

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL EN CUATRO CUADRANTES DE UNA MÁQUINA DC CON UN CONVERTOR DC/DC TIPO CÚK BIDIRECCIONAL

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

FRANCISCO XAVIER TOAPANTA MOSCOSO

francisco.toapanta@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr.-Ing. PAUL MARCELO POZO PALMA

marcelo.pozo@epn.edu.ec

D.M, Quito, febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, FRANCISCO XAVIER TOAPANTA MOSCOSO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

FRANCISCO XAVIER TOAPANTA MOSCOSO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por FRANCISCO XAVIER TOAPANTA MOSCOSO, bajo mi supervisión.

Dr.-Ing. PAUL MARCELO POZO PALMA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

FRANCISCO XAVIER TOAPANTA MOSCOSO

Dr.-Ing. PAUL MARCELO POZO PALMA

DEDICATORIA

El siguiente trabajo se lo dedico a mi Padre Celestial quien me acompañó durante toda la carrera guiándome por buenos caminos y enseñándome con quien conversar para llegar a este punto.

Además, lo dedico a mis padres y hermana, quienes han estado a mi lado desde el inicio hasta el final, viéndome luchar por alcanzar este objetivo.

AGRADECIMIENTO

Quisiera agradecer en primer lugar a la Escuela Politécnica Nacional por sus espectaculares maestros quienes aportaron con el conocimiento necesario para la realización de este trabajo.

En especial quiero agradecer al Dr.-Ing. Paul Marcelo Pozo Palma, quien siempre estuvo pendiente para brindarme el apoyo necesario para que logre culminar con este trabajo, además, me aportó con el conocimiento necesario durante los semestres que fui su alumno.

Agradezco a todos mis profesores que me enseñaron todo lo necesario para llegar a este punto de mi vida.

También, a cada uno de mis compañeros de estudio, quienes han sido un soporte tanto académico como social.

A los grandes amigos que encontré durante este tiempo de estudio, con quienes compartí prolongadas horas de estudio y sirvieron de guía y motivación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA.....	3
1.4.1.1 Ley de Faraday.....	4
1.4.1.2 Ley de Lorentz.....	5
1.4.1.3 Comportamiento de generador DC.....	5
1.4.1.4 Comportamiento de motor DC.....	7
1.4.1.5 Modelo matemático aproximado de una máquina DC.....	8
1.4.1.6 Máquina DC en operación cuatro cuadrantes.....	11
1.4.2 ANÁLISIS PARA EL CONTROL DE MÁQUINA DC EN OPERACIÓN CUATRO CUADRANTES	12
1.4.2.1 Análisis del control de velocidad.....	12
1.4.2.2 Análisis de control en cascada	14
1.4.3 CONVERSORES DC/DC.....	15
1.4.3.1 Análisis del convertidor Cûk para la operación en cuatro cuadrantes de la máquina DC.....	17
1.4.4 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	18
2 METODOLOGÍA	20
2.1 SELECCIÓN DE MÁQUINA DC Y EL ANÁLISIS DE SU COMPORTAMIENTO	20
2.1.1 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA MÁQUINA SELECCIONADA.....	20
2.2 DISEÑO DEL CONVERTOR CUK PARA EL CONTROL DE LA MÁQUINA DC	21

2.2.1	ANÁLISIS DEL CICLO DE TRABAJO PARA OBTENER VOLTAJES POSITIVOS Y NEGATIVOS	21
2.2.2	ANÁLISIS DEL VOLTAJE PARA LA ALIMENTACIÓN DEL CONVERTOR... ..	22
2.2.3	DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DEL CONVERTOR.....	22
2.2.3.1	Selección del semiconductor de potencia.....	25
2.2.4	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL CONVERSO CÛK.....	25
2.2.4.1	Análisis cuando los semiconductores son ideales.	25
2.3	SIMULACIÓN EN LAZO ABIERTO DE LA MÁQUINA DC OPERANDO EN CUATRO CUADRANTES ENERGIZADA POR EL CONVERTOR CÛK	27
2.4	DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LOS CONTROLADORES PARA LA OPERACIÓN DE LA MÁQUINA EN CUATRO CUADRANTES EN LAZO CERRADO	28
2.4.1	DISEÑO DEL CONTROLADOR PI POR ASIGNACIÓN DE POLOS	28
2.4.1.1	Controlador de corriente o lazo interno.....	31
2.4.1.2	Controlador de velocidad o lazo externo.....	31
2.4.2	ACOPLAMIENTO DE LOS SENSORES DE LA MÁQUINA DC.....	32
2.4.2.1	Selección de sensor de corriente y su acondicionamiento	33
2.4.2.2	Selección de sensor de velocidad.....	33
2.5	DISEÑO DE LA INTERFAZ HMI PARA LA VISUALIZACIÓN DEL TRABAJO REALIZADO	34
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
3.1	Resultados	39
3.1.1	DESEMPEÑO DEL CONTROL EN CASCADA DISEÑADO	39
3.1.1.1	Respuesta del lazo interno o control de corriente	39
3.1.1.2	Respuesta del lazo externo o control de velocidad	40
3.1.1.3	Respuesta del sistema ante cambios de referencia y perturbaciones..	42
3.1.2	DEMOSTRACIÓN DE LA OPERACIÓN EN CUATRO CUADRANTES DE LA MÁQUINA DC.....	47
3.1.2.1	Operación primer cuadrante.	48
3.1.2.2	Operación segundo cuadrante.....	48
3.1.2.3	Operación tercer cuadrante	49
3.1.2.4	Operación cuarto cuadrante	50
3.1.3	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN COMPLETA.....	50
3.1.3.1	Respuesta trayectoria plana	51
3.1.3.2	Respuesta plano torque vs velocidad angular.....	51
3.1.3.3	Respuesta con trayectoria variable.....	52
3.2	CONCLUSIONES.....	55

3.3	RECOMENDACIONES	56
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
5	ANEXOS.....	61

RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular presenta el diseño y simulación del control en cuatro cuadrantes de una máquina DC mediante un convertor DC/DC tipo Cûk bidireccional.

Para el efecto, se realiza un análisis de la máquina operando en sus cuatro cuadrantes, en función de su operación, se analiza cómo debe diseñarse el convertor DC/DC tipo Cûk bidireccional para controlarla.

Para el diseño del regulador se modela matemáticamente, tanto, el convertor DC/DC tipo Cûk y la máquina DC. Con estos modelos se sintoniza el regulador en cascada para controlar el comportamiento de la máquina DC, mediante el actuador que es el convertor DC/DC tipo Cûk bidireccional. Es posible controlar el lazo interno o de corriente y el lazo externo o de velocidad, para lo cual se sintoniza los reguladores PI.

A fin de obtener una visualización interactiva e intuitiva del trabajo de integración curricular, se diseñó una interfaz hombre-máquina diseñada mediante las herramientas de Matlab App-Designer, donde se puede observar como el convertor DC/DC tipo Cûk permite el control de la máquina DC en sus cuatro cuadrantes de operación.

Finalmente utilizando índices de desempeño se determina que el control es aceptable para el correcto funcionamiento de la máquina y la vida útil del convertor.

PALABRAS CLAVE: cuatro cuadrantes, máquina DC, convertor Cûk bidireccional, control en cascada, índices de desempeño, App-Designer.

ABSTRACT

The present curricular integration project presents the design and simulation of the four quadrants control of a DC machine with a Bidirectional Cûk type DC/DC converter.

For this purpose, an analysis of the machine operating in its four quadrants is performed, based on the operation of the machine, it is analyzed how the bidirectional Cûk type DC/DC converter should be designed to control the machine.

For the design of the regulator, both the Cûk type DC/DC converter and the DC machine are mathematically modeled. With these models, the cascade controller is designed to control the DC machine, through the actuator which is the bidirectional Cûk type DC/DC converter, it is possible to control the internal or current loop and the external or speed loop, for this purpose PI controllers are tuning.

For an interactive and intuitive visualization of the curricular integration project, a human-machine interface was designed using Matlab App-Designer tool, where it can be seen how the DC/DC converter type Cûk allows the control of the DC machine in its four quadrants of operation.

Finally, using performance indexes, is determined that the control is acceptable for proper machine operation and converter operational lifetime.

KEYWORDS: Four Quadrants, DC Machine, Bidirectional Cûk Converter, Cascade Control, Performance Indexes, App-Designer.

1 INTRODUCCIÓN

Las máquinas de corriente continua o máquinas DC, son un tipo de convertidores electromecánicos de energía, que transforman la energía eléctrica en mecánica y viceversa. En la industria, se utilizan las máquinas DC para diversas aplicaciones, siendo estas: vehículos eléctricos, tranvías, grúas marinas, montacargas, elevadores de mina, entre otras [1], por lo tanto, su uso en la industria es muy amplio.

Las máquinas DC necesitan controlar el sentido de giro de su eje y el torque en función de su aplicación, es decir que, el eje gire en sentido horario o antihorario, tanto en aceleración, velocidad constante o freno, o regeneración, es decir, una operación en cuatro cuadrantes [2], [3].

En la actualidad, no se tiene mucho conocimiento respecto al convertidor DC/DC tipo Cûk para el control de máquinas DC. De igual manera, se tiene poca información del uso de convertidores Cûk en operación en cuatro cuadrantes, debido a que la topología de este convertidor es normalmente tipo reductor – elevador inversor, es decir, actúa en dos cuadrantes [4]. Es por ello, que se propone el control de una máquina DC a través de un convertidor Cûk en operación en cuatro cuadrantes.

Para el control de una máquina en cuatro cuadrantes de operación es necesario implementar un control en cascada, ya que, se desea controlar la velocidad angular del eje de la máquina y también su comportamiento ante perturbaciones de torque, por lo cual, se tiene reguladores para cada etapa del control de cascada que generalmente son reguladores proporcional-integral-PIs [2].

En función de lo mencionado anteriormente y en base a lo que dice la teoría sobre este tema, se analiza cómo controlar una máquina DC de potencia de hasta 5HP en sus cuatro cuadrantes, mediante el uso de un convertidor Cûk.

Para corrientes inversas, voltajes positivos y negativos se realizó el diseño de un convertidor Cûk capaz de cumplir todos estos requerimientos, el convertidor diseñado es bidireccional.

Finalmente, se demostró el desempeño del regulador diseñado cuando se producen cambios de referencia, perturbaciones y cargas en el eje de la máquina DC. Se diseñó una interfaz que permite observar de manera intuitiva y didáctica la operación en cuatro cuadrantes de la máquina seleccionada.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular el control en cuatro cuadrantes de una máquina DC con un convertidor DC/DC tipo Cúk bidireccional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre el control de máquinas DC y sobre el convertidor DC/DC tipo Cúk.
2. Realizar un estudio y análisis del modelamiento del convertidor Cúk y de la máquina DC, así como, de los reguladores en cascada que permitirán el control de la máquina DC.
3. Diseñar y simular un convertidor Cúk bidireccional y dimensionar sus elementos eléctricos y electrónicos para controlar una máquina DC comercial.
4. Diseñar e implementar una interfaz hombre-máquina del sistema propuesto, a fin de que un usuario interactúe con el sistema y permita modificar y proponer diferentes referencias, cargas y perturbaciones, además permita visualizar la operación de todo el sistema.
5. Analizar y evaluar el funcionamiento del esquema de control propuesto ante diferentes escenarios de operación tanto a cambios de referencia, a diferentes perfiles de carga, así como a perturbaciones mediante el análisis de los índices de desempeño en los resultados obtenidos de la simulación.

1.3 ALCANCE

- Se realizará una búsqueda bibliográfica sobre el convertidor Cúk bidireccional, con las respectivas etapas de alimentación del convertidor, siendo: la rectificación, el bus DC y el chopper, para el control en cascada de una máquina DC de potencias de hasta 5HP.
- Se realizará un estudio y análisis bibliográfico de modelamiento del convertidor de potencia DC/DC Cúk, así como de máquinas DC.
- Se diseñará y se dimensionarán los elementos eléctricos y electrónicos necesarios para el diseño del convertidor y el control de la máquina DC de potencias de hasta 5 HP.

- Se diseñará un control en cascada para el control de una máquina DC de hasta 5HP, así como, la sintonización de los respectivos reguladores, lazo interno control de corriente, lazo externo control de velocidad, en el control de máquinas DC.
- Se simulará en un software especializado la propuesta de diseño del control en cascada de una máquina DC a través de un convertor DC/DC Cûk bidireccional.
- Se implementará una interfaz gráfica HMI asociada a la simulación que permita interactuar para poder cambiar referencias y perturbaciones.
- Se analizarán los respectivos índices de desempeño del control realizado, para determinar los resultados al trabajar en los cuatro cuadrantes de la máquina DC.

1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos que sirven de base para la elaboración del trabajo de integración curricular. Para lo cual se considera, el estudio de la máquina DC con énfasis en la operación en cuatro cuadrantes, el control cascada, el estudio de convertidores DC/DC, en especial la topología del convertor Cûk.

1.4.1 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

También, denominada máquina de corriente directa, de ahí su nombre máquina DC. Esta máquina está conformada por algunos elementos, entre los que se desatacan dos secciones que según su comportamiento permiten que la máquina opere sea como un generador o un motor. Estas secciones son: el rotor o inducido o armadura y el estator llamado también inductor o campo, tal como se aprecia en la Figura 1.1.

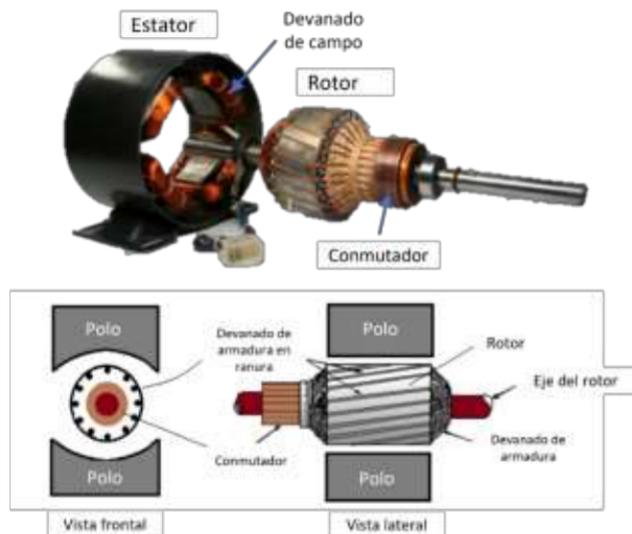


Figura 1.1. Esquema de una máquina DC [5].

El devanado de armadura o rotor está conformado por varias espiras y sus extremos están conectados a segmentos asilados de cobre denominados colector de delgas o conmutador. Por este devanado circula la corriente que permitirá que la máquina opere, ya sea como generador o motor. Por otra parte, el devanado del estator o inductor está formado de hierro macizo que al ser energizado genera un campo magnético constante [5].

Antes de analizar el comportamiento de la máquina como generador o motor, es necesario entender dos leyes físicas relacionadas al magnetismo que permiten dicho comportamiento, siendo estas: la ley de Lorentz y la Ley de Faraday [6].

1.4.1.1 Ley de Faraday

Cuando un conductor eléctrico está en movimiento con una velocidad constante dentro de un campo magnético, se tendrá una tensión inducida o una fuerza electromotriz (fem), la cual tendrá una polaridad descrita por la ley de Lenz [6], [7], para un mejor entendimiento dirigirse a la Figura 1.2.

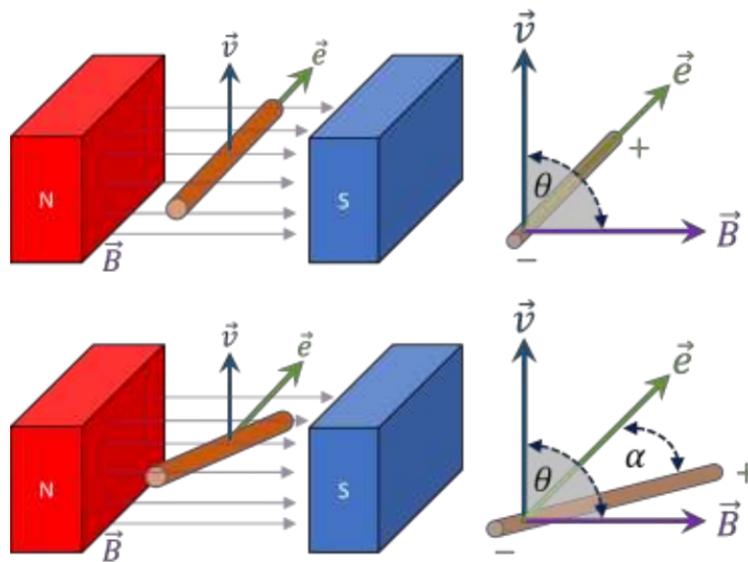


Figura 1.2 Inducción en barra dentro de campo magnético.

En la anterior figura se observa el campo magnético \vec{B} y dentro de este está el conductor de longitud L , que se mueve a una velocidad \vec{v} . Al relacionar estos componentes se obtiene la tensión inducida como se describe en la Ecuación (1.1) [8].

$$\begin{cases} \vec{e}_i = (\vec{v} \times \vec{B})L \\ e_i = vBL \sin(\theta) \cos(\alpha) \end{cases} \quad (1.1)$$

Donde θ es el ángulo entre el campo y la dirección de la velocidad y α es el ángulo entre el vector resultante del producto cruz y la barra. Para determinar de manera más sencilla

la dirección resultante de la tensión inducida se puede usar el criterio de la mano derecha, donde el dedo índice indica la dirección de la velocidad, los otros tres, la dirección del campo y el pulgar, hacia dónde se dirige la tensión, que vendría a ser el resultado de la ley, por eso, en la imagen anterior se observa que la polaridad positiva se encuentra al fondo. [6], [7], [9].

1.4.1.2 Ley de Lorentz

A diferencia de la ley de Faraday, esta menciona, que si por un material conductor circula una corriente eléctrica y este conductor está dentro de un campo magnético, el conductor tiende a salir del campo magnético con una fuerza inducida, como se observa en la Figura 1.3.

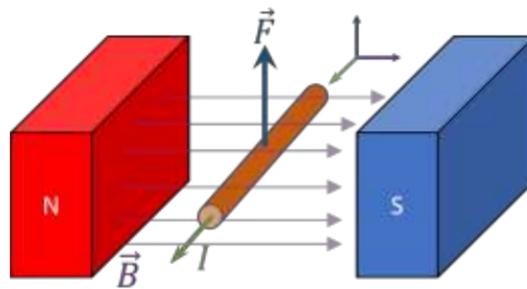


Figura 1.3 Sentido de la fuerza inducida.

La fuerza inducida es igual a la magnitud de la corriente I , que multiplica al producto cruz del vector de la longitud del conductor \vec{L} , el cual es atravesado por el flujo de corriente I y el vector del campo \vec{B} como se describe en la Ecuación (1.2) [7].

$$\vec{F} = I(\vec{L} \times \vec{B}) \quad (1.2)$$

Al igual que la ley de Faraday, se puede usar el criterio de la mano derecha, pero, en este caso el dedo índice muestra la dirección de la corriente, los tres dedos están en dirección del campo y el pulgar indica la dirección de la fuerza. [7], [9].

Con el análisis de las leyes descritas anteriormente, se puede comprender como una máquina puede actuar tanto como motor y generador, lo cual se explica a continuación.

1.4.1.3 Comportamiento de generador DC

Cuando una fuerza mecánica externa gira el eje del rotor de la máquina DC y el devanado de campo genera un campo magnético constante al estar energizado, se cumple la ley de Faraday, ya que, se induce una fuerza electromotriz (fem) en los contornos del devanado del rotor, los cuales se visualizan como conductores, tal como se muestra en la Figura 1.2,

en base a lo cual, se analiza que un devanado del rotor puede ser considerado como dos conductores conectados en su extremo y separados por un conmutador, como se ilustra en la Figura 1.4.

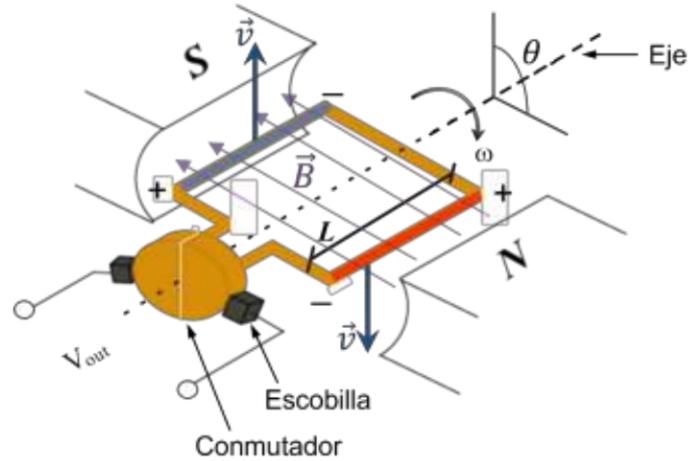


Figura 1.4 Esquema del generador.

Donde se observa un ángulo θ que es el ángulo de la rotación del eje y se visualiza los dos conductores de la espira, las zonas sombreadas de rojo y azul.

Analizando la Ecuación (1.1 con $\alpha = 0$, se obtiene la Ecuación (1.3 [7].

$$e_i = 2vBL \sin(\theta) \quad (1.3)$$

Se obtiene dos veces la tensión inducida, ya que, se cuenta con dos conductores, mientras uno sube (zona azul) se induce un voltaje positivo y cuando el segundo conductor baja (zona roja) se induce un voltaje negativo, dando como resultado una fem sinusoidal. Para la rectificación de esta fem se usa el conmutador que permite tener una tensión rectificada como se indica en la Figura 1.5 . Esta tensión se mide usando escobillas de carbón o grafito los cuales se conecta a los extremos de la salida V_{out} y rozan el conmutador [9].

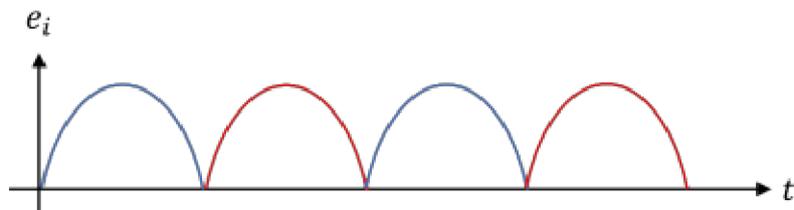


Figura 1.5 Fem resultante de una espira.

Como se aprecia en la anterior figura, la fem no es una señal continua, ya que solo se visualiza la señal de una espira o devanado. Es preciso, tener en cuenta que el rotor está conformado por varios devanados como se indica en la Figura 1.6.

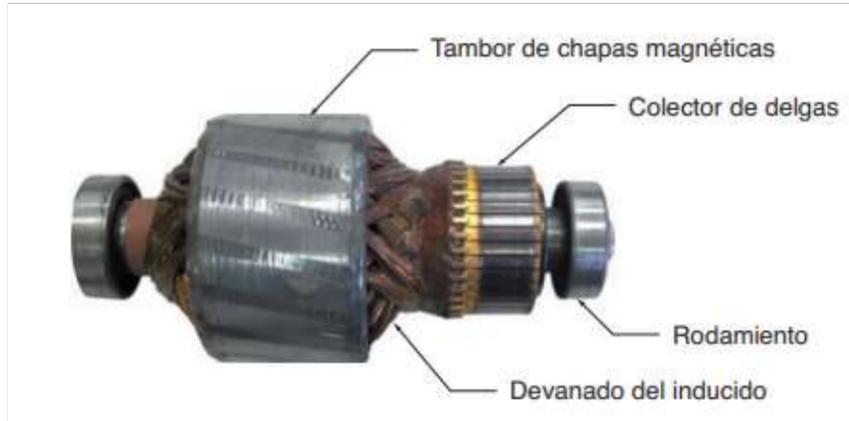


Figura 1.6 Devanado del rotor de una máquina DC [9].

Además, se cuenta con varios polos en el estator, cuya forma no es cuadrada, sino circulares, como se muestra en la Figura 1.1. La forma de los núcleos del estator permite un campo magnético idóneo para la generación de una fem continua [9], [10].

1.4.1.4 Comportamiento de motor DC.

Cuando se energiza las terminales de las escobillas con un voltaje DC, circula una corriente por la espira como se muestra en la Figura 1.7. La interacción entre el campo magnético resultante del estator, la corriente que circula por el devanado de la armadura o rotor y la longitud del devanado da como resultado un par de fuerzas electromagnéticas, las cual, se basan en la ley de Lorentz como se presenta en la Ecuación (1.4 [7]). Con este par de fuerzas, el eje de la máquina empezará a rotar como se ilustra en la Figura 1.7.

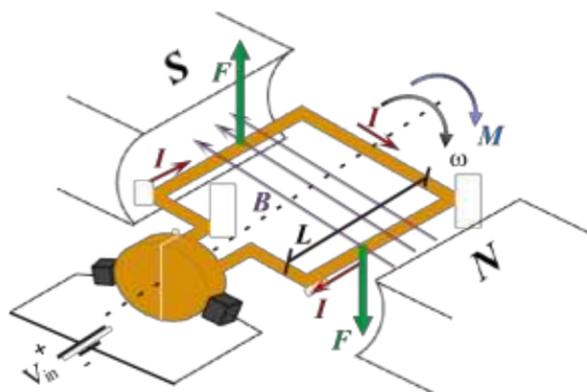


Figura 1.7 Esquema del funcionamiento de un motor DC

$$\vec{F} = I(\vec{L} \times \vec{B}) \quad (1.4)$$

Donde: \vec{F} es la fuerza resultante, I es la magnitud de la corriente que atraviesa el devanado del rotor, \vec{B} es la densidad de campo magnético y \vec{L} es la longitud del devanado, con la dirección del flujo de corriente, el cual es atravesado por el campo magnético.

Como se explicó en párrafos anteriores, la dirección de la fuerza inducida se determina por el criterio de la mano derecha. A partir de la Ecuación (1.4) se puede determinar el momento de fuerzas o par rotacional, que está descrito en las Ecuaciones de (1.5) [8].

$$\begin{cases} \vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \\ \vec{M} = \vec{r} \times I(\vec{L} \times \vec{B}) \\ \vec{M} = I(\vec{S} \times \vec{B}) \\ M = I|S||B| \sin(\theta) \end{cases} \quad (1.5)$$

Donde M es el torque medido en Nm, I es la corriente en A, r es el radio del conductor, S es la superficie de la espira en m^2 , B el campo magnético y θ es el ángulo entre la dirección del campo magnético y la dirección de la fuerza.

De la ecuación (1.5) y la ecuación (1.3) se observa que ambas ecuaciones son funciones del ángulo θ , cuando este es igual a cero se presenta la zona neutra donde se anulan las fuerzas y las tensiones inducidas, para solucionar este efecto se necesita más espiras como se muestra en la Figura 1.6. Con más espiras en el rotor y más polos en el estator, se evita que la máquina se detenga [10].

1.4.1.5 Modelo matemático aproximado de una máquina DC

El circuito de la máquina DC se describe como se presenta en la Figura 1.8, donde se pueden analizar las ecuaciones tanto eléctricas como mecánicas que rigen el comportamiento de dicha máquina.

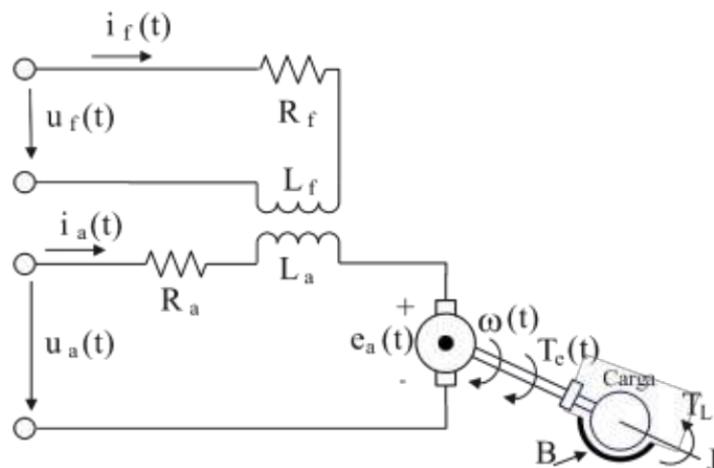


Figura 1.8 Circuito aproximado de una máquina DC

En la figura anterior se observa que hay dos circuitos, la parte superior corresponde al circuito de devanado del estator o campo, el cual genera el campo magnético necesario para la inducción magnética o magnetización que permitirá la rotación del eje de la máquina DC, y la parte inferior muestra el circuito del devanado de armadura o rotor, mismo que está dentro de un campo magnético debido al circuito de campo. Además, se observa que el circuito de armadura es energizado y, por ende, es atravesado por una corriente, lo que demuestra que la máquina opera como motor. La figura 1.8 será de ayuda para el análisis matemático del sistema eléctrico y mecánico de la máquina DC.

Basándose en la ley de voltajes de Kirchhoff, se puede determinar el estado transitorio del sistema eléctrico del motor DC [11], como se describe en la Ecuación (1.6).

$$u_a(t) = i_a(t) * R_a + L_a * \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (1.6)$$

Donde u_a es la tensión de armadura con el que se alimenta al rotor, i_a es la corriente que atraviesa el circuito de la armadura, R_a es la resistencia del devanado de armadura, L_a es la inductancia de armadura y e_a es la fuerza contraelectromotriz.

Por otra parte, para el sistema mecánico, basándose en la segunda ley de Newton enfocada en la rotación dinámica [11] y considerando las fuerzas que están implicadas el torque o momento queda expresado como se presenta en la Ecuación (1.7).

$$\begin{cases} \sum T = J * \frac{d\omega(t)}{dt} \\ T_e(t) - B * \omega(t) - T_L(t) = J * \frac{d\omega(t)}{dt} \\ T_e(t) = J * \frac{d\omega(t)}{dt} + B * \omega(t) + T_L(t) \end{cases} \quad (1.7)$$

Siendo T_e torque electromagnético de la máquina, ω velocidad angular del rotor, J momento de inercia, B coeficiente de viscosidad o fricción y T_L carga en el eje del rotor.

A partir de las Ecuaciones (1.6 y (1.7, se puede obtener la fuerza contraelectromotriz inducida y el torque mecánico. Para relacionar dichas ecuaciones se considera que la fuerza contraelectromotriz es proporcional a la velocidad angular del eje de la máquina y el torque electromecánico es proporcional a la corriente de armadura [12], como se observa en la Ecuación (1.8 y Ecuación (1.9 respectivamente.

$$e_a(t) = K_e * \omega(t) \quad (1.8)$$

$$T_e(t) = K_T * i_a(t) \quad (1.9)$$

Siendo K_e la constante de voltaje y K_T la constante de torque. En la mayoría de las aplicaciones, éstas constantes son prácticamente iguales [2].

Al transformar las Ecuaciones (1.6 a (1.9 en el dominio de Laplace se obtienen las siguientes ecuaciones que permitirán obtener el modelo matemático de la máquina DC.

$$U_a(s) = I_a(s) * R_a + s * L_a * I_a(s) + E_a(s) \quad (1.10)$$

$$T_e(s) = s * J * \Omega(s) + B * \Omega(s) + T_L(s) \quad (1.11)$$

$$E_a(s) = K_e * \Omega(s) \quad (1.12)$$

$$T_e(s) = K_T * I_a(s) \quad (1.13)$$

Al despejar la corriente de armadura de la Ecuación (1.10 se tiene la Ecuación (1.14, la cual describe el sistema eléctrico de la máquina DC.

$$I_a(s) = \frac{1}{L_a * s + R_a} [U_a(s) - E_a(s)] \quad (1.14)$$

A partir de la Ecuación (1.11, se determina el sistema mecánico de la máquina, despejando la velocidad angular como se describe en la Ecuación (1.15).

$$\Omega(s) = \frac{1}{J * s + B} [T_e(s) - T_L(s)] \quad (1.15)$$

Posteriormente, se relacionan las ecuaciones resultantes con las Ecuaciones (1.12 y (1.13. lo que da como resultado el diagrama de bloques que se aprecia en la Figura 1.9, el que permite desarrollar el posterior control de la máquina DC.

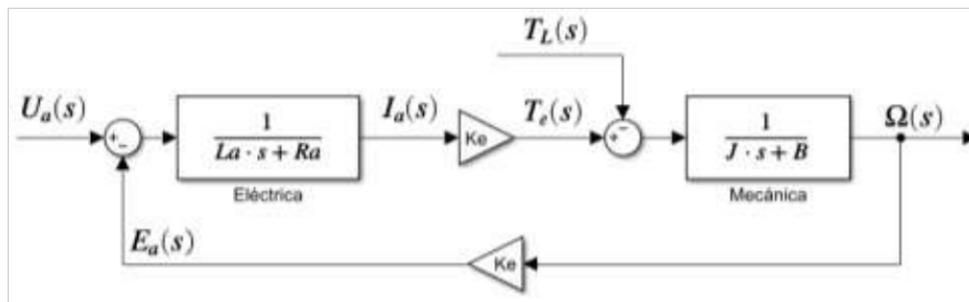


Figura 1.9 Diagrama de bloques de una máquina DC.

1.4.1.6 Máquina DC en operación cuatro cuadrantes

Una máquina DC puede operar en los cuatro cuadrantes del plano torque (M) vs velocidad angular (ω) como se muestra en la Figura 1.10.

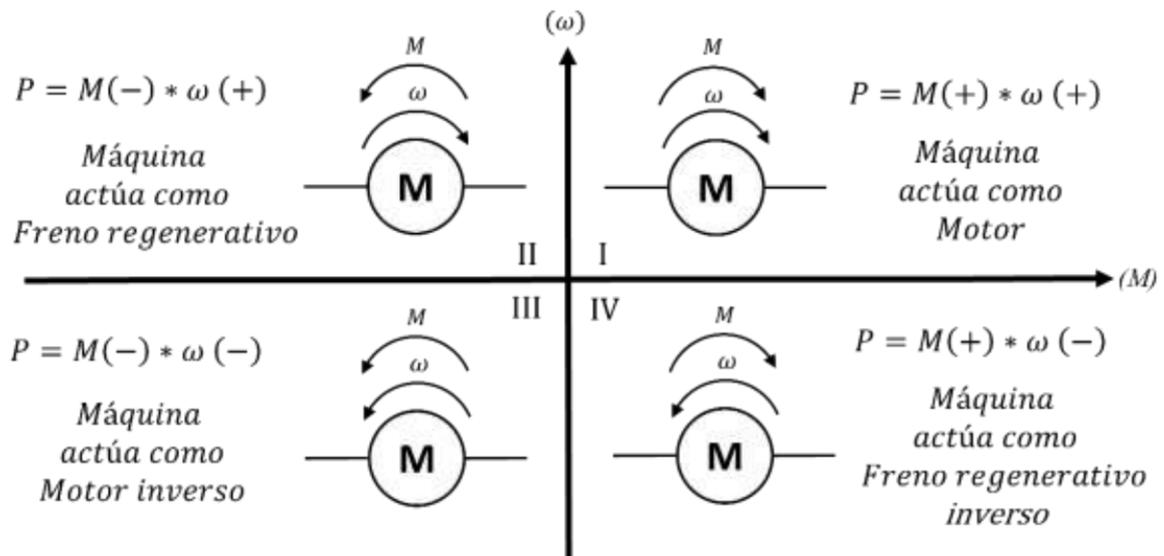


Figura 1.10 Esquema de la operación cuatro cuadrantes de una máquina DC.

Donde ω es la velocidad angular con la que gira el eje de la máquina DC que muestra el sentido de giro y M es el torque del eje. En función de estas variables la potencia mecánica (P) de la máquina puede ser positiva, lo que implica un comportamiento de motor, o negativa, que indica que la máquina actúa como generador [7].

La máquina DC puede operar como motor en el primer y tercer cuadrante, el sentido de giro del eje de la máquina dependerá de la polaridad con que se energice el circuito de armadura. Si el rotor de la máquina gira en sentido horario se denomina directo, quiere decir que, el rotor gira hacia adelante, por otra parte, en el tercer cuadrante el eje de la máquina genera movimiento en sentido de retroceso debido a la polaridad negativa con que se alimenta al circuito de armadura.

El segundo cuadrante denominado freno regenerativo, se produce cuando el eje de la máquina está girando en sentido directo con un torque negativo, por lo tanto, la máquina opera como generador. Finalmente, el cuarto cuadrante se produce cuando gira el rotor de la máquina en sentido inverso y el torque es positivo [2], [3], [13].

1.4.2 ANÁLISIS PARA EL CONTROL DE MÁQUINA DC EN OPERACIÓN CUATRO CUADRANTES

Como se puede observar en los anteriores puntos, para que una máquina opere en sus cuatro cuadrantes, es necesario que se cuente con una fuente capaz de invertir su polaridad, para eso se cuenta con un intermediario entre la fuente y la máquina. Dicho intermediario debe soportar la corriente negativa, la cual se genera cuando la máquina opera como un generador. Este intermediario puede ser un convertidor, del cual se hablará más adelante, por el momento se analiza cómo se controla la máquina DC.

Una máquina DC cuenta con dos sistemas, el sistema eléctrico y el mecánico como se muestra en el diagrama de la Figura 1.9. El sistema eléctrico posee una constante de tiempo, la que se describe en la Ecuación (1.16), y se refiere al tiempo que tarda la máquina en alcanzar el 63.2% de la corriente nominal de armadura. Por otra parte, el sistema mecánico también cuenta con una constante de tiempo que se describe en la Ecuación (1.17), este es el tiempo que tarda la máquina en alcanzar el 63.2% de la velocidad nominal [14].

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (1.16)$$

$$\tau_m = \frac{J * R_a}{K_T * K_e} \quad (1.17)$$

Al observar que el sistema cuenta con dos constantes de tiempos, se contempla que $\tau_e \ll \tau_m$ de esta manera se obtienen dos respuestas, una rápida y una lenta. La respuesta rápida es la corriente del sistema eléctrico y la respuesta lenta es la velocidad resultante del sistema mecánico. Como se observa en la Ecuación (1.13) la corriente es proporcional al torque y el torque varía en función de la carga que tenga el eje de la máquina, por lo que, las perturbaciones en el eje se verán reflejadas en la corriente que consume la máquina. Por otra parte, la velocidad del eje se relaciona con la tensión que energiza a la armadura.

1.4.2.1 Análisis del control de velocidad

Según [7] existen dos principales métodos usuales para controlar la velocidad del eje de una máquina DC, el primero, se denomina por debilitamiento de campo y el segundo, control de voltaje de armadura.

Para el control de velocidad por debilitamiento de campo es necesario cambiar la magnitud del campo magnético que se genera en el devanado del estator. Este control de velocidad es utilizado para obtener velocidades mayores a la velocidad nominal, pudiendo llegar a la

velocidad máxima que puede soportar el eje de la máquina, para lo cual, se reduce la corriente de campo. Para este control, es necesario energizar al circuito de armadura con la tensión nominal de armadura.

Para alcanzar una velocidad menor a la velocidad nominal del eje de la máquina se realiza el control de voltaje de armadura, el cual permite obtener una velocidad desde cero hasta la velocidad nominal. Para este control se debe mantener la corriente de campo en su valor nominal.

Es preciso mencionar, que, para velocidades menores a la velocidad nominal de la máquina, si se utiliza el control por debilitamiento de campo, se necesitaría una corriente de campo muy elevada, la que podría deteriorar al devanado de campo. Por otra parte, si se usa el control de voltaje para velocidades mayores a la velocidad nominal de la máquina, la corriente de armadura se podría incrementar de tal manera que dañaría el devanado de armadura [7].

En función de la velocidad que se desea alcanzar en el eje de la máquina DC, se puede escoger entre los dos tipos de controles mencionados tanto un sentido de giro como en otro, como se presenta en la Figura 1.11, la cual muestra cuál sería el tipo de control idóneo.

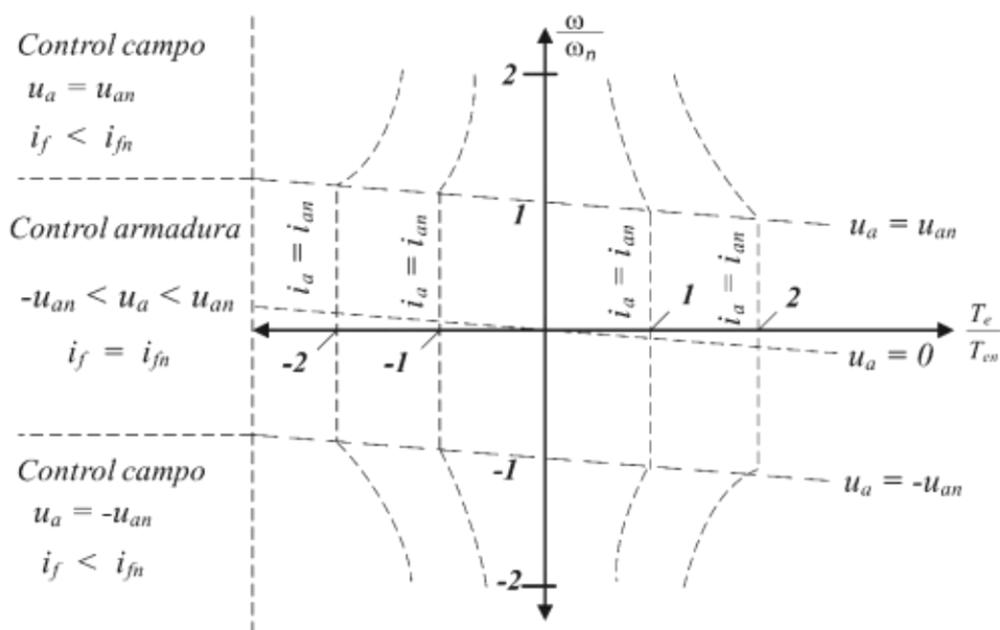


Figura 1.11 Regiones de operación de una máquina DC de excitación independiente en el plano torque vs velocidad nominal.

Donde i_a es la corriente de armadura, i_{an} la corriente nominal de armadura, i_f corriente de campo, i_{fn} corriente nominal de campo, u_a voltaje de armadura y u_{an} voltaje nominal de armadura.

Como el objetivo es controlar la velocidad del eje de la máquina en los cuatro cuadrantes de operación, desde la velocidad cero hasta la nominal, se escoge el control de voltaje de armadura.

1.4.2.2 Análisis de control en cascada

A partir de lo expuesto en párrafos anteriores, se determina que, para realizar el control de velocidad, se cuenta con dos variables a controlar: la velocidad angular del eje del rotor y la corriente del devanado de armadura. En este caso, el control en cascada es una técnica que permite realizar el control de la velocidad del eje de la máquina de manera óptima, ya que cuenta con dos lazos, un lazo interno y uno externo, el lazo interno se encarga del control de la variable rápida que es la corriente, y el lazo externo de la velocidad angular [2], Tal como se observa en la Figura 1.12.

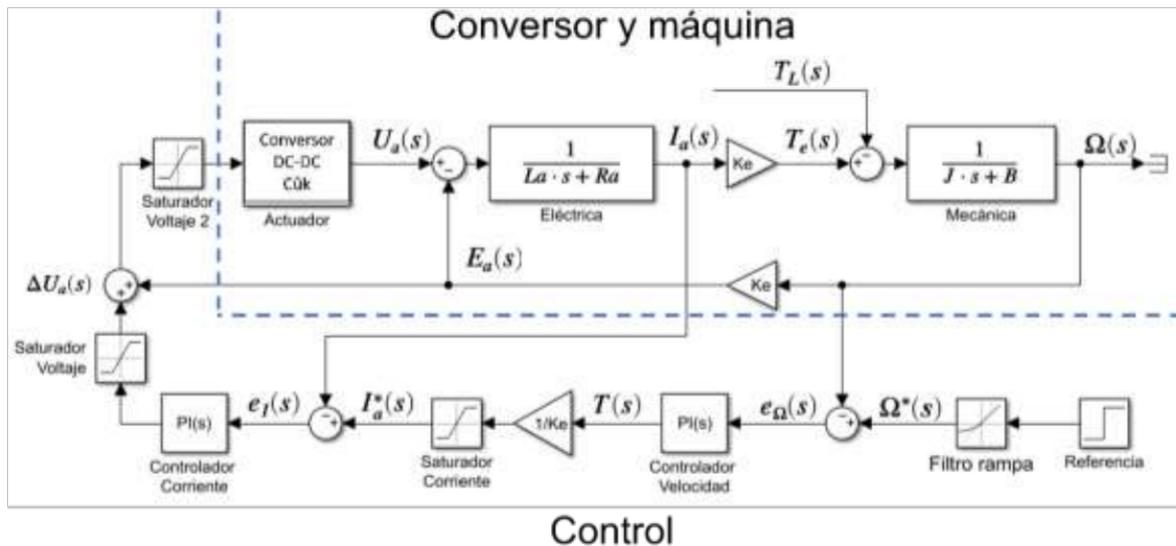


Figura 1.12 Diagrama de bloques para el control en cascada con el modelo matemático de la máquina DC.

En la parte superior de la figura anterior se observan los dos sistemas que corresponden a la máquina DC, la parte eléctrica y la parte mecánica. Para el lazo interno se tiene la referencia de la corriente, cuya salida del controlador es $\Delta U_a(s)$ el cual se suma con la fuerza contra electromotriz $E_a(s)$ y el resultado es el voltaje referencial para el convertor, el cual entrega $U_a(s)$ que ingresa a la máquina.

El pre-controlador de corriente es el controlador de velocidad que tiene como referencia la velocidad angular de la máquina. De la salida del controlador de velocidad se obtiene el torque, el cual es proporcional a la corriente, para eso se multiplica por $1/K_e$ y se tiene la referencia de corriente para el siguiente lazo de control.

A la salida de los controladores de velocidad y corriente, se utilizan saturadores o límites, que protegen a la máquina y al convertidor. Así, el saturador de corriente protege la parte mecánica de la máquina; y, los otros dos saturadores limitan el voltaje para que este no sea mayor al voltaje nominal de la máquina y tampoco sobre exceda el voltaje con el que opera el convertidor [2].

Es importante mencionar que se usa un filtro para la referencia de velocidad, el cual es una rampa de aceleración o desaceleración que se implementa por software y evita los sobre picos de corriente que se originan cuando se presentan respuestas muy elevadas. Estos sobre picos pueden dañar al convertidor y a la máquina DC [7].

1.4.3 CONVERSORES DC/DC

Este tipo de convertidores estáticos de energía, son circuitos que tienen la capacidad de convertir un voltaje continuo no regulado a un voltaje continuo regulado [15]. Ciertos convertidores cuentan con elementos pasivos que permiten el almacenamiento de energía, lo que contribuye al incremento o decremento del voltaje, este comportamiento es semejante al de los transformadores. Estos tipos de convertidores pueden ser usados para el control de máquinas DC [16].

Se cuenta con varias topologías de convertidores, sin embargo, se hace una breve comparación entre tres tipos de convertidores DC/DC no aislados, entre esos están: Buck-Boost, Cúk y Sepic, los cuales siguen la relación que está descrita en la Ecuación (1.18).

$$\frac{V_{out}}{E} = \frac{\delta}{1 - \delta} \quad (1.18)$$

Donde V_{out} es el voltaje de salida del convertidor, E voltaje con el que se alimenta al convertidor y δ es el ciclo de trabajo con la que opera el convertidor [15].

Convertidor Buck-Boost

Este convertidor es elevador - reductor de voltaje, además su salida es de polaridad invertida a la de la fuente, está conformado por un inductor y un capacitor que son elementos pasivos, para la conmutación cuenta con un semiconductor de potencia y un diodo, como se observa en la Figura 1.13.

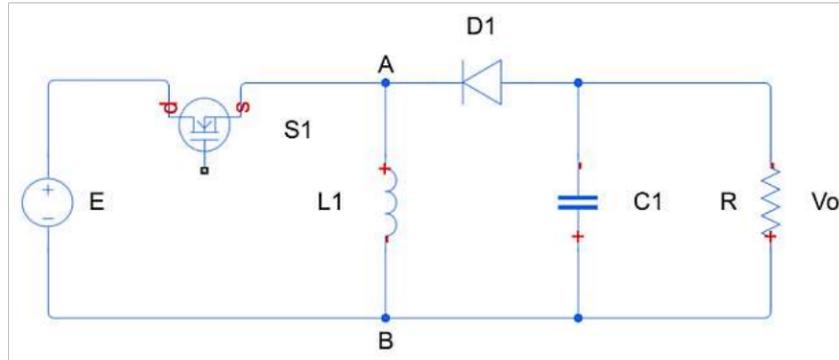


Figura 1.13 Circuito del conversor Buck-boost [15].

Conversor Cûk

Al igual que el anterior conversor, el voltaje de salida puede ser mayor o menor al de la fuente y su salida es de polaridad invertida, este conversor almacena la energía con la que alimenta a su carga en el capacitor C2, como se muestra en la Figura 1.14 [4], [15].

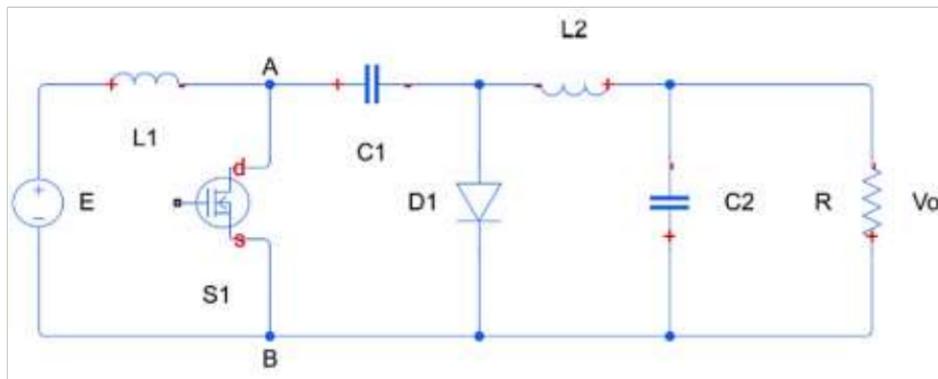


Figura 1.14 Circuito del conversor Cûk [15].

Conversor Sepic

Este conversor es semejante al Cûk, con la diferencia que el voltaje a la salida ya no es inverso. Se puede observar cómo está constituido el circuito de este conversor en la Figura 1.15 [15].

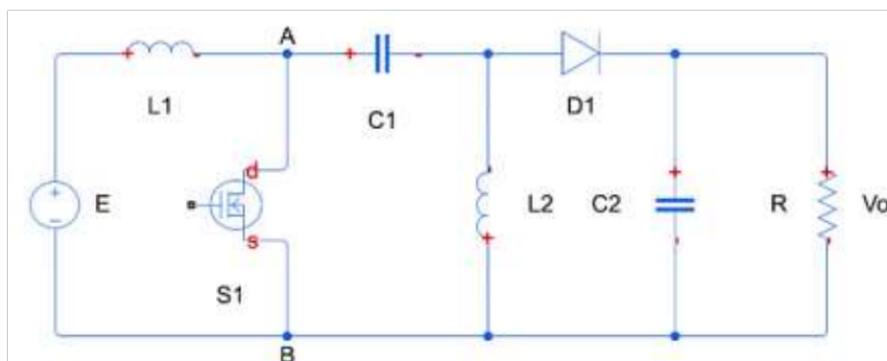


Figura 1.15 Circuito del conversor sepic [15].

Estos tres convertidores son semejantes, sin embargo, basándose en la Tabla 1.1 y en los resultados de [17], se determina que el convertidor que se usa para el desarrollo de este trabajo es el convertidor Cûk, porque permite alcanzar resultados favorables.

Tabla 1.1 Comparativa de los convertidores DC/DC [15].

Convertidor	Eleva y reduce	Polaridad salida	Dificultad control	Eficiencia	Perdidas en conmutación
Buck-Boost	Si	Inversa	Baja	Alta	Baja
Cûk	Si	Inversa	Alta	Alta	Baja
Sepic	Si	No inversa	Alta	Baja	Baja

1.4.3.1 Análisis del convertidor Cûk para la operación en cuatro cuadrantes de la máquina DC.

En base a lo expuesto en los párrafos que anteceden, se observa que la salida del convertidor Cûk da como resultado un voltaje de polaridad inverso en comparación con su fuente, sin embargo, si se desea realizar un control de voltaje de armadura, siguiendo la Figura 1.11 se necesita un voltaje que sea negativo y positivo, tal como, se ilustra en la Figura 1.10, además, es necesario que el convertidor tenga un comportamiento bidireccional, ya que la corriente fluye en los dos sentidos. El circuito resultante es el que se muestra en la Figura 1.16.

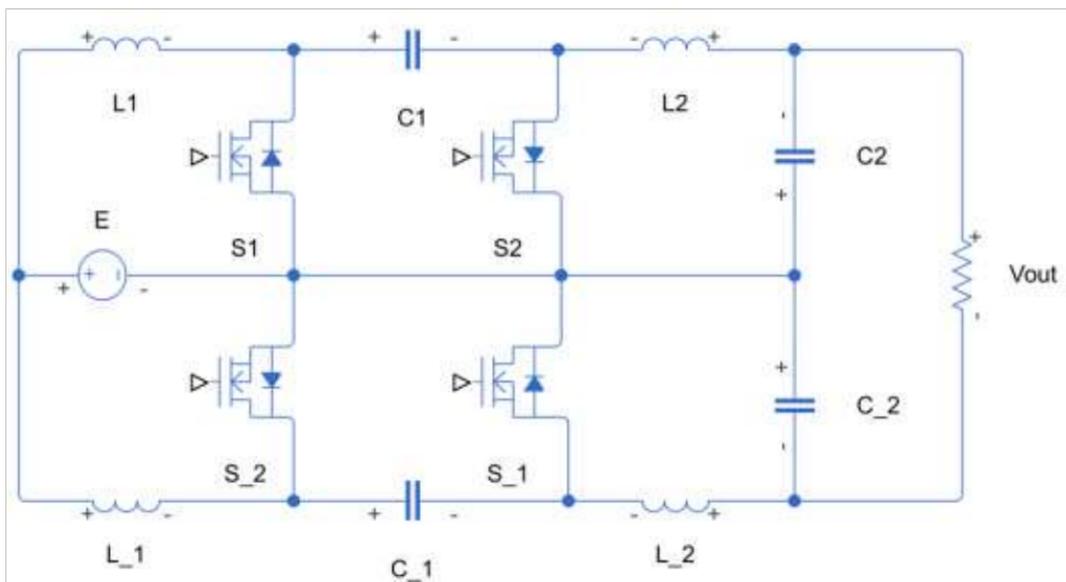


Figura 1.16 Circuito del convertidor Cûk para la operación cuatro cuadrantes de la máquina DC.

Donde se puede observar que el mismo convertidor Cûk se conecta en antiparalelo, de esta manera se obtiene el voltaje positivo y negativo que demanda la máquina DC. Si la máquina opera como generador, el convertidor, al tener otro semiconductor de potencia (S2 o S_1) actúa de manera bidireccional, por lo tanto, este convertidor permite el control en los cuatro cuadrantes [18].

Para la debida energización del convertidor DC/DC propuesto, Cûk se sugiere alimentar desde la red AC, para ello se rectifica a través de un convertidor AC/DC no controlador (diodos), luego se sugiere el uso de un breaking chopper para la regeneración de energía y proteger así el puente de diodos y luego el convertidor DC/DC Cûk para el control de la máquina DC como accionamiento eléctrico [2].

1.4.4 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Cuando hay variables que se tienen que controlar, es necesario monitorearlas, sin embargo, dependiendo de los sensores que se utilicen, se podrá optar por un acondicionador de señales.

Para acondicionar una señal se requiere conocer cuál es el rango de entrada y salida del sensor, para el efecto, se puede considerar el uso de amplificadores operacionales que sirven para sumar e invertir la señal en función del rango de salida, como se observa en la Figura 1.17.

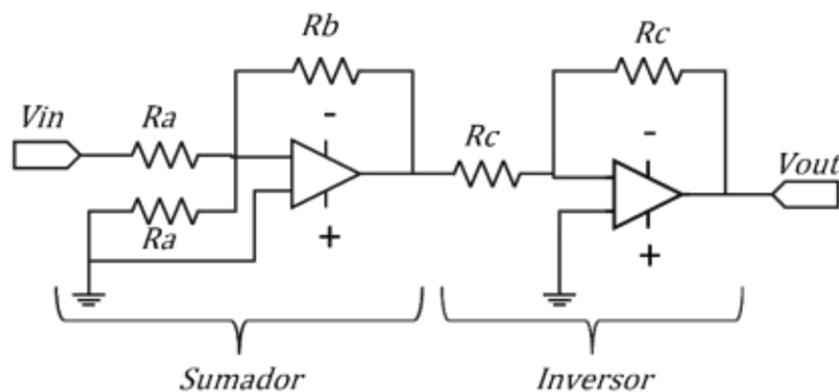


Figura 1.17 Circuito acondicionador de señales mediante operacionales.

Donde primero se determina la relación de entrada y salida como se muestra en la Ecuación (1.19, siendo X el rango de la entrada y Y el rango de la salida deseada.

$$V_{out} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} * V_{in} + b \quad (1.19)$$

Conociendo la relación de la pendiente se puede estimar el mismo con el uso de dos resistencias R_a y R_b , su relación sigue la Ecuación (1.20).

$$\frac{R_b}{R_a} \approx \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (1.20)$$

Finalmente, después de realizar los cálculos para la etapa del sumador se obtiene un resultado negativo, por lo que, es necesario invertir dicho resultado, para el efecto, se usa el inversor que utiliza resistencias de aproximadamente 100Ω [19].

2 METODOLOGÍA

El presente trabajo fue desarrollado mediante un enfoque de investigación experimental, ya que la problemática se centró en controlar la operación de una máquina DC en sus cuatro cuadrantes, para esto se realizó un análisis del comportamiento de la máquina seleccionada, lo que permitió el diseño de un convertidor Cûk que domine la operación de la máquina en sus cuatro cuadrantes mediante el control del respectivo convertidor.

2.1 SELECCIÓN DE MÁQUINA DC Y EL ANÁLISIS DE SU COMPORTAMIENTO

Para que la simulación sea cercana a la realidad se usó una máquina DC de excitación independiente, modelo D5005R de ABB [20], cuyos parámetros se describen en la Tabla 2.1, con las siguientes características: potencia 5 HP, voltaje de armadura 500 V, voltaje de campo 300 V y la velocidad nominal de la máquina a plena carga 1750 RPM.

Tabla 2.1 Parámetros del modelo de la máquina seleccionada.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Resistencia de armadura	R_a	11.2	ohms
Inductancia de armadura	L_a	0.1215	H
Resistencia de campo	R_f	281.2	ohms
Inductancia de campo	L_f	156	H
Inductancia mutua campo-armadura	L_{af}	1.976	H
Inercia	J	0.02215	kg.m ²
Coeficiente de viscosidad o fricción	B	0.002953	N.m.s

Con los valores expuestos en la tabla que antecede, se procede a realizar el modelamiento matemático de la máquina DC.

2.1.1 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA MÁQUINA SELECCIONADA

Como se observa en la Figura 1.9 es necesario tener la constante eléctrica o la constante del torque para vincular la parte eléctrica con la parte mecánica de la máquina DC, para ello se utiliza la Ecuación (2.1) donde se determina el valor de la constante eléctrica [12].

$$K_e = L_{af} * I_f \quad (2.1)$$

Donde L_{af} es la inductancia mutua entre el campo y la armadura y I_f es la corriente de campo de la máquina DC, en la simulación se obtiene un valor de 1.067 [A], con esto se puede determinar el valor de K_e como se indica en la Ecuación (2.2).

$$K_e = 1.976 * 1.067 = 2.108 \quad (2.2)$$

Con los valores anteriores, los parámetros de la Tabla 2.1 y despejando del diagrama de la Figura 1.9 se puede describir el modelo matemático de la máquina DC como se indica en la Ecuación (2.3). Donde se determina la velocidad angular en función de la tensión de armadura.

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_e}{JL_a}}{s^2 + \frac{JR_a + BL_a}{JL_a}s + \frac{R_aB + K_e^2}{JL_a}} = \frac{783.2864}{s^2 + 92.3144s + 1663.4572} \quad (2.3)$$

Como se puede apreciar el modelo matemático posee dos polos, lo que es preciso tomar en cuenta para el diseño del controlador que se detalla más adelante.

2.2 DISEÑO DEL CONVERTOR CUK PARA EL CONTROL DE LA MÁQUINA DC

A partir del análisis previo de la operación de la máquina DC en los cuatro cuadrantes, se observó que se requiere un convertor que permita entregar voltaje de polaridad positiva y negativa para el control en el primer y tercer cuadrante. Para el control en el segundo y cuarto cuadrante el convertor debe tener una capacidad bidireccional, quiere decir que la corriente pueda ir en ambos sentidos: de fuente a máquina y de máquina hacia la fuente. Por lo que, se propuso el circuito de la Figura 1.16, para la obtención de dicho circuito se diseñó un convertor Cûk bidireccional, en donde, el mismo convertor es el que se conecta en antiparalelo, para obtener el voltaje positivo y negativo en función del ciclo de trabajo.

2.2.1 ANÁLISIS DEL CICLO DE TRABAJO PARA OBTENER VOLTAJES POSITIVOS Y NEGATIVOS

En la Ecuación (1.18 se analiza el ciclo de trabajo para tener un voltaje mayor o menor al de la fuente del convertor, sin embargo, para obtener voltaje positivo y negativo con una fuente de voltaje positiva, se determina que es necesario realizar un complemento del ciclo de trabajo δ para el segundo convertor Cûk, dando como resultado la Ecuación (2.4).

$$V_{out} = E \left(\frac{\delta}{1-\delta} - \frac{1-\delta}{\delta} \right) \quad (2.4)$$

Para aprovechar al máximo al convertor como tal, se determina que el ciclo de trabajo ideal está en el intervalo: $25\% < \delta < 75\%$ ya que bajo el 25%, el convertor puede operar en modo de conducción discontinua y sobre el 75% puede tender al infinito la ganancia. Por lo tanto, se decide trabajar en ese intervalo [21], [22].

Una vez determinado el intervalo en que se desea operar, se procede a realizar el diseño del convertor, para lo cual, se opta por controlar el ciclo de trabajo. De esta manera se obtiene un voltaje positivo y negativo para la alimentación de la armadura de la máquina DC.

2.2.2 ANÁLISIS DEL VOLTAJE PARA LA ALIMENTACIÓN DEL CONVERTOR.

A fin de determinar el voltaje con el que se energiza al convertor, se toma en cuenta que la máquina DC se debe energizar con 500 V como voltaje nominal y siguiendo el intervalo del ciclo de trabajo seleccionado. Se calcula con la Ecuación (2.4) el valor de la fuente para el convertor, lo que se evidencia en las Ecuaciones (2.5) y (2.6).

$$E = \frac{V_{out}}{\left(\frac{\delta}{1-\delta} - \frac{1-\delta}{\delta}\right)} \rightarrow \delta = 0.25 \wedge V_{out} = 500V \therefore E = 187.5 \approx 200V \quad (2.5)$$

$$E = \frac{V_{out}}{\left(\frac{\delta}{1-\delta} - \frac{1-\delta}{\delta}\right)} \rightarrow \delta = 0.75 \wedge V_{out} = -500V \therefore E = 187.5 \approx 200V \quad (2.6)$$

2.2.3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS DEL CONVERTOR.

Para evitar que el convertor pueda saturarse, se escoge un valor para la fuente de 200 V, con este valor y considerando que el convertor entregará 500 V y 9 A a plena carga se diseña el convertor.

La Figura 1.16 muestra la unión en antiparalelo del convertor a diseñar, para comprender mejor su diseño, se escoge la sección del convertor Cûk que al ser alimentado por una fuente de polaridad positiva entrega tensión negativa, tal como se describe en la Figura 2.1.

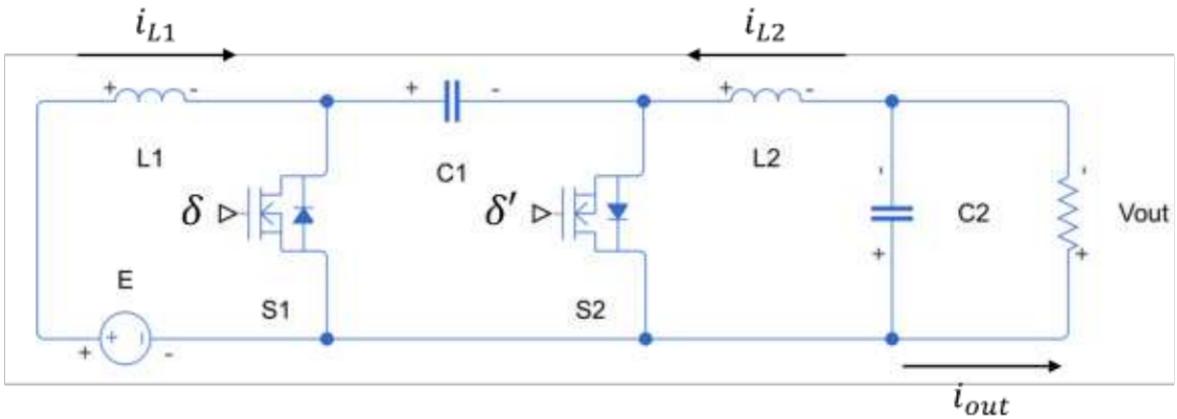


Figura 2.1 Circuito esquemático del convertor Cûk bidireccional.

Donde:

E : Alimentación del convertor.

δ : Ciclo de trabajo para la modulación PWM.

δ' : Complemento del ciclo de trabajo para la modulación PWM para el semiconductor $S2$.

i_{L1} : Corriente en el inductancia L_1

i_{L2} : Corriente en el inductancia L_2

i_{out} : Corriente de la carga.

V_{out} : Voltaje en el capacitor C_{out} , mismo con el que se alimenta la carga.

En estado estacionario las corriente que atraviesan las inductancias L_1 y L_2 y las tensiones en los capacitores C_1 y C_{out} se muestran en las siguientes ecuaciones en (2.7) [23].

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{L1} = \frac{\delta^2}{(1-\delta)^2} * \frac{E}{V_{out}n^2} * P_n \\ i_{L2} = \frac{\delta}{1-\delta} * \frac{E}{V_{out}n^2} * P_n \\ V_{C1} = \frac{E}{1-\delta} \\ V_{out} = \frac{\delta}{1-\delta} * E \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Siendo:

$V_{out}n$: Voltaje de salida nominal

P_n : Potencia nominal de la carga.

Basándose en el voltaje de armadura nominal de la máquina DC y la corriente a plena carga de 9 A, se tiene como parámetros de diseño los que están detallados en la Tabla 2.2. Algo importante que mencionar, es que la frecuencia de conmutación será de 100 kHz para obtener resultados adecuados en lo que respecta a los inductores y los condensadores.

Tabla 2.2 Parámetros para el diseño del convertor Cúk [23].

Parámetro	Símbolo	Valor
Potencia entrada máquina DC	P_n	4500 [W]
Voltaje armadura nominal	$V_{out}n$	500 [V]
Voltaje de alimentación	E	200 [V]
Frecuencia de conmutación	f_{sw}	100 [kHz]
Ciclo de trabajo	δ	0.71
Rizado de corriente inductor L_1	Δi_{L1}	$0.1i_{L1}$ [A]
Rizado de corriente inductor L_2	Δi_{L2}	$0.1i_{L2}$ [A]
Rizado de voltaje capacitor C_1	ΔV_{C1}	$0.01V_{C1}$ [V]
Rizado de voltaje capacitor C_{out}	ΔV_{Cout}	$0.01V_{Cout}$ [V]

Para la inductancia L_1 se determina mediante la Ecuación (2.8).

$$L_1 = \frac{E}{f_{sw}\Delta i_{L1}} \delta \quad (2.8)$$

La inductancia L_2 se encuentra con la expresión (2.9).

$$L_2 = \frac{E}{f_{sw}\Delta i_{L2}} \delta \quad (2.9)$$

Para el cálculo del capacitor C_1 se utiliza la Ecuación (2.10).

$$C_1 = \frac{\delta^2}{1 - \delta} * \frac{E}{f_{sw}\Delta V_{C1}} * \frac{P_n}{V_{out}n^2} \quad (2.10)$$

Finalmente, el cálculo del C_2 se describe con la Ecuación (2.11).

$$C_2 = \delta^2 * \frac{E}{8 * f_{sw}^2 L_2 \Delta V_{Cout}} \quad (2.11)$$

Usando las ecuaciones de (2.7 se puede determinar los valores necesarios para el diseño del convertor Cúk que cumpla los datos mencionados en la Tabla 2.2 con las ecuaciones que anteceden, los valores de los elementos pasivos se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores comerciales de los elementos pasivos del conversor Cûk.

Elemento	Símbolo	Valor	Unidad
Inductor entrada	L_1	0.740	mH
Inductor salida	L_2	3.100	mH
Capacitor intermedio	C_1	10	uF
Capacitor salida	C_{out}	120	nF

Los valores en la tabla anterior se seleccionaron en función de los valores comerciales (ver Anexo II).

2.2.3.1 Selección del semiconductor de potencia.

Basándose en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 se observa que las inductancias operan en una frecuencia de 100 kHz, por tal razón, se nota que el semiconductor que se usa para el conversor Cûk opera a altas frecuencias, esto permite que los inductores y capacitores puedan tener valores más reducidos y cercanos a los comerciales.

Un semiconductor perfecto que suple la necesidad del trabajo mediante modulación PWM, es el MOSFET, el cual se activa por voltaje [2]. El MOSFET para este trabajo es el APT29F100L [24], el cual soporta hasta 30 A y opera en un rango de 1000 V. Su hoja de datos se encuentra en el Anexo II.

2.2.4 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL CONVERSO CÛK

Para el análisis del modelo matemático se observa al conversor de manera ideal, a partir de esto se obtienen los valores de voltaje y corriente en los respectivos elementos pasivos, los cuales almacenan energía [25].

2.2.4.1 Análisis cuando los semiconductores son ideales.

En la Figura 2.1 se muestra que se cuenta con dos semiconductores para obtener la bidireccionalidad del conversor, se analiza con un comportamiento ideal y se observa cómo opera el conversor cuando S_1 está encendido y el S_2 está apagado y viceversa.

En la Figura 2.2 se puede observar el comportamiento del conversor cuando el semiconductor S_1 está encendido y permite el paso de energía, por otro lado, en la Figura 2.3 se muestra el comportamiento cuando el semiconductor S_1 está apagado. De esta manera se determina cuándo los elementos pasivos están almacenando energía [16], [25], [26].

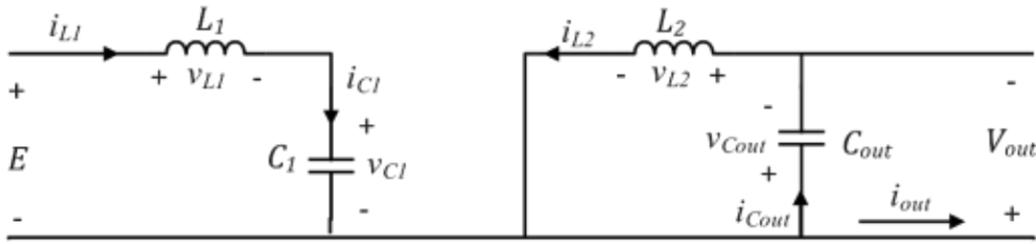


Figura 2.2 Conversor Cûk cuando está encendido el semiconductor de potencia S1.

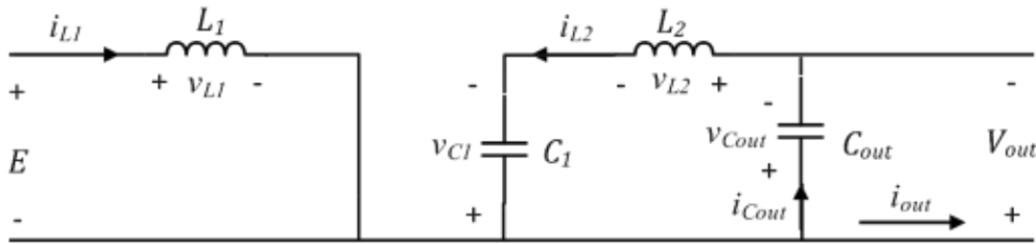


Figura 2.3 Conversor Cûk cuando está apagado el semiconductor de potencia S1.

A partir del análisis del comportamiento del circuito en función del ciclo de encendido δ y apagado δ' se muestra el almacenamiento de energía de los elementos pasivos del conversor en el conjunto de ecuaciones (2.13 [25]).

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{L1}(t)}{dt} = E(t) - \delta' v_{C1}(t) \\ L_2 \frac{di_{L2}(t)}{dt} = -\delta v_{C1}(t) - V_{out}(t) \\ C_1 \frac{dv_{C1}(t)}{dt} = \delta' i_{L1}(t) + \delta i_{L2}(t) \\ C_2 \frac{dv_{C2}(t)}{dt} = i_{L2}(t) - \frac{V_{out}(t)}{R} \end{cases} \quad (2.12)$$

Para la obtención de la Ecuación (2.13 que representa en variables de estado el Conversor Cûk, se realizó un análisis del sistema tanto en apagado como encendido del semiconductor de potencia S1 mostrado en la Figura 2.1, estas ecuaciones se toman como guía en base a [23] y se determinan las matrices en (2.14

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.13)$$

Donde:

$$\dot{x} = (\dot{i}_{L1} \quad \dot{i}_{L2} \quad \dot{v}_{C1} \quad \dot{V}_{out})^T \rightarrow \text{Derivada del vector}$$

$$x = (i_{L1} \quad i_{L2} \quad v_{C1} \quad V_{out})^T \rightarrow \text{Vector variables de estado}$$

$$u = E \rightarrow \text{Vector entrada}$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1-\delta}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\delta}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1-\delta}{C_1} & \frac{\delta}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_{out}} & 0 & -\frac{1}{RC_{out}} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Cabe mencionar que el modelo matemático que se presenta corresponde al Convertor Cûk. Para el diseño total del circuito, se usan dos convertidores Cûk conectados en antiparalelo para el control en cuatro cuadrantes de la máquina DC. En este caso, se presenta el diseño que se aplica a los dos convertidores que operan de manera complementaria a partir de los requerimientos nominales de la máquina DC.

2.3 SIMULACIÓN EN LAZO ABIERTO DE LA MÁQUINA DC OPERANDO EN CUATRO CUADRANTES ENERGIZADA POR EL CONVERTOR CÛK

Una vez definido el modelo matemático del convertor Cûk y el modelo matemático de la máquina DC, se realizan las pruebas pertinentes para el desarrollo del control en cascada. En la Figura 2.4 se observa el comportamiento de la máquina operando en los cuatro cuadrantes, para mejor comprensión observar la Figura 1.10.

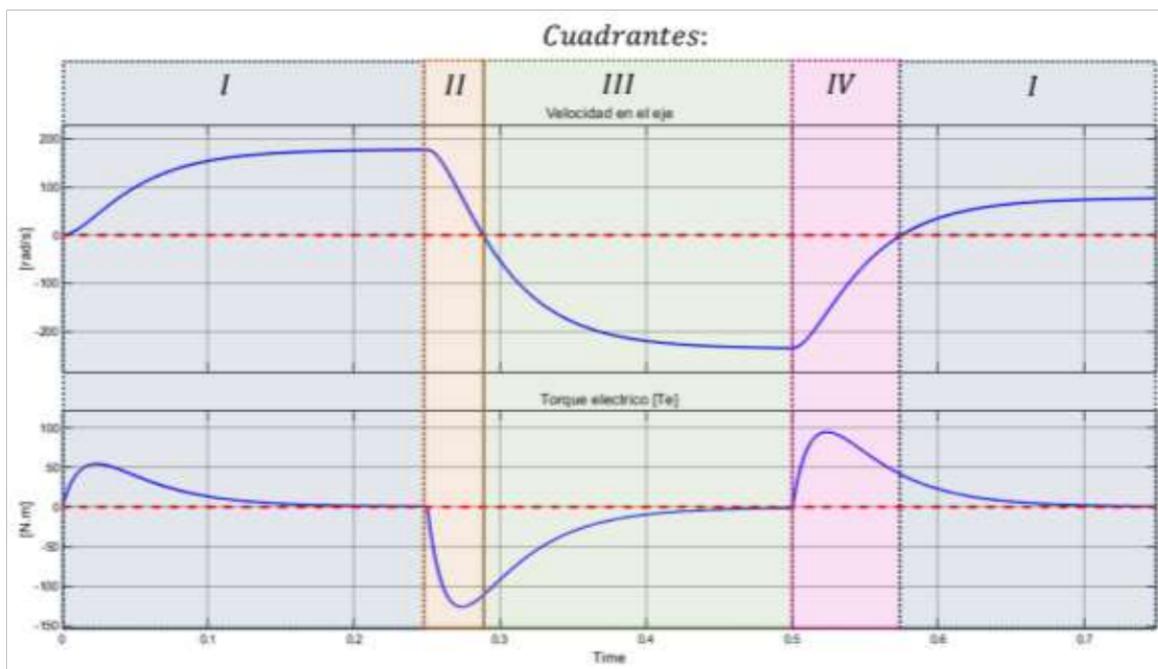


Figura 2.4 Velocidad angular y torque de la máquina en los cuatro cuadrantes.

En la Figura 2.4 se muestra que: del intervalo $0 < t < 0.25$ la máquina opera en el primer cuadrante, ya que la velocidad angular del eje es positiva igual que el torque, en el intervalo $0.25 < t < 0.29$ la máquina está operando en el segundo cuadrante, ya que la velocidad angular sigue siendo positiva, pero el torque de la máquina es negativo, en este punto la máquina actúa como un generador. En el intervalo $0.29 < t < 0.5$ la máquina está operando en el tercer cuadrante, ya que la fuente en este intervalo tiene polaridad negativa, por lo que la velocidad angular de la máquina es negativa igual que el torque, y finalmente, en el intervalo $0.5 < t < 0.574$ la máquina opera en el cuarto cuadrante, la velocidad angular es negativa pero el torque eléctrico de la máquina es positivo. Una vez que la máquina pasa de la velocidad negativa a positiva empieza a operar en el primer cuadrante.

Al usar la Ecuación (1.9 se determina que la corriente en la simulación presenta un valor máximo de 40 A y de -60 A, estos valores sobre pasan en gran medida la corriente nominal de la máquina, por lo que, es preciso que se use el control en cascada.

2.4 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LOS CONTROLADORES PARA LA OPERACIÓN DE LA MÁQUINA EN CUATRO CUADRANTES EN LAZO CERRADO

Para el control de la máquina DC se usan controladores tipo PI, ya que estos permiten alcanzar la velocidad referencial en función de parámetros transitorios como: tiempo de estabilización, tiempo de incremento y sobre pico [27]. Con el uso del controlador PI se puede obtener una dinámica rápida y estable del sistema, además el algoritmo de control PI puede ser aplicado directamente al sistema linealizado [28].

A partir del modelo matemático de la máquina descrito en la Ecuación (2.3, se determina que la máquina es un sistema de segundo orden, lo que significa que tiene dos polos. El controlador PI regulará de manera adecuada el sistema desarrollado. Esto muestra que el uso de un control PI para máquinas DC es el adecuado. Para este trabajo se realiza la sintonización mediante la asignación de Polos [29]–[31].

2.4.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR PI POR ASIGNACIÓN DE POLOS

Para sintonizar un controlador existen diversas maneras de hacerlo, entre estas sobresalen métodos heurísticos de sintonización como es el de Ziegler y Nichols. Sin embargo, para realizar una sintonización a partir de las características deseadas del transitorio (máximo sobre impulso y el tiempo de establecimiento), se considera idóneo la sintonización por asignación de polos, el cual permite prever con mayor precisión el comportamiento del sistema a controlar [32].

El sistema conversor-máquina se describe por un modelo de sexto orden, pero al observar el comportamiento del sistema ante una entrada paso, se obtiene una respuesta muy similar a una de primer orden, por lo cual, se puede aplicar el método de sintonización previamente mencionado.

Para el diseño del controlador se considera: $G(s)$ la planta (conversor y máquina DC) aproximada a un modelo de primer orden y $C(s)$ el controlador, que se observa en la Figura 2.5.

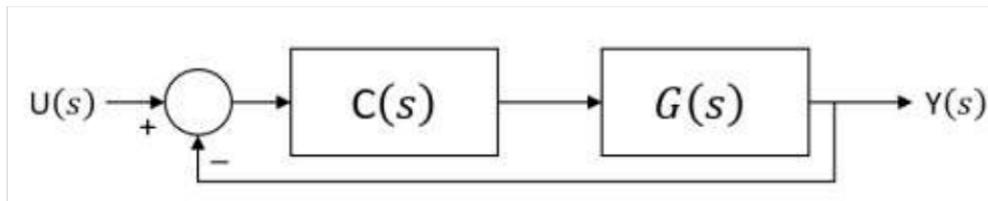


Figura 2.5 Esquema de control.

En la Ecuación (2.15) se observa la equivalencia de cada bloque de la Figura 2.5

$$\begin{cases} G(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} \\ C(s) = k_c \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \end{cases} \quad (2.15)$$

Donde:

k_p → Ganancia estática proceso.

τ → Constante de tiempo, lo que le toma al proceso llegar al 63.2% [33].

k_c → Ganancia proporcional del controlador.

τ_i → Tiempo integral del controlador

Al analizar el lazo de control, se obtiene la Ecuación (2.16).

$$H(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{\frac{k_c k_p}{\tau_i \tau} (\tau_i s + 1)}{s^2 + \frac{1}{\tau} (1 + k_p k_c) s + \frac{k_c k_p}{\tau_i \tau}} \quad (2.16)$$

La ecuación que antecede se puede comparar con la ecuación característica de un sistema de segundo orden, véase Ecuación (2.17).

$$HG_c(s) = \frac{k\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.17)$$

Al relacionar la Ecuación (2.16 con la Ecuación (2.17 se obtienen los términos en (2.18, los cuales permiten determinar el tiempo de la parte integral y la ganancia de la parte proporcional del control PI.

$$\begin{cases} \tau_i = \frac{k_c k_p}{\tau \omega_n^2} \\ k_c = \frac{2\xi \omega_n \tau - 1}{k_p} \end{cases} \quad (2.18)$$

Teniendo en cuenta los criterios de control en [31]–[34], se tiene las siguientes consideraciones para el diseño del controlador.

Un tiempo de establecimiento considerando un error menor al 2% como se detalla en la Ecuación (2.19).

$$t_s = \frac{4}{\xi \omega_n} \quad (2.19)$$

El coeficiente de amortiguamiento se define en la Ecuación (2.20)

$$\xi = -\frac{\ln\left(\frac{M_p}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln\left(\frac{M_p}{100}\right)}} \quad (2.20)$$

Para determinar los valores del controlador PI descritos en el conjunto de ecuaciones de (2.18, es necesario escoger el máximo sobre impulso M_p y el tiempo de establecimiento t_s que se desee alcanza, para el tiempo de establecimiento se puede escoger entre 3 a 5 veces τ . Los parámetros previamente mencionados se detallan en la Figura 2.6.

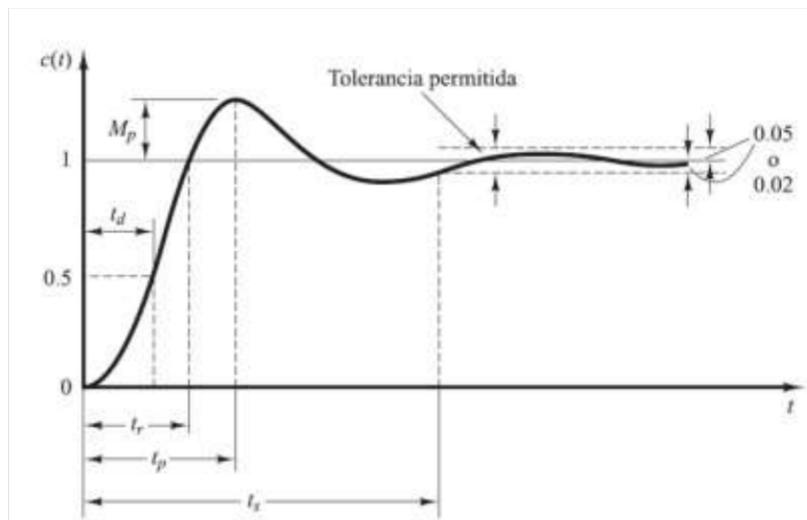


Figura 2.6 Respuesta transitoria de un sistema de segundo orden [33].

Conociendo las ecuaciones previamente descritas y en base a los requerimientos del sistema se procede a diseñar los reguladores en base a la Figura 1.12, tal como se describe a continuación.

2.4.1.1 Controlador de corriente o lazo interno

La sintonización de este controlador se realiza mediante la prueba a rotor bloqueado, donde se observa que ante una referencia de corriente se obtiene una respuesta de primer orden igual que en la ecuación (2.15).

Donde la constante de tiempo es $\tau_e = 0.011$ siendo igual que la constante de tiempo eléctrica de la máquina DC, por otra parte, la ganancia estática del modelo es 1 dando como resultado la Ecuación (2.21). La constante eléctrica mediante la simulación es aproximadamente igual a la constante eléctrica siguiendo la Ecuación (1.16).

$$G_{p_{interna}}(s) = \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{1}{0.011s + 1} \quad (2.21)$$

Para alcanzar un sobre impulso menor al 10% se utiliza la ecuación (2.20), que permite obtener el coeficiente de amortiguamiento. Para un tiempo de establecimiento menor a tres veces la constante de tiempo eléctrica se usa la ecuación (2.19), que permite obtener la frecuencia natural. Con los dos valores y el uso de las ecuaciones de (2.18), se obtiene los parámetros para el regulador PI, el cual está descrito en ecuación (2.22).

$$C_{interno}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) = \frac{15}{90} \left(1 + \frac{1}{0.007225543 s} \right) \quad (2.22)$$

2.4.1.2 Controlador de velocidad o lazo externo.

Una vez sintonizado el control de corriente se procede a realizar el análisis para el diseño del controlador de velocidad, al igual que el caso anterior, se observa la respuesta del sistema ante una referencia paso de velocidad y se determina el comportamiento como se indica en la Ecuación 2.23.

$$G_{velocidad}(s) = \frac{k_p}{\tau_m s + 1} = \frac{\frac{0.0804}{0.33}}{0.05643s + 1} = \frac{0.2436}{0.05643s + 1} \quad (2.23)$$

Al igual que la constante eléctrica se observa que la constante de tiempo mecánica simulada es prácticamente igual al resultado de la Ecuación (1.17).

Para la sintonización del controlador PI se escoge un máximo sobre impulso del 10%, un error en posición estable del 2% y un tiempo de establecimiento de tres veces la constante de tiempo mecánica dando como resultado la Ecuación 2.24.

$$C_{velocidad}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) = 6.840796 \left(1 + \frac{1}{0.037067036 s} \right) \quad (2.24)$$

Entendiendo el comportamiento de la máquina DC, se observa que la velocidad no es inmediata, por lo que no es prudente usar entradas paso o cambios de velocidad escalonada, ya que, la corriente de armadura de la máquina podría sufrir sobrecalentamiento [5], debido a esto se usa una rampa de aceleración y desaceleración como se mencionó previamente y se muestra en la Figura 1.12.

2.4.2 ACOPLAMIENTO DE LOS SENSORES DE LA MÁQUINA DC.

Para realizar el control de la máquina DC hay dos variables que deben ser monitoreadas: corriente de armadura y la velocidad en el eje del rotor y de esta manera se observa que la máquina opera en los cuatro cuadrantes [2].

En función de la Tabla 2.2 se observa que el convertor operará con una frecuencia de conmutación de 100kHz, para el control de la máquina es necesario el uso de un microcontrolador que permita realizar una modulación PWM de esta frecuencia, el mismo microcontrolador realizará varias tareas, las mismas que se describen en la Figura 2.7

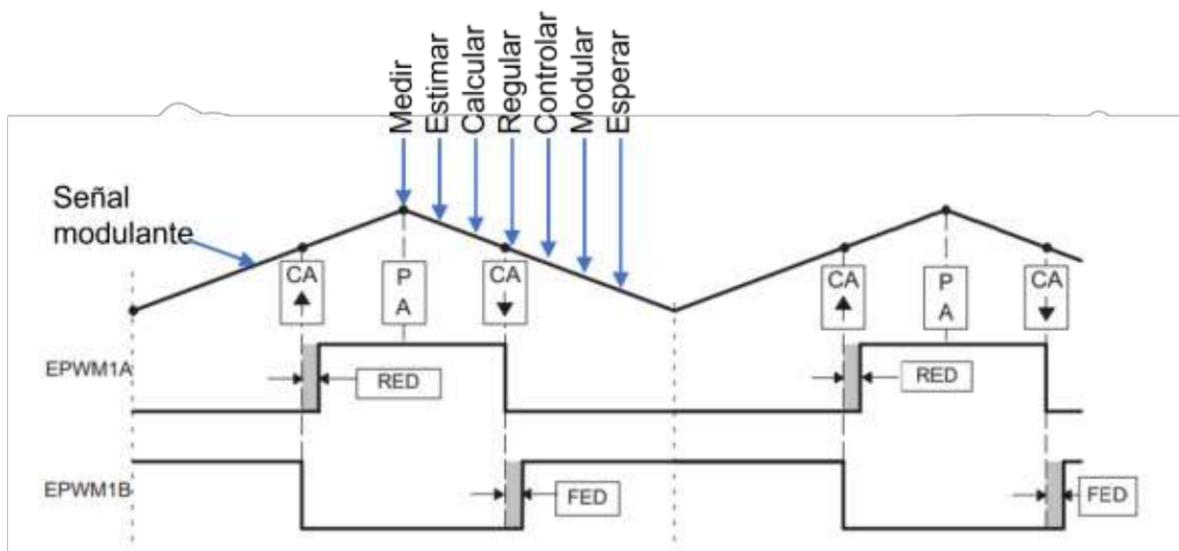


Figura 2.7 Estimación de datos y acciones para el control [2].

Para el debido control de la máquina se mide: E voltaje con el que se energiza al convertor, I_a corriente de armadura y ω la velocidad angular de la máquina.

Como se observa en la figura anterior es necesario realizar varias acciones para el control respectivo, en la actualidad muchos microcontroladores operaran con un voltaje de 3.3V y son robustos, entre estos se destaca la familia STM32, el cual cuenta con una velocidad de procesamiento de datos de hasta 84 MHz [35], sin embargo, la velocidad puede cambiar según se requiera.

Teniendo en cuenta que se realiza el control en cascada cuyo lazo interno controla la corriente y lazo externo controla la velocidad de la máquina DC, es necesario medir estas variables, para eso se usan los sensores que se muestran a continuación.

2.4.2.1 Selección de sensor de corriente y su acondicionamiento

Existe varios tipos de sensores de corriente, unos son invasivos y otros no invasivos, los no invasivos permiten medir la corriente mediante el efecto Hall [2], por otra parte, los invasivos como su nombre lo indica alteran en cierta manera al sistema. En el caso que se desee implementar se deja como opción el uso del sensor ACS712-20A, cuyo costo es accesible y es ideal para el control de la máquina DC escogida, ya que su rango de medición es de -20 A hasta 20 A con una sensibilidad es de 100mV/A, sin embargo, es necesario acondicionar la salida del sensor para que su señal sea medida por el microcontrolador que opera con 3.3V.

Con las Ecuaciones (1.19 y (1.20, se obtienen los valores mostrados en la Tabla 2.4 de las resistencias para el acondicionamiento de la señal, para entender mejor los valores obtenidos observar la Figura 1.17.

Tabla 2.4 Resistencias para el acondicionador de la señal de corriente.

Parámetro	Símbolo	Valor
Resistencia de entrada	R_a	820 [Ω]
Resistencia de salida	R_b	560 [Ω]
Resistencia del inversor	R_c	100 [Ω]

Para observar el sensor ACS712-20A se puede dirigir al Anexo II.

2.4.2.2 Selección de sensor de velocidad

Existe una gran variedad de sensores de velocidad, desde taco generadores que generan una señal de voltaje y esta se mide mediante una ADC del microcontrolador hasta Encoders que permiten medir la velocidad con el uso de interrupciones. Para la familia de los microcontroladores STM32 los Encoders son la mejor opción, ya que cuentan con pines específicos para dicha medición (ver Anexo II).

2.5 DISEÑO DE LA INTERFAZ HMI PARA LA VISUALIZACIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Para tener una visualización intuitiva y didáctica sobre el trabajo realizado, se usan las herramientas de Matlab, en este caso se utiliza App Designer, permite el desarrollo de aplicaciones web y de escritorio, al igual que GUIDE, el cual permite una comunicación entre todos los elementos de Matlab. Las simulaciones para el desarrollo de controladores y respuestas de este trabajo se usó la herramienta Simulink, que cuenta con librerías destinadas a la ingeniería eléctrica y electrónica con las cuales se observa el comportamiento que tendrá un sistema en la vida real.

Para tener una visualización de la operación de una máquina en los cuatro cuadrantes se puede usar un vehículo móvil como se indica en la Figura 2.8.

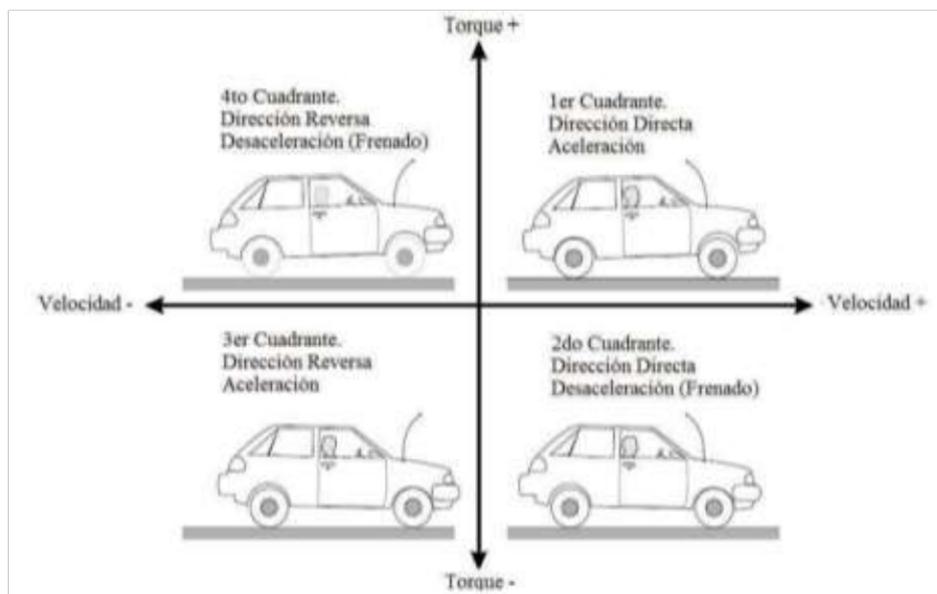


Figura 2.8 Comportamiento de un vehículo móvil en el plano velocidad vs torque [36].

Al relacionar la Figura 2.8 con la Figura 1.10 se comprende el comportamiento de una máquina DC en los cuatro cuadrantes de operación.

En base a la figura que antecede se contempla el uso de un vehículo móvil que presente el comportamiento descrito en la Figura 2.8 y se pueda controlar su velocidad, como el modelo 3D diseñado por Brian Hong, el cual se puede encontrar en los archivos de MathWorks® [37].

El modelo escogido cuenta una trayectoria plana que permite observar el comportamiento de la máquina en los cuatro cuadrantes, cuando el vehículo va hacia delante y atrás.

También, cuenta con una opción de subir y bajar colinas, la altura de las colinas puede ser aleatorio, hasta una altura máxima ya configurada.

En la Figura 2.9 se observa el vehículo móvil sobre una trayectoria que sirve como ayuda visual a la simulación de la operación de la máquina en los cuatro cuadrantes.

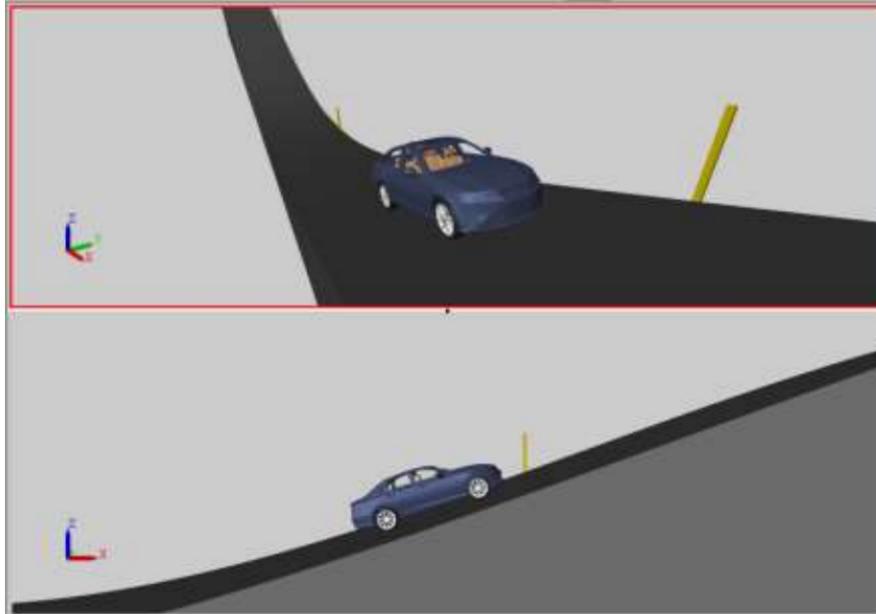


Figura 2.9 Vehículo 3D [37].

Además de la simulación del vehículo móvil, se cuenta con una interfaz gráfica HMI que tiene 5 ventanas:

- La primera, presenta el trabajo de integración curricular.
- La segunda, muestra la máquina y sus datos de placa, adicionalmente cuenta un enlace que dirige a la página de los fabricantes.
- La tercera, presenta el circuito del convertidor Cûk diseñado con los respectivos valores de cada elemento eléctrico.
- La cuarta, corresponde al panel de control, donde se visualiza el comportamiento del sistema, en la que se puede cambiar la referencia de velocidad y perturbaciones sobre el eje.
- La quinta, muestra los resultados finales de la simulación realizada.

En la Figura 2.10 se muestra la ventana de presentación, la cual cuenta con tres opciones (MÁQUINA DC, CONVERTOR Y SIMULACIÓN), dos indican los datos técnicos, tanto del convertidor diseñado, como de la máquina a controlar, por otra parte, la opción de simulación

abre el panel de control que muestra el comportamiento de la máquina en todo el tiempo que se simule.



Figura 2.10 Ventana de inicio o presentación.

Cuando el operario escoge la opción simulación se despliega la ventana que se observa en la Figura 2.11.

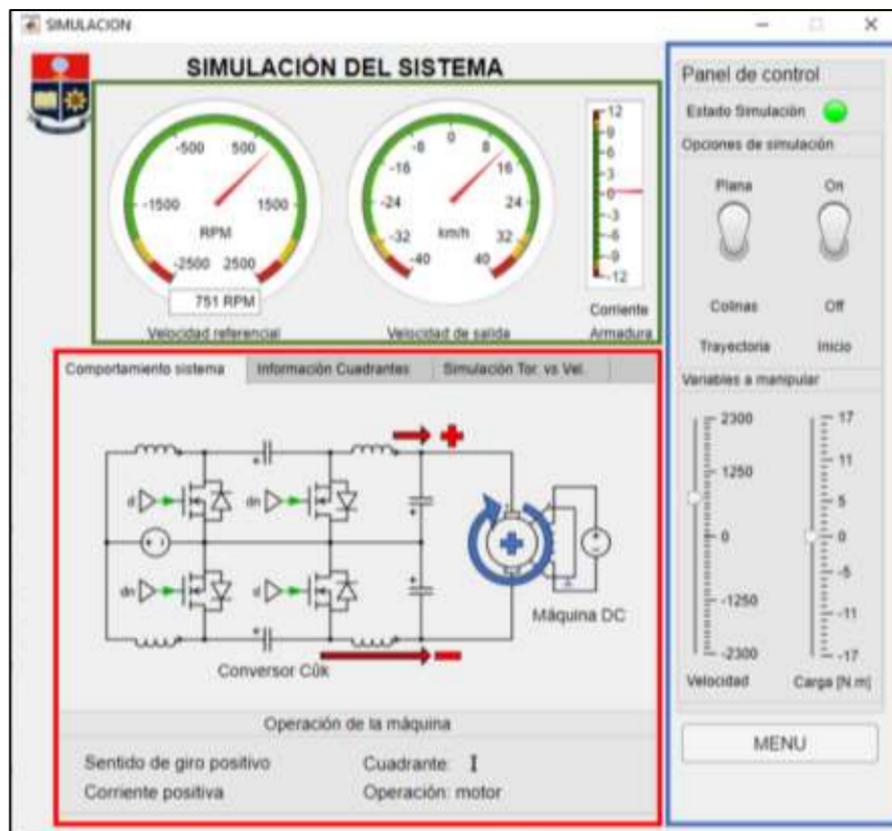


Figura 2.11 Ventana del panel de control.

Se describe el panel de control mediante los siguientes cuadros de colores. El cuadro azul encierra el panel de control, el cual indica el estado de la simulación, el tipo de trayectoria que se desea observar, el inicio de la simulación y dependiendo de la trayectoria se muestran dos sliders, uno es la referencia de velocidad y el otro es la perturbación de la carga sobre el eje de la máquina. Si el usuario escoge como trayectoria la opción colinas, el slider de la carga desaparece, ya que estas representarán la carga a medida que el vehículo se mueva por la trayectoria simulada.

Como se puede notar el panel de control no cuenta con una opción de tiempo de simulación, debido a que la simulación se la realiza en línea, es decir que, el usuario puede cambiar la referencia de velocidad cuando lo desee y de igual manera la carga sobre el eje cuando se simule la trayectoria plana.

El cuadro verde encierra las variables que se monitorean en línea, se observa la referencia de velocidad en RPM y la velocidad del vehículo que es la salida de velocidad de la máquina simulada, pero de manera didáctica se muestra km/h. También se monitorea la corriente de armadura la cual varía con relación a la carga del eje de la máquina.

Finalmente se observa la zona encerrada por el cuadro rojo, donde se visualiza que hay tres pestañas; la primera, muestra el comportamiento del convertidor, quiere decir si está entregando voltaje positivo o negativo a la máquina DC, el sentido de giro de la máquina y la corriente cuando la máquina opera como generador; la segunda pestaña muestra un plano torque vs velocidad para que el usuario pueda saber que pasa en cada cuadrante; y, la tercera pestaña es la simulación en línea de las variables torque vs velocidad angular.

Una vez finalizada la simulación se recogen los datos que se muestran en un grupo de gráficas donde se podrá observar el comportamiento que tuvo la máquina en el tiempo de recorrido. Se puede acceder a estas gráficas a través del botón (RESULTADOS) que aparece en el panel de control como se muestra en la Figura 2.12.

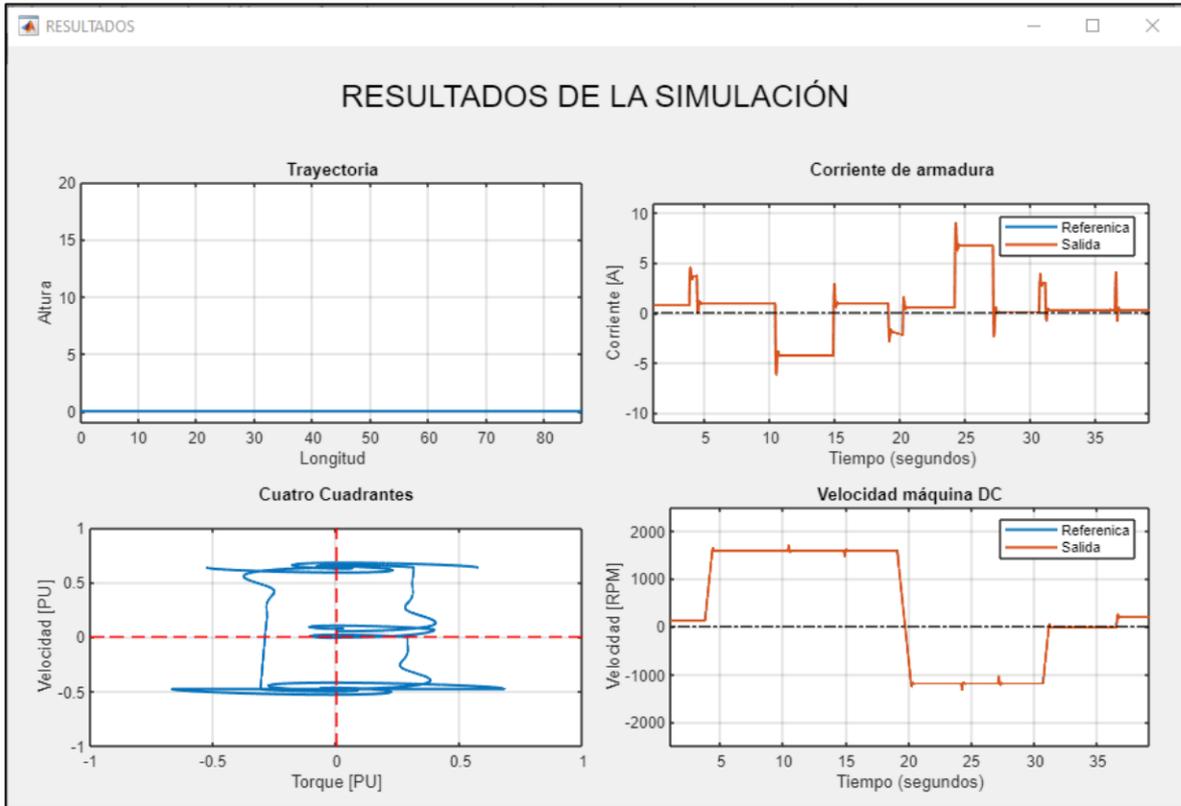


Figura 2.12 Gráficas de los resultados de la simulación realizada.

La figura anterior muestra cuatro ventanas, la primera, grafica la trayectoria que se siguió durante la simulación; la segunda, la corriente de armadura; la tercera, el torque vs la velocidad por unidad; y, la cuarta, la velocidad con la rampa de aceleración en [RPM].

Para una explicación más detallada del HMI referirse al Anexo I.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

A continuación, se muestra el desempeño del control diseñado, la respuesta del sistema ante cambios de referencia y perturbaciones, y la operación en cuatro cuadrantes de la máquina DC mediante la interfaz gráfica diseñada.

3.1.1 DESEMPEÑO DEL CONTROL EN CASCADA DISEÑADO

Para la demostración de la efectividad del controlador diseñado, se usa el índice del cuadrado del error o ISE de sus siglas en inglés, el error es la diferencia que existe entre la referencia y la salida del sistema. Este índice permite detectar aquellos errores que se dan al inicio de la respuesta o en la parte del transitorio [38], y se describe en la Ecuación 3.1.

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (3.1)$$

Ya que el control diseñado es un control en cascada, primero se muestra la respuesta del lazo interno o control de corriente y posterior a este se muestra la respuesta del lazo externo o control de velocidad.

3.1.1.1 Respuesta del lazo interno o control de corriente

Para el lazo interno se hace pruebas a rotor bloqueado, en este caso se usó una entrada paso de 1 A y los resultados se muestran en la Figura 3.1.

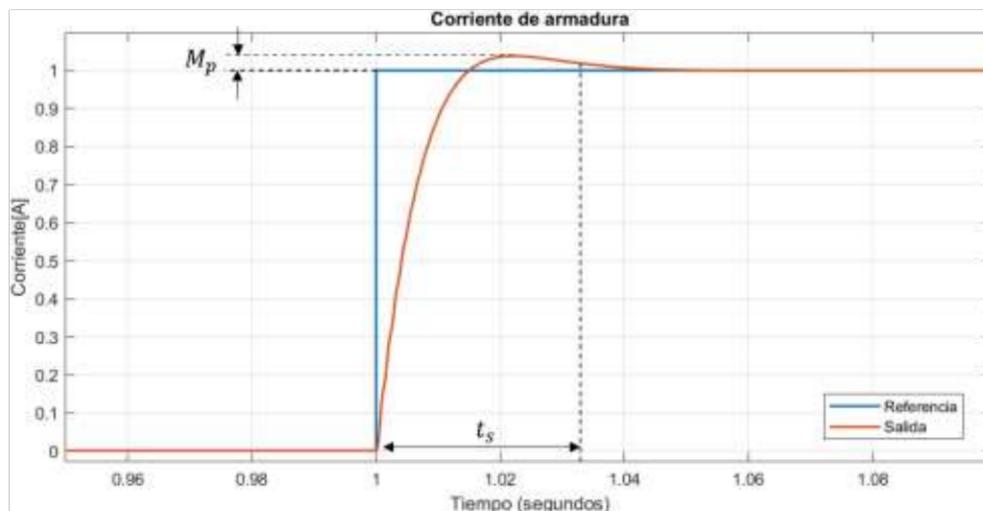


Figura 3.1 Respuesta lazo interno rotor bloqueado.

Bajo los parámetros de diseño seleccionados: máximo impulso de hasta el 10% y un tiempo de establecimiento de 3 veces la constante de tiempo eléctrica. El sistema tiene un comportamiento donde el máximo impulso (M_p) es 3.27% y el tiempo de establecimiento (t_s) es 0.033. Con esta respuesta se verifica que el controlador opera en los parámetros propuestos, además se usa el índice del cuadrado del error (ISE) para observar como el sistema se estabiliza en un tiempo corto y se tiene un error de posición en estado estable igual a cero, este resultado se puede observar en la Figura 3.2.

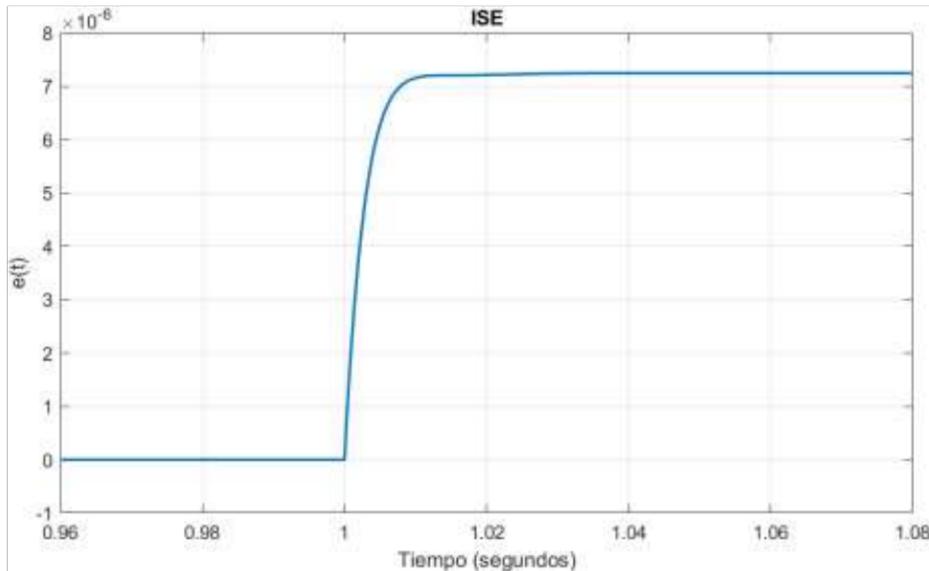


Figura 3.2 ISE del control de la corriente de armadura.

3.1.1.2 Respuesta del lazo externo o control de velocidad

Como se había mencionado previamente, en vista que las entradas paso pueden generar sobre picos de corriente, se usó una rampa de aceleración y desaceleración, la cual ayuda a que el sistema no tenga sobre corrientes y pueda perjudicar a la armadura de la máquina o al convertidor.

Para el diseño del controlador de velocidad se usó el criterio de M_p menor al 10% y un tiempo de establecimiento t_s hasta tres veces la constante de tiempo mecánica. El sistema ante una entrada paso que inicia en el reposo y alcanza 1800 [RPM] sin carga presenta el siguiente comportamiento descrito en la Figura 3.3

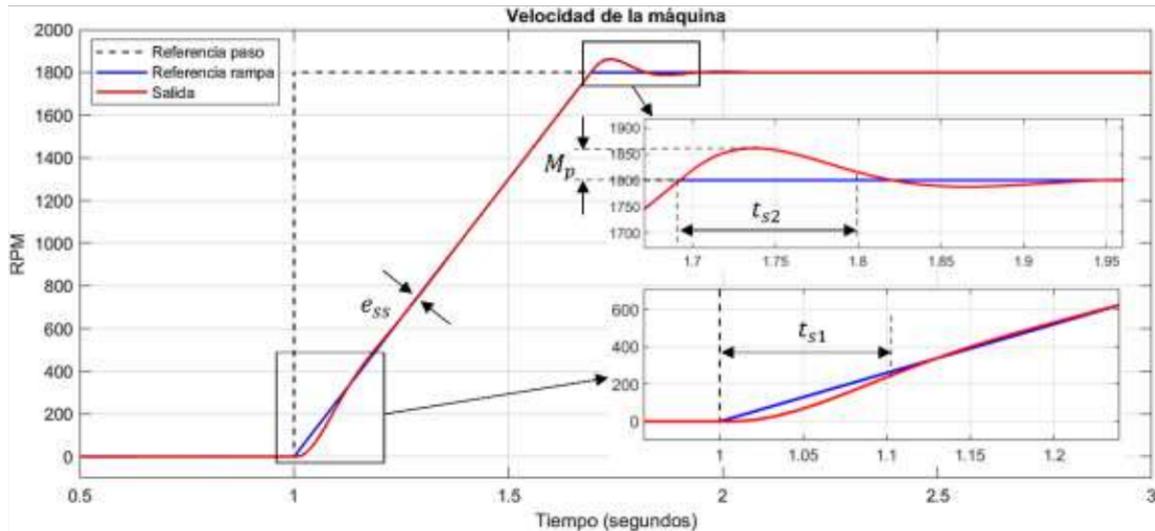


Figura 3.3 Respuesta lazo externo o control de velocidad.

Donde el tiempo de establecimiento inicial t_{s1} es 0.1 segundos, el error en estado estable e_{ss} es cero, M_p es igual a 3.4% y el tiempo de establecimiento t_{s2} es 0.1 segundos. Demostrando que el controlador de velocidad es aceptable.

Para determinar el desempeño del controlador se usa el ISE el cual demuestra que el sistema controlado alcanza su referencia de manera óptima, la Figura 3.4 demuestra el desempeño del controlador.

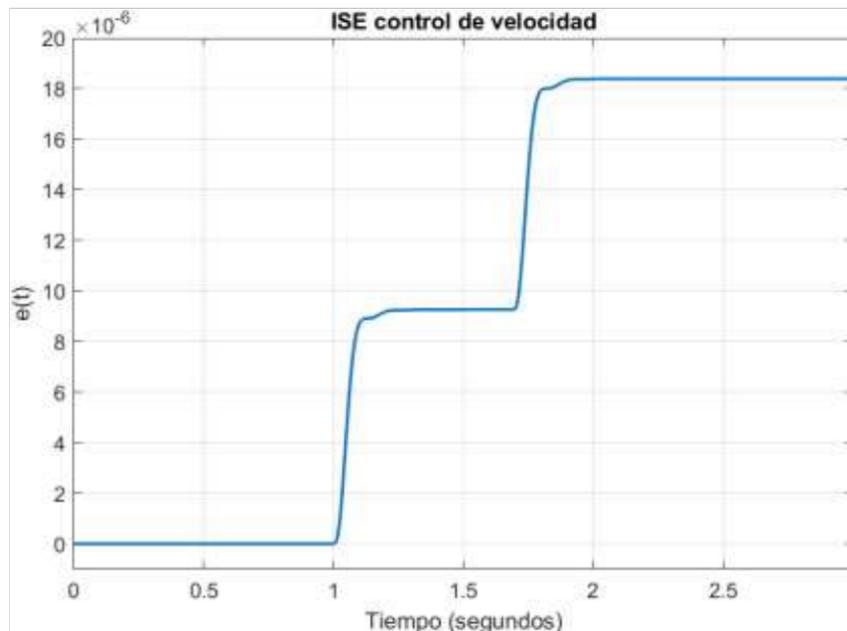


Figura 3.4 ISE del control velocidad.

Como se observa en la figura que antecede hay dos errores considerables, el primero, que se produce al momento que comienza el cambio de velocidad del sistema, es la pequeña

oscilación inicial de la salida de velocidad que se observa en la Figura 3.3, sin embargo, se puede notar que un tiempo de 0.1 segundos se estabiliza el sistema, el segundo error se produce en el instante que el sistema está a punto de alcanzar la referencia. Sin embargo, el sistema alcanza la referencia de manera aceptable, también se puede destacar que la máquina obtiene la velocidad referencial en un tiempo de 0.8 segundos.

3.1.1.3 Respuesta del sistema ante cambios de referencia y perturbaciones

Para visualizar el desempeño del control de la máquina, se simula el sistema ante cambios de velocidad positiva y negativa. Entre los tiempos estables del sistema se introduce cargas al eje a manera de perturbación al sistema y se observa la respuesta que presenta, tal cual se muestra a continuación.

Respuesta del sistema ante cambios de velocidad.

Para este caso, se observa cómo reacciona el sistema ante una entrada de referencia de 2000 RPM en el primer segundo de la simulación, después en el tercer segundo se identifica su respuesta a un cambio de velocidad de -2000 RPM, lo cual se detalla en la Figura 3.5.

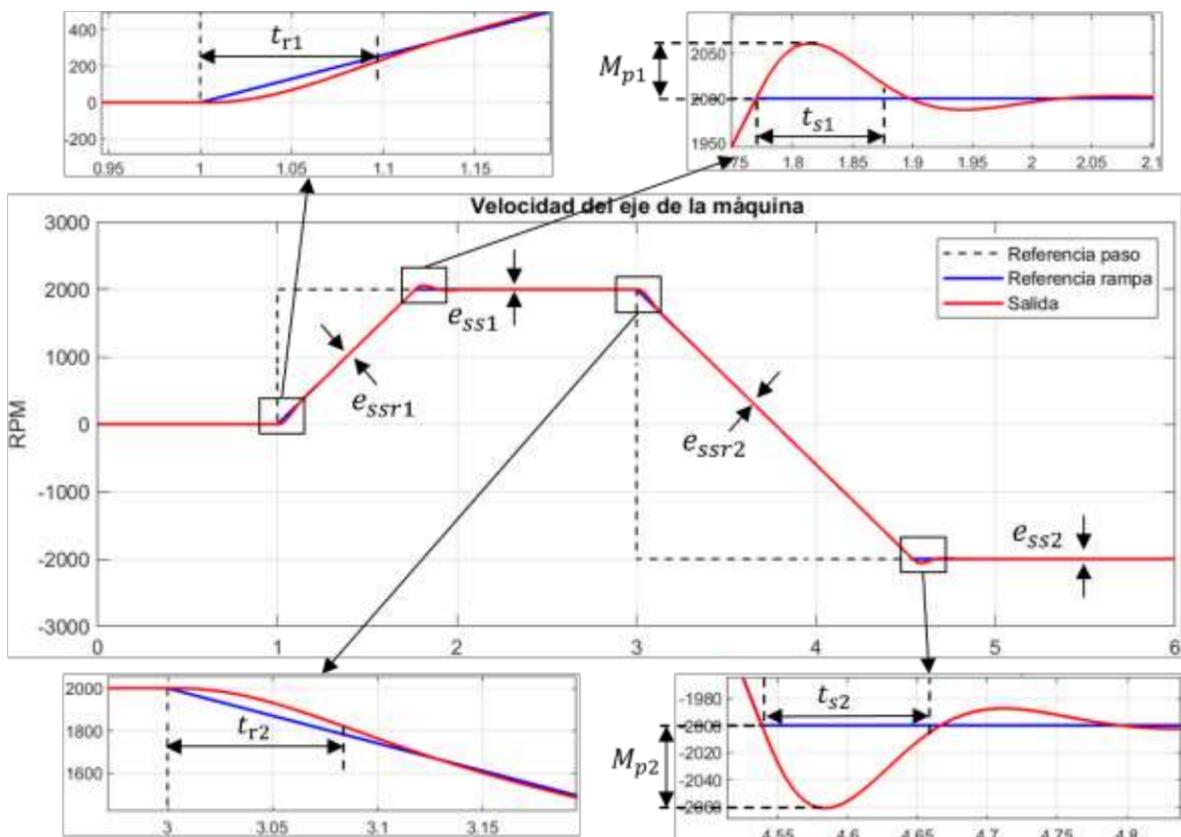


Figura 3.5 Respuesta de la velocidad ante cambios de referencia.

Entre el intervalo de 1 a 2 segundos se observa que la velocidad incrementa con una rampa de aceleración, al inicio del cambio de velocidad hay un retardo t_{r1} igual a 0.1 segundos, después de este, se tiene un error en estado estable durante la rampa e_{ssr1} igual a cero, al instante que la referencia de velocidad es 2000 RPM, se obtiene un sobre impulso M_{p1} menor al 3% de la referencia y el sistema se estabiliza en un tiempo t_{s1} igual a 0.1 segundos. El sistema alcanza la referencia en aproximadamente 0.87 segundos desde que inicia la aceleración.

A los tres segundos de la simulación, se tiene una referencia de -2000 RPM, para esto el sistema empieza a desacelerar hasta llegar a velocidad cero, luego de lo cual inicia una aceleración hasta alcanzar la referencia de -2000 RPM. Al instante que inicia el cambio de velocidad en el tercer segundo de la simulación, se tiene un retardo t_{r2} igual a 0.08 segundos, después del retardo el sistema tiene un error en estado estable durante la rampa e_{ssr2} igual a cero. Cuando la referencia alcanza los -2000 RPM, se presenta un sobre impulso M_{p2} igual al 3% de la referencia, después de un tiempo de establecimiento t_{s2} menor a 0.13 segundos el sistema se estabiliza y tiene un error en estado estable e_{ss2} igual a cero.

El comportamiento de la corriente de armadura se presenta en la siguiente figura.

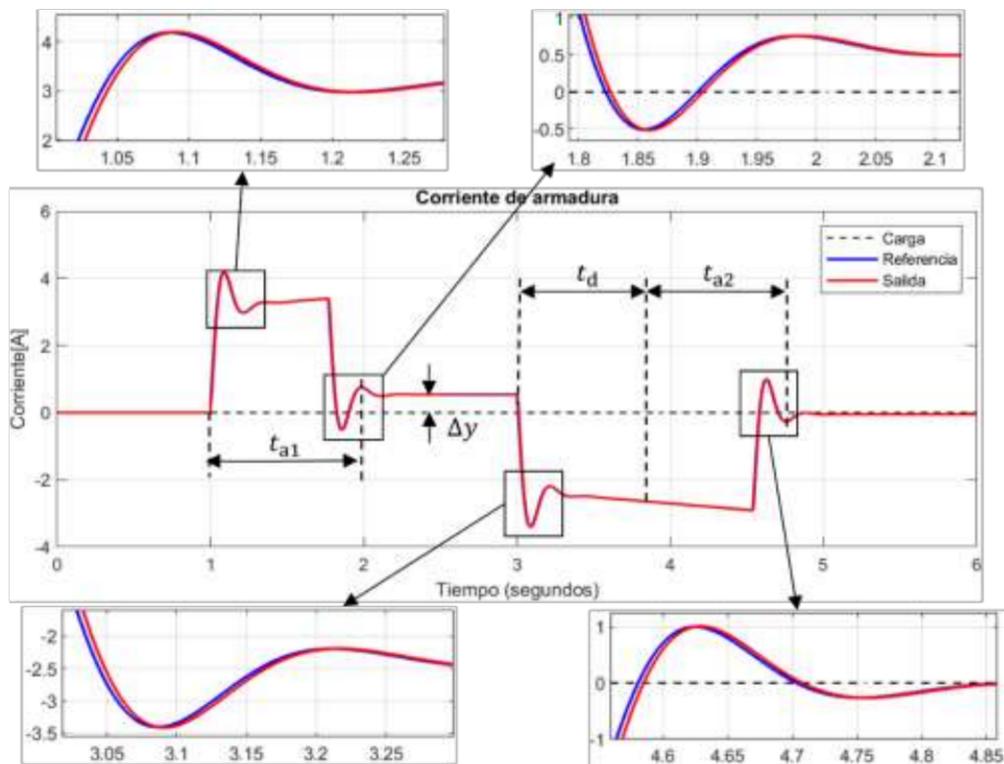


Figura 3.6 Respuesta de la corriente ante cambios de referencia.

Durante el tiempo t_{a1} se acelera el sistema hasta llegar a su referencia, durante este tiempo la corriente de armadura es aproximadamente de 3 A y se observa dos oscilaciones al momento del cambio de velocidad. Cuando el sistema deja de acelerar se tiene dos oscilaciones como respuesta del control para que la velocidad se estabilice. A una velocidad de 2000 RPM sin carga en el eje se tiene una variación Δy , la corriente resultante es la corriente necesaria para vencer al coeficiente de rozamiento y la viscosidad de la máquina.

A partir del tercer segundo de simulación se muestra como varía la corriente durante el tiempo t_d , el cual le toma al sistema desacelerar hasta llegar a cero, luego acelera la máquina, de manera negativa durante un tiempo t_{a2} hasta que el sistema alcanza la referencia de -2000 RPM.

Para un análisis de la robustez del control sintonizado se presenta la respuesta del ISE en la Figura 3.7.

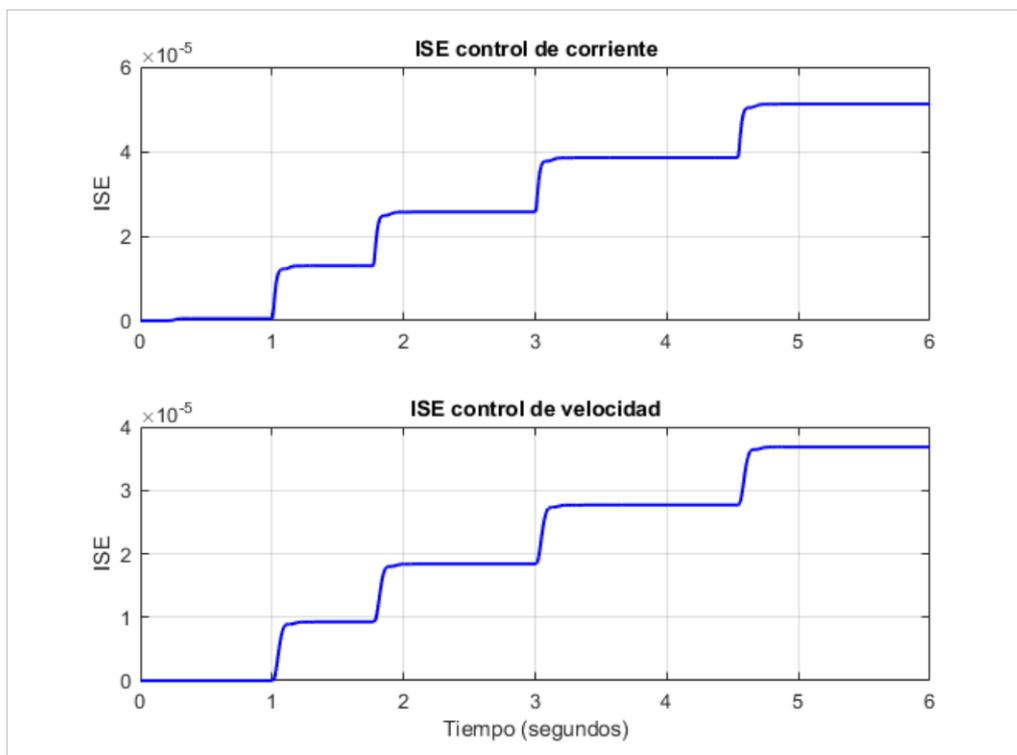


Figura 3.7 ISE de la velocidad y la corriente ante cambios de referencia.

En la figura que antecede se observa que, ante cambios de referencia se tiene respuestas rápidas y estables, tanto para el controlador de corriente, como el de velocidad. La diferencia que puede existir entre la referencia de corriente y la salida de corriente no es considerable y cumple con un desempeño adecuado para el controlador de corriente. Los

resultados de esta simulación demuestran que el controlador en cascada otorga respuestas rápidas y robustas.

Respuesta del sistema a velocidad constante con cambios de carga en el eje

Para este caso se realiza una simulación con velocidad constante y se observa la respuesta del sistema ante cargas en el eje del rotor de la máquina DC, dicha simulación se observa en las Figura 3.8 y 3.9.

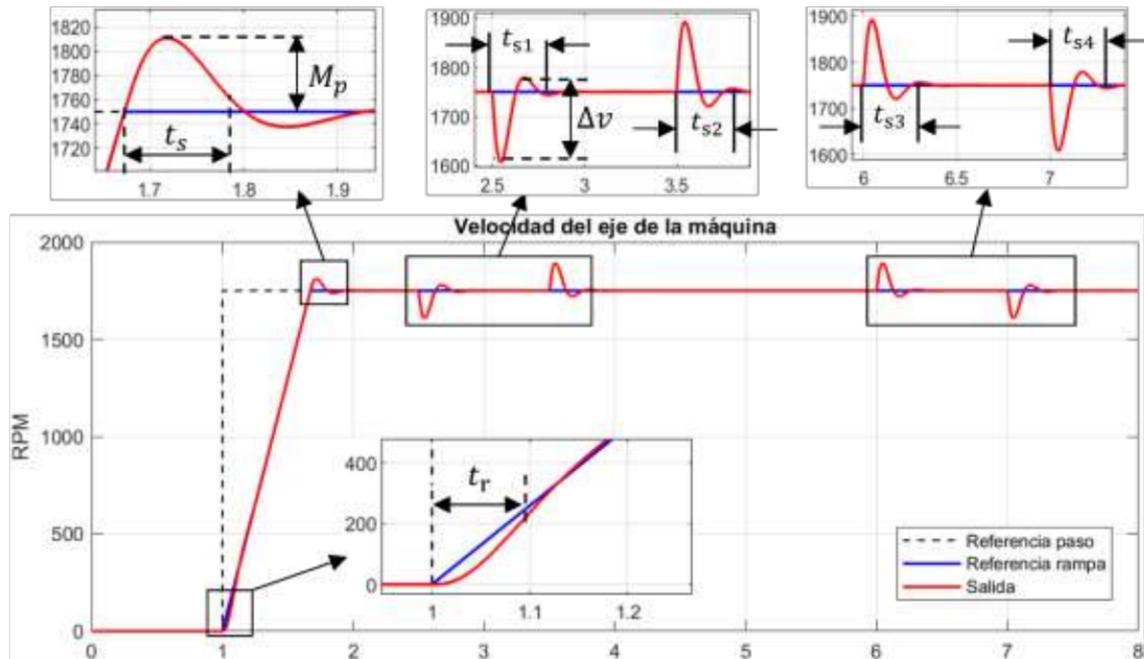


Figura 3.8 Respuesta de la velocidad ante cargas en el eje del rotor.

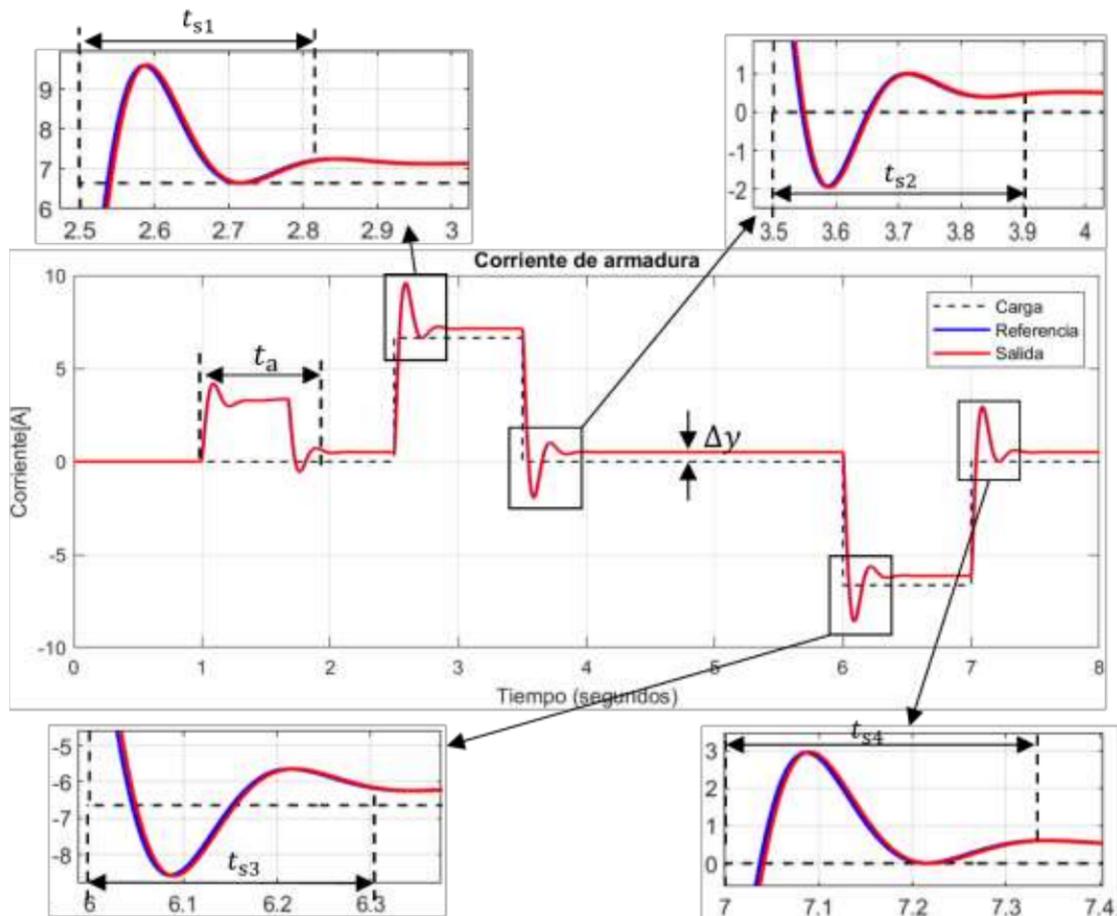


Figura 3.9 Respuesta de la corriente ante cargas en el eje del rotor.

Después de que la velocidad alcanza un valor constante, en el Intervalo de 2.5 a 3.5 segundos, se somete el sistema a una carga en contra del sentido de giro del eje, al recordar que la corriente es proporcional al torque del eje de la máquina, se observa el comportamiento en la corriente de armadura. Ante la carga, el controlador diseñado estabiliza el sistema en un intervalo de tiempo $t_{s1} = 0.11s$ y con una variación de velocidad (Δv) menor al 10% de referencia, al instante que se retira la carga, al sistema le toma un tiempo t_{s2} hasta estabilizarse, $t_{s2} = t_{s1}$. Dando como resultado una respuesta rápida y robusta. Además, la corriente no supera los 10 A.

La corriente del sistema sin cargas no puede ser igual a cero debido al coeficiente de rozamiento de la máquina y la viscosidad, esto se indica por Δy .

En el intervalo de 6 a 7 segundos se somete al sistema a una carga que está a favor del sentido de giro del eje. Se observa que el tiempo de establecimiento y la variación de velocidad es igual al caso anterior, con la diferencia que se presenta de forma inversa. Así, el sistema incrementa su velocidad en un tiempo t_{s3} , una vez que se retira la carga la

velocidad disminuye por un intervalo de tiempo t_{s4} . Donde: $t_{s4} = t_{s3} = t_{s2} = t_{s1}$. Debido a que la carga está a favor del sentido de giro del eje, la corriente es negativa y el sistema opera como generador.

Al igual que el caso anterior se muestra el ISE del sistema ante las perturbaciones en la Figura 3.10.

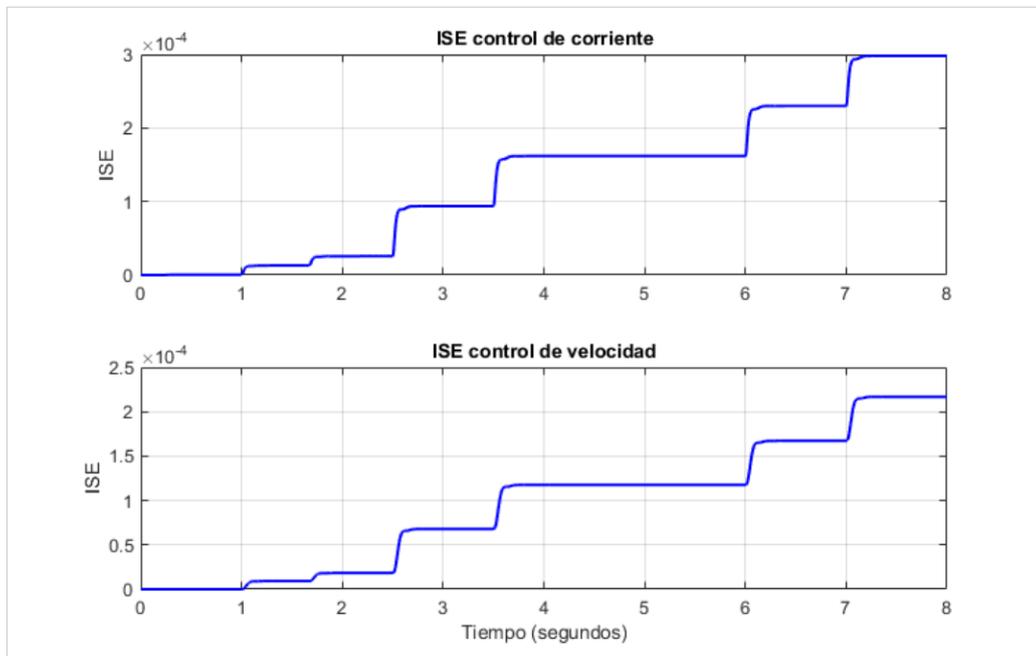


Figura 3.10 Respuesta del sistema ante cargas en el eje del rotor.

En ambos casos, tanto para el control de corriente como para el control de velocidad, se observa que el sistema reacciona de manera rápida ante las perturbaciones y alcanza la referencia óptimamente.

3.1.2 DEMOSTRACIÓN DE LA OPERACIÓN EN CUATRO CUADRANTES DE LA MÁQUINA DC

Con la interfaz gráfica se demuestra la operación de la máquina en sus cuatro cuadrantes en línea, para esto se cuenta con dos opciones de trayectoria, una plana y una con colinas como se había mencionado previamente. Primero se muestra la respuesta del sistema ante una trayectoria con colinas, ya que las colinas actúan como una carga variable sobre el eje y permiten que el usuario vea de manera más intuitiva el comportamiento del sistema.

3.1.2.1 Operación primer cuadrante.

Tal como se mencionó en el marco teórico, la máquina DC opera en el primer cuadrante cuando la velocidad angular del eje es positiva y el torque es positivo, ya que, el vehículo está avanzando, dicho comportamiento se puede observar en la Figura 3.11.



Figura 3.11 Simulación del sistema en el primer cuadrante.

En la gráfica anterior se observa que el vehículo está ascendiendo y su velocidad es alrededor de 45 km/h, por lo tanto, el eje de la máquina gira de manera directa a 1745 RPM. La colina se comporta como una carga y esto se muestra en el medidor de corriente armadura que marca aproximadamente 6 A. En la parte inferior del HMI se muestra la polaridad con que se está energizando el devanado de armadura y el sentido de giro del rotor.

3.1.2.2 Operación segundo cuadrante

En el segundo cuadrante, cuando el vehículo está descendiendo la colina, con velocidad positiva, la corriente que se presenta por parte de la colina es negativa, de esta manera se detecta que está operando la máquina en el segundo cuadrante, como se muestra en la Figura 3.12.



Figura 3.12 Simulación del sistema en el segundo cuadrante.

En la gráfica anterior se puede observar que el HMI muestra una corriente negativa, la misma que ocasiona que la máquina opere como generador. El eje de la máquina no incrementa su velocidad al descenso, por lo tanto, se entiende que la máquina tiene un comportamiento de frenado regenerativo.

3.1.2.3 Operación tercer cuadrante

Para el tercer y cuarto cuadrante la velocidad angular del eje de la máquina debe ser negativo, de esta manera el vehículo móvil empezará a ir en retroceso, para esto el convertor diseñado debe tener la capacidad de otorgar un voltaje de polaridad negativo como se comprueba en la Figura 3.13.



Figura 3.13 Simulación del sistema en el tercer cuadrante.

En base a la simulación para que el vehículo ascienda en retroceso se usa una velocidad aproximada de -1815 RPM, la corriente de armadura es aproximadamente -6.5 A y el vehículo tiene una velocidad aproximada de -45 km/h, el sentido de giro del eje es negativo y la polaridad con que es energizada la máquina es negativa dando un comportamiento de motor inverso.

3.1.2.4 Operación cuarto cuadrante

Finalmente, la operación de la máquina en el cuarto cuadrante se observa cuando el vehículo móvil desciende en retroceso, con una velocidad negativa del eje y con una corriente positiva debido a la pendiente de la colina que actúa como carga, tal como se describe en la Figura 3.14.



Figura 3.14 Simulación del sistema en el cuarto cuadrante.

Tal como se muestra en la figura anterior la velocidad del vehículo es -45 km/h con una velocidad del eje de la máquina de -1768 RPM y se tiene una corriente positiva de 8 A. se comprueba que la máquina está operando como generador, sin embargo, por la corriente positiva se puede decir que actúa como un frenado regenerativo inverso.

3.1.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN COMPLETA

Al finalizar la simulación se puede desplegar una ventana con el comportamiento del sistema en todo el tiempo de simulación.

Como se mencionó se tiene dos tipos de trayectoria, la plana y la que tiene colinas, a continuación, se muestra el comportamiento del sistema en base a la trayectoria que se escoja.

3.1.3.1 Respuesta trayectoria plana

Para una trayectoria plana, en un tiempo de simulación de aproximadamente 40 segundos, en el segundo 3.8 de la simulación se incrementa la velocidad del eje de la máquina hasta 1500 RPM. Entre el intervalo de 10.5 y 15 segundos aproximadamente, se introduce una carga de 12 N.m. Al segundo 19.2 se ajusta la referencia de velocidad a -1200 RPM. Entre el intervalo de 24 y 27 segundos se ayuda al sistema con una carga negativa de -15 N.m aproximadamente. Con esto se tiene la respuesta mostrada en la Figura 3.15

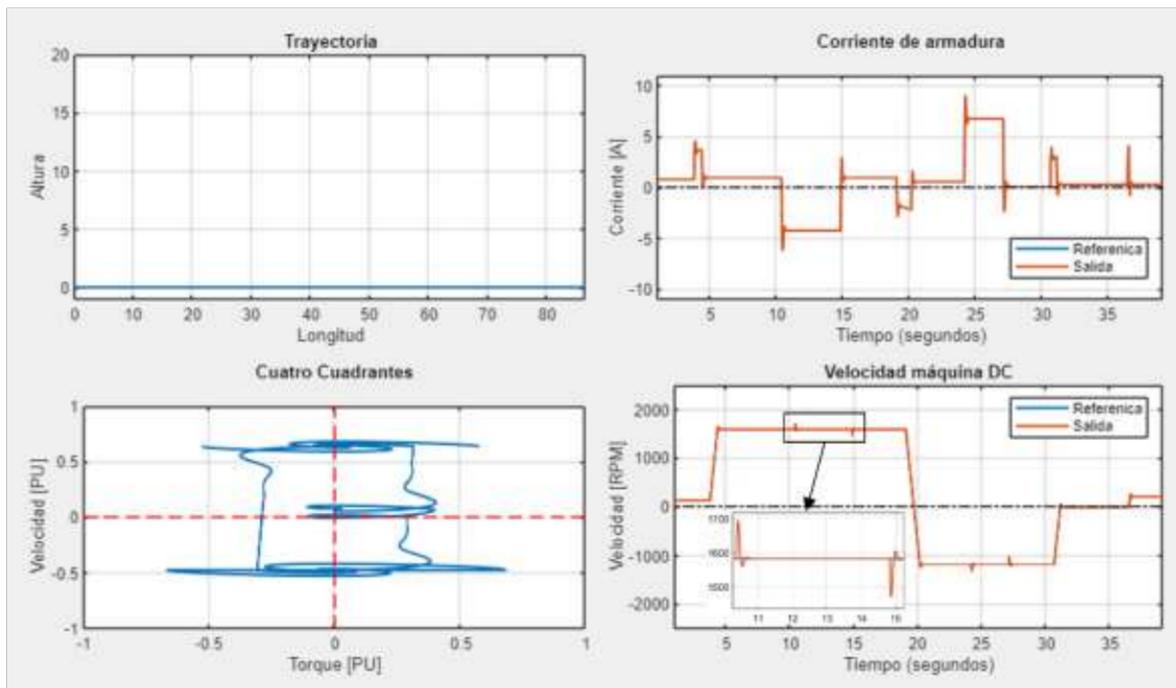


Figura 3.15 Resultados finales del sistema en trayectoria plana.

Al observar la gráfica resultante de la velocidad del eje y comparándola con la corriente de armadura, se obtiene que el control diseñado permite una respuesta rápida ante la perturbación.

3.1.3.2 Respuesta plano torque vs velocidad angular.

La Figura 3.16 titulada Cuatro Cuadrantes, es la relación torque vs velocidad, esta demuestra que para pasar del primer al tercer cuadrante es necesario pasar por el segundo cuadrante, este comportamiento se simula en línea, para observarlo dirigirse al enlace del video en el Anexo I.

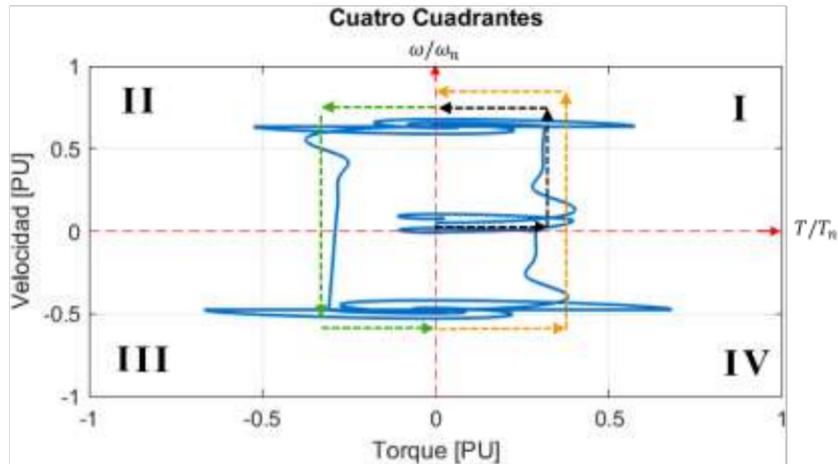


Figura 3.16 Respuesta torque eléctrico vs Velocidad angular del eje.

En la gráfica anterior se observa que para alcanzar la primer referencia de velocidad (flecha negra), el sistema primero vence una carga inicial, luego incrementa la velocidad con el torque necesario y llega a la velocidad deseada, en este punto, el torque decremanta. Si se desea que la máquina opere del primer al tercer cuadrante (mediante la flecha verde), se mira que primero se tiene un torque negativo y velocidad positiva, a partir de lo cual, la velocidad decremanta hasta que llega a la referencia de velocidad negativa y cuando llegue a esta referencia, el sistema ya no vence un torque, por lo que el torque se vuelve cero. Lo mismo pasa si se desea pasar del tercer cuadrante al primero, con la diferencia que se pasa por el cuarto cuadrante, tal como se indica con la ayuda de la flecha naranja.

3.1.3.3 Respuesta con trayectoria variable

Para una trayectoria variable se cuenta con pendientes en las que el vehículo debe ascender y descender, estas actúan como una carga variable sobre el eje del rotor de la máquina DC, ya que, la carga es proporcional a la pendiente, esta puede ser carga a favor o en contra del sentido de giro del eje.

Entonces, se presentan dos respuestas: la respuesta del sistema con velocidad positiva al ascender y descender un tramo de la trayectoria variable; y, la respuesta del sistema con velocidad negativa al subir y descender en retroceso el mismo tramo.

Respuesta con velocidad positiva.

Para esta simulación se tiene una velocidad positiva y constante durante la trayectoria variable, dando como resultado la Figura 3.17.

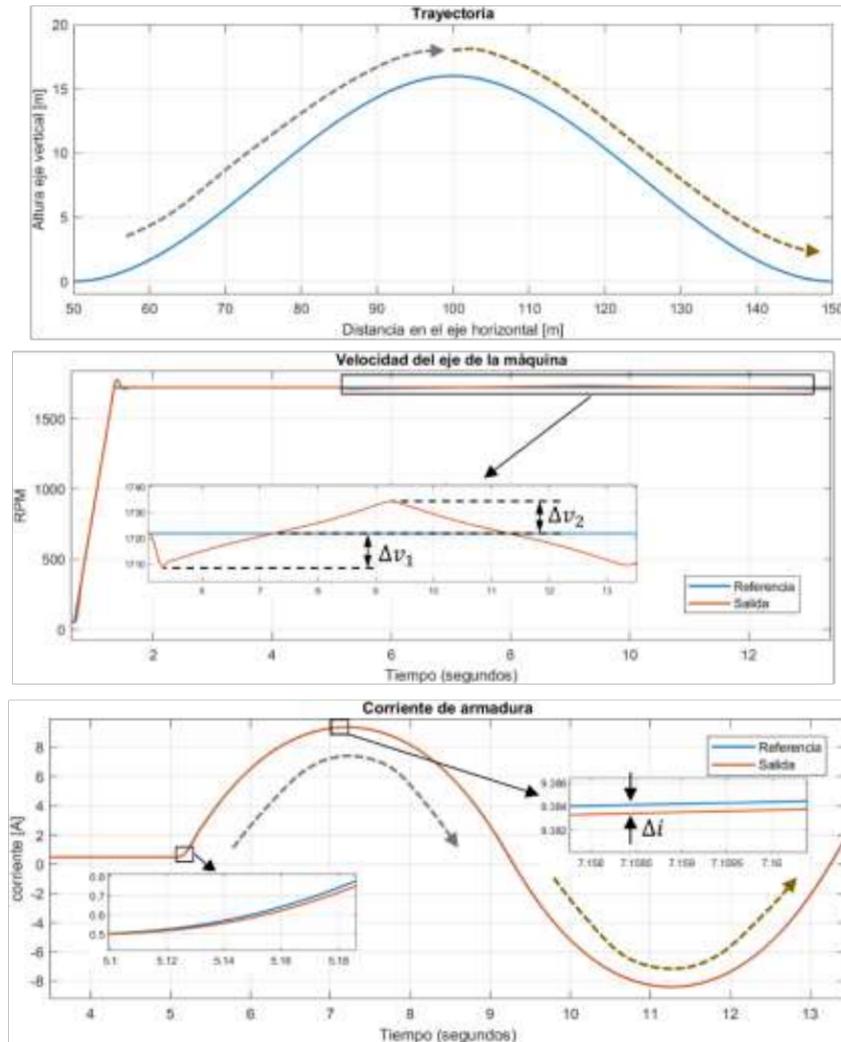


Figura 3.17 Resultados del sistema en trayectoria variable con velocidad positiva.

El comportamiento del sistema se describe con flechas de colores, como se puede observar en la figura que antecede. Así, la flecha gris es el intervalo de tiempo que el vehículo está ascendiendo la pendiente de la trayectoria, durante este la corriente reflejada en la armadura incrementa y decremanta hasta que el vehículo alcanza la cima. Una vez que el vehículo está en la cima de la trayectoria empieza su descenso, el cual se muestra con la flecha color marrón.

De los resultados en este intervalo de tiempo se observa que la velocidad decremanta e incrementa en relación con la trayectoria, sin embargo Δv_1 y Δv_2 son menores al 1% de la referencia de velocidad. Además, mediante Δi se observa que la referencia de corriente prácticamente se alcanza por la corriente resultante de la acción de control.

Respuesta con velocidad negativa.

Para esta respuesta, se observa el comportamiento del sistema con el vehículo en retroceso en la misma trayectoria anterior, el cual se muestra en la Figura 3.18.

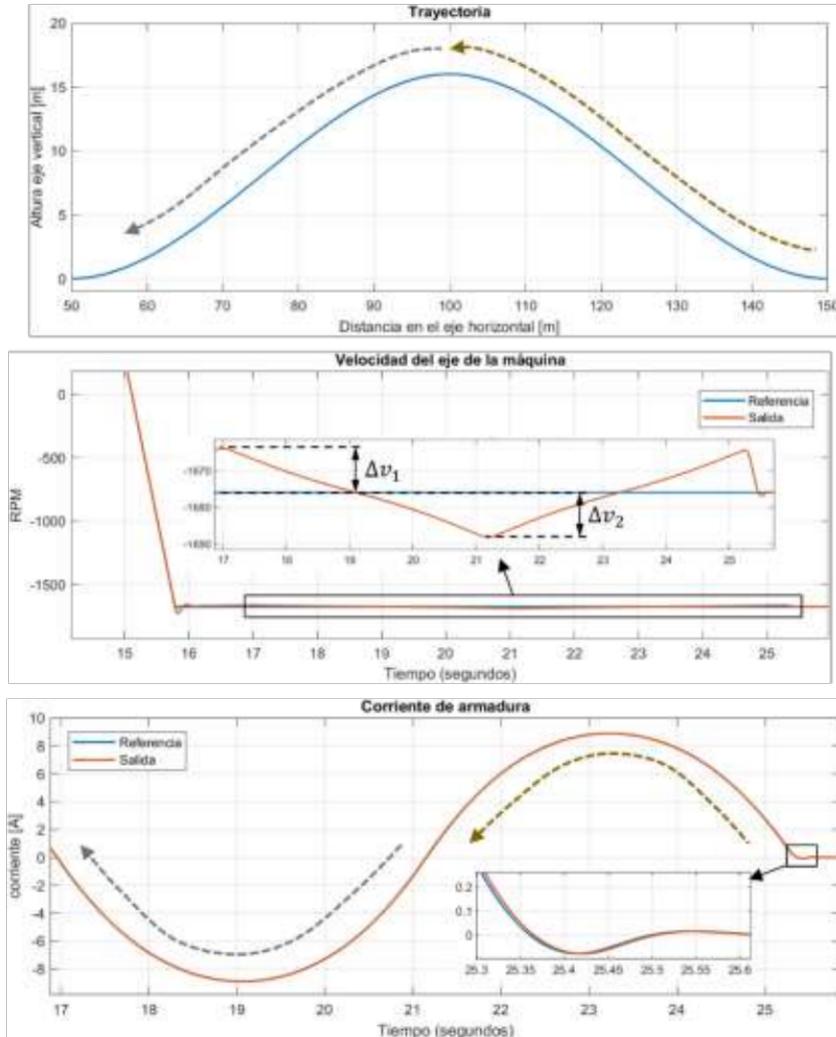


Figura 3.18 Resultados del sistema en trayectoria variable con velocidad negativa.

Para describir el comportamiento del sistema cuando el vehículo retrocede por la trayectoria en el intervalo de 17 a 25 segundos, se utilizan flechas que indican la respuesta de la corriente de armadura, misma que cambia en función de la pendiente que posee la trayectoria. La flecha marrón muestra el resultado de la corriente cuando el vehículo asciende en retroceso la pendiente, mientras que, la flecha gris indica cómo la corriente de armadura varía mientras el vehículo desciende en retroceso.

La variación de velocidad de la referencia y la salida del sistema es menor al 1%.

Además, la corriente de armadura resultante tiene una forma sinusoidal, esto se debe a la carga variable $T_L(t)$. Basándose en la ecuación (1.7) y relacionando el torque con la corriente se obtiene la Ecuación 3.2, la que permite observar dicho comportamiento.

$$I_a(t) = \frac{1}{k_e} \left[J * \frac{d\omega(t)}{dt} + B * \omega(t) + T_L(t) \right] \quad (3.2)$$

Con estos resultados se observa el comportamiento que tiene el sistema en los cuatro cuadrantes del plano torque vs velocidad angular. Demostrando que en efecto la máquina opera en los cuatro cuadrantes mediante el control del convertidor diseñado.

3.2 CONCLUSIONES

- La revisión bibliográfica sobre el control de máquinas DC y sobre el convertidor DC/DC tipo Cûk amplió el conocimiento requerido y fundamentó teórica y técnicamente el diseño del convertidor y el control para la operación de la máquina DC en sus cuatro cuadrantes.
- El estudio y análisis del modelamiento matemático del convertidor Cûk y de la máquina DC, permitió establecer los parámetros necesarios para la sintonización de los reguladores PI para el control cascada que permite la operación en cuatro cuadrantes de la máquina DC, además utilizando la asignación de polos se pudo realizar los controladores con valores estimados y no de manera heurística.
- El convertidor Cûk bidireccional diseñado con elementos comerciales (Inductor de entrada 0.74mH, Inductor de salida 3.1mH, Capacitor intermedio 10uF y Capacitor de salida 120nF) operando a una frecuencia de 100kHz y con un ciclo de trabajo entre el 25% al 75% permiten controlar la máquina DC en sus cuatro cuadrantes.
- Mediante la interfaz gráfica hombre-máquina diseñada en App-Designer, usando Simulink y el modelo 3D de Brian Hong, el usuario puede interactuar de tal manera que al realizar cambios de referencia de velocidad puede observar cómo incrementa o decrementa la velocidad, además dependiendo de la trayectoria seleccionada se puede identificar cómo la máquina opera como motor y generador en los cuatro cuadrantes.
- Se comprobó el desempeño del esquema propuesto de control mediante el índice cuadrado del error (ISE), el cual da como resultado que el control permite respuestas rápidas y robustas ante cambios de referencias y perturbaciones.

3.3 RECOMENDACIONES

- Se recomienda usar el convertor Cûk bidireccional de cuatro cuadrantes para la energización de diferentes sistemas y analizar el comportamiento de estos.
- Se recomienda la sintonización de controladores mediante la asignación de polos, ya que muchos sistemas contarán con respuestas aproximadas de primer orden a pesar de que la planta pueda tener un comportamiento de orden mayor.
- Para diseñar y simular un convertor Cûk bidireccional se recomienda usar frecuencias de conmutación elevadas, ya que los elementos comerciales a frecuencias bajas son de limitado acceso. Para el comportamiento bidireccional, se recomienda colocar un MOSFET en vez del diodo que tiene el diseño unidireccional.
- Para el diseño e implementación de interfaces hombre-máquina como este sistema, se recomienda utilizar los diseños ya realizados por parte de los desarrolladores de MathWorks de Matlab.
- Para analizar y evaluar el funcionamiento de esquemas de control desarrollados, se recomienda el uso del índice ISE, que permite valorar la rapidez y robustez de un sistema controlado.
- Para trabajos futuros se recomienda utilizar este trabajo de integración curricular para el análisis y diseño de carga de baterías cuando la máquina este operando como generador.
- Se recomienda el uso de la interfaz gráfica diseñada, en las clases que se explica el comportamiento de una máquina DC en los cuatro cuadrantes de operación. De esta manera los estudiantes podrán comprender de manera intuitiva y didáctica este tema.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. C. Carrillo Herrera, "Estudio de estrategias de control: predictivo por matriz dinámica y redes neuronales en un convertidor elevador," Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control., 2018. Accessed: Dec. 17, 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/15350>
- [2] L. L. Gualpa Almeida, "Diseño e implementación de un módulo didáctico para el control en cuatro cuadrantes de una máquina DC," Mar. 2021, Accessed: Dec. 17, 2021. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21470>
- [3] D. Ortuño and O. Grau, "Control de velocidad en cuatro cuadrantes para motor DC mediante chopper en puente completo," Sep. 2017, Accessed: Dec. 17, 2021. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/86631>
- [4] R. Sánchez Carreño, "Estudio y simulación de convertidores CC/CC elevadores," 2019, Accessed: Dec. 17, 2021. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/36755>
- [5] Miguel Ángel Rodríguez Pozueta, "Máquinas de corriente continua ," *Universidad de Cantabria* (España), 2017. <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Maquinas%20cc.pdf> (accessed Dec. 20, 2021).
- [6] Olmo M and Nave Carl Rod, "DC Electric Motors," *Georgia State University*, 2017. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/motdc.html#c1> (accessed Dec. 21, 2021).
- [7] S. Chapman, *Máquinas Eléctricas* , Quinta. Mc Graw Hill, 2012.
- [8] W. Hayt and J. Buck, "Teoría electromagnética." [Online]. Available: www.elsolucionario.net
- [9] J. C. Martin Castillo, *Máquinas eléctricas [Electricidad y Electrónica]*. Madrid: Editorial Editex S.A., 2012.
- [10] "1. Conceptos básicos. Tensión Inducida y Fuerza Inducida. (Regla de la mano derecha) - YouTube." <https://www.youtube.com/watch?v=wOntwtS410Q> (accessed Jan. 20, 2022).
- [11] F. J. Meza Weber and P. D. Ramos Morales, "Modelo matemático motor DC conexión independiente.," 2015, Accessed: Dec. 21, 2021. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10257>
- [12] Mathworks, "Implement wound-field or permanent magnet DC machine - Simulink - MathWorks América Latina." https://la.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/dcmachine.html?searchHighlight=dc%20machine&s_tid=srchtitle_dc%20machine_1 (accessed Dec. 22, 2021).
- [13] S. Tiwari and S. Rajendran, "Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor for Electric Vehicles," 2019 *IEEE PES GTD Grand International*

Conference and Exposition Asia, GTD Asia 2019, pp. 577–582, May 2019, doi: 10.1109/GTDASIA.2019.8715878.

- [14] S. E. Avila Perez and V. del R. Cuásquer Gualoto, “Diseño y construcción de un controlador electrónico de velocidad con freno regenerativo para una plataforma autónoma móvil terrestre con tracción diferencial,” Mar. 2016, Accessed: Dec. 26, 2021. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15093>
- [15] J. F. Vargas Guachamin, “Diseño y simulación de la optimización en la generación de energía en una central fotovoltaica mediante convertidores DC/DC y la técnica de control MPPT,” Jul. 2018, Accessed: Dec. 27, 2021. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19591>
- [16] P. Anibal and V. Rueda, “Diseño e implementación de un control no lineal de convertidores conmutados DC/DC, utilizando técnicas de deslizamiento; y la viabilidad del uso de la pasividad y linealización entrada-salida por realimentación,” Dec. 2010, Accessed: Dec. 27, 2021. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2643>
- [17] M. Luthfansyah, S. Suyanto, and A. Bakarr Momodu Bangura, “Evaluation and Comparison of DC-DC Power Converter Variations in Solar Panel Systems Using Maximum Power Point Tracking (MPPT) Flower Pollination Algorithm (FPA) Control,” *E3S Web of Conferences*, vol. 190, p. 00026, Sep. 2020, doi: 10.1051/E3SCONF/202019000026.
- [18] B. de Para Estabilización Nivel De Voltaje and E. Y. Control Richard Alfredo Chicango Chinchuña, “Diseño e implementación de un convertidor dc/dc bidireccional para estabilización de nivel de voltaje en un bus dc mediante ultracapacitores,” Nov. 2017, Accessed: Jan. 04, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18913>
- [19] F. Gálvez Díaz-Rubio, “Capítulo 2 Acondicionamiento de señal~señal,” 2002, Accessed: Jan. 07, 2022. [Online]. Available: <http://informatica.uv.es/iiguia/INS/material/inst02.pdf>
- [20] ABB, “D5005R - Product Catalog - Baldor.com.” <https://www.baldor.com/catalog/D5005R#tab=%22specs%22> (accessed Dec. 30, 2021).
- [21] S. R. Chafle, U. B. Vaidya, and Z. J. Khan, “DESIGN OF CUK CONVERTER WITH MPPT TECHNIQUE,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING*, vol. 1, 2013, Accessed: Dec. 31, 2021. [Online]. Available: www.ijireeice.com
- [22] H. Gholizadeh, S. A. Gorji, E. Afjei, and D. Sera, “Design and Implementation of a New Cuk-Based Step-Up DC–DC Converter,” *Energies 2021, Vol. 14, Page 6975*, vol. 14, no. 21, p. 6975, Oct. 2021, doi: 10.3390/EN14216975.
- [23] E. Patricio and Á. Balarezo, “Diseño y simulación de un control en cascada (PI-deslizante) para los convertidores DC-DC presentes en una planta virtual de generación de energía eléctrica,” Nov. 2017, Accessed: Dec. 17, 2021. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18885>

- [24] "N-Channel FREDFET Absolute Maximum Ratings Thermal and Mechanical Characteristics", Accessed: Jan. 07, 2022. [Online]. Available: <http://www.microsemi.com>
- [25] R. W. (Robert W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of power electronics*.
- [26] V. Galera Ortega, "Simulador Convertidores DC-DC," 2002. Accessed: Jan. 03, 2022. [Online]. Available: <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/197pub.pdf>
- [27] R. G. Kanojiya and P. M. Meshram, "Optimal tuning of PI controller for speed control of DC motor drive using particle swarm optimization," *2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies, APCET 2012*, 2012, doi: 10.1109/APCET.2012.6302000.
- [28] R. Ramírez Betancour, F. A. Valenzuela Murillo, F. Martínez Solís, C. E. Castañeda Hernández, O. A. Morfin Garduño, and J. A. Olmos Lopez, "Control de velocidad de un motor de CD basado en mediciones de la corriente de armadura," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 19, no. 4, pp. 1–10, Oct. 2018, doi: 10.22201/FI.25940732E.2018.19N4.039.
- [29] A. VERGARA-BENTANCOURT, E. SALAZAR-HIDALGO, J. D. J. RAMIRO-JUÁREZ, and J. RAMIRO-RAMIRO, "Control de velocidad PI a un motor de DC utilizando herramientas Open Source," *Artículo Revista de Tecnología e Innovación Junio*, vol. 4, no. 11, pp. 1–13, 2017, Accessed: Jan. 04, 2022. [Online]. Available: www.ecorfan.org/bolivia
- [30] M. A. Paz, T. A. Ramírez-del Real, S. C. Garibo, and J. L. Gallegos, "ALGORITMO DIDÁCTICO PARA LA ASIGNACIÓN IMPLÍCITA DE POLOS MEDIANTE LA ESPECIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS TEMPORALES DESEADAS USANDO CONTROLADORES PI INDUSTRIALES," *Formación universitaria*, vol. 6, no. 6, pp. 23–40, 2013, doi: 10.4067/S0718-50062013000600004.
- [31] S. Castaño, "CONTROLADOR PI - Asignación de Polos," 2017. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/controlador-pi-por-asignacion-de-polos/> (accessed Jan. 04, 2022).
- [32] M. A. Paz, T. A. Ramírez-del Real, S. C. Garibo, and J. L. Gallegos, "ALGORITMO DIDÁCTICO PARA LA ASIGNACIÓN IMPLÍCITA DE POLOS MEDIANTE LA ESPECIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS TEMPORALES DESEADAS USANDO CONTROLADORES PI INDUSTRIALES," *Formación universitaria*, vol. 6, no. 6, pp. 23–40, 2013, doi: 10.4067/S0718-50062013000600004.
- [33] DACI-EPN, "ANÁLISIS DE LA RESPUESTA TRANSITORIA", Accessed: Jan. 05, 2022. [Online]. Available: http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/virtualdirectories/80/CControlC/materias/automatico/Descargas/An%C3%A1lisis/Lecturas/Lecturas_PDF/LECTURA_ANALISIS.pdf
- [34] A. J. Carrillo Paz, *Sistemas Automáticos de Control*, 2da ed. UNERMB, 2011. Accessed: Jan. 05, 2022. [Online]. Available: http://150.185.9.18/fondo_editorial/images/PDF/CUPUL/SISTEMA%20DE%20CONTROL%20%201.pdf

- [35] “NUCLEO-F401RE - STM32 Nucleo-64 development board with STM32F401RE MCU, supports Arduino and ST morpho connectivity - STMicroelectronics.” <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f401re.html#> (accessed Jan. 07, 2022).
- [36] F. V. Llumigusín Rivera and S. D. Quinga Socasi, “Diseño y construcción de un convertor de frecuencia con frenado óptimo para vehículo eléctrico,” Dec. 2016, Accessed: Jan. 22, 2022. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16963>
- [37] B. Hong, “Virtual Hardware and Labs for Controls,” 2022. (<https://github.com/MathWorks-Teaching-Resources/Virtual-Controls-Laboratory/releases/tag/v1.0.0> (accessed Jan. 06, 2022)).
- [38] O. Camacho, A. Rosales, and F. Rivas, *CONTROL DE PROCESOS*, vol. 1. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2020.

5 ANEXOS

ANEXO I. Manual de usuario HMI

ANEXO II. Hojas de datos de los elementos eléctricos, electrónicos e información relevante.

ANEXO I

Manual de operación del HMI

El siguiente enlace permite ser direccionado a un video demostrativo de cómo usar esta interfaz gráfica: <https://youtu.be/KXaX1e97cMA>

La interfaz gráfica cuenta con 5 ventanas, las cuales se abren en función de los requerimientos del usuario.

En primer lugar, se presenta la ventana de inicio tal como se muestra en la Figura Al.1.



Figura Al.1 Ventana de inicio.

Donde se observa el nombre del autor, el nombre del director y el título del trabajo de integración curricular.

En este menú se observan tres botones en la parte inferior: MÁQUINA DC, CONVERSION y SIMULACIÓN.

Al presionar el botón de MÁQUINA DC se abre la ventana que se muestra en la Figura Al.2.



Figura A1.2 Ventana de datos técnicos de la máquina DC.

Dependiendo de la resolución de la pantalla se puede ampliar o no la ventana para observar de forma más clara los datos de placa.

Además, se cuenta con un enlace que permite redirigir a la página web del fabricante, donde se observa a más detalle la máquina simulada.

Para volver al menú inicial, basta con cerrar la ventana de la MÁQUINA DC.

Una vez cerrada la ventana de MÁQUINA DC, se puede presionar el botón de CONVERTOR, el cual abre la ventana que se muestra en la Figura A1.3.

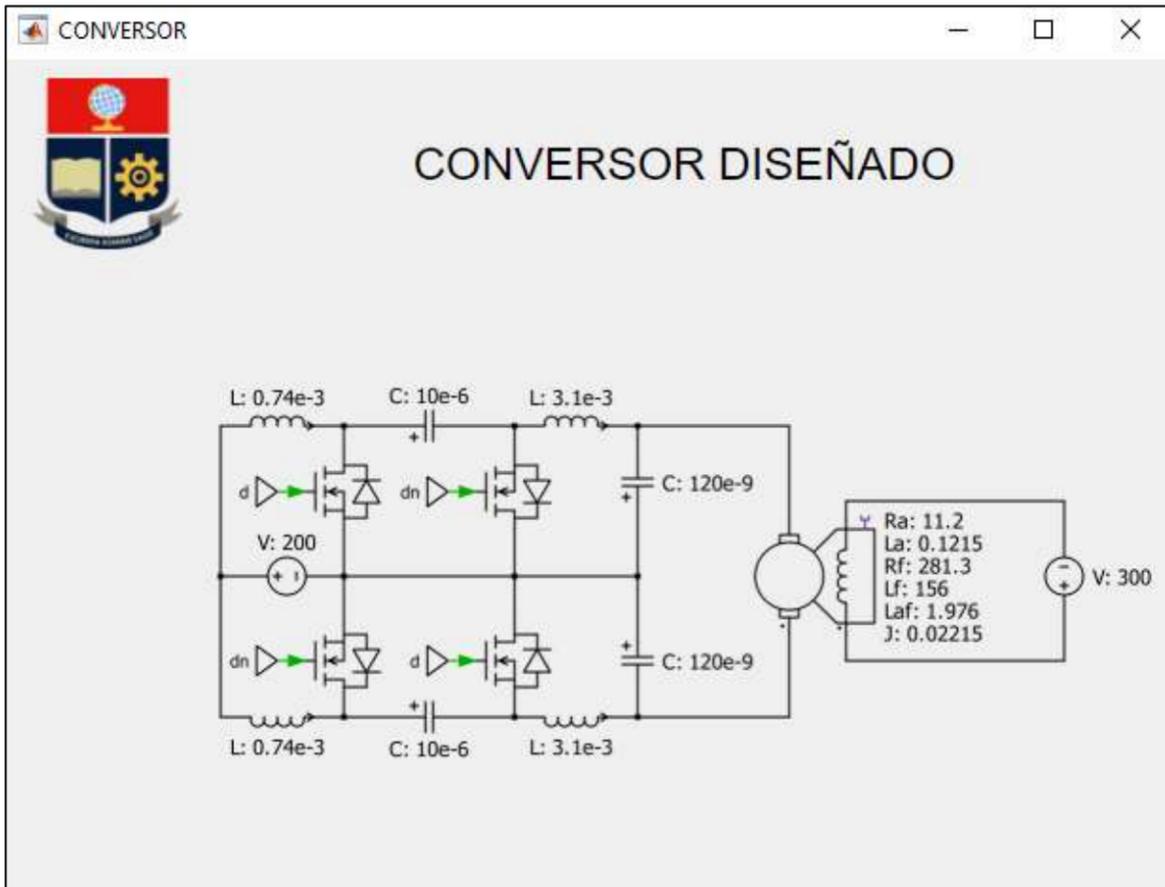


Figura A1.3 Ventana del convertidor diseñado.

De la figura anterior se destacan los valores comerciales de los elementos eléctricos del convertidor DC/DC tipo Cúk bidireccional, además de los parámetros de la máquina DC simulada. Para cerrar esta ventana se presiona la X en el cuadro superior derecho. Es importante mencionar que las dos ventanas anteriores se pueden ampliar hasta que cubran la pantalla donde se abra la interfaz, sin embargo, la ventana de inicio y de Simulación no cuenta con esta opción.

Al estar en el menú principal y presionar el botón de SIMULACIÓN se abre la ventana que se muestra a continuación.

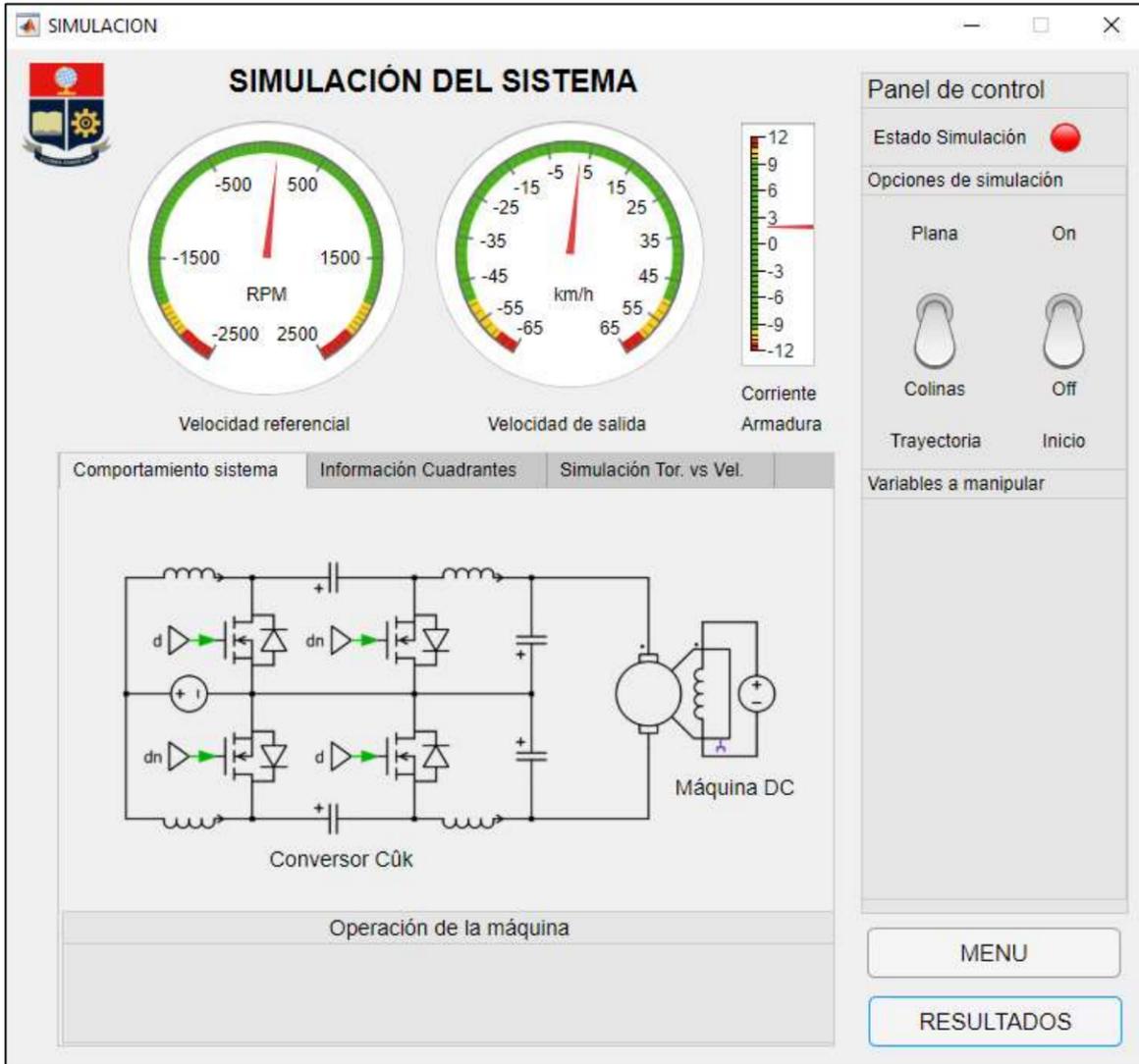


Figura A1.4 Ventana de simulación.

En la figura anterior se observa el estado inicial de la simulación, donde se destacan algunas partes vacías, sin embargo, estas secciones a medida que se realiza la simulación empezarán a llenarse con datos que resulten de interés para el usuario, tal como: la referencia de velocidad y la carga sobre el eje, dependiendo del tipo de trayectoria que se escoja.

Para iniciar la simulación se debe escoger el tipo de trayectoria, entre una trayectoria plana o con colinas. Si se escoge la trayectoria plana aparecerá el slider que permite realizar cambios de carga sobre el eje de la máquina DC.

Para iniciar la simulación se debe cambiar de estado al switch cuyo nombre es inicio. Al cambiar el estado del switch aparecerá una ventana de Mechanics Explorer, esta ventana

permite observar el estado en línea del vehículo simulado. Este vehículo 3D fue desarrollado por Brian Hong,

La ventana del vehículo móvil servirá de ayuda para tener una noción de la velocidad de la máquina en relación de la velocidad de simulación del vehículo móvil.



Figura A1.5 Vehículo móvil 3D y panel de control.

De la Figura A1.5 se observa que aparece varias cosas que no se visualizaban en la pantalla del panel sin la simulación iniciada.

En la siguiente sección se explica cada detalle de la Figura A1.5.

Medidores



Figura A1.6 Medidores de la simulación

Las principales medidas que se necesita conocer son, la velocidad de la máquina en RPM, velocidad del vehículo en km/h y la corriente de armadura.

Controles de mando



Figura AI.7 Opciones de simulación y cambios de en variables específicas

En la Figura AI.7 se observa dos switches, uno permite escoger la trayectoria sobre la que se desea que circule el vehículo móvil y el otro, permite iniciar la simulación. Se cuenta con dos sliders; un slider permite cambiar la referencia de velocidad y el otro, la carga sobre el eje en trayectoria plana.

Además, se cuenta con una luz led que indica si la simulación está corriendo o ya terminó.

Flechas y texto de cuadrantes

Para una interpretación más intuitiva se muestra un conjunto de flechas, las cuales muestran el sentido giro de la máquina, la dirección de la corriente cuando la máquina opera como generador, además de la polaridad de alimentación del devanado de armadura.

Las flechas rojas muestran qué sección del convertidor está operando a mayor porcentaje del ciclo de trabajo. La flecha azul y naranja en conjunto con el signo muestran el sentido de giro del eje de la máquina DC, tal como se indica a continuación.

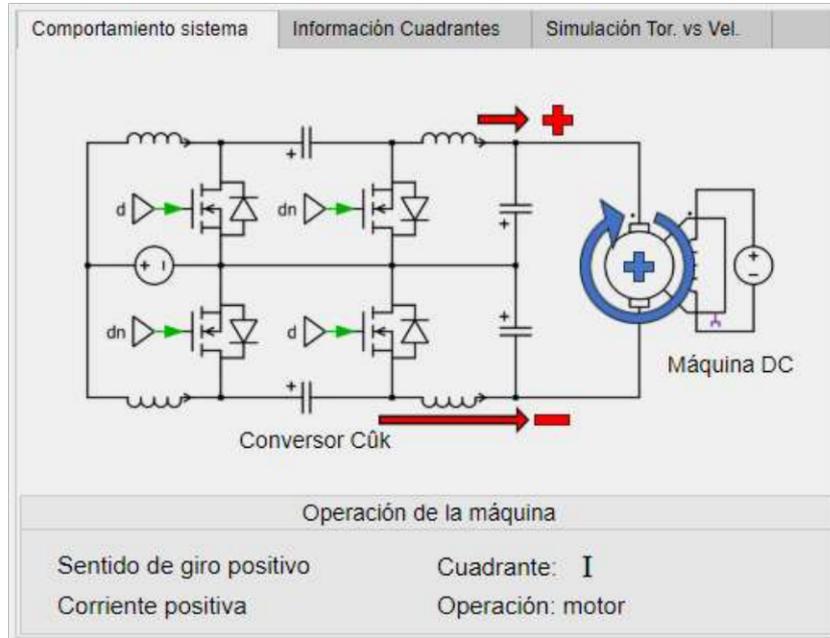


Figura AI.8 Convertor entregando energía positiva, giro positivo del eje.

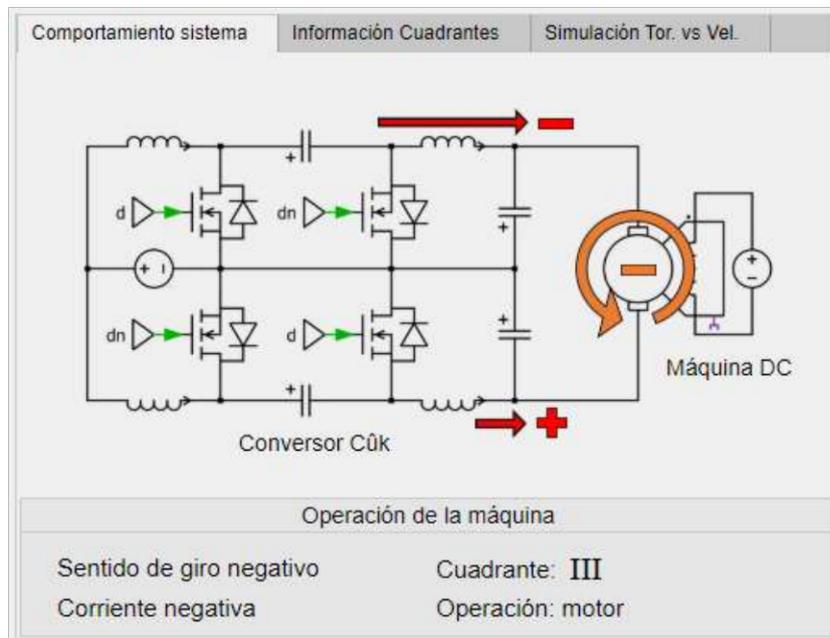


Figura AI.9 Convertor entregando energía negativa, giro negativo del eje.

Las anteriores gráficas muestran cuando la máquina opera como motor, quiere decir que la máquina se alimenta con energía, cuyo intermediario es el convertidor.

En el caso de que la máquina opere como generador, las siguientes gráficas servirán de ayuda visual.

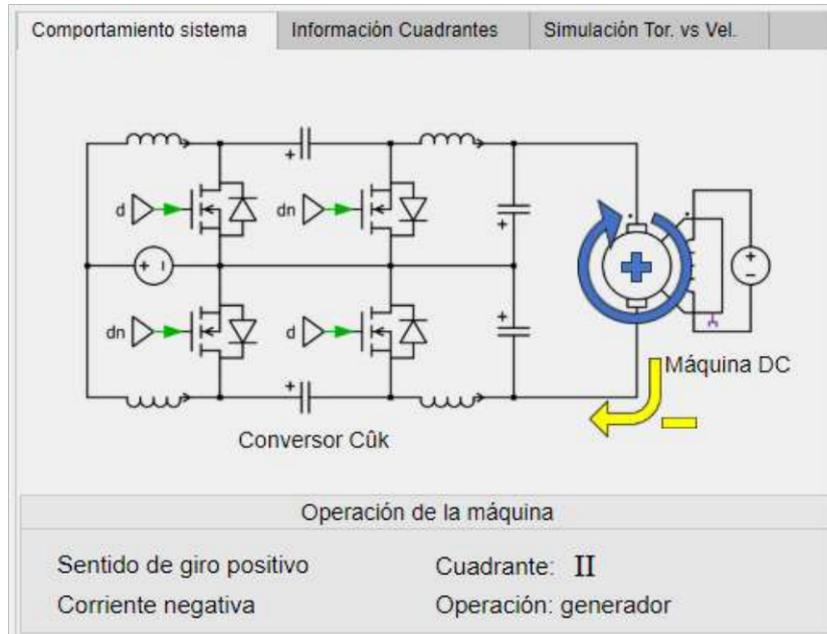


Figura AI.10 Convertor recibiendo energía negativa, giro positivo del eje.

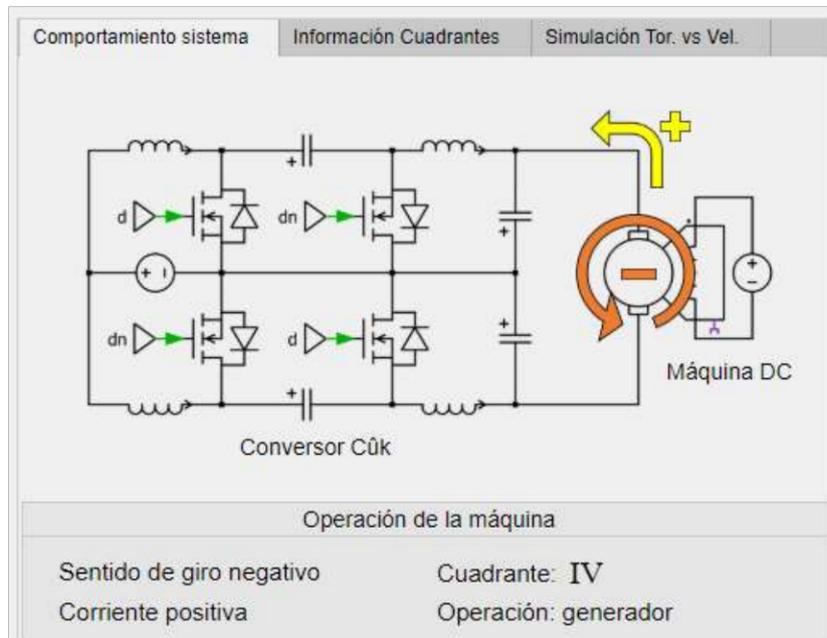


Figura AI.11 Convertor recibiendo energía positiva, giro negativo del eje.

En estas figuras se observa que ya no hay flechas rojas, ya que el convertor permite que la energía sea entregada por la máquina, debido que la máquina está operando como generador, la energía atraviesa al convertor por su cualidad bidireccional.

Además, se cuenta con un texto en la parte inferior que muestra en qué cuadrante se opera y cuál es el comportamiento de la máquina en ese instante.

Se cuenta con dos pestañas, la primera, muestra una gráfica referencial y la segunda, el comportamiento en línea en el plano Torque vs Velocidad. Tal como se presenta a continuación.

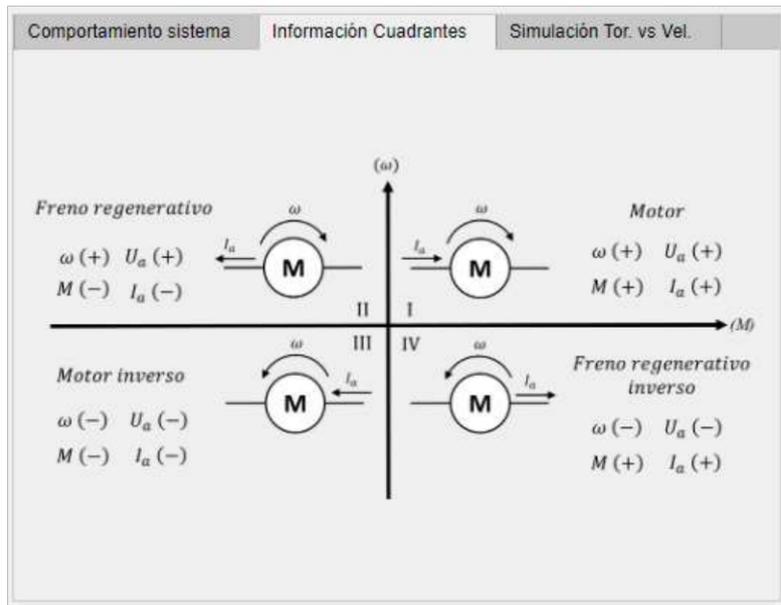


Figura AI.12 Comportamiento cuatro cuadrantes.

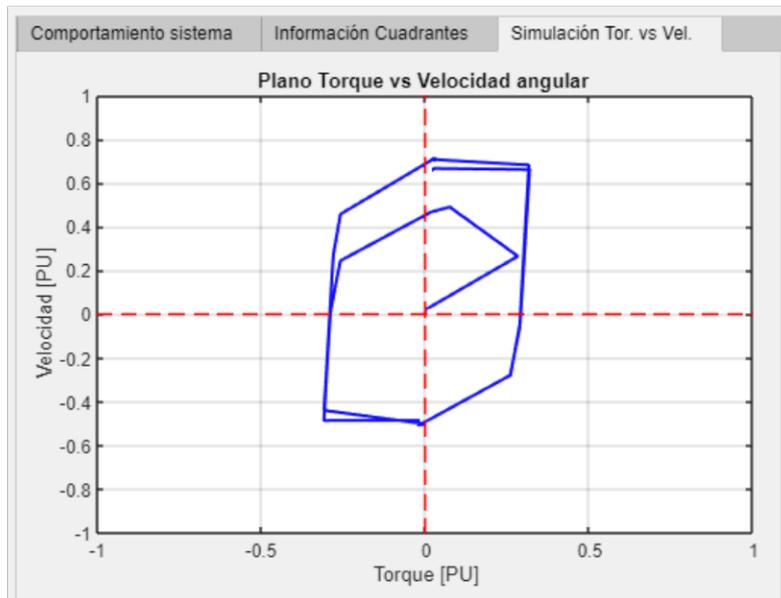


Figura AI.13 Simulación torque vs velocidad.

Modelo 3D vehículo móvil

Como se pudo apreciar en figuras anteriores, se cuenta con un vehículo móvil en tres dimensiones, este vehículo es parte de un laboratorio virtual desarrollado por Brian Hong, el bloque del vehículo cuenta con una entrada que es la velocidad con la que se desea que opere, además de las opciones de la trayectoria a seguir.

Para el uso de este vehículo se cuenta con la licencia y permiso de Matlab, bajo la cita de:

Brian Hong (2022). Virtual Hardware and Labs for Controls (<https://github.com/MathWorks-Teaching-Resources/Virtual-Controls-Laboratory/releases/tag/v1.0.0>), GitHub. Retrieved January 11, 2022.

El vehículo se lo puede observar en la Figura A1.14.

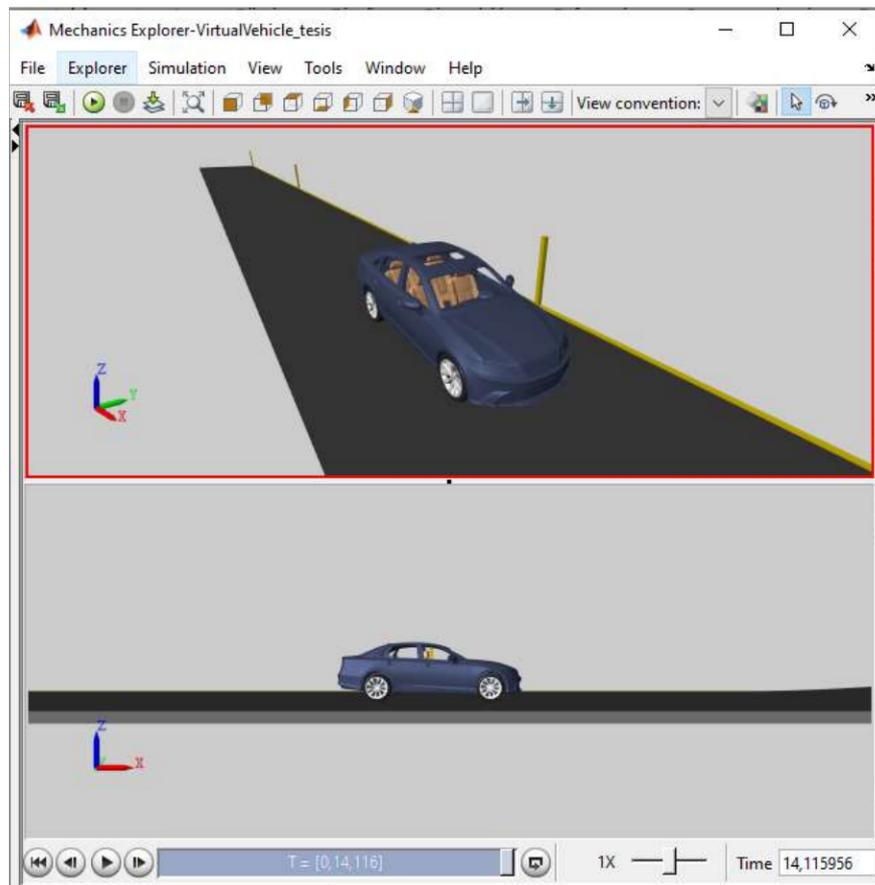


Figura A1.14 Modelo del vehículo 3D observado mediante Mechanics Explorer.

Una vez finalizada la simulación aparece un botón que permite observar los resultados de todo el tiempo de simulación, el cual se muestra en la Figura A1.15.



Figura AI.15 Aparición de botón RESULTADOS.

Al presionar el botón RESULTADOS se despliega la siguiente ventana:

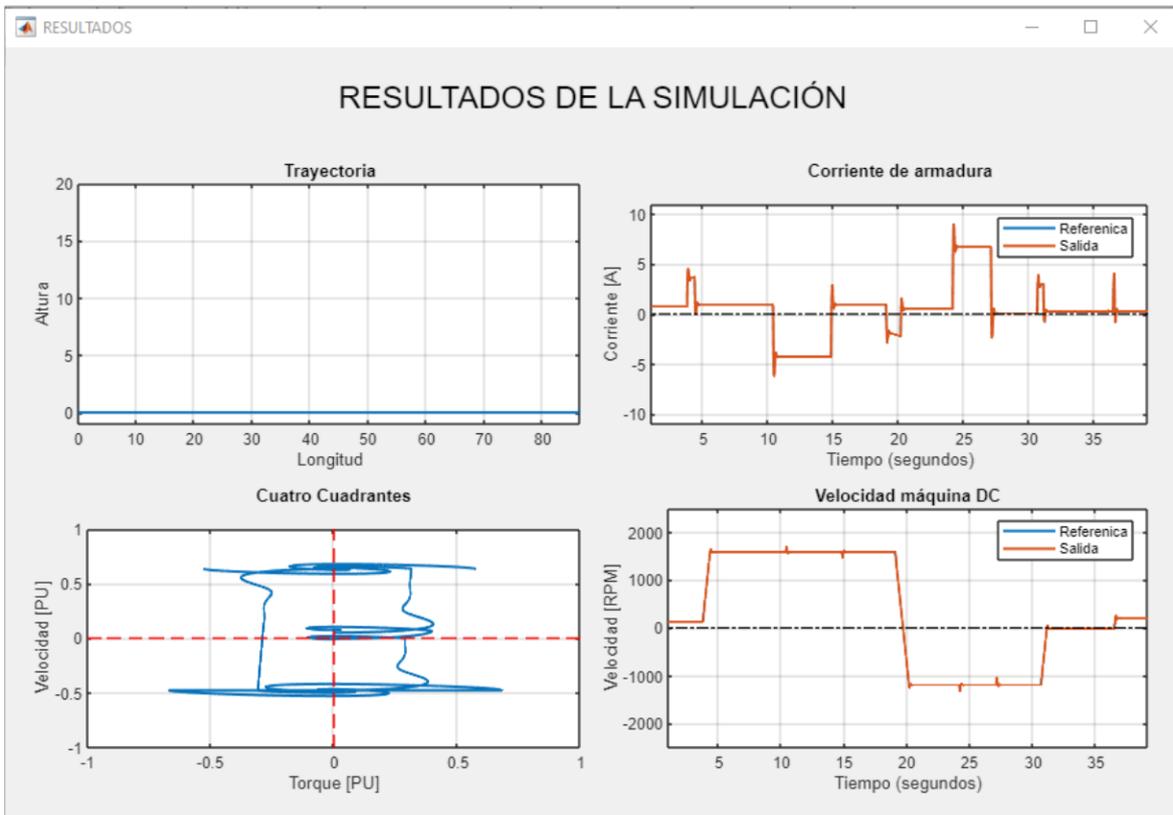


Figura AI.16 Ventana de los resultados finales.

De la Figura AI.16 se observan cuatro gráficas las cuales se describen a continuación:

Al usar App Designer para el diseño de esta simulación, se pueden hacer varias cosas con las gráficas realizadas, estas actúan como la función plot del Command Window.

Trayectoria

La altura de la trayectoria es aleatoria, pero el valor máximo que puede alcanzar es de 16 metros. La pendiente de la altura de la colina es la carga del eje de la máquina DC, la cual se puede visualizar en el indicador de la corriente de armadura ya que la corriente es proporcional al torque de la máquina.

Corriente de armadura

El control en cascada cuenta con un lazo interno para la variable rápida la cual es la corriente, además el circuito de armadura de la máquina DC soporta hasta 9 A. por eso es importante observar el comportamiento de la corriente de armadura.

Cuatro cuadrantes

Una manera rápida para observar que la máquina está operando en los cuatro cuadrantes, es relacionando la velocidad angular del eje y el torque del eje, por eso se grafica el Torque vs La velocidad angular.

Velocidad de la máquina

La última gráfica permite observar como la máquina no pierde la velocidad referencial. Por eso, se grafica la velocidad de la máquina y la referencia de esta. Para una mejor visualización se realiza un acercamiento con las herramientas que este bloque posee, tal como se visualiza en la siguiente figura.

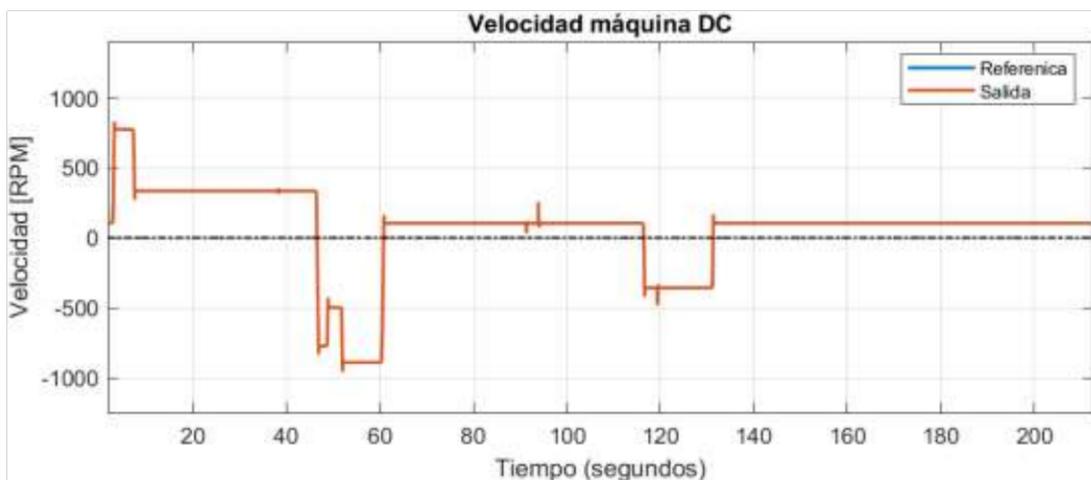


Figura AI.17 Velocidad y menú de la imagen.

Con la ayuda del menú de la imagen se pueden realizar varias funciones, entre estas: guardar o copiar una imagen, acercar o alejar zonas, en la Figura Al.18 se coloca un ejemplo de un acercamiento de la figura anterior.

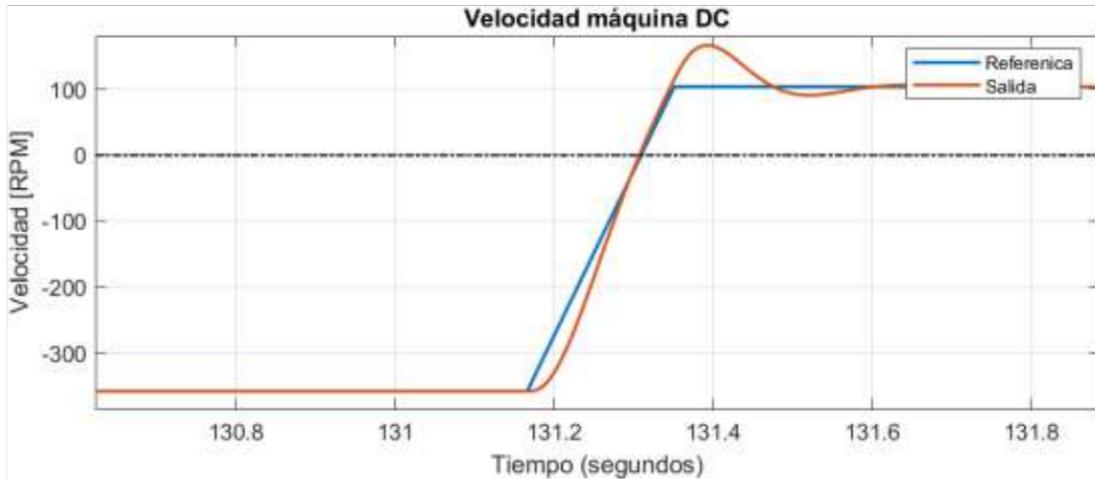


Figura Al.18 Acercamiento de la velocidad en el intervalo de tiempo mostrado en la amplitud requerida.

NOTA

La ventana RESULTADOS, solo se puede abrir al finalizar la simulación.

La trayectoria no es infinita, por lo que, se puede salir de la longitud total que esta puede tener.

ANEXO II

Hoja de datos de los inductores

Hoja de datos de los capacitores

Hoja de datos del semiconductor escogido

Hoja de datos de la máquina DC

Hoja de datos del sensor de Corriente

Hoja de datos del sensor de velocidad

AC Line Filters

Common Mode SCR-XV Coils, Automotive Grade



Overview

The KEMET SCR-XV coils are common mode chokes with a wide variety of characteristics for automotive & harsh environment industrial application. These toroidal coils are designed with our proprietary high permeability ferrite S15H cores and are useful in various noise countermeasure fields.

Applications

- On board charger for EV/PHEV
- Wireless charging systems with 85 kHz
- Medium power drives for steering, air conditioning and mild hybrid 48 V systems
- High voltage automotive and harsh environment industrial EMI filtering

Benefits

- Proprietary S15H ferrite material
- High rated voltage up to 1,000 V AC/DC
- Operating temperature range from -40°C to +120°C
- High permeability
- High impedance
- UL 94 V-0 flame retardant rated base and cap
- AEC-Q200 qualified

SCR**XV-JV



SCR**XV-JH



Part Number System

SCR	19XV	080-	1R0	A	011	J
Series	Dimension Code (See Dimensions)	Rated Current (A)	Wire Diameter (mm)	Windings	Number of Turns	Terminal Base Type
SCR	19XV 25XV 29XV	xxx = xx.x A Examples: 080 = 8.0 A 200 = 20.0 A	R = Decimal point Examples: 1R0 = 1.0 mm 2R4 = 2.4 mm	A = Single	00x = x turns 0xx = xx turns Examples: 005 = 5 turns 011 = 11 turns	JV = Vertical type JH = Horizontal type

Table 1 – Ratings & Part Number Reference cont.

Part Number	Rated Voltage AC/DC (V)	Rated Current (A)	Inductance ¹ (mH) ±35%	DC Resistance/ Line (mΩ) ±13%	Temperature Rise (K) Maximum	Wire Diameter (mm)	Weight (g) Approximate
SCR25XV-050-1R0A022JH	1000	5	8.900	32.400	45	1.0	47.1
SCR25XV-070-1R1A022JH	1000	7	5.900	21.350	55	1.1	47.1
SCR25XV-090-1R2A016JH	1000	8	4.000	13.500	50	1.2	47.3
SCR25XV-100-1R3A016JH	1000	10	3.100	12.270	55	1.3	48.1
SCR25XV-110-1R4A013JH	1000	11	2.100	7.600	50	1.4	47.3
SCR25XV-130-1R5A012JH	1000	13	1.770	6.430	55	1.5	49.0
SCR25XV-150-1R6A018JH	1000	15	1.230	4.740	50	1.6	47.9
SCR25XV-170-1R7A09JH	1000	17	1.000	3.830	55	1.7	48.8
SCR25XV-190-1R8A008JH	1000	19	0.780	3.070	55	1.8	48.7
SCR25XV-220-1R9A007JH	1000	22	0.660	2.450	55	1.9	48.6
SCR25XV-240-2R0A006JH	1000	24	0.440	1.520	55	2.0	48.1
SCR25XV-280-2R1A005JH	1000	28	0.310	1.440	55	2.1	46.3
SCR25XV-310-2R3A004JH	1000	31	0.197	1.000	50	2.3	48.2
SCR25XV-350-2R4A003JH	1000	35	0.116	0.700	50	2.4	43.5
SCR29XV-050-1R0A044JV	1000	5	11.800	40.300	55	1.0	44.7
SCR29XV-060-1R1A036JV	1000	6	7.900	27.200	55	1.1	45.0
SCR29XV-070-1R2A030JV	1000	7	5.500	19.200	50	1.2	45.1
SCR29XV-090-1R3A026JV	1000	8	4.130	14.200	45	1.3	45.4
SCR29XV-090-1R4A022JV	1000	9	2.950	10.200	40	1.4	45.6
SCR29XV-110-1R5A019JV	1000	11	2.200	8.000	45	1.5	45.8
SCR29XV-120-1R6A017JV	1000	12	1.760	6.430	40	1.6	46.3
SCR29XV-150-1R7A015JV	1000	15	1.370	5.040	55	1.7	46.7
SCR29XV-180-1R8A013JV	1000	18	1.040	3.990	60	1.8	46.4
SCR29XV-190-1R9A012JV	1000	19	0.880	3.280	55	1.9	47.5
SCR29XV-200-2R0A011JV	1000	20	0.740	2.730	50	2.0	48.4
SCR29XV-210-2R1A010JV	1000	21	0.610	2.300	45	2.1	48.1
SCR29XV-250-2R2A008JV	1000	25	0.390	1.680	50	2.2	45.1
SCR29XV-270-2R3A006JV	1000	27	0.220	1.190	45	2.3	41.1
SCR29XV-300-2R4A005JV	1000	30	0.153	0.930	45	2.4	39.3
SCR29XV-050-1R0A044JH	1000	5	11.800	39.900	55	1.0	45.4
SCR29XV-060-1R1A036JH	1000	6	7.900	27.400	55	1.1	46.2
SCR29XV-070-1R2A030JH	1000	7	5.500	19.200	50	1.2	46.1
SCR29XV-090-1R3A026JH	1000	8	4.130	14.200	45	1.3	46.8
SCR29XV-090-1R4A022JH	1000	9	2.950	10.600	40	1.4	46.8
SCR29XV-110-1R5A019JH	1000	11	2.200	8.070	45	1.5	47.2
SCR29XV-120-1R6A017JH	1000	12	1.760	6.450	40	1.6	47.0
SCR29XV-150-1R7A015JH	1000	15	1.370	5.140	55	1.7	48.8
SCR29XV-180-1R8A013JH	1000	18	1.040	4.100	60	1.8	47.0
SCR29XV-190-1R9A012JH	1000	19	0.880	3.330	55	1.9	48.9
SCR29XV-200-2R0A011JH	1000	20	0.740	2.840	50	2.0	49.6
SCR29XV-210-2R1A010JH	1000	21	0.610	2.330	45	2.1	50.0
SCR29XV-250-2R2A008JH	1000	25	0.390	1.660	50	2.2	46.7
SCR29XV-270-2R3A006JH	1000	27	0.220	1.180	45	2.3	42.1
SCR29XV-300-2R4A005JH	1000	30	0.153	0.920	45	2.4	40.4

¹Inductance Measurement Condition: 100 kHz

Hoja de datos del capacitor (10uF)

Type BLH, DC Link Capacitors for Harsh Environments

85 °C / 85% RH , 1500h @ Vr, AEC-Q200 Qualified



Type BLH DC Link capacitors use the most advanced construction and technology to meet the challenges of harsh environments. Tested for 1,500-hour at 85 °C / 85% relative humidity with rated voltage applied (50% greater than competitive THB test life). The series is qualified to automotive-grade electrical and mechanical testing per standard AEC-Q200.

Highlights

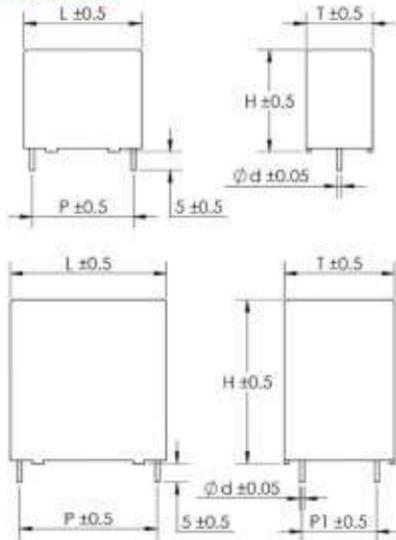
- High capacitance
- High ripple current
- Self-healing and low loss
- THB 85 °C / 85% RH 1500 h at rated voltage

Specifications

Capacitance Range	1 to 170 µF
Capacitance Tolerance	±10% standard , ±5% optional
Rated Voltage	450 to 1200 Vdc
Operating Temperature Range	-40 °C to 105 °C (>85 °C derate voltage 1.35% per °C)
Maximum rms Current	see data tables
Maximum rms Voltage	230 Vac
Test Voltage between Terminals @ 25 °C	150% rated DC voltage for 10 s
Test Voltage between Terminals and Case @ 25°C	3 kVac @ 50/60 Hz for 10 s
Insulation Resistance	≥30,000 MΩxµF @ 100 Vdc 25 °C after 1 minute
Life Expectancy	100,000 h @ 70°C hot spot, rated voltage
THB Rating	85 °C / 85% RH - rated voltage - 1500 h
Reference Standards	IEC 61071, AEC- Q200 qualified (as noted)

RoHS Compliant

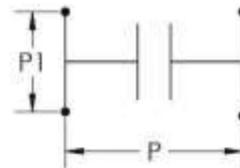
Dimensions



Construction Details

Case Material	Plastic UL94V-0
Resin Material	Dry Resin UL94V-0
Terminal Material	Tin Plated Copper

 UL Recognized E128034
construction only - unprotected



Type BLH, DC Link Capacitors for Harsh Environments

85 °C / 85% RH , 1500h @ Vr, AEC-Q200 Qualified

Part Number	Cap C (µF)	Typ ESR 10 kHz (mΩ)	Thermal Res (°C/W)	Irms 10 kHz 70 °C (A)	Typ ESL (nH)	dv/dt (V/µs)	Peak Current (A)	Dimensions						AEC Q200
								L (mm)	H (mm)	T (mm)	P (mm)	P1 (mm)	d (mm)	
450 Vdc														
BLH606K451C064	60	4.5	9.2	16.5	30	35	2100	57.5	45	30	52.5	20.3	1.2	Yes
BLH606K451B104	60	4	8.6	16.5	30	35	2100	42.5	45	30	37.5	20.3	1.2	Yes
BLH806K451C064	80	4	7.4	16	35	20	1600	57.5	45	30	52.5	20.3	1.2	Yes
BLH107K451C084	100	3.8	6.2	18	35	20	2000	57.5	50	35	52.5	20.3	1.2	Yes
BLH137K451C124	130	3.5	5.5	22	35	20	2600	57.5	60	35	52.5	20.3	1.2	*
BLH147K451C134	140	3.4	5.4	24	35	20	2800	57.5	65	35	52.5	20.3	1.2	*
BLH157K451C154	150	3.2	5.2	26	35	20	3000	57.5	70	35	52.5	20.3	1.2	*
BLH167K451C164	160	3.1	5.0	28	35	20	3200	57.5	80	35	52.5	20.3	1.2	*
BLH177K451C164	170	3	4.8	30	35	20	3400	57.5	80	35	52.5	20.3	1.2	*
550 Vdc														
BLH305K551A022	3	28	22.3	4	25	60	180	32	20	11	27.5	\	0.8	Yes
BLH505K551A032	5	14	16.8	6	25	60	300	32	22	13	27.5	\	0.8	Yes
BLH805K551A052	8	12.5	12.6	8.5	25	60	480	32	28	14	27.5	\	0.8	Yes
BLH106K551A072	10	8	12.5	10	25	60	600	32	33	18	27.5	\	0.8	Yes
BLH156K551A082	15	6.5	9.1	12	28	60	900	32	37	22	27.5	\	0.8	Yes
BLH156K551A084	15	5.5	8.1	13	28	60	900	32	37	22	27.5	10.2	1.2	Yes
BLH156K551B012	15	6.5	8.3	10.5	28	60	900	42.5	18	24	37.5	\	1	Yes
BLH206K551B084	20	6.5	9.8	12.5	30	35	700	42.5	40	20	37.5	10.2	1.2	Yes
BLH226K551B084	22	6.5	8.4	13.5	30	35	770	42.5	40	20	37.5	10.2	1.2	Yes
BLH256K551B084	25	6.5	7.3	14.5	30	35	875	42.5	40	20	37.5	10.2	1.2	Yes
BLH306K551B094	30	6	6.5	16	30	35	1050	42.5	44	24	37.5	10.2	1.2	Yes
BLH356K551B104	35	6	5.1	18	30	35	1225	42.5	45	30	37.5	20.3	1.2	Yes
BLH406K551B104	40	5.5	5.1	18	30	35	1400	42.5	45	30	37.5	20.3	1.2	Yes
BLH406K551C014	40	5.8	5.2	16	30	35	1400	57.5	22	43	52.5	20.3	1.2	Yes
BLH506K551B114	50	5	5.0	20	30	35	1750	42.5	50	35	37.5	20.3	1.2	Yes
BLH606K551C064	60	4.8	6.2	18	35	20	1200	57.5	45	30	37.5	20.3	1.2	Yes
BLH756K551C084	75	5	5.0	20	35	20	1500	57.5	50	35	52.5	20.3	1.2	Yes
BLH107K551C114	100	4.5	3.9	24	35	20	2000	57.5	55	45	52.5	20.3	1.2	Yes
BLH117K551C114	110	4	3.7	26	35	20	2200	57.5	55	45	52.5	20.3	1.2	Yes
BLH137K551C124	130	3.4	5.4	23	35	20	2600	57.5	60	35	52.5	20.3	1.2	*
BLH147K551C134	140	3.3	5.3	25	35	20	2800	57.5	65	35	52.5	20.3	1.2	*
BLH157K551C154	150	3.1	5.0	27	35	20	3000	57.5	70	35	52.5	20.3	1.2	*
BLH167K551C164	160	3	4.8	29	35	20	3200	57.5	80	35	52.5	20.3	1.2	*
BLH177K551C164	170	2.8	4.7	32	35	20	3400	57.5	80	35	52.5	20.3	1.2	*
600 Vdc														
BLH305K601A022	3	28	22.3	4	25	60	180	32	20	11	27.5	\	0.8	Yes
BLH405K601A022	4	26	14.3	5	25	60	240	32	20	11	27.5	\	0.8	Yes
BLH505K601A052	5	14.5	26.5	6	25	60	300	32	28	14	27.5	\	0.8	Yes
BLH805K601A052	8	12	17.8	7.5	25	60	480	32	28	14	27.5	\	0.8	Yes
BLH106K601A072	10	7.5	19.8	8.5	25	60	600	32	33	18	27.5	\	0.8	Yes

*AEC Q200 may be available

CDE Cornell Dubilier • 1605 East Rodney French Blvd • New Bedford, MA 02744 • Phone: (508)996-8561 • Fax: (508)996-3830

Hoja de datos del capacitor (120nF)

Polypropylene Pulse/High Frequency Capacitors

R76, Double Metallized Polypropylene Film, Radial, DC and Pulse Applications (Automotive Grade)



Overview

The R76 series is constructed of polypropylene film and double metallized polyester film as electrodes with radial leads of tinned wire. The radial leads are electrically welded to the metal layer on the ends of the capacitor winding. The capacitor is encapsulated in a self-extinguishing solvent resistant plastic case with thermosetting resin material meeting UL 94 V-0 requirements. Two different winding constructions are used depending on voltage parameters. Please see the Performance Characteristics for more information.

Automotive grade devices (up to lead spacing 22.5 mm) meet the demanding Automotive Electronics Council's AEC-Q200 qualification requirements.

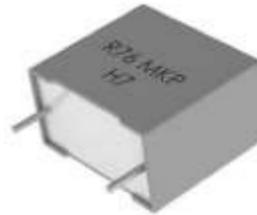
Applications

Typical applications include resonant circuit, high frequency high current, snubber and silicon-controlled rectifier (SCR and IGBT) and SiC (e.g. MOSFET) commutation circuits as well as applications with high voltage and high current.

Not suitable for across-the-line application (see Suppressor Capacitors).

Benefits

- Voltage range: 250 – 2,000 VDC
- Capacitance range: 100 pF – 12 μF
- Lead Spacing: 7.5 mm – 37.5 mm
- Capacitance tolerance: ±2.5%, ±5%, ±10%
- Climatic category: 55/110/56 IEC 60068-1
- Operating temperature range of -55°C to +110°C
- RoHS compliance and lead-free terminations
- Tape & Reel packaging in accordance with IEC 60286-2
- Self-healing
- Automotive (AEC-Q200) grades available up to lead spacing 22.5 mm



Part Number System

R76	I	D	1680	SE	30	K	
Series	Rated Voltage (VDC)	Lead Spacing (mm)	Capacitance Code (pF)	Packaging	Internal Use	Capacitance Tolerance	
Double Metallized Polypropylene	I = 250	D = 7.5	The last three digits represent significant figures.	See Ordering Options Table	00	50	H = ±2.5% (*)
	M = 400	F = 10			10	60	J = ±5%
	P = 630	I = 15	20		70	K = ±10%	
	Q = 1,000	N = 22.5	30		80	(*) = for C ≥ 1,000 pF	
	T = 1,600	R = 27.5	40		L0		
U = 2,000	W = 37.5	The first digit specifies the total number of zeros to be added.					

Built Into Tomorrow

© KEMET Electronics Corporation • KEMET Tower • One East Broward Boulevard
Fort Lauderdale, FL 33301 USA • 954-766-2800 • www.kemet.com

F3034_R76 • 9/13/2021 1

Table 1 – Ratings & Part Number Reference cont.

VDC	VAC	Cap Value (µF)	Dimensions in mm			Lead Spacing (S)	dV/dt (V/µs)	Max K _v (V ² /µs)	I _{sur}	ESL	ESR _{max}	I _{max} (*)	Rth	KEMET Internal Part Number	Customer Part Number
			Lead Length 2x 4 mm	at 100 kHz	at 100 kHz 85°C					R _{th}					
											A ₂₅	nH	mΩ		
T	H	L	A ₂₅	nH	mΩ	A _{max}	(°C/W)								
1,000	600	0.039	6.0	15.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	82	16	18	5.3	43	76QN2390(1)30(2)	R76QN2390(1)30(2)
1,000	600	0.047	6.0	15.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	99	16	14	5.8	43	76QN2470(1)50(2)	R76QN2470(1)50(2)
1,000	600	0.047	7.0	16.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	99	15	14	6.0	41	76QN2470(1)30(2)	R76QN2470(1)30(2)
1,000	600	0.056	6.0	15.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	118	16	20	4.8	43	76QN2560(1)50(2)	R76QN2560(1)50(2)
1,000	600	0.056	7.0	16.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	118	16	20	4.9	41	76QN2560(1)30(2)	R76QN2560(1)30(2)
1,000	600	0.068	7.0	16.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	143	16	18	5.5	41	76QN2640(1)50(2)	R76QN2640(1)50(2)
1,000	600	0.068	8.5	17.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	143	16	16	5.6	38	76QN2640(1)30(2)	R76QN2640(1)30(2)
1,000	600	0.082	7.0	16.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	172	16	14	6.0	41	76QN2820(1)50(2)	R76QN2820(1)50(2)
1,000	600	0.082	10.0	18.5	26.5	22.5	2,100	4,200,000	172	16	14	6.4	36	76QN2820(1)30(2)	R76QN2820(1)30(2)
1,000	600	0.1	8.5	17.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	210	16	11	6.8	38	76QN3100(1)50(2)	R76QN3100(1)50(2)
1,000	600	0.1	10.0	18.5	26.5	22.5	2,100	4,200,000	210	16	11	7.1	36	76QN3100(1)30(2)	R76QN3100(1)30(2)
1,000	600	0.12	8.5	17.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	252	16	20	6.1	38	76QN3120(1)50(2)	R76QN3120(1)50(2)
1,000	600	0.12	11.0	20.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	252	16	20	5.4	34	76QN3120(1)30(2)	R76QN3120(1)30(2)
1,000	600	0.15	10.0	18.5	26.5	22.5	2,100	4,200,000	315	16	16	5.9	36	76QN3150(1)50(2)	R76QN3150(1)50(2)
1,000	600	0.15	13.0	22.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	315	16	16	6.3	31	76QN3150(1)30(2)	R76QN3150(1)30(2)
1,000	600	0.18	11.0	20.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	378	16	13	6.7	34	76QN3180(1)50(2)	R76QN3180(1)50(2)
1,000	600	0.22	11.0	20.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	462	16	11	7.4	34	76QN3220(1)50(2)	R76QN3220(1)50(2)
1,000	600	0.27	13.0	22.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	567	16	9	8.5	31	76QN3270(1)50(2)	R76QN3270(1)50(2)
1,000	600	0.33	13.0	22.0	26.5	22.5	2,100	4,200,000	693	16	7	9.4	31	76QN3330(1)50(2)	R76QN3330(1)50(2)
1,000	600	0.1	9.0	17.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	108	18	11	7.2	35	76QR3100(1)40(2)	R76QR3100(1)40(2)
1,000	600	0.12	9.0	17.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	128	18	20	5.4	35	76QR320(1)40(2)	R76QR320(1)40(2)
1,000	600	0.15	11.0	20.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	150	18	16	6.3	31	76QR3150(1)30(2)	R76QR3150(1)30(2)
1,000	600	0.18	13.0	22.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	160	18	13	7.2	29	76QR3180(1)30(2)	R76QR3180(1)30(2)
1,000	600	0.18	24.0	35.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	160	18	13	7.5	27	76QR3180(1)L0(2)	R76QR3180(1)L0(2)
1,000	600	0.22	13.0	22.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	220	18	11	8.0	29	76QR3220(1)30(2)	R76QR3220(1)30(2)
1,000	600	0.22	24.0	35.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	220	18	11	8.2	27	76QR3220(1)L0(2)	R76QR3220(1)L0(2)
1,000	600	0.27	13.0	25.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	270	18	9	9.0	28	76QR3270(1)40(2)	R76QR3270(1)40(2)
1,000	600	0.27	24.0	35.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	270	18	9	9.1	27	76QR3270(1)L0(2)	R76QR3270(1)L0(2)
1,000	600	0.33	14.0	26.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	330	18	7	10.3	26	76QR3330(1)30(2)	R76QR3330(1)30(2)
1,000	600	0.39	18.0	33.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	390	18	8	10.3	23	76QR3390(1)30(2)	R76QR3390(1)30(2)
1,000	600	0.47	18.0	33.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	470	18	7	11.3	23	76QR3470(1)30(2)	R76QR3470(1)30(2)
1,000	600	0.56	22.0	37.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	560	18	6	13.0	21	76QR3560(1)30(2)	R76QR3560(1)30(2)
1,000	600	0.68	22.0	37.0	32.0	27.5	1,000	2,000,000	680	18	7	11.7	21	76QR3680(1)30(2)	R76QR3680(1)30(2)
1,000	600	0.18	11.0	22.0	41.5	37.5	500	1,000,000	90	20	13	7.5	27	76QW3180(1)30(2)	R76QW3180(1)30(2)
1,000	600	0.22	11.0	22.0	41.5	37.5	500	1,000,000	110	20	11	8.2	27	76QW3220(1)30(2)	R76QW3220(1)30(2)
1,000	600	0.27	13.0	24.0	41.5	37.5	500	1,000,000	135	20	9	9.5	25	76QW3270(1)30(2)	R76QW3270(1)30(2)
1,000	600	0.27	24.0	35.0	41.5	37.5	500	1,000,000	135	20	9	9.6	24	76QW3270(1)L0(2)	R76QW3270(1)L0(2)
1,000	600	0.33	13.0	24.0	41.5	37.5	500	1,000,000	165	20	7	10.5	25	76QW3330(1)30(2)	R76QW3330(1)30(2)
1,000	600	0.33	24.0	35.0	41.5	37.5	500	1,000,000	165	20	7	10.6	24	76QW3330(1)L0(2)	R76QW3330(1)L0(2)
1,000	600	0.39	16.0	26.5	41.5	37.5	500	1,000,000	195	20	8	10.4	23	76QW3390(1)30(2)	R76QW3390(1)30(2)
1,000	600	0.39	24.0	35.0	41.5	37.5	500	1,000,000	195	20	8	10.0	24	76QW3390(1)L0(2)	R76QW3390(1)L0(2)
1,000	600	0.47	16.0	26.5	41.5	37.5	500	1,000,000	235	20	7	11.4	23	76QW3470(1)30(2)	R76QW3470(1)30(2)
1,000	600	0.47	24.0	35.0	41.5	37.5	500	1,000,000	235	20	7	11.4	23	76QW3470(1)L0(2)	R76QW3470(1)L0(2)
1,000	600	0.56	16.0	26.5	41.5	37.5	500	1,000,000	280	20	6	12.5	23	76QW3560(1)30(2)	R76QW3560(1)30(2)
1,000	600	0.56	24.0	35.0	41.5	37.5	500	1,000,000	280	20	6	12.4	23	76QW3560(1)L0(2)	R76QW3560(1)L0(2)
1,000	600	0.68	19.0	32.0	41.5	37.5	500	1,000,000	340	20	7	11.7	21	76QW3680(1)30(2)	R76QW3680(1)30(2)
1,000	600	0.82	20.0	40.0	41.5	37.5	500	1,000,000	410	20	6	13.5	19	76QW3820(1)30(2)	R76QW3820(1)30(2)
1,000	600	1	20.0	40.0	41.5	37.5	500	1,000,000	500	20	5.8	13.8	18	76QW4100(1)50(2)	R76QW4100(1)50(2)
1,000	600	1.2	24.0	44.0	41.5	37.5	500	1,000,000	600	20	5.3	14.8	17	76QW4120(1)30(2)	R76QW4120(1)30(2)

(1) Insert lead and packaging code. See Ordering Options Table for available options.

(2) H = 2.5% (only for C ≥ 1,000 pF), J = 5%, K = 10%

(*) I_{sur} value that leads to a ΔT of 20°C in the hot spot > T_{amb} + ΔT = 85°C + 20°C = 105°C

Hoja de datos del semiconductor escogido



APT29F100B2
APT29F100L

1000V, 30A, 0.44Ω Max, $t_{rr} \leq 270ns$

N-Channel FREDFET

Power MOS 8™ is a high speed, high voltage N-channel switch-mode power MOSFET. This 'FREDFET' version has a drain-source (body) diode that has been optimized for high reliability in ZVS phase shifted bridge and other circuits through reduced t_{rr} , soft recovery, and high recovery dV/dt capability. Low gate charge, high gain, and a greatly reduced ratio of C_{TSS}/C_{ISS} result in excellent noise immunity and low switching loss. The intrinsic gate resistance and capacitance of the poly-silicon gate structure help control dV/dt during switching, resulting in low EMI and reliable paralleling, even when switching at very high frequency.



APT29F100B2 APT29F100L



FEATURES

- Fast switching with low EMI
- Low t_{rr} for high reliability
- Ultra low C_{TSS} for improved noise immunity
- Low gate charge
- Avalanche energy rated
- RoHS compliant

TYPICAL APPLICATIONS

- ZVS phase shifted and other full full bridge
- Half bridge
- PFC and other boost converter
- Buck converter
- Single and two switch forward
- Flyback

Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Ratings	Unit
I_D	Continuous Drain Current @ $T_C = 25^\circ C$	30	A
	Continuous Drain Current @ $T_C = 100^\circ C$	19	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ^①	120	
V_{GS}	Gate-Source Voltage	±30	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ^②	1875	mJ
I_{AR}	Avalanche Current, Repetitive or Non-Repetitive	18	A

Thermal and Mechanical Characteristics

Symbol	Characteristic	Min	Typ	Max	Unit
P_D	Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ C$			1040	W
$R_{\theta JC}$	Junction to Case Thermal Resistance			0.12	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case to Sink Thermal Resistance, Flat, Greased Surface		0.11		
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55		150	°C
T_L	Soldering Temperature for 10 Seconds (1.6mm from case)			300	
W_T	Package Weight		0.22		oz
			6.2		g
Torque	Mounting Torque (TO-264 Package), 4-40 or M3 screw			10	in-lbf
				1.1	N.m

Microsemi Website - <http://www.microsemi.com>

050-8078 Rev D 8-2011

Static Characteristics $T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified **APT29F100B2 L**

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
$V_{BR(DSS)}$	Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$	1000			V
$\Delta V_{BR(DSS)}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temperature Coefficient	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D = 250\mu A$		1.15		$V/^\circ\text{C}$
$R_{DS(on)}$	Drain-Source On Resistance ^②	$V_{GS} = 10V, I_D = 16A$		0.37	0.44	Ω
$V_{GS(th)}$	Gate-Source Threshold Voltage	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 2.5mA$	2.5	4	5	V
$\Delta V_{GS(th)}/\Delta T_J$	Threshold Voltage Temperature Coefficient			-10		$mV/^\circ\text{C}$
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current	$V_{DS} = 1000V, T_J = 25^\circ\text{C}$ $V_{GS} = 0V, T_J = 125^\circ\text{C}$			250	μA
I_{SSS}	Gate-Source Leakage Current	$V_{GS} = \pm 30V$			± 100	nA

Dynamic Characteristics $T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
g_{fs}	Forward Transconductance	$V_{GS} = 50V, I_D = 16A$		34		S
C_{iss}	Input Capacitance	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 25V$ $f = 1MHz$		8500		pF
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance			115		
C_{oss}	Output Capacitance			715		
$C_{out(Ch)}$	Effective Output Capacitance, Charge Related	$V_{GS} = 0V, V_{DS} = 0V$ to $667V$		290		pF
$C_{out(E)}$	Effective Output Capacitance, Energy Related			150		
Q_g	Total Gate Charge	$V_{GS} = 0$ to $10V, I_D = 16A,$ $V_{DS} = 500V$		260		nC
Q_{gs}	Gate-Source Charge			46		
Q_{gd}	Gate-Drain Charge			125		
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	Resistive Switching $V_{DS} = 667V, I_D = 16A$ $R_G = 2.2\Omega$ ^③ , $V_{GS} = 15V$		39		ns
t_r	Current Rise Time			35		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time			130		
t_f	Current Fall Time			33		

Source-Drain Diode Characteristics

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit	
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode (body diode)			30	A	
I_{SW}	Pulsed Source Current (Body Diode) ^③				120		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	$I_{SD} = 16A, T_J = 25^\circ\text{C}, V_{GS} = 0V$			1.2	V	
t_{rr}	Reverse Recovery Time	$I_{SD} = 16A$ ^④ $di_{SD}/dt = 100A/\mu s$	$T_J = 25^\circ\text{C}$	230	270	ns	
			$T_J = 125^\circ\text{C}$		500		640
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge		$T_J = 25^\circ\text{C}$		13		μC
			$T_J = 125^\circ\text{C}$		35		
I_{rrm}	Reverse Recovery Current		$T_J = 25^\circ\text{C}$		11		A
		$T_J = 125^\circ\text{C}$		15			
dv/dt	Peak Recovery dv/dt	$I_{SD} \leq 16A, di_{SD} \leq 1000A/\mu s, V_{DS} = 667V,$ $T_J = 125^\circ\text{C}$			25	V/ns	

① Repetitive Rating: Pulse width and case temperature limited by maximum junction temperature.

② Starting at $T_J = 25^\circ\text{C}, L = 14.65mH, R_G = 25\Omega, I_{AS} = 16A.$

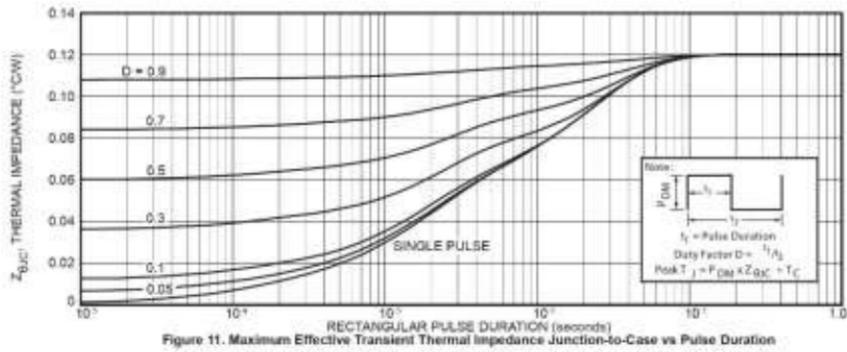
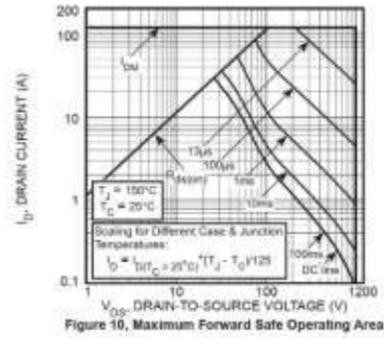
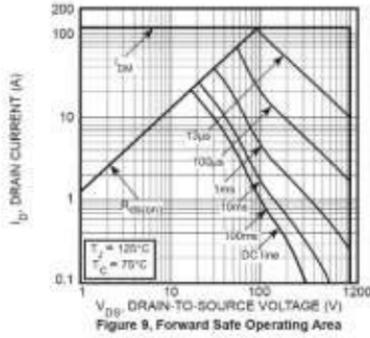
③ Pulse test: Pulse Width < 380 μs , duty cycle < 2%.

④ $C_{out(Ch)}$ is defined as a fixed capacitance with the same stored charge as C_{oss} with $V_{DS} = 67\%$ of $V_{BR(DSS)}$.

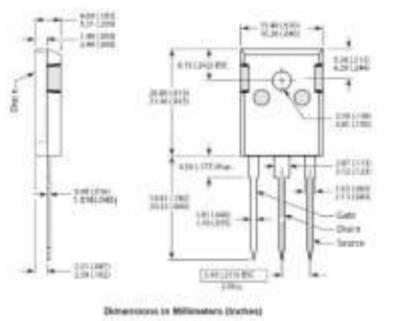
⑤ $C_{out(E)}$ is defined as a fixed capacitance with the same stored energy as C_{oss} with $V_{DS} = 67\%$ of $V_{BR(DSS)}$. To calculate $C_{out(E)}$ for any value of V_{DS} less than $V_{BR(DSS)}$, use this equation: $C_{out(E)} = -2.47E-7/V_{DS}^2 + 4.36E-8/V_{DS} + 8.44E-11.$

⑥ R_G is external gate resistance, not including internal gate resistance or gate driver impedance. (MIC4452)

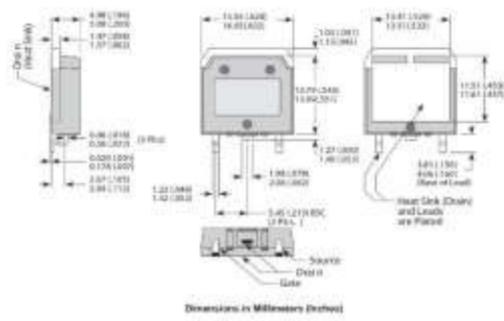
Microsemi reserves the right to change, without notice, the specifications and information contained herein.



TO-247 (B) Package Outline
 SAC: Tin, Silver, Copper



D³PAK Package Outline
 100% Sn Plated



050-8079 Rev D 8-2011

Hoja de datos de la máquina DC

BALDOR • RELIANCE Paquete de información de producto: D5005R - C1811ATZ,5HP,1750RPM,500,300,DPG,F1

Placa 000613006HP	
CAT. NO. D5005R	SPEC. NO. T1851334
FR C1811ATZ	HP 5
ENCL. DP	RPM 1750/2300
ENCL. MOD. GUARDED	VOLTS 500
MAX. SAFE SPEED 04500	AMPS 8.00
	SER. NO.
	POWER CODE 0
	D.E. BRG. 40BC02J00X
	O.D.E. BRG. 30BC02J00X
	MIN. AMB. 0
	TYPE TR
	BRUSH 419804051E

BALDOR • RELIANCE Paquete de información de producto: D5005R - C1811ATZ,5HP,1750RPM,500,300,DPG,F1

406770-006

406770-006

CONNECTION DIAGRAM

D-C MOTOR - STRAIGHT SHUNT

ARMATURE AND FIELD EXTERNAL CONNECTIONS:
WARNING- SEE NOTE 7 FOR GROUNDING INSTRUCTIONS:

CCW ROTATION: A1, A2, F1, F2

CV ROTATION: A1, A2, F1, F2

ROTATION FACING COMMUTATOR END

1. CAUTION - ARMATURE MAY HAVE MULTIPLE LEADS. CONNECT ALL LEADS WITH THE SAME MARKING TOGETHER.

2. OPTIMAL CONTROL SIGNAL LEAD IS MARKED AX2. ALWAYS TAKE INTERPLE BROP BETWEEN AX AND AX2. NOTE: NEVER DESIGNATE FOR AX2 IS LETTER C.

3. SPACE HEATERS, WHEN PROVIDED, WILL HAVE LEADS MARKED H1 AND H2, H3, H4, ETC.

4. THERMAL PROTECTOR, WHEN PROVIDED, WILL HAVE LEADS MARKED P1 AND P2, P3, P4, ETC.

5. WINDING KIT(S), WHEN PROVIDED, WILL HAVE LEAD MARKED W1.

6. BRUSH WEAR SENSOR, WHEN PROVIDED, WILL HAVE LEAD MARKED V1.

7. WARNING - MOTOR MUST BE GROUNDED TO PREVENT SERIOUS INJURIES TO PERSONNEL. GROUND THE MOTOR PER IEC, NATIONAL, ELECTRICAL CODE AND ANY APPLICABLE LOCAL ELECTRICAL CODES. A TAPPED HOLE IS PROVIDED IN THE CONDUIT BOX, ON THE FOOT, FRAME BRACE OR OPPOSITE OPPOSITE DRIVE END BRACKET, ADJACENT TO THE TERMINAL BOX FOR FOR MOTOR GROUNDING. GROUND LEAD, WHEN PROVIDED, WILL BE GREEN.

BALDOR

D-C MOTOR CONNECTION DIAGRAM, STRAIGHT SHUNT

3 of 1

REV. DESC: UPDATE LOGO AND TITLEBLOCK; LOADED TO BUS

REV. LTR: - VERSION: 50 TDR: 00000781086

FILE: \RSN\000261\015 REVISO: 02/01/08 02/01/2013

WFL: - BY: MHP/C



ACS712

Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

FEATURES AND BENEFITS

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage



Package: 8-Lead SOIC (suffix LC)



Not to scale

DESCRIPTION

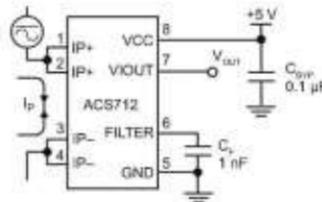
The Allegro™ ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection. The device is not intended for automotive applications.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($>V_{OUT}(I)$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of

Continued on the next page...

Typical Application



Application 1. The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_p , within the range specified. C_f is recommended for noise management, with values that depend on the application.

ACS712

Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

x05B PERFORMANCE CHARACTERISTICS [1]: $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-5	-	5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	180	185	190	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{\text{OUT}} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	21	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT(Q)}}$	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	-0.26	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.08	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	0.054	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.008	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
Total Output Error [2]	E_{TOT}	$I_P = \pm 5\text{ A}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	± 1.5	-	%

[1] Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{j(\text{max})}$, is not exceeded.

[2] Percentage of I_P , with $I_P = 5\text{ A}$. Output filtered.

x20A PERFORMANCE CHARACTERISTICS [1]: $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-20	-	20	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	96	100	104	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, 100 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{\text{OUT}} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	11	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT(Q)}}$	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	-0.34	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.07	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	0.017	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.004	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
Total Output Error [2]	E_{TOT}	$I_P = \pm 20\text{ A}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	± 1.5	-	%

[1] Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{j(\text{max})}$, is not exceeded.

[2] Percentage of I_P , with $I_P = 20\text{ A}$. Output filtered.

x30A PERFORMANCE CHARACTERISTICS [1]: $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1\text{ nF}$, and $V_{CC} = 5\text{ V}$, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		-30	-	30	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P , $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	63	66	69	mV/A
Noise	$V_{\text{NOISE(PP)}}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$, 66 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47\text{ nF}$, $C_{\text{OUT}} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	-	7	-	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{\text{OUT(Q)}}$	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	-0.35	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.08	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 25°C	-	0.007	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
		$T_A = 25^{\circ}\text{C}$ to 150°C	-	-0.002	-	mV/A/ $^{\circ}\text{C}$
Total Output Error [2]	E_{TOT}	$I_P = \pm 30\text{ A}$, $T_A = 25^{\circ}\text{C}$	-	± 1.5	-	%

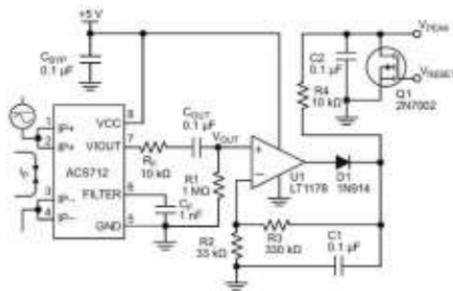
[1] Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{j(\text{max})}$, is not exceeded.

[2] Percentage of I_P , with $I_P = 30\text{ A}$. Output filtered.

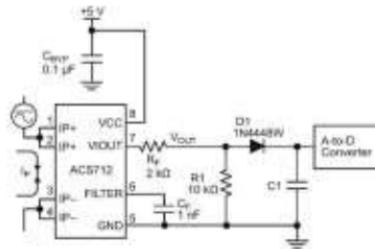
ACS712

Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

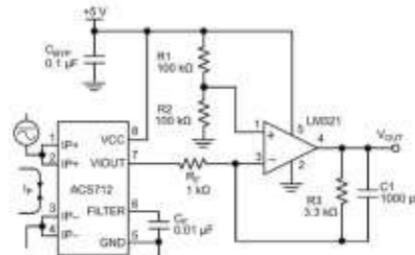
TYPICAL APPLICATIONS



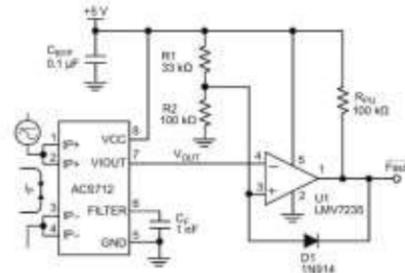
Application 2. Peak Detecting Circuit



Application 4. Rectified Output. 3.3 V scaling and rectification application for A-to-D converters. Replaces current transformer solutions with simpler ACS circuit. C1 is a function of the load resistance and filtering desired. R1 can be omitted if the full range is desired.



Application 3. This configuration increases gain to 610 mV/A (tested using the ACS712ELC-05A).



Application 5. 10 A Overcurrent Fault Latch. Fault threshold set by R1 and R2. This circuit latches an overcurrent fault and holds it until the 5 V rail is powered down.

E30S Series

Diameter ø30mm Shaft type Incremental Rotary Encoder

■ Features

- Diameter ø30mm of miniature shaft type rotary encoder
- Easy installation at narrow space
- Small moment of inertia
- Power supply : 5VDC, 12-24VDC ±5%
- Various output types



⚠ Please read "Caution for your safety" in operation manual before using.



■ Ordering information

E30S 4 - 3000 - 3 - N - 24 -

Series	Shaft diameter	Pulse/1 Revolution	Output phase	Output	Power supply	Cable
Diameter ø30mm, shaft type	ø4mm	Refer to resolution	3 : A, B, Z 6 : A, A̅, B, B̅, Z, Z̅	T: Totem pole output N: NPN open collector output V: Voltage output L: Line driver output(※)	5 : 5VDC ±5% 24: 12-24VDC ±5%	No mark: Cable type C: Connector cable type(※)

※ Standard: E30S4-PLUSE-3-N-24

※Standard: A, B, Z

※The power of Line driver is only for 5VDC

※Cable length: 250mm

■ Specifications

Item	Diameter ø30mm shaft type of incremental rotary encoder	
Resolution(P/R)	100, 200, 360, 500, 1000, 1024, 3000(Not indicated resolution is customizable.)	
Output phase	A, B, Z phase(Line driver : A, A̅, B, B̅, Z, Z̅ phase)	
Phase difference of output	Phase difference between A and B : $\frac{T}{4} = \frac{T}{8}$ (T=1 cycle of A phase)	
Control output	Totem pole output	• Low - Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC • High - Load current : Max. 10mA, Output voltage(Power voltage 5VDC) : Min. (Power voltage-2.0)VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC) : Min. (Power voltage-3.0)VDC
	NPN open collector output	Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC
	Voltage output	Load current : Max. 10mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC
	Line driver output	• Low - Load current : Max. 20mA, Residual voltage : Max. 0.5VDC • High - Load current : Max. -20mA, Output voltage : Min. 2.5VDC
Response time (Rise/Fall)	Totem pole output	Max. 1µs
	NPN open collector output	Max. 1µs
	Voltage output	Max. 1µs(5VDC : Output resistance 820Ω), Max. 2µs(12-24VDC : Output resistance 4.7kΩ)
	Line driver output	Max. 0.5µs
Max. Response frequency	300kHz	
Power supply	• 5VDC ±5%(Ripple P-P : Max. 5%) • 12-24VDC ±5%(Ripple P-P : Max. 5%)	
Current consumption	Max. 80mA(disconnection of the load), Line driver output : Max. 50mA(disconnection of the load)	
Insulation resistance	Min. 100MΩ(at 500VDC magger between all terminals and case)	
Dielectric strength	750VAC 50/60Hz for 1 minute(Between all terminals and case)	
Connection	Cable type, 250mm connector cable type	
Mechanical specification	Starting torque	Max. 20gf·cm(0.002N·m)
	Moment of inertia	Max. 20g·cm ² (2×10 ⁻⁵ kg·m ²)
	Shaft loading	Radial : Max. 2kgf, Thrust : Max. 1kgf
	Max. allowable revolution ^{※1}	5000rpm
Vibration	1.5mm amplitude or 300m/s ² at frequency of 10 to 55Hz(for 1 min.) in each of X, Y, Z directions for 2 hours	
Shock	Approx. Max. 50G	
Environment	Ambient temperature	-10 to 70°C, storage : -25 to 85°C
	Ambient humidity	35 to 85%RH, storage : 35 to 90%RH
Protection	IP50(IEC standard)	
Cable	ø5, 5-wire, Length : 2m, Shield cable(Line driver : ø5, 8-wire)	
Accessory	ø4mm coupling	
Approval	CE (Except line driver output)	
Unit weight	Approx. 80g	

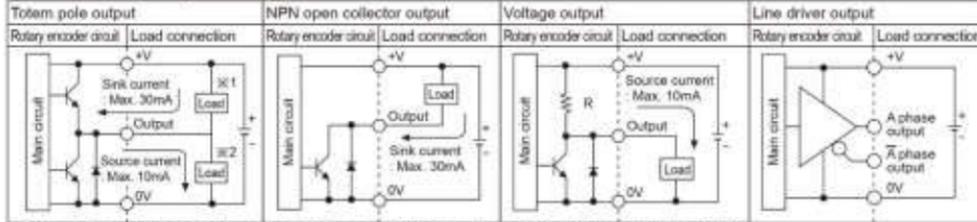
※1: Make sure that Max response revolution should be lower than or equal to max. allowable revolution when selecting the resolution.

$$(\text{Max. response revolution(rpm)}) = \frac{\text{Max. response frequency}}{\text{Resolution}} \times 60 \text{ sec}$$

※Environment resistance is rated at no freezing or condensation.

Incremental ø30mm Shaft type

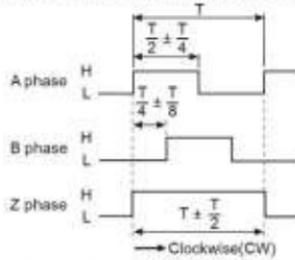
Control output diagram



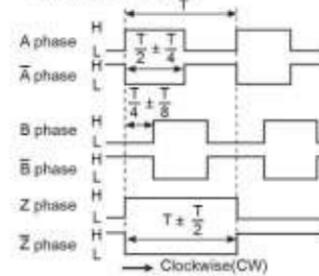
- Totem pole output type can be used for NPN open collector output type(×1) or Voltage output type(×2).
- All output circuits of A, B, Z phase are the same. (Line driver output is for A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z})

Output waveform

- Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output
- Line driver output



※CW: Right turn as from the shaft



Connections

① Cable type

- Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output



• Line driver output



- ※Unused wires must be insulated.
- ※The metal case and shield wire of encoder should be grounded(F.G.).

② Connector cable type

- Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output



• Line driver output

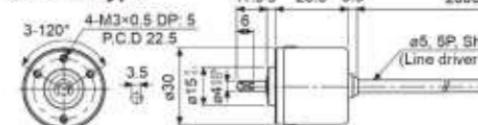


Totem pole output NPN open collector output Voltage output			Line driver output		
Pin No	Function	Cable color	Pin No	Function	Cable color
①	OUT A	Black	①	OUT A	Black
②	OUT B	White	②	OUT A	Red
③	OUT Z	Orange	③	+V	Brown
④	+V	Brown	④	GND	Blue
⑤	GND	Blue	⑤	OUT B	White
⑥	F.G.	Shield	⑥	OUT B	Gray
			⑦	OUT Z	Orange
			⑧	OUT Z	Yellow
			⑨	F.G.	Shield

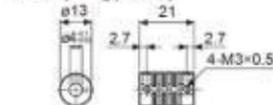
※ F.G. (Field Ground) It should be grounded separately.

Dimensions

① Cable type



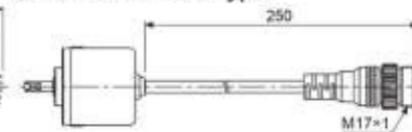
• Coupling(E30S)



- Parallel misalignment: Max. 0.25mm
- Angular misalignment: Max. 5°
- End-play: Max. 0.25mm

※For parallel misalignment, angular misalignment, end-play terms, refer to the F-78 page.
 ※For flexible coupling(ERB Series) information, refer to the F-71 page.

② Connector cable type



※Connector cable is customizable and refer to the G-10 for specifications.

- (A) Photo electric sensor
- (B) Photo optic sensor
- (C) Dual/Non sensor
- (D) Proximity sensor
- (E) Pressure sensor
- (F) Rotary encoder
- (G) Connector Socket
- (H) Temp. controller
- (I) Split Power controller
- (J) Counter
- (K) Taster
- (L) Panel meter
- (M) Tactol Special Pulse meter
- (N) Display unit
- (O) Sensor controller
- (P) Switching mode power supply
- (Q) Stepper motor/Driver/Controller
- (R) (Digital) Light panel
- (S) Field sensor device
- (T) Software
- (U) Other