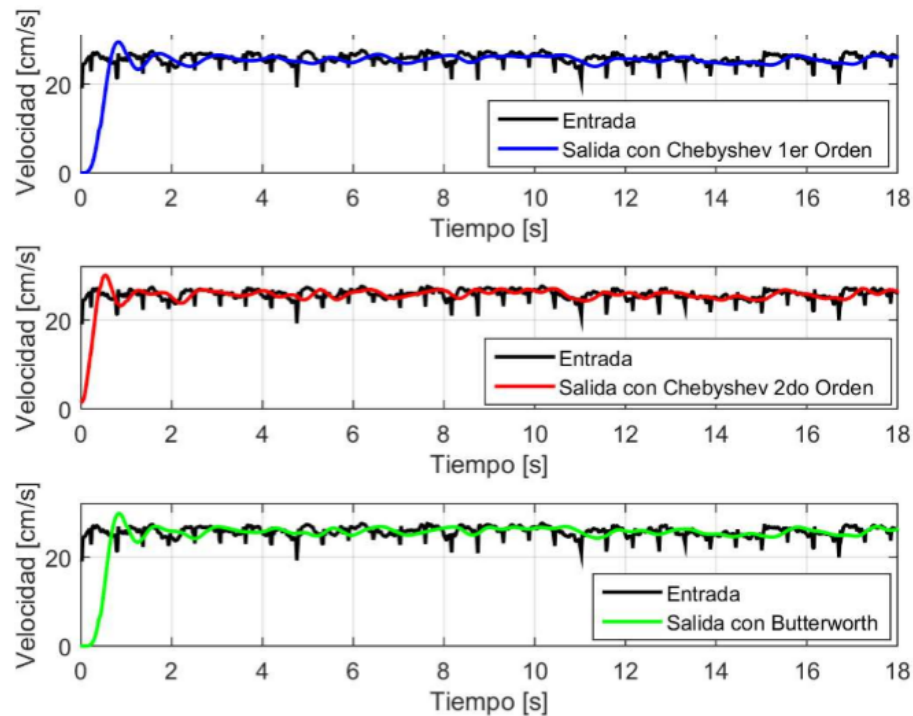


Figura 5.7. Velocidad de referencia filtrada según tipo de filtro IIR

Se puede observar que las señales filtradas son bastante similares en su comportamiento en el tiempo y en amplitud, salvo por el desfase que ocurre en ellas. Las señales filtradas por el Chebyshev de primer orden y el Butterworth presentan un desfase muy significativo en comparación con el Chebyshev de segundo orden que es bastante menos significativo. Es por esto que se determina que el mejor filtro a utilizar en las pruebas de lazo abierto y lazo cerrado es este último.

5.3.2 Lazo abierto con variación en la carga

La siguiente prueba consiste en que el vehículo realice el recorrido de la pista en lazo abierto y así poder observar como la velocidad de referencia de 25 [cm/s] se pierde, ver Figura 5.8. El código implementado en Arduino se puede ver en el apartado B1.2 del Anexo B.

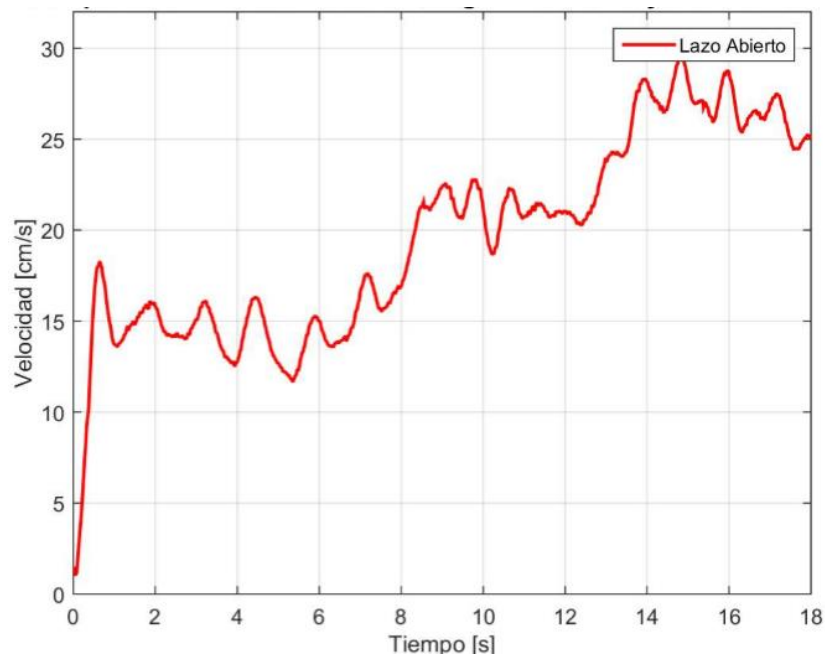


Figura 5.8. Velocidad del vehículo en lazo abierto

El vehículo operando en lazo abierto no puede mantener constante la velocidad de referencia sencillamente porque la tensión en la armadura es constante, pero la carga mecánica es distinta en cada situación. En el inicio la carga mecánica es alta, por ende, la velocidad de la señal disminuye a un valor aproximado de 17 [cm/s] esto se puede observar en el rango de 0 a 6 [s]. En el plano horizontal la velocidad alcanza un valor de 23 [cm/s] a pesar de que acerca bastante al valor de referencia no alcanza a llegar puesto que aún existe una pequeña carga al rodar en un plano horizontal. Por último, en la bajada la velocidad alcanza un valor de 28 [cm/s], puesto que ahora la carga favorece el movimiento.

5.3.3 Lazo cerrado con variación en la carga

Esta prueba se realiza con la misma secuencia que en 5.3.2 con la diferencia que ahora el control se encuentra en lazo cerrado con el PID

implementado. En la Figura 5.9 se puede observar que la diferencia con el lazo abierto es notable, ahora la velocidad del vehículo sigue la referencia a pesar del ruido y se ajusta cada vez que la velocidad baja o retrocede. El código implementado en Arduino se puede ver en el apartado B1.3 del Anexo B.

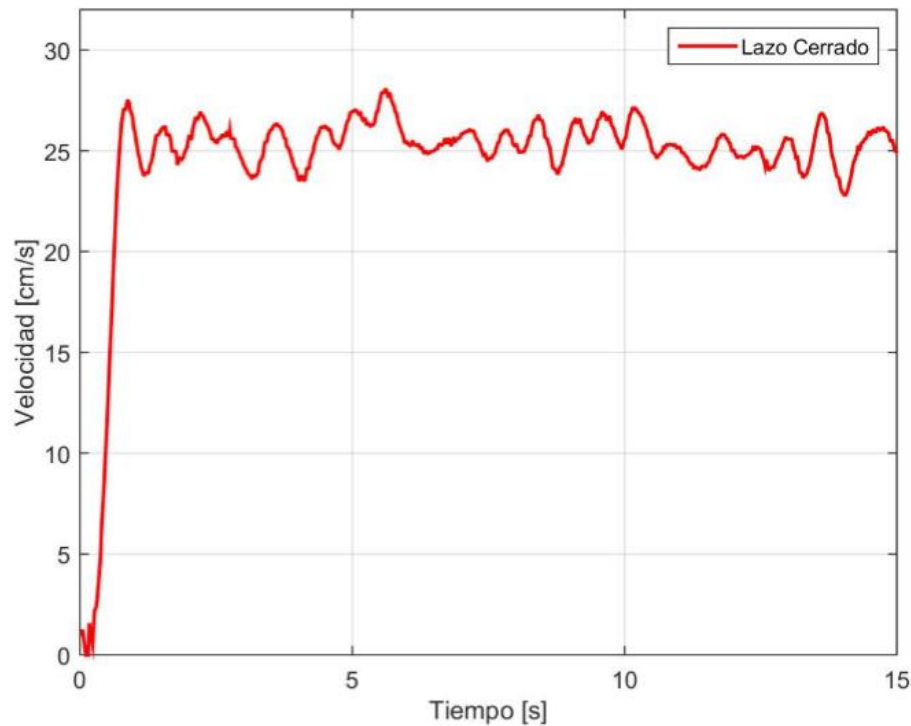


Figura 5.9. Velocidad del vehículo en lazo cerrado

5.3.4 Análisis de la tensión de armadura en lazo cerrado

A. Recorrido en subida

Para mantener constante la velocidad del vehículo el controlador debe ajustar la señal de control continuamente. Esta señal de control se traduce en el ciclo de trabajo de la señal PWM que dispara los IRF540N. En la subida el vehículo se encuentra con una carga alta, por ende, el controlador aumenta la tensión que

se debe aplicar en la armadura y lograr la velocidad de referencia. La Figura 5.10 muestra la tensión aplicada en la armadura para esta situación, se observa que el ciclo de trabajo es de 82,3% y la tensión media aplicada es aproximadamente de 9 [V].

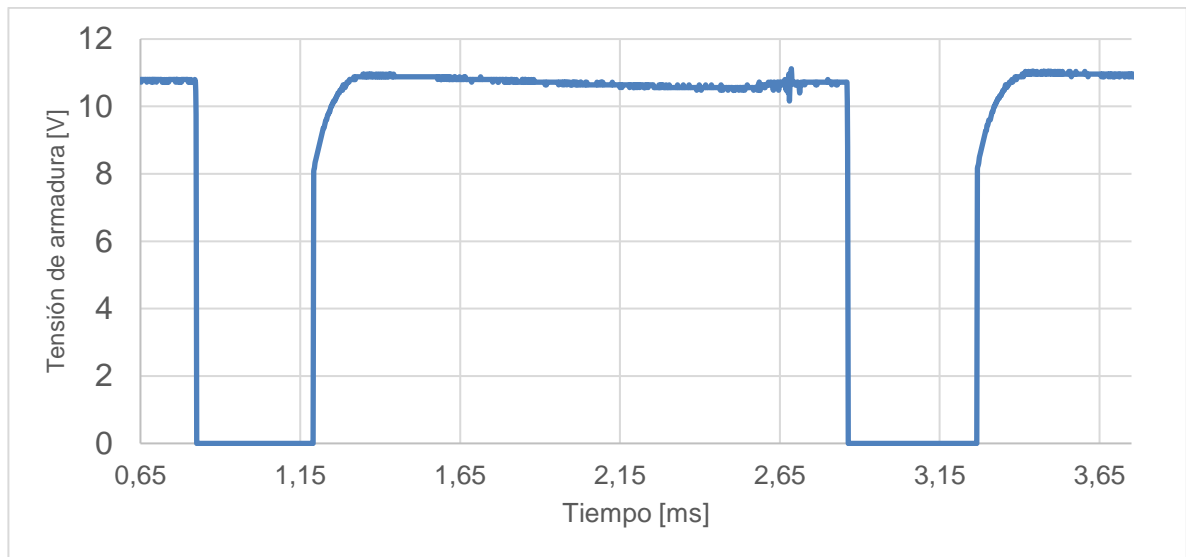


Figura 5.10. Tensión de armadura cuando el vehículo se encuentra en subida

B. Recorrido en plano horizontal

En el plano horizontal el vehículo se encuentra con una carga casi nula, por ende, el controlador disminuye moderadamente la tensión de la armadura con respecto al caso de subida para lograr la velocidad de referencia. La Figura 5.11 muestra la tensión aplicada en la armadura para esta situación, se observa que el ciclo de trabajo es de 72,6% y la tensión media aplicada es aproximadamente de 8 [V]. Además, es importante mencionar que en el primer instante ocurre un pulso de 12,16 [V] y duración 0,072 [ms], esto se debe a que en ese instante el motor opera como un generador.

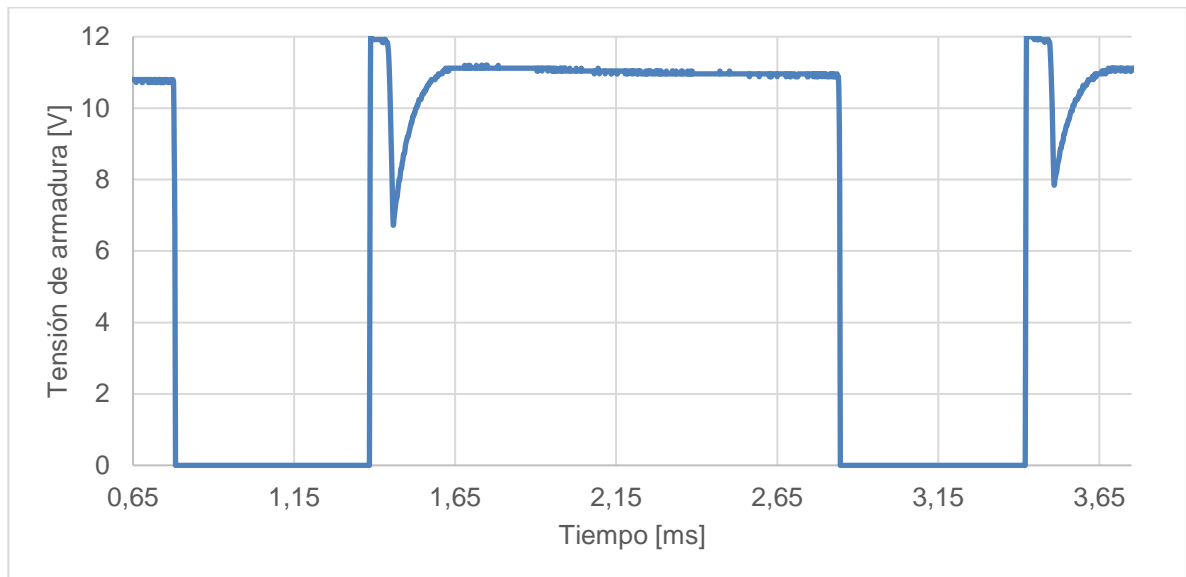


Figura 5.11. Tensión de armadura cuando el vehículo se encuentra en plano horizontal.

C. Recorrido en bajada

En bajada el vehículo se encuentra con una carga a favor del movimiento, por ende, el controlador disminuye aún más la tensión de la armadura con respecto al caso del plano horizontal para lograr la velocidad de referencia. La Figura 5.12 muestra la tensión aplicada en la armadura para esta situación, se observa que el ciclo de trabajo es de 63,4% y la tensión media aplicada es aproximadamente de 7 [V]. Además, es importante mencionar que en el primer instante ocurre un pulso de 12,08 [V] y de duración 0,17 [ms], esto se debe a que en ese rango el motor opera como un generador, lo cual se demuestra en el siguiente subcapítulo.

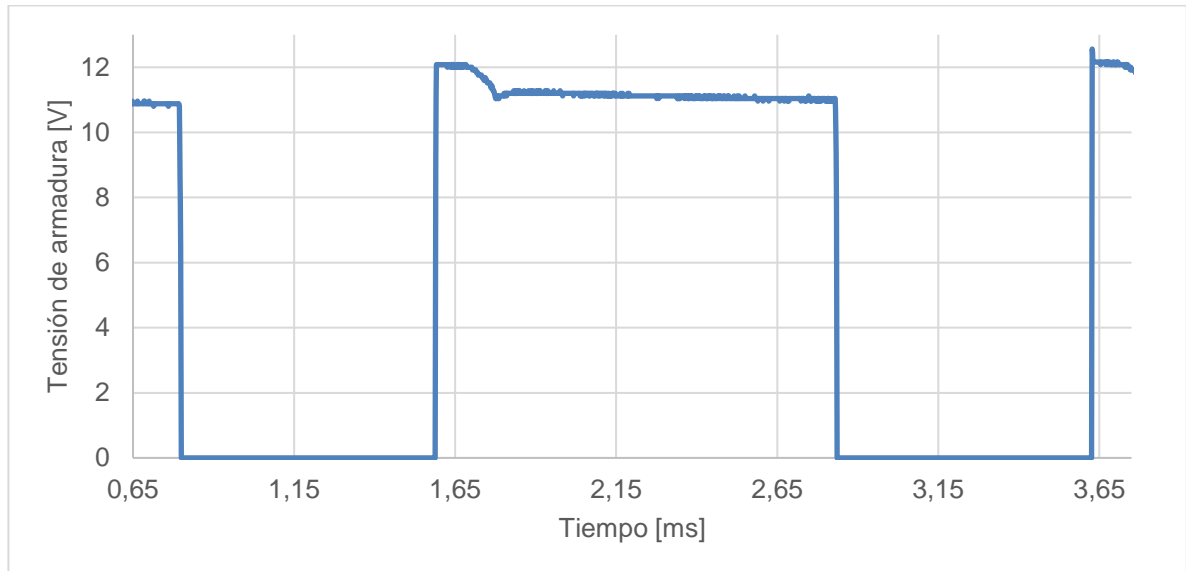


Figura 5.12. Tensión de armadura cuando el vehículo se encuentra en bajada

5.3.5 Análisis de la corriente de armadura en lazo cerrado

El análisis de los datos fue filtrado en Excel con una media móvil de 25 muestras. Lo cual se ve reflejado en la leyenda de las Figuras 5.13 – 5.15

A. Recorrido de subida

En subida el vehículo se encuentra con una carga alta que el motor debe vencer, esto lo logra aumentando el torque en el eje del motor que es proporcional al torque electromagnético y a la corriente de armadura. Esto quiere decir que al aumentar la carga mecánica del vehículo aumenta el consumo de corriente de la armadura. La Figura 5.13 muestra que la corriente de armadura no posee valores negativos, esto significa que el motor siempre se encuentra consumiendo energía como se verifica de la Figura 5.10 la cual no posee un pulso al inicio. Además, como se estudió en 2.3.2, la forma de onda de la corriente es la esperada.

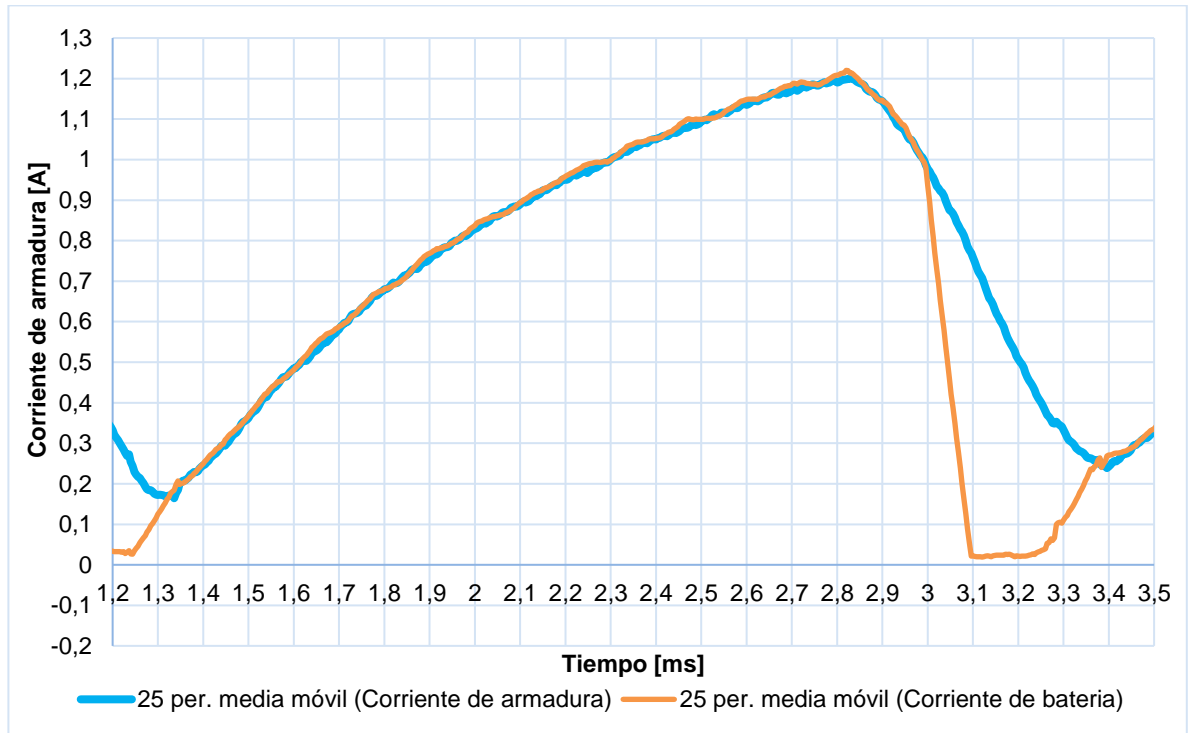


Figura 5.13. Formas de onda de la corriente de armadura y de la batería cuando el vehículo se encuentra en subida.

B. Recorrido en plano horizontal

En plano horizontal el vehículo se encuentra con una carga baja que el motor debe vencer, esto lo logra disminuyendo el torque en el eje del motor con respecto al de subida, por ende, la corriente en la armadura también disminuye. Esto quiere decir que al disminuir la carga mecánica del vehículo disminuye el consumo de corriente de la armadura. La Figura 5.14 muestra que la corriente de armadura posee valores negativos, esto significa que el motor tiene instantes que opera como generador eléctrico, este intervalo de tiempo tiene una duración aproximada de 0,1 [ms], lo cual se aproxima al tiempo afirmado en 5.3.4 a partir de la Figura 5.11.

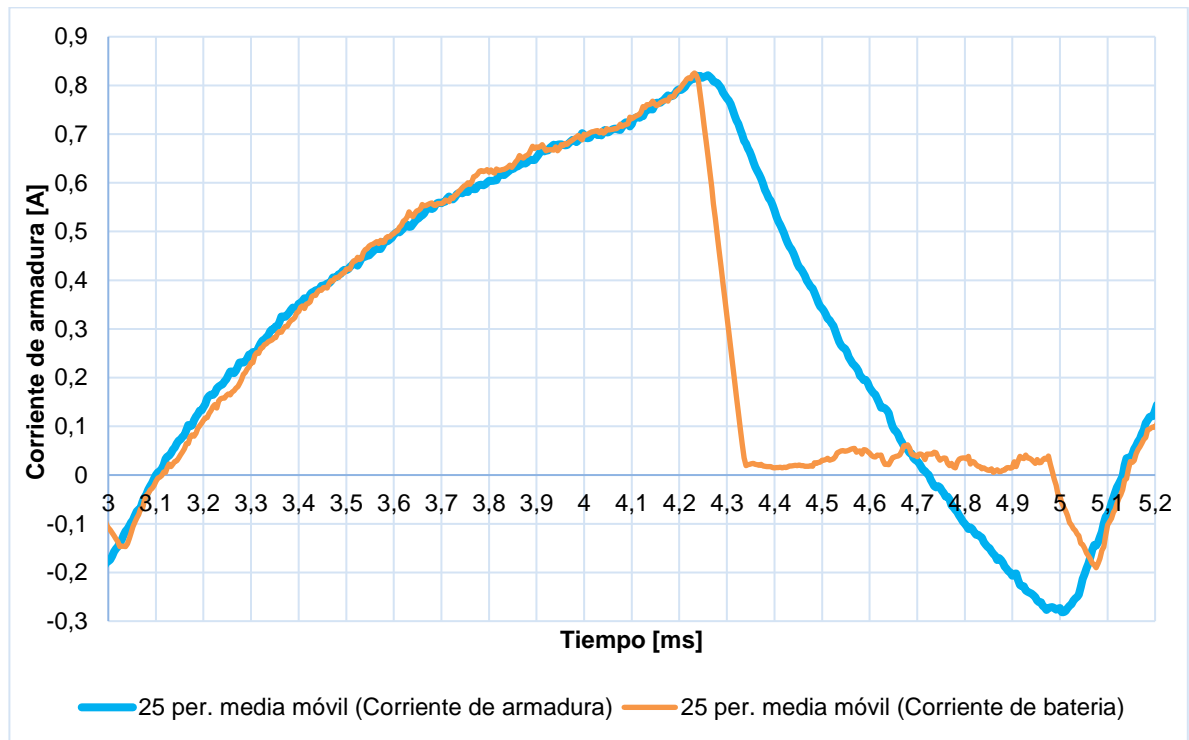


Figura 5.14. Formas de onda de la corriente de armadura y de la batería cuando el vehículo se encuentra en plano horizontal.

C. Recorrido en bajada

En bajada el vehículo se encuentra con una carga a favor del movimiento que el motor debe frenar, esto lo logra disminuyendo aún más el torque en el eje del motor con respecto al plano horizontal, por ende, la corriente en la armadura también disminuye. Esto quiere decir que al tener una carga mecánica a favor del movimiento del vehículo se disminuye el consumo de corriente de la armadura. La Figura 5.15 muestra que la corriente de armadura posee valores negativos, esto significa que el motor tiene instantes que opera como generador eléctrico, el intervalo de tiempo de esta operación tiene una duración aproximada de 0,2 [ms], lo cual se aproxima a lo afirmado en 5.3.4 a partir de la Figura 5.12.

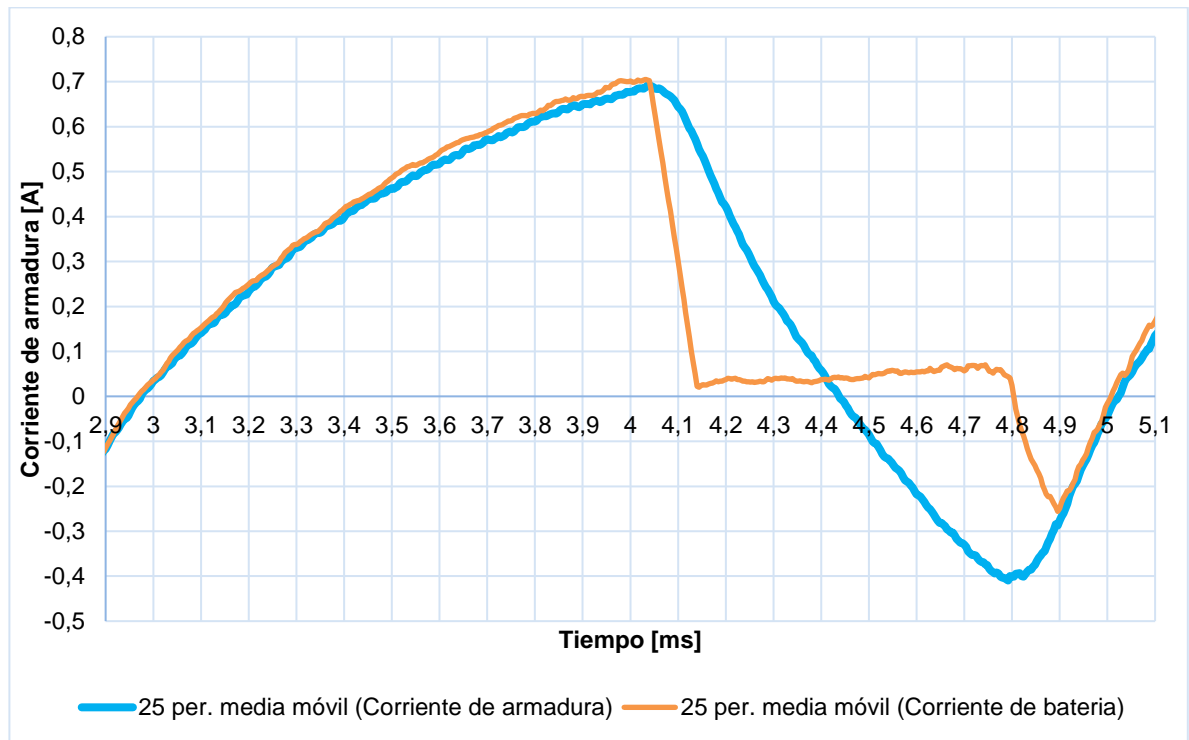


Figura 5.15. Formas de onda de la corriente de armadura y de la batería cuando el vehículo se encuentra en plano horizontal.

De comparar la corriente de armadura de las Figuras 5.13 – 5.15 se observa que la amplitud de la corriente es similar, pero, las amplitudes de la corriente cambian. En el caso de la situación de subida el valor oscila entre 0,2 a 1,2 [A], en el caso del plano horizontal dicho valor oscila entre -0,3 a 0,8 [A], y en el caso de baja oscila entre -0,4 a 0,7 [A]. Esto quiere decir que a medida que la carga disminuye o vaya en favor del movimiento el consumo de corriente disminuye y aumenta la generación.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES

En base a los capítulos de diseño, implementación y resultados es que se elaboran las siguientes conclusiones:

- Se seleccionó e implementó un motor que satisface las condiciones de funcionamiento del vehículo. El motor fue implementado con un sistema de transmisión de potencia mecánica el cual permite el movimiento rotacional del eje tractor. El diseño e implementación de los engranes de transmisión fue un factor clave para minimizar el ruido que estos provocan en la velocidad del vehículo. Se recomienda para esta etapa considerar el diseño de un especialista en el área de la mecánica o de alguna empresa externa.
- Se diseñó e implementó una etapa de potencia basado en un convertidor de CC-CC estático y reversible en corriente. Su operación se logra verificar al momento de variar la carga mecánica del vehículo. Al tener una carga a favor del movimiento (carga negativa), disminuye de manera considerable el consumo energético (tanto la tensión y la corriente), además, existe un intervalo de tiempo en que el motor opera como generador y ocurre un frenado regenerativo. La energía generada se puede aprovechar para recargar la batería y aumentar su autonomía, disminuir costos energéticos y aumentar la sustentabilidad del vehículo. Tanto, es fundamental que el vehículo opere siempre en bajada o con pendiente negativa, para que el peso del mismo actúe como carga negativa.

- A partir de diseñar e implementar las estrategias de control PID en lazo abierto y cerrado en un Arduino Mega 2560 y de las gráficas obtenidas, se observa que cuando el vehículo opera en lazo cerrado la velocidad de referencia se satisface a pesar de la situación en la que se encuentre (subida, horizontal, bajada) y del ruido que afecta a la señal. En cambio, cuando el vehículo opera en lazo abierto, se aprecia como la velocidad de referencia no se satisface en ningún instante. Por tanto, es fundamental el uso de un lazo de control cerrado para la operación del vehículo.
- Se verifica el buen funcionamiento del freno de emergencia que se activa una vez el vehículo haya recorrido el tramo de operación para evitar accidentes. Este freno desconecta la batería de la máquina abriendo uno de los transistores y cerrando el otro para permitir la descarga de la máquina y esta opere como generador y se frene.
- Los circuitos electrónicos diseñados e implementados tanto para la etapa de control como para la de potencia satisfacen los objetivos de manera exitosa, solo cabe recalcar la importancia de no cerrar el lazo de la etapa de potencia sin antes energizar y tener operativa la etapa de control que realiza la conmutación de los transistores. Se recomienda el uso de un componente que no permita cerrar el lazo de potencia, como puede ser un interruptor, un relé u otro transistor que solo se active una vez que la etapa de control esté operando y así evitar el deterioro de los componentes.
- La selección de los materiales rueda-riel es fundamental para tener una rodadura sin deslizamiento del vehículo. Los materiales a seleccionar deben tener una alta adherencia lo cual depende del coeficiente de rozamiento y la rugosidad de los materiales. Se recomienda recubrir la rueda con algún material como el caucho o la goma para aumentar el roce.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Nuevo Central Argentino S.A., «Manual Integral de Vías,» de *Capítulo 2 – Geometría de la Vía*, Argentina, http://www.alaf.int.ar/publicaciones/MANUAL_INTEGRAL_DE_VIAS.pdf, Octubre 2014, pp. 15-24.

- [2] Ministerio de transporte de Colombia, «Especificación de mantenimiento - Inspección y auscultación de la vía. Equipos y sistemas para la inspección de insfraestructuras y superestructuras -,» de *Manual de normatividad ferrea - Parte II*, Viceministerio de infraestructura - Dirección de infraestructura, <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=10879>, 2013, pp. 6-9.

- [3] Universidad Técnica Federico Santa María, «Tecnología de las baterías,» <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>.

- [4] Universidad Técnica Federico Santa María, «Tecnología de las baterías,» *Batería de Polímero-litio y Aplicaciones de batería Polímero-litio*, <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>, pp. 16-17.

- [5] S. J. Chapman, «Capítulo 1: Introducción a los principios de máquinas,» de *Máquinas eléctricas*, BAE Australia, Mc Graw Hill, 3ra edición, 2000, p. 1.

- [6] S. J. Chapman, «Capítulo 9: Motores y generadores DC - Motor DC de imán permanente,» de *Máquinas eléctricas*, BAE Australia, Mc Graw Hill, 3ra edición, 2000, pp. 575-576.

- [7] T. Wildi, «Motores de corriente directa,» de *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*, Mexico, Pearson Prentice Hall, Sexta edición, 2006, pp. 101-102.
- [8] T. Wildi, «Control electrónico de motores de corriente directa,» de *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*, Mexico, Pearson Prentice Hall, Sexta edición, 2006, p. 555.
- [9] T. Wildi, «Motores de corriente directa,» de *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*, Mexico, Pearson Prentice Hall, Sexta edición, 2006, pp. 96-118.
- [10] O. O. Flores Cortez, «Batalla de microcontroladores ¿AVR o PIC?,» *Boletín Escuela de Informática, Facultad de Informática y Ciencias Aplicadas, UTEC*, p. 3, Septiembre 2009.
- [11] Ingeniería MCI Ltda. (Olimex Chile), «¿Que es Arduino?,» Wikimedia Foundation, Inc., [En línea]. Available: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>.
- [12] I. Barbi y D. Cruz Martins, «Reversibilidades dos conversores cc-cc diretos,» de *Conversores CC-CC básicos nao isolados*, Florianópolis, Edicao dos autores, 2da edicao revisada, 2006, p. 321.
- [13] I. Barbi y D. Cruz Martins, «Reversibilidades dos conversores cc-cc diretos,» de *Conversores CC-CC básicos nao isolados*, Florianópolis, Edicao dos autores, 2da edicao revisada, 2006, pp. 323-324.
- [14] R. G. Budynas y K. J. Nisbett, «Parte uno: Fundamentos - Especificaciones del estudio del caso transmisión de potencia,» de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley - Octava edición*, México D.F., McGraw-Hill Interamericana, 2008, pp. 23-24.

- [15] R. G. Budynas y K. J. Nisbett, «Parte dieciocho: Caso de estudio: Transmisión de potencia,» de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley - Octava edición*, México D.F., McGraw-Hill Interamericana, 2008, p. 914.
- [16] R. A. Serway y J. W. Jewett, Jr., «Capítulo 5: Las leyes del movimiento - Fuerza gravitacional y peso,» de *Física para ciencias e ingeniería - Volumen 1 - Séptima edición*, México D.F., Cengage Learning Editores, 2005, pp. 106-107.
- [17] A. Herbener y D. Archibald, «A Direct Method of Measuring the Rolling Resistance of a Bicycle Tire,» *ASEE NCS conference*, vol. http://people.cst.cmich.edu/yelam1k/asee/proceedings/2015/Paper%20files/Student_Papers/2015_ASEE_NCS_Conference_submission_61.pdf, nº 61, p. 12, 2015.
- [18] R. A. Serway y J. J. W. Jewett, «Algunas aplicaciones de las leyes de Newton - Ejemplo 5.6 el auto que escapa,» de *Física para ciencias e ingeniería - Volumen 1 - Séptima edición*, Mexico D.F., Cengage Learning Editores, 2005, p. 113.
- [19] A. Vdovin, «Driving resistance,» de *Investigation of Aerodynamic Resistance of Rotating Wheels on Passenger Cars*, Gothenburg, Sweden, Chalmers University OF Technology, 2013, p. 5.
- [20] J. P. Martínez y R. Agosta, «Unidad 5: Resistencias al movimiento ferroviario - Resistencia en curvas horizontales,» de *Ingeniería del transporte I - Transporte ferroviario*, UCA. Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, 2008.

- [21] M. H.-. Rashid, «Capítulo 8: Transistores de potencia - 8-1: Introducción,» de *Electrónica de potencia - Circuitos, dispositivos y aplicaciones*, Naucalpan de Juarez, Estado de Mexico., Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1995, p. 262.
- [22] I. Barbi y D. Cruz Martins, «Controle do conversor buck empregando modulacao PWM,» de *Conversores CC-CC básicos nao isolados*, Florianópolis, Edicao dos autores, 2da edicao revisada, 2006, pp. 51-52.
- [23] Y. Montenegro Maluenda, «Diseño de Filtros IIR,» de *Filtros digitales*, Apuntes de asignatura Procesamiento Digital de Señales, Departamento de ingeniería Eléctrica, Universidad de Antofagasta, 2014, pp. 53-63.

ANEXO A.

MEMORIA DE CÁLCULO DEL SISTEMA

A1. Cálculos modelamiento del motor

A1.1 Modelo del motor sin reductor ni carga

Considerando la naturaleza eléctrica del motor, la respuesta en régimen transitorio se puede obtener de aplicar la ley de Kirchoff de tensión, resultando:

$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad \text{A. 1}$$

Donde el valor de la fuerza electromotriz e_a viene dada por la ecuación A.2

$$e_a(t) = k_m \omega_m(t) \quad \text{A. 2}$$

De manera similar, considerando las propiedades mecánicas del sistema que según la segunda ley de Newton del movimiento y la relación de esta con el torque se cumple la ecuación A.3, a su vez, el torque electromagnético de un motor CC de imán permanente viene dado por A.4.

$$\sum \tau = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} \Rightarrow \tau_m = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B\omega_m(t) + \tau_c \quad \text{A. 3}$$

$$\tau_m = k_m i_a(t) \quad \text{A. 4}$$

De relacionar las ecuaciones A.1, A.3 y A.4 y considerando que no hay carga en el motor " $\tau_c = 0$ ", aplicando la transformada de Laplace se obtiene la función de transferencia A.5 que relaciona una entrada de tensión aplicada a la armadura del motor con la salida de velocidad de rotación del eje del motor.

$$G_m(s) = \frac{\Omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{k_m}{(sL_a + R_a)(sJ_m + B) + k_m^2} \quad A. 5$$

Para simplificar el modelo de la función de transferencia del motor se puede despreciar el coeficiente de viscosidad que afecta al eje del motor luego factorizando y asumiendo las relaciones de A.6 se obtiene A.7.

$$\begin{cases} Y_m = \frac{R_a J_m}{k_m^2} \\ Y_e = \frac{L_a}{R_a} \\ Y_m \gg Y_e \end{cases} \quad A. 6$$

$$G_m(s) = \frac{1/k_m}{(sY_m + 1)(sY_e + 1)} \quad A. 7$$

A1.2 Modelo del motor con reductor y sin carga

El eje del motor no está directamente conectado a la carga mecánica, sino que posee una caja reductora que reduce la velocidad del eje del motor y aumenta el torque de este según las ecuaciones A.8 y A.9.

$$\omega_r(t) = r\omega_m(t) \quad A. 8$$

$$\tau_r(t) = \frac{\eta}{r} \tau_c(t) \quad A. 9$$

Se debe considerar que los engranes del motor también poseen un determinado peso y momento de inercia que por muy poco que sea igual influye en el valor final del torque electromagnético, los efectos del reductor vienen dados por A.10. con la inercia de A.11.

$$\tau_r(t) = J_r \frac{d\omega_r(t)}{dt} \quad A. 10$$

De resolver las ecuaciones A.3, A.9 y A.10 se determina que el torque que debe realizar el motor viene dado por A.11 con un momento de inercia dado por A.12

$$T_m(t) = J_{mr} \frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad A. 11$$

$$J_{mr} = J_m + \frac{r^2}{\eta} J_r \quad A. 12$$

Considerando los ajustes de A.13, la función de transferencia del motor con reductor y sin carga viene dado por A.14.

$$\begin{cases} Y_{mr} = \frac{R_a J_{mr}}{k_{mr}^2} \\ k_{mr} = \frac{k_m}{r} \end{cases} \quad A. 13$$

$$G_{mr}(s) = \frac{1/k_{mr}}{(sV_{mr}+1)(sV_e+1)} \quad A. 14$$

A1.3 Modelo del motor con reductor y carga

Consideremos que ahora se acopla una carga mecánica al eje del motor a través de un mecanismo reductor, que satisface las ecuaciones 2.10. Además, la velocidad angular de la carga es la misma que la velocidad a la salida del reductor.

A partir de la ecuación A.9. se puede decir que el torque real de la carga vista desde el motor es la suma del torque del reductor y de la carga, entonces se cumple A.15.

$$\begin{cases} T_c = \frac{r^2}{\eta} J_{rC} \frac{d\omega_m(t)}{dt} + \frac{r}{\eta} T_{Cg} \\ J_{rC} = J_r + J_C \end{cases} \quad A. 15$$

Para simplificar el análisis de la función de transferencia los efectos gravitacionales no serán considerados en el modelo del motor, sino como un disturbio externo, y el coeficiente de viscosidad segura siendo despreciado, por tanto, se cumple A.16.

$$\begin{cases} T_m(t) = J_T \frac{d\omega_m(t)}{dt} \\ J_T = J_m + \frac{r^2}{\eta} J_{rC} \end{cases} \quad \text{A. 16}$$

Luego con estos nuevos ajustes la función de transferencia del motor reductor y carga acoplada queda como sigue en A.17. Con la constante mecánica total de A.18.

$$G_T(s) = \frac{1/k_{mr}}{(sY_{mT}+1)(sY_e+1)} \quad \text{A. 17}$$

$$Y_{Tmr} = \frac{R_a J_T}{k_m^2} \quad \text{A. 18}$$

No olvidar que el efecto de T_{cg} sigue estando presente en el modelo, pero será tratado como un disturbio de la planta

A2. Cálculos del convertidor cc-cc

En este apartado se procede a explicar el funcionamiento del convertidor reductor reversible en corriente en sus tres modos de operación

A2.1. Modo tracción

En la primera etapa el interruptor S1 está cerrado y la fuente de alimentación V_a está conectada a la carga como muestra la Figura A.1.

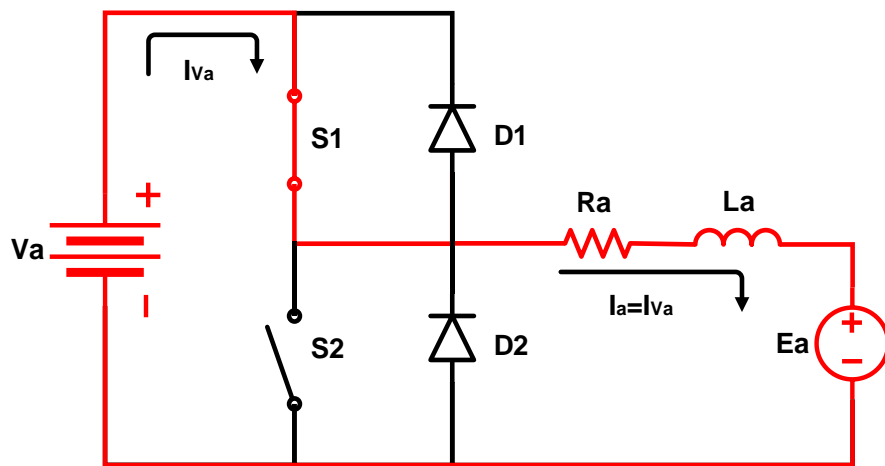


Figura A. 1. Primera etapa del convertidor en modo tracción

En la segunda etapa el interruptor S2 está abierto y la fuente de alimentación “Va” esta desconectada. LA corriente de la carga fluye a través del diodo D2, sufriendo un decaimiento, véase la Figura A.2.

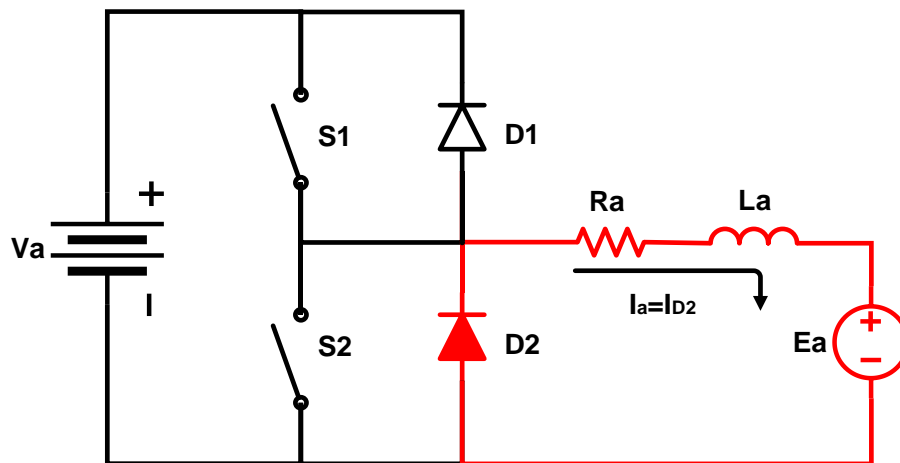


Figura A. 2. Segunda etapa del convertidor en modo tracción

En general en este modo la corriente fluye de la fuente de alimentación hacia la máquina que opera como motor, esto se puede demostrar resolviendo las ecuaciones de las etapas A.19.

$$\begin{cases} V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a, & 0 < t < \delta T \\ 0 = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a, & \delta T < t < T \\ T_{RL} = \frac{L_a}{R_a} \end{cases} \quad \text{A. 19}$$

Con esto se puede obtener el comportamiento de la corriente en la armadura (ecuación A.20) cuando el convertidor se encuentra en la primera etapa, y en la segunda etapa.

$$i_a(t) = \begin{cases} I_{L0} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} + \left(\frac{V_a - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & 0 < t < \delta T \\ I_{L\delta T} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & \delta T < t < T \end{cases} \quad \text{A. 20}$$

Además de observar las Figuras 5.3 y 5.4, se puede demostrar que la forma de onda de la corriente en la fuente de alimentación viene dada por A.21.

$$i_{Va}(t) = \begin{cases} I_{L0} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} + \left(\frac{V_a - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & 0 < t < \delta T \\ 0, & \delta T < t < T \end{cases} \quad \text{A. 21}$$

A2.2. Modo regeneración

En la primera etapa el interruptor S2 está cerrado, el motor opera como generador y la energía acumulada en la bobina comienza a circular por S2, como muestra la Figura A.3.

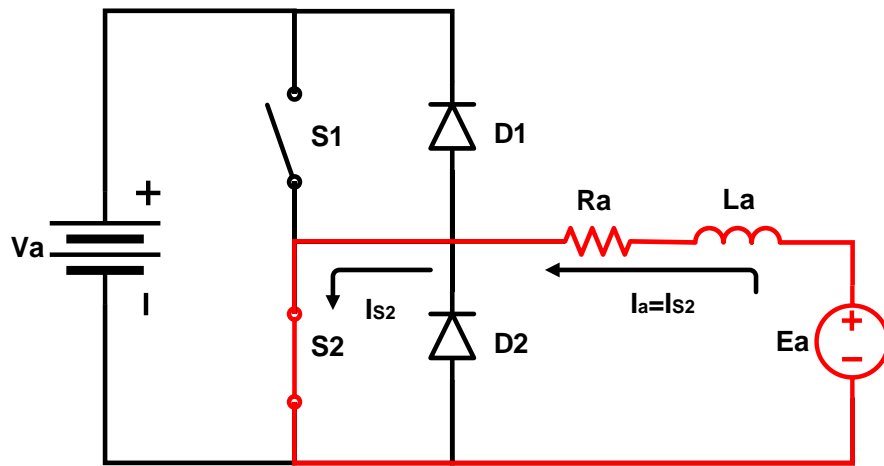


Figura A. 3. Primera etapa del convertidor en modo regeneración

En la segunda etapa el interruptor S2 está abierto y la energía almacenada en el inductor es devuelta a la fuente de alimentación a través del diodo D1 (Ver Figura A.3).

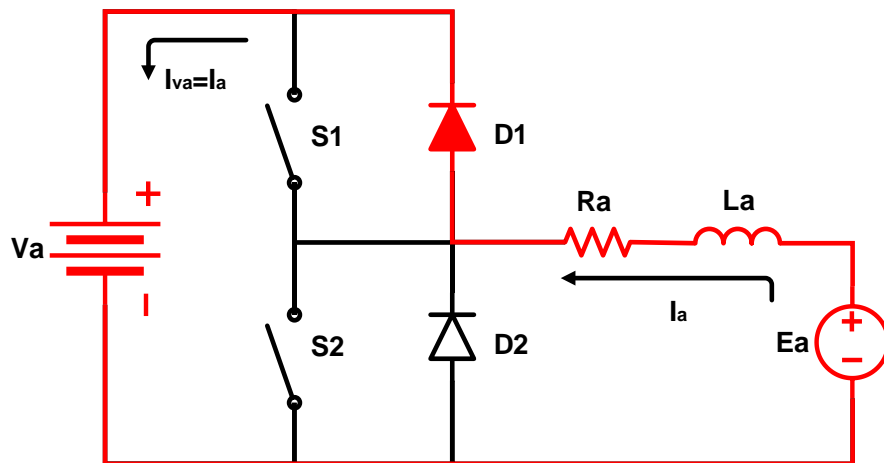


Figura A. 4. Segunda etapa del convertidor en modo tracción

En general en este modo la corriente es invertida y ahora el motor opera como generador, que le entrega energía a la fuente, esto se puede demostrar de resolver la ecuación A.22.

$$\begin{cases} E_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}, & 0 < t < \delta T \\ E_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_a, & \delta T < t < T \end{cases} \quad \text{A. 22}$$

Con esto se puede obtener el comportamiento de la corriente en la armadura cuando el convertidor se encuentra en la primera etapa, y en la segunda etapa, la cual tiene la forma de A.23.

$$i_a(t) = \begin{cases} -I_{L0} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & 0 < t < \delta T \\ -I_{L\delta T} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} + \left(\frac{V_a - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & \delta T < t < T \end{cases} \quad \text{A. 23}$$

Además de observar las Figuras 5.5 y 5.6, se puede demostrar que la forma de onda de la corriente en la fuente de alimentación viene dada por A.24.

$$i_{Va}(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t < \delta T \\ -I_{L\delta T} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} - \left(\frac{V_a - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & \delta T < t < T \end{cases} \quad \text{A. 24}$$

A2.3. Ambos modos

En la primera etapa el interruptor S1 está cerrado y S2 está abierto. El motor se encuentra operando como generador, en esta etapa la energía fluye desde el generador hacia la fuente y comienza desde que la corriente llegó a su valor mínimo hasta que sea nula, ver Figura A.4.

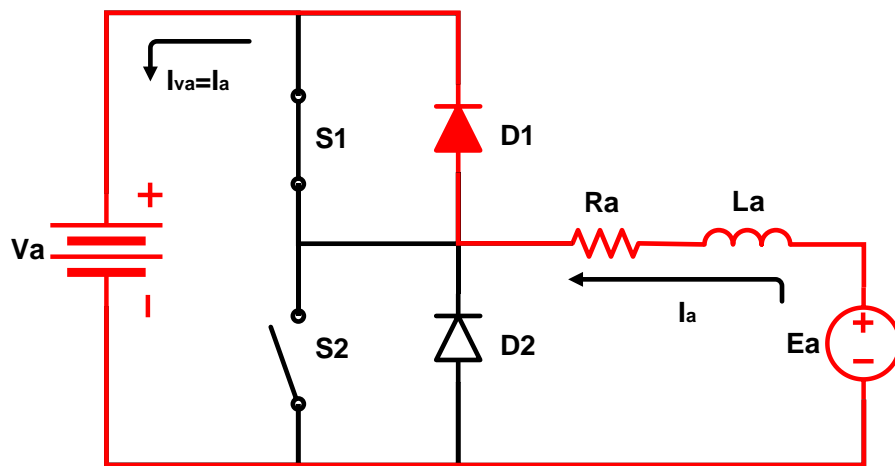


Figura A. 5. Primera etapa del convertidor alternando modos

En la segunda etapa el interruptor S1 está cerrado y S2 está abierto. La máquina se encuentra operando como motor, en esta etapa la energía fluye desde la fuente hacia el motor, y comienza desde que la corriente llegó a un valor nulo hasta que llegue un valor máximo, ver Figura A.6.

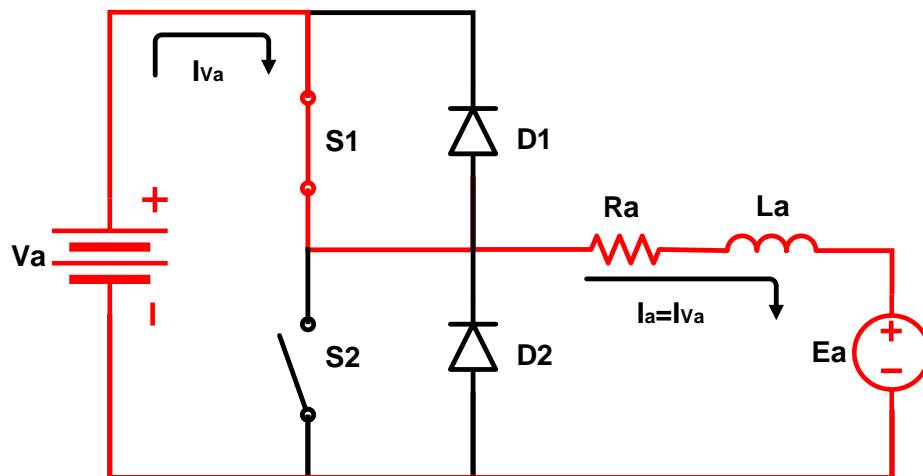


Figura A. 6. Segunda etapa del convertidor alternando modos

En la tercera etapa el interruptor S1 está abierto y S2 está cerrado. La máquina se encuentra operando como motor, en esta etapa la corriente empieza a

decaer debido a su descarga por medio del diodo D2 y comienza desde que la corriente llegó a su valor máximo hasta que sea nula, ver Figura A.7.

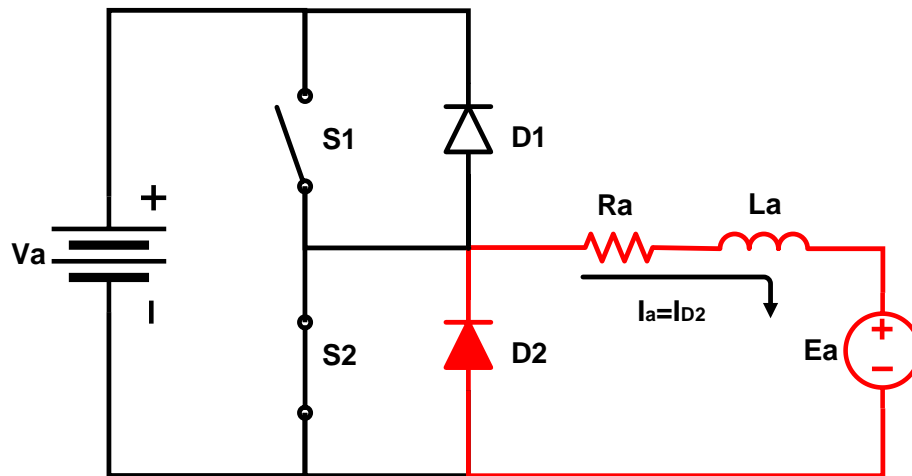


Figura A. 7. Tercera etapa del convertidor alternando modos

En la cuarta etapa el interruptor S1 está abierto y S2 está cerrado. La máquina se encuentra operando como generador, en esta etapa la corriente sigue decayendo debido a su descarga por medio del interruptor S2 y comienza desde que la corriente llegó a un valor nulo hasta que llegue a su valor mínimo, ver Figura A.8.

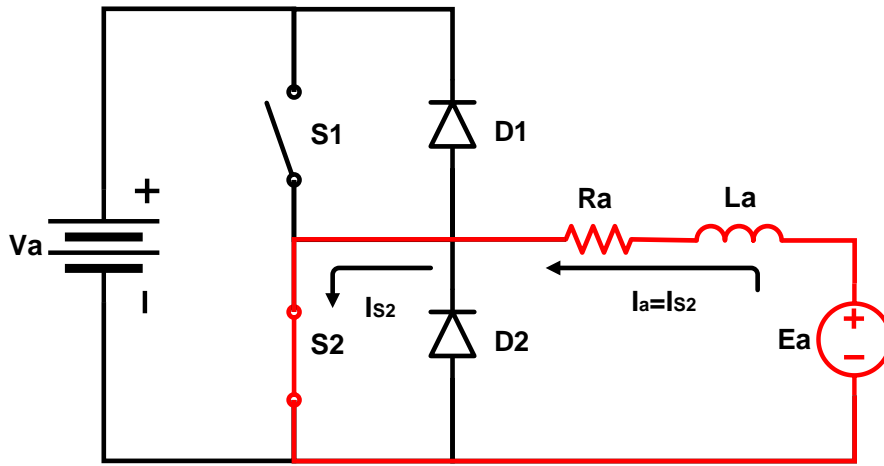


Figura A. 8. Cuarta etapa del convertidor alternando modos

Las ecuaciones de cada etapa se muestran en el sistema de ecuaciones A.25, en general en este modo de operación se opera tanto en tracción y regeneración de manera simultánea.

$$\begin{cases} E_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_a, & 0 < t < t_1 \\ V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a, & t_1 < t < \delta T \\ 0 = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a, & \delta T < t < t_2 \\ E_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}, & t_2 < t < T \end{cases} \quad \text{A. 25}$$

Resolviendo dicho sistema de ecuaciones y analizando los circuitos de cada etapa Figuras A.5 – A.8. Se obtiene la forma de onda de la corriente en la armadura cuando el convertidor se encuentra en las cuatro etapas, es necesario resaltar que la primera ecuación representa el comportamiento de las primeras dos etapas, y la segunda ecuación de las últimas dos.

$$i_a(t) = \begin{cases} -I_{L0} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} + \left(\frac{V_a - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & 0 < t < \delta T \\ I_{L\delta T} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} - \frac{E_a}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & \delta T < t < T \end{cases} \quad \text{A. 26}$$

Se puede ver también el comportamiento de la corriente en la fuente de alimentación, al empezar de un valor inicial mínimo negativo, se determina que existe regeneración de energía, ver ecuación A.27.

$$i_{Va}(t) = \begin{cases} -I_{L0} e^{-\frac{t}{T_{RL}}} + \left(\frac{V_a - E_a}{R_a} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{RL}}} \right), & 0 < t < \delta T \\ 0, & \delta T < t < T \end{cases} \quad \text{A. 27}$$

ANEXO B.

CÓDIGOS Y DIAGRAMAS DE BLOQUES PARA PROGRAMACIÓN PROCESAMIENTO Y SIMULACIÓN

B1. CODIGOS DE PROGRAMACIÓN EN ARDUINO

B1.1. Registro de datos del motor EMG30 para identificación

```

- byte pwm_in =6;
- int pwm_value;
- float pwm_period;
- float time_rev;
- float speed_rps;
- float speed_rpm=0;
- float vo_analog=0;
- float vcas_analog=0;
- int vcas_lecture=1;
- int vo=0;
- int vcas=0;
- void setup() {
- pinMode(pwm_in,INPUT);
- Serial.begin(19200);
- }
- void loop() {
- vcas=analogRead(A1);
- vcas_analog=vcas*(5/1023.0);
- pwm_value = pulseIn(pwm_in, HIGH);
- pwm_period =2*pwm_value;
- time_rev=90*pwm_period/1000000;
- if(time_rev != 0){
- speed_rps=1/time_rev;
- speed_rpm=60*speed_rps;
- }

```

```

- Serial.print(pwm_period);
- Serial.print(" ");
- Serial.print(vcas_analog);
- Serial.print(" ");
- Serial.println(speed_rpm);
- speed_rpm=0;
- }

```

B1.2. Programa definitivo del vehiculo en lazo abierto

```

- #include <SD.h>
- File dataFile;
- int start=0;
- int button=42; //SI cambio a 42
- //---Tiempo---//
- unsigned long t;
- unsigned long t1;
- unsigned long t2;
- float t_seg;
- //-----//
- //---Lectura de velocidad---//
- byte pwm_in =6; //SI
- int pwm_value;
- float pwm_period;
- float time_rev;
- float speed_rps;
- float speed_rpm=0;
- float n_ref=0;
- float v_ref=0;
- float r=2.5;
- //-----Lectura de corriente de bateria-----//
- float vcas_analog=0;
- float i_bat=0;
- int vcas_lecture=1;
- int vcas=0;
- //-----//
- int pwm_gate1 =2;
- //---PI-----//
- int D=160;

```

```

- void setup() {
-   pinMode(53, OUTPUT);
-   digitalWrite(53, HIGH);
-   if (!SD.begin(53)) {
-     return;}
-   dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
-   //////////
-   if (dataFile) {
-     dataFile.println("Escribiendo Informacion...");
-     dataFile.println("");
-     dataFile.println("Programador: Gabriel Tabilo Barraza");
-     dataFile.println("");
-     dataFile.println("<<< Datalogger >>>");
-     dataFile.close();}
-   else {
-   }
-   //////////
-   //-----Variables iniciales-----//
-   pinMode(pwm_in, INPUT);
-   //-----//
-   }
-   void loop() {
-     inicio;;
-     t1=millis();
-     finrutina;;
-     start=digitalRead(button);
-     D=160;
-     if(start==HIGH){
-       t_seg=t/1000.0;
-       //-----Lectura_corriente-----//
-       //-----//
-       //-----Lectura velocidad-----//
-       pwm_value = pulseIn(pwm_in, HIGH);
-       pwm_period =2*pwm_value;
-       time_rev=90*pwm_period/1000000;
-       if(time_rev != 0){
-         speed_rps=1/time_rev;
-         speed_rpm=60*speed_rps;
-       }
-       //-----//

```

```

- //-----Control PI-----//
- if (D>=255){
-   D=255;
- }
- else if(D<=102){
-   D=102;
- }
- analogWrite(pwm_gate1,D);
- n_ref=speed_rpm*(2.0*3.1416)/60;
- v_ref=n_ref*r;
- t2=millis();
- t=t2-t1;
- if (t>18000){
-   D=0;
-   analogWrite(pwm_gate1,D);
-   start=digitalRead(button);
-   while(start==HIGH){
-     start=digitalRead(button);
-   }
-   goto inicio;
- }
- //-----//
- //-----Datalogger-----//
- dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
- if (dataFile) {
-   dataFile.print(t);
-   dataFile.print(" ");
-   dataFile.print(v_ref);
-   dataFile.print(" ");
-   dataFile.println(D);
-   dataFile.close();
- }
- else {
- }
- //-----//
- speed_rpm=0;
- n_ref=0;
- v_ref=0;
- goto finrutina;
- }

```

```

- else{
- analogWrite(pwm_gate1,D);
- }
- }

```

B1.3. Programa definitivo del vehiculo en lazo cerrado

```

- #include <SD.h>
- #include <PID_v1.h>
- File dataFile;
- int start=0;
- int button=42; //SI cambio a 42
- //---Tiempo---//
- unsigned long t;
- unsigned long t1;
- unsigned long t2;
- float t_seg;
- //-----//
- //---Lectura de velocidad---//
- byte pwm_in =6; //SI
- int pwm_value;
- float pwm_period;
- float time_rev;
- float speed_rps;
- float speed_rpm=0;
- float n_ref=0;
- float v_ref=0;
- float r=2.5;
- //----Lectura de corriente de bateria-----//
- float vcas_analog=0;
- float i_bat=0;
- int vcas_lecture=1;
- int vcas=0;
- //-----//
- int pwm_gate1 =2;
- //---PI-----//
- int D=102;
- double Setpoint, Input;
- double Output;

```

```

- //-----//
- PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,0.3115,7.37,0, DIRECT);
- void setup() {
-   pinMode(53, OUTPUT);
-   digitalWrite(53, HIGH);
-   if (!SD.begin(53)) {
-     return;}
-   dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
-   //////////
-   if (dataFile) {
-     dataFile.println("Escribiendo Informacion...");
-     dataFile.println("");
-     dataFile.println("Programador: Gabriel Tabilo Barraza");
-     dataFile.println("");
-     dataFile.println("<<< Datalogger >>>");
-     dataFile.close();}
-   else {
-   }
-   //////////
-   //-----Variables iniciales-----//
-   Input=50;
-   Setpoint=96;
-   myPID.SetMode(AUTOMATIC);
-   pinMode(pwm_in,INPUT);
-   //-----//
-   }
-   void loop() {
-     inicio;;
-     t1=millis();
-     finrutina;;
-     start=digitalRead(button);
-     if(start==HIGH){
-       t_seg=t/1000.0;
-       //-----Lectura velocidad-----//
-       pwm_value = pulseIn(pwm_in, HIGH);
-       pwm_period =2*pwm_value;
-       time_rev=90*pwm_period/1000000;
-       if(time_rev != 0){
-         speed_rps=1/time_rev;
-         speed_rpm=60*speed_rps;

```

```

- }
- //-----//
- //-----Control PI-----//
- Input=speed_rpm;
- myPID.Compute();
- D=Output;
- if (D>=255){
-   D=255;
- }
- else if(D<=102){
-   D=102;
- }
- analogWrite(pwm_gate1,D);
- n_ref=speed_rpm*(2.0*3.1416)/60;
- v_ref=n_ref*r;
- t2=millis();
- t=t2-t1;
- if (t>15000){
-   D=0;
-   analogWrite(pwm_gate1,D);
-   start=digitalRead(button);
-   while(start==HIGH){
-     start=digitalRead(button);
-   }
-   goto inicio;
- }
- //-----//
- //-----Datalogger-----//
- dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
- if (dataFile) {
-   dataFile.print(t);
-   dataFile.print(" ");
-   dataFile.print(v_ref);
-   dataFile.print(" ");
-   dataFile.println(D);
-   dataFile.close();
- }
- else {
- }
- //-----//

```

```

- speed_rpm=0;
- n_ref=0;
- v_ref=0;
- goto finrutina;
- }
- else{
- analogWrite(pwm_gate1,D);
- D=102;
- Output=D;
- }
- }

```

B2. CODIGOS DE PROCESAMIENTO EN MATLAB

B2.1 Identificación del motor con la herramienta “ident”

```

- clear all
- clc
- xlsread('D:\UNIVERSIDAD\ICIE\TRABAJO
  TITULO\PROTOTIPO\Pruebas de laboratorio\emg30.xlsx');
- x=ans;
- t=x(:,1);
- v=x(:,2);
- n=x(:,3);
- %ident

```

DE

B2.2 Diseño del controlador PI con la herramienta “pidtool”

```

- clear all
- clc
- s=tf('s');
- Kmr=1/18.295; ymr=0.00671;
- ye=0.000176;
- Gmr=(1/Kmr)/((s*ymr+1)*(s*ye+1));
- ymrT=0.0218;
- GmrC=Kmr/((s*ymrT+1)*(s*ye+1));
- Va=12/255;
- Gs=Va*GmrC;

```

- pidtool(Gs);

B2.3 Implementación de filtros digitales IIR

- clear all
- clc
- %VELOCIDAD EN LAZO ABIERTO SIN CARGA OBTENIDA POR DATALOG
- xlsread('C:\Users\Gabriel\Desktop\VARIOS ESCRITORIO\Ref tesis\tabla final\DATALOG LAZO ABIERTO SIN CARGA.xlsx');
- x=ans;
- t=x(:,1)/1000.0;
- v=x(:,2);
- c=x(:,3);
- v=v';
- V=fft(v);
- M=length(v);
- w=0:2*pi/(M-1):2*pi;
- Fs=50;
- %DISEÑO DEL FILTRO
- Ap=0.1
- As=20
- fs=2.0;
- fp=1.0;
- ws=2*pi*fs
- wp=2*pi*fp
- Ws=ws/(Fs*pi)
- Wp=wp/(Fs*pi)
- %FILTRO DE CHEBYSHEV 1ER ORDEN
- [N1,Wn1]=cheb1ord(Wp, Ws, Ap, As);
- [B1,A1]=cheby1(N1,Ap,Wn1);
- [H1 wn1]=freqz(B1,A1);
- h1=ifft(H1);
- %SALIDA FILTRADA POR CHEBYSHEV DE 1ER ORDEN
- y1=filter(B1,A1,v);
- Y1=fft(y1);
- %FILTRO DE CHEBYSHEV 2DO ORDEN
- [N2,Wn2]=cheb2ord(Wp, Ws, Ap, As);
- [B2,A2]=cheby2(N2,As,Wn2);

```

– [H2 wn2]=freqz(B2,A2);
– h2=ifft(H2);
– %SALIDA FILTRADA POR CHEBYSHEV DE 2DO ORDEN
– y2=filter(B2,A2,v);
– Y2=fft(y2);
– %FILTRO DE CHEBYSHEV 2DO ORDEN
– [N3,Wn3]=buttord(Wp, Ws, Ap, As);
– [B3,A3]=butter(N3,Wn3);
– [H3 wn3]=freqz(B3,A3);
– h3=ifft(H3);
– %SALIDA FILTRADA POR CHEBYSHEV DE 2DO ORDEN
– y3=filter(B3,A3,v);
– Y3=fft(y3);
– %GRAFICA DE VELOCIDAD EN LAZO ABIERTO SIN CARGA
– subplot(1,1,1);plot(t,v,'black','linewidth',2);ylim([0 32]);title('Velocidad del
vehiculo en lazo abierto','FontName','Arial','FontSize', 16);xlabel('Tiempo
[s]','FontName','Arial','FontSize', 14);ylabel('Velocidad [cm/s]','Font
Name','Arial','FontSize', 14);legend('Entrada');set(gca, 'fontsize', 13);grid on
– %GRAFICAS de filtros IIR
– figure
– subplot(1,1,1);plot((wn1*Fs)/(2*pi),20*log10(abs(H1)), 'b','linewidth',2);
– hold on
– subplot(1,1,1);plot((wn2*Fs)/(2*pi),20*log10(abs(H2)), 'r','linewidth',2);
– hold on
– subplot(1,1,1);plot((wn3*Fs)/(2*pi),20*log10(abs(H3)), 'g','linewidth',2);xlim([0
4]);ylim([-40 5]);title('Filtros digitales IIR','FontName','Arial','FontSize',16);
xlabel('Frecuencia [Hz]','FontName','Arial','FontSize', 14);ylabel('Magnitud
[dB]','FontName','Arial','FontSize', 14);legend('Chebyshev 1er Orden',
'Chebyshev 2do Orden','Butterworth');set(gca, 'fontsize', 13);grid on
– %GRAFICAS COMPARACIONES DE ENTRADA VS SALIDA EN FILTROS
IIR
– figure
– subplot(3,1,1);plot(t,v,'black','linewidth',2);ylim([0 32]);
– hold on
– subplot(3,1,1);plot(t,y1,'b','linewidth',2);ylim([0 32]);title('Comparación
Entrada vs Salida, según filtro IIR','FontName','Arial','FontSize', 16);
xlabel('Tiempo [s]','FontName','Arial','FontSize', 14);ylabel('Velocidad
[cm/s]','FontName','Arial','FontSize', 14);legend('Entrada','Salida con
Chebyshev 1er Orden');set(gca, 'fontsize', 13);grid on
– subplot(3,1,2);plot(t,v,'black','linewidth',2);ylim([0 32]);

```

```

– hold on
– subplot(3,1,2);plot(t,y2,'r','linewidth',2);ylim([0 32]);xlabel('Tiempo [s]',
'FontName','Arial','FontSize', 14);ylabel('Velocidad [cm/s]','FontName'
,'Arial','FontSize', 14);legend('Entrada','Salida con Chebyshev 2do Orden');
set(gca, 'fontsize', 13);grid on
– subplot(3,1,3);plot(t,v,'black','linewidth',2);ylim([0 32]);
– hold on
– subplot(3,1,3);plot(t,y3,'g','linewidth',2);ylim([0 32]);xlabel('Tiempo
[s]','FontName','Arial','FontSize', 14);ylabel('Velocidad [cm/s]',
'FontName','Arial','FontSize', 14);legend('Entrada','Salida con
Butterworth');set(gca, 'fontsize', 13);grid on
– %VELOCIDAD EN LAZO ABIERTO OBTENIDA POR DATALOG
– xlsread('C:\Users\Gabriel\Desktop\VARIOS ESCRITORIO\Ref tesis\tabla
final\DATALOG LAZO ABIERTO.xlsx');
– x=ans;
– t=x(:,1)/1000.0;
– v=x(:,2);
– c=x(:,3);
– v=v';
– V=fft(v);
– M=length(v);
– w=0:2*pi/(M-1):2*pi;
– Fs=50;
– %SALIDA FILTRADA POR CHEBYSHEV DE 2DO ORDEN
– y2=filter(B2,A2,v);
– Y2=fft(y2);
– %GRAFICA DE COMPARACION ENTRADA VS SALIDA CON FILTRO
CHEBYSHEV 2DO ORDEN
– figure
– subplot(1,1,1);plot(t,v,'black','linewidth',2);ylim([0 32]);
– hold on
– subplot(1,1,1);plot(t,y2,'r','linewidth',2);ylim([0 32]);title('Comparación
Entrada vs Salida, según filtro Chebyshev 2do Orden','FontName'
,'Arial','FontSize', 16);xlabel('Tiempo [s]','FontName','Arial','FontSize',
14);ylabel('Velocidad [cm/s]','FontName','Arial','FontSize', 14);legend
('Entrada','Salida con Chebyshev 2do Orden');set(gca, 'fontsize', 13);grid on
– %VELOCIDAD EN LAZO CERRADO OBTENIDA POR DATALOG
– xlsread('C:\Users\Gabriel\Desktop\VARIOS ESCRITORIO\Ref tesis\tabla
final\DATALOG LAZO CERRADO.xlsx');
– x=ans;

```

```
– t=x(:,1)/1000.0;
– v=x(:,2);
– c=x(:,3);
– v=v';
– V=fft(v);
– M=length(v);
– w=0:2*pi/(M-1):2*pi;
– Fs=50;
– %SALIDA FILTRADA POR CHEBYSHEV DE 2DO ORDEN
– y2=filter(B2,A2,v);
– Y2=fft(y2);
– %GRAFICA DE COMPARACION ENTRADA VS SALIDA CON FILTRO
  CHEBYSHEV 2DO ORDEN
– figure
– subplot(1,1,1);plot(t,v,'black','linewidth',2);ylim([0 32]);
– hold on
– subplot(1,1,1);plot(t,y2,'r','linewidth',2);ylim([0 32]);title('Comparación
  Entrada vs Salida, según filtro Chebyshev 2do Orden','FontName'
  , 'Arial','FontSize', 16);xlabel('Tiempo [s]','FontName','Arial','FontSize',
  14);ylabel('Velocidad [cm/s]','FontName','Arial','FontSize', 14);legend
  ('Entrada','Salida con Chebyshev 2do Orden');set(gca, 'fontsize', 13);grid on
```

B3. DIAGRAMA DE BLOQUES DE SIMULACIÓN EN SIMULINK

B3.1 Diagrama del motor EMG30

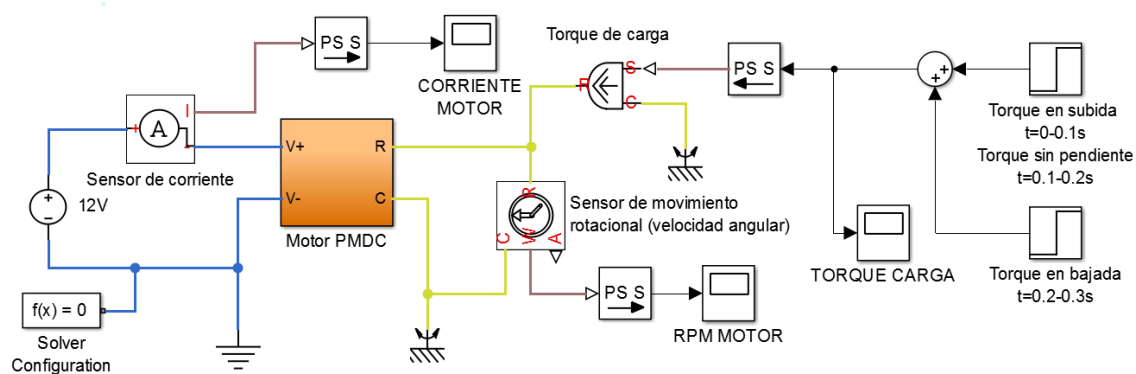


Figura B. 1. Esquema de conexión para simulación del motor EMG30 en Simulink

B3.2. Diagrama de bloques del convertidor

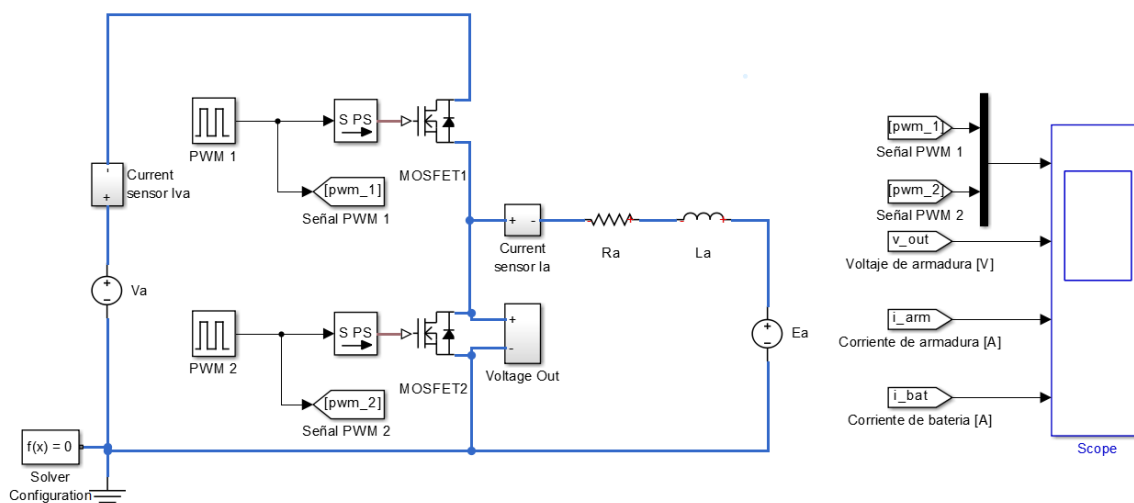


Figura B. 2. Modelo del convertidor reductor reversible en corriente con carga RLE en Simulink

B3.3. Diagrama de bloques del motor con convertidor

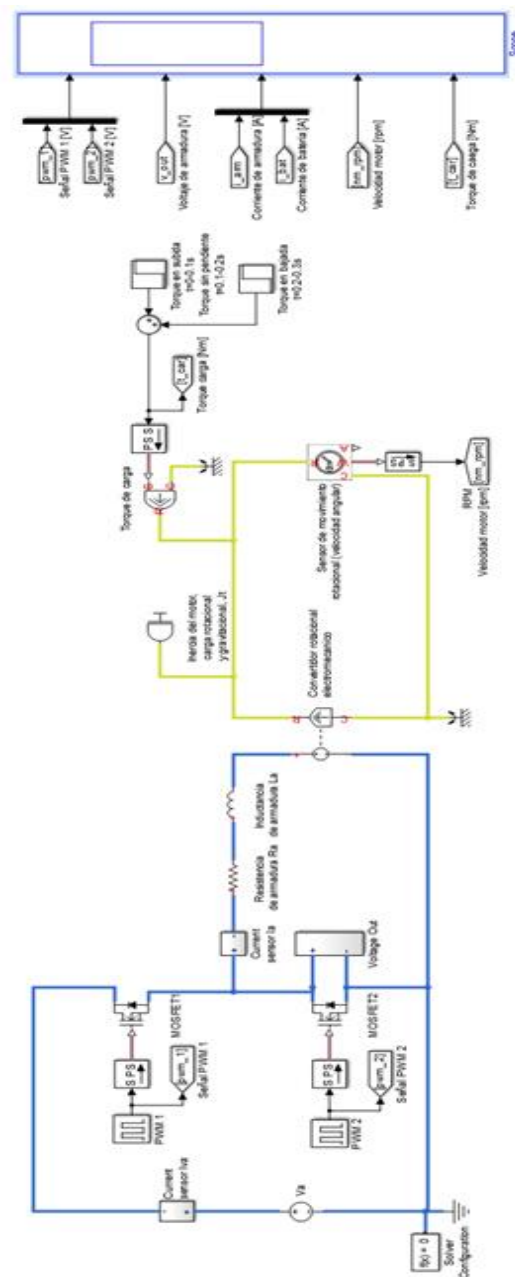


Figura B. 3. Modelo del convertidor reductor reversible en corriente con motor EMG30 con carga, en Simulink

B3.4 Diagrama de bloques del motor con convertidor y lazo de control PI

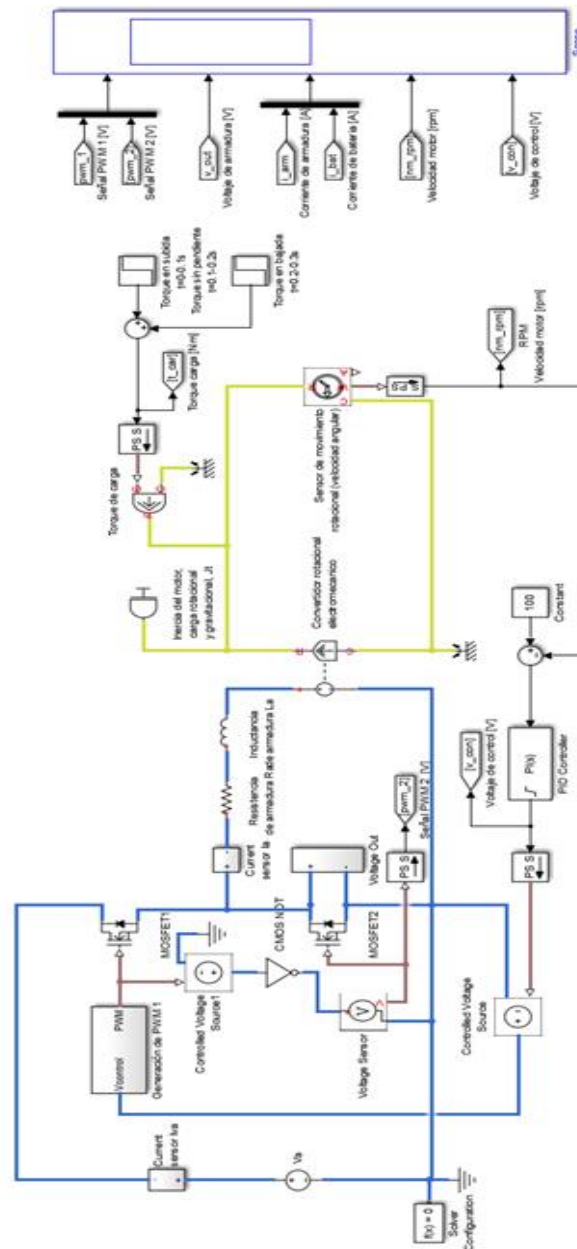


Figura B. 4. Modelo del convertidor reductor reversible en corriente con motor EMG30 con carga y un controlador PI en lazo cerrado, en Simulink

ANEXO C.

DATOS TÉCNICOS DE DISPOSITIVOS Y COMPONENTES

C1. DISPOSITIVOS ELECTRICOS Y ELECTRÓNICOS

C1.1. Motor EMG30



Figura C. 1. Estructura física del motor EMG30

Tabla C. 1. Pines de conexionado del motor EMG30

Color	Función
Purpura	Señal A del encoder
Azul	Señal B del encoder
Verde	GND del encoder
Café	VCC del encoder ¹
Rojo	+ Motor
Negro	- Motor

¹El sensor de efecto hall acepta una tensión de alimentación de 3,5 -20 [V]

Tabla C. 2. Especificaciones de operación del motor EMG30

Parametro	Valor
Tensión nominal	12 [V]
Torque nominal	1,5 [kgcm]
Velocidad nominal	170 rev/min
Corriente nominal	530 [mA]
Velocidad sin carga o en vacio	216 [rev/min]
Corriente sin carga o en vacio	150 [mA]
Corriente máxima	2,5 [A]
Potencia de salida nominal	4,22 [W]
Pulsos por vuelta de encoder¹	360
Velocidad mínima	1,5 [rev/min]
Velocidad máxima	200 [rev/min]

¹En la practica el numero de pulsos por vueltas fue de 90.

C1.2. Arduino Mega 2560

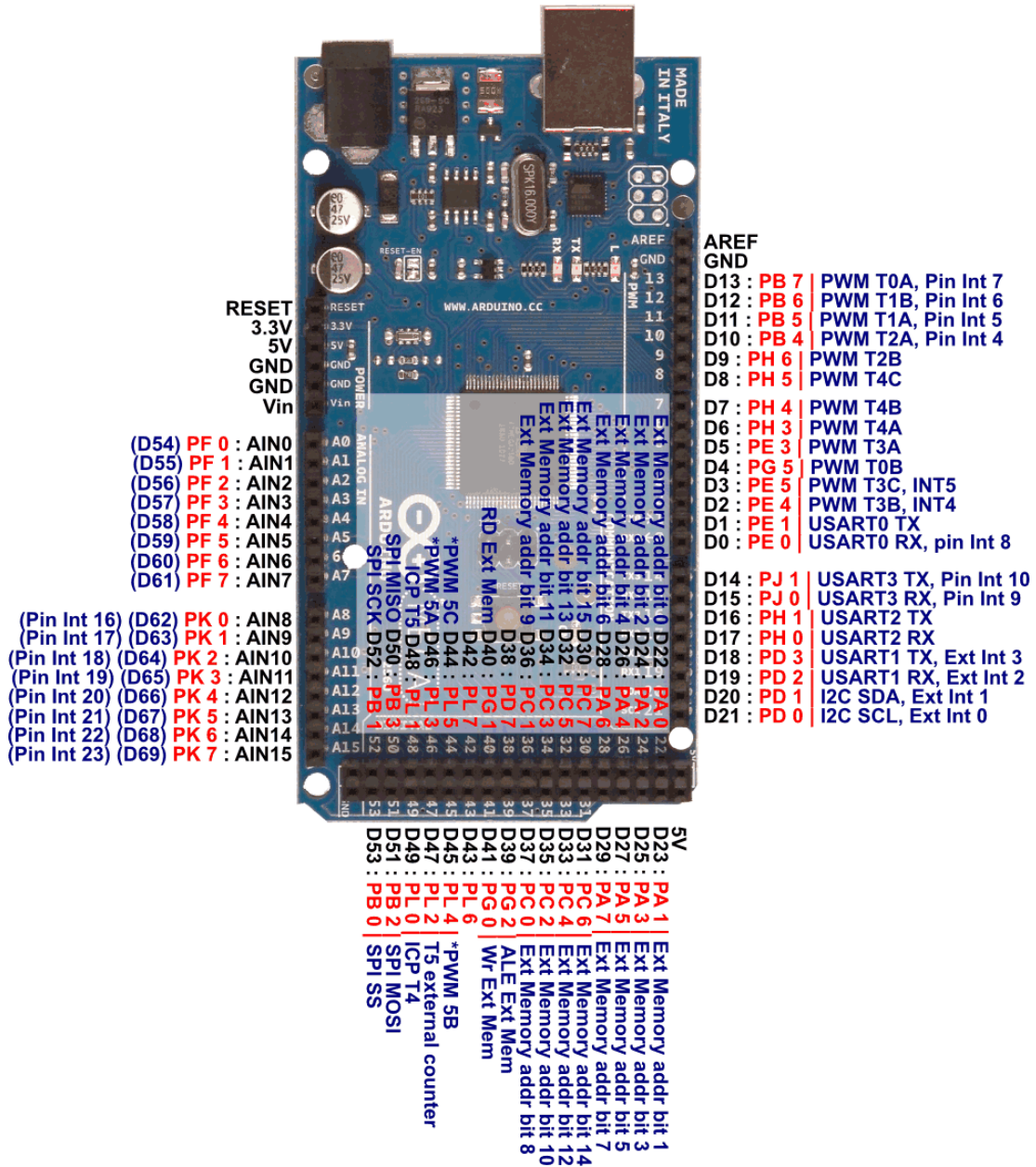


Figura C. 2. Arduino Mega 2560 con pines de conexión

Tabla C. 3. Características relevantes del Arduino Mega 2560

Característica	Valor
Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de operación	5V
Tensión de entrada	7-12V
Limites de tension de entrada	6-20V
Pines digitales de E/S	54 (of which 15 provide PWM output)
Pines de entrada analógica	16
Corriente CC por pin E/S	20 mA
Corriente CC por pin 3,3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz
Longitud	101.52 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	37 g

C2. COMPONENTES ELECTRÓNICOS

C2.1. Compuerta logica NOT 74LS04

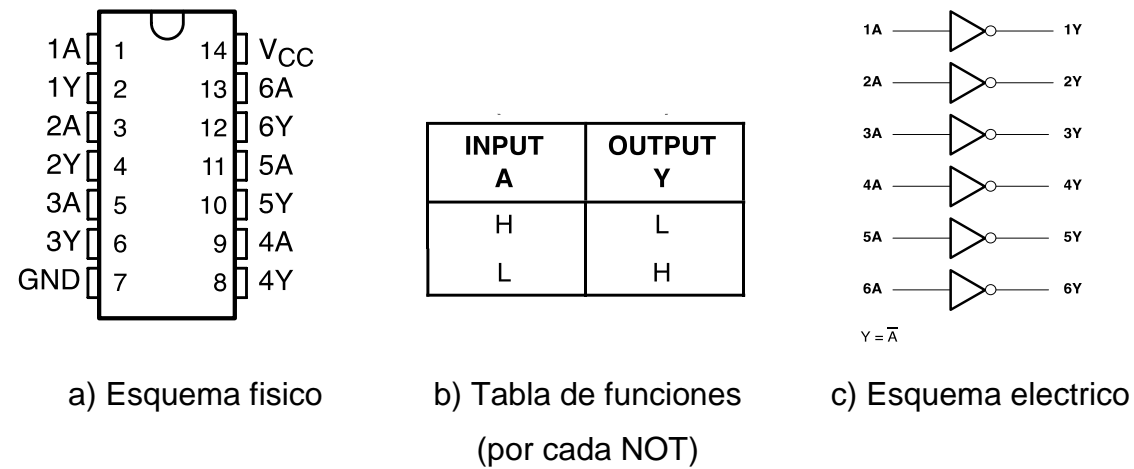
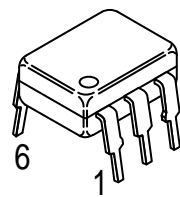


Figura C. 3. Esquematicos y funciones de un 74LS04

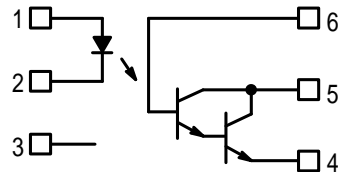
Tabla C. 4. Caracteristicas de operación de un 74LS04

	SN74LS04			UNIT
	MIN	NOM	MÁX	
Tensión de alimentación V _{CC}	4,75	5	5,25	V
Tensión de entrada logica alto V _{IH}	2			V
Tensión de entrada logica bajo V _{IL}	0.8			V
Corriente de salida logica alta I _{OH}	-0.4			mA
Corriente de saida logica bajo I _{OL}	8			mA
Temperatura de operación al aire libre T _A	0		70	°C

C2.2. Opto-acoplador 4N32



a) Esquema fisico



b) Esquema electrico

- PIN 1. LED ANODE
2. LED CATHODE
3. N.C.
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE

c) Pines del esquema electrico

Figura C. 4. Esquematicos y pines de un 4N32

Tabla C. 5. Rangos de operación máximos de los principales parámetros de un 4N32

Parametro	Simbolo	Valor	Unidad
Voltaje inverso	V_R	3	V
Corriente de Forward – Continuo	I_F	60	mA
Potencia disipación del LED	P_D	120	mW
Corriente de colector - Continuo	I_C	150	mA
Tempreatura ambiente de operación	T_A	250	°C

C2.3. Regulador de tensión LM317T

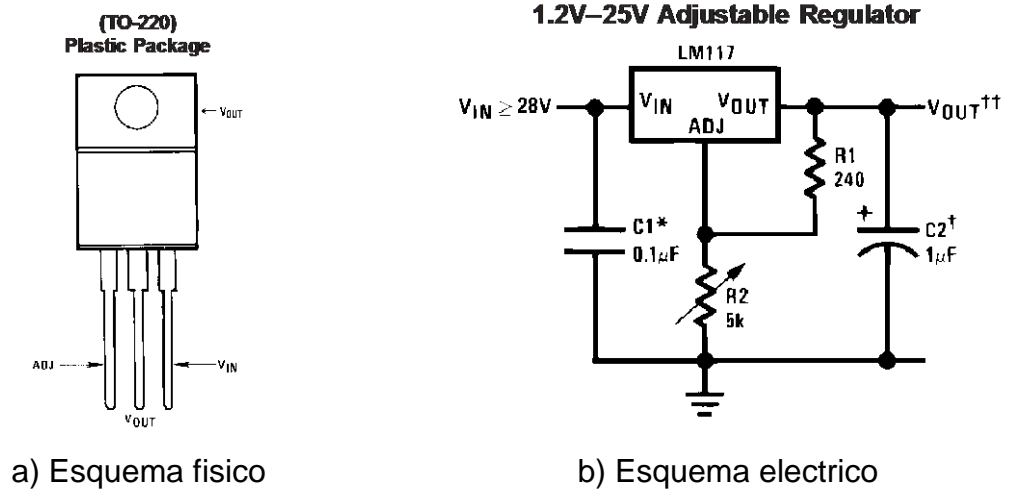


Figura C. 5. Esquematicos de un LM317T

C2.4. Transistor MOSFET IRF540N

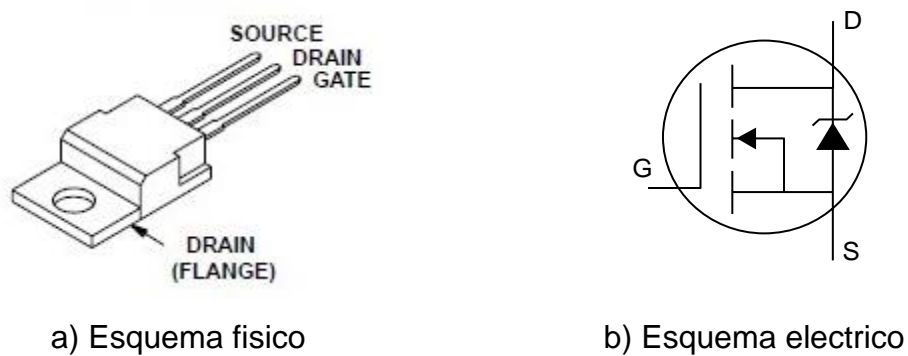


Figura C. 6. Esquematicos de un IRF540N

Tabla C. 6. Características eléctricas principales para la operación de un IRF540N

	Parametro	Max.	Unidad
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Corriente continua de drenaje, $V_{GS} @ 10\text{V}$	33	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Corriente continua de drenaje, $V_{GS} @ 10\text{V}$	23	
I_{DM}	Corriente pulsante de drenaje	110	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Potencia de disipación	130	W
V_{GS}	Tensión de puerta-fuente	± 20	V
V_{GSth}	Tensión de puerta-fuente "treshold"	2 a 4	V