

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA CON CONTROL DE ARRANQUE PARA UN MOTOR DE SCOOTER ELÉCTRICO

Trabajo de grado presentado ante la Universidad Técnica del Norte previo
a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Ricardo Javier Vaca Chamorro

Director:

PhD. Gerardo Isaías Collaguazo Galeano

Ibarra – Ecuador

2023



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100494282-5		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vaca Chamorro Ricardo Javier		
DIRECCIÓN:	Av. Isla santa Cruz y Ambato		
EMAIL:	rjvacac@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:		TELÉFONO MÓVIL:	0985377784
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA CON CONTROL DE ARRANQUE PARA UN MOTOR DE SCOOTER ELÉCTRICO		
AUTOR (ES):	Vaca Chamorro Ricardo Javier		
FECHA: DD/MM/AAAA	24/02/2023		
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO			
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO		
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Electricidad		
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Jhonny Barzola Msc.		

Constancia

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló, sin violar derechos de autor a terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que se asume responsabilidad sobre el contenido de esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días del mes de febrero de 2023

EL AUTOR:



Vaca Chamorro Ricardo Javier

Cedula: 1004942825



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

Certificación del director del trabajo.

Yo, Gerardo Collaguazo en calidad del tutor del señor estudiante Vaca Chamorro Ricardo Javier certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA CON CONTROL DE ARRANQUE PARA UN MOTOR DE SCOOTER ELÉCTRICO"**.

Para obtención del título de Ingeniero en Electricidad, aprobado la defensa, impresión y empastado.



PhD. Gerardo Isaias Collaguazo Galeano.
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Dedicatoria

Dedico mi trabajo enteramente a mis padres ya que gracias a ellos fui capaz de llegar hasta donde hoy me encuentro, siendo mi soporte incondicional en todo momento. A mis hermanas porque siempre fueron parte de mi superación día tras día, estando presentes en los momentos más difíciles de salud física y mental, siendo el motivo diario para superarme y ser cada vez mejor ser humano.

Además, dedico mi trabajo en especial a mi abuelito que se encuentra en el cielo.

Agradecimiento

Agradezco a toda mi familia, por haber estado en todas mis etapas de vida estudiantil, siempre estando presentes mis abuelitos, mis tíos, mis tías de mis dos familias.

Agradezco principalmente a Dios que me ha bendecido con la familia que tengo, mis padres, mis hermanas y mi gato Chester.

Además, agradezco a mis amigos que han estado siempre presentes en mi vida estudiantil, siendo pocos, pero buenos. Ellos han observado todo el proceso y el día tras día, siendo días buenos o días malos, pero siempre todos con el mismo sueño.

Además, agradezco en especial a cierta persona que ya no se encuentra en mi vida, pero me hizo creer en la bondad de las personas, en la lealtad y en que jamás hay que darse por vencido en los momentos más difíciles de la vida.

Tabla de contenido

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	2
Constancia	4
Certificación del director del trabajo de grado	3
Dedicatoria	5
Agradecimiento	6
Resumen.....	15
Abstract.....	16
A1. Contextualización.....	17
A2. Planteamiento del problema.....	20
A3. Justificación del problema.	20
A4. Alcance del proyecto.	21
A5. Viabilidad del trabajo.	22
A6. Objetivo General.....	23
A7. Objetivos Específicos	23
Capítulo 1	24
Descripción funcional de las partes del Scooter Eléctrico y estrategias de control en un Motor Brushless	24
1. Scooter Eléctrico.....	24
1.1. Diagrama en bloques de un Scooter Eléctrico	24
1.2. Descripción funcional de las partes del Scooter Eléctrico	25
1.2.1. El Motor sin escobillas o Motor Brushless	25
1.2.2. Secuencia de giro y pulsos eléctricos de un Motor Brushless	27
1.2.3. Campo magnético en el Motor Brushless	28
1.2.4. Marcas y Motores.	29
1.3. Controlador del Scooter Eléctrico	29
2. Convertidores de potencia.....	30
2.2. Convertidor Buck-Boost (Reductor -Elevador).....	31
2.2.1. Funcionamiento del convertidor “Buck-Boost”	31
2.2.2. Modo de conexión continua y discontinua.....	32
2.3. Inversores.....	33
2.3.1. Inversores monofásicos	33
2.3.2. Inversores Trifásicos.....	35
3. Estrategias de control de corriente de un Motor Brushless	35
3.3.1. Modulación ancho de pulso (PWM) y control de Lazo Abierto	36

3.3.2.1.	Técnicas de modulación de señal PWM.....	37
3.3.2.2.	Señal Bipolar	37
3.3.2.3.	Señal Unipolar	38
CAPÍTULO 2	40
2.1.	Metodología.....	40
2.2.	Descripción del Sistema	40
2.2.1.	Diagrama de bloques representativo del sistema	41
2.2.2.1.	Fuente DC.....	42
2.2.2.2.	Osciloscopio de 4 canales	42
2.2.2.3.	Puntas Diferenciales.....	43
2.2.2.4.	Microcontrolador	43
2.2.3.	Herramientas de utilizadas en la implementación.	43
2.2.4.	Descripción de Software utilizado	43
2.2.4.1.	Matlab – Simulink	43
2.2.4.2.	Code Composer Studio.....	44
2.2.4.3.	Hantek 6022BE.....	44
2.3.	Características operativas del inversor en un motor trifásico	44
2.3.1.	Frecuencia utilizada	44
2.3.2.	Modelos matemáticos del inversor (VSI).....	45
2.3.2.1.	El inversor puente completo.....	46
2.3.2.2.	Ecuaciones de conmutación del inversor (VSI)	47
2.3.2.3.	Modelo promedio del inversor (VSI).....	48
2.4.	Características operativas de programación para el inversor trifásico	48
2.4.1.	Modulación SPWM	49
2.4.2.	Señal triangular y señal moduladora	49
2.4.3.	Onda sinusoidal.....	51
2.4.4.	Control de desfase de una onda trifásica en simulación	52
2.4.5.	Control de desfase de una onda trifásica en la implementación	52
2.4.6.	Control de la velocidad en simulación	52
2.4.7.	El inductor	52
2.4.8.	La Resistencia eléctrica	53
2.5.	Diseño de los elementos del sistema de carga para el inversor	54
2.5.1.	Sistema de Carga en Simulink	54
2.5.2.	Pruebas de señal SPWM en la carga.....	54
2.6.	Tabla de Ecuaciones	55
3.	Cálculo de los elementos	57

3.1.	Frecuencia utilizada	57
3.2.	Inductor implementado en la carga.....	59
3.3.	Potenciómetro o resistencia variable	59
3.4.	Ecuaciones del inversor trifásico.....	59
3.4.1.	Modulación del Duty Cyclea	60
3.4.3.	Ecuación de la onda sinusoidal	62
3.4.4.	Ecuaciones del motor Trifásico	62
4.	Selección de valores comerciales.....	63
5.	Simulación de verificación de parámetros técnicos de funcionamiento.....	64
5.1.	Funcionamiento del sistema de simulación planteado	65
5.2.	Rampa de corriente resultante	66
5.2.1.	Simulación de las ecuaciones en Matlab	67
CAPITULO 3	69
3.1.	Generación de pulsos.....	69
3.1.2.	Sistema físico de conversión del inversor.....	72
3.3.	Resultados experimentales iniciales con carga.....	75
3.3.1.	Resultados experimentales de programación	75
3.3.2.	Resultados experimentales iniciales de la conexión entre placas PCBs	76
3.3.2.1.	Resultado experimental inicial de ondas trifásicas y sus inversas.....	77
3.3.2.2.	Resultado experimental de ondas trifásicas y el control de la amplitud, en constancia de la existencia de la rampa de corriente	77
3.3.3.	Resultados experimentales iniciales con la Carga/Motor.....	79
3.3.3.1.	Señal de Corriente.....	79
3.3.3.2.	Señal de Voltaje	80
3.3.3.3.	Rampa de corriente.	81
3.3.3.3.1	Instante de velocidad inicial con potenciómetro en arranque de la carga	82
3.3.3.3.2.	Instante de velocidad media con potenciómetro en la carga	83
3.3.3.3.3.	Instante de velocidad máxima en el convertidor inversor hacia una carga RL.	84
3.4.	Resultados iniciales con motor brushless o motor de scooter eléctrico	85
3.4.1.	Figura demostrativa del funcionamiento del convertidor potencia en un motor brushless	85
3.4.2.	Funcionamiento de arranque inicial del convertidor inversor en un motor brushless	86
3.4.3.	Funcionamiento de arranque en velocidad media a partir del convertidor inversor en un motor brushles o motor de scooter eléctrico.....	87
3.4.4.	Funcionamiento del motor brushless en velocidad máxima a partir de un convertidor de potencia "Inversor"	88
CONCLUSIONES	90

RECOMENDACIONES.....	91
ANEXOS.....	92
BIBLIOGRAFÍA	109

Índice de Figuras

Fig.1. Diagrama de bloques de un Scooter Eléctrico	24
Fig.2. Estructura de un motor brushless; Imanes permanentes, Sensor hall, devanado.	26
Fig.3. Estructura del motor brushless DC	26
Fig.4. Conmutación de corrientes de los devanados BLDC.	27
Fig.5. Campo electromagnético proporcionado por los imanes permanentes del estator.	28
Fig.6. Controlador de velocidad o Esc.	30
Fig.7. Convertidor Buck-Boost.....	31
<i>Fig.8. Convertidor tipo “Buck-Boost” en topología tipo “On”, en el intervalo de $0 < t < TON$</i>	
<i>Fig.9. Convertidor tipo “Buck-Boost” en topología tipo “Off”.....</i>	33
Fuente: :(John Jairo García Ortiz & Suasti, 2021)	33
Fig.10. Gráfico de un inversor en conjunto con una fuente denotada como V_e Inversor	33
Fig.11. Inversor monofásico puente completo.	34
Fig.12. Circuito medio puente.....	34
Fig.13. Inversor trifásico	35
Fig.14. Referencia de un control de Lazo Cerrado (S. Sinadrives, 2021).....	35
Fig.15. Referencia de un control de Lazo Cerrado (S. Sinadrives, 2021).....	36
Fig.16. Formas posibles de generación de señal PWM	37
Fig. 17. Formas de onda esquema modulación bipolar	38
Fig. 18. Formas de esquema de modulación unipolar	39
Fig.19. Metodología.....	40
Fig.20 Diagrama de bloques de la implementación	41
Fig.23. Osciloscopio de cuatro canales Rigol,	42
Fig.22. Fuente Voltaje, Corriente	42
Fig.21. Multímetro 2.0.....	42
Fig.25. Puntas diferenciales de voltaje y corriente,.....	42
Fig.24. Osciloscopio	42
Fig.26. Eficiencia vs Frecuencia de Conmutación	45
Fig.27. Circuito básico de un inversor.....	45
Fig.28. Instantes de conmutación de un inversor full puente	46
<i>Fig.30. Relación de inversor en conjunto con la carga “VSI”.....</i>	47
Fig.29. Inversor	47
Fig.30. Esquema para el modelado del inversor Full Puente.....	48

Fig.31. Punteros en la tabla de valores senoidales para la generación del voltaje de salida del inversor.	49
Fig.32. PWM Señal	49
Fig.33. Duty Cycle señal PWM	50
Fig.34. Voltaje instantáneo y promedio generado mediante las interrupciones del timer0 y los valores de la tabla senoidal.	50
Fig.35. Voltaje de fase (V_{AN}) y corriente de fase (I_{AN}).....	54
Fig.36. Frecuencia 1KHz	58
Fig.37. Frecuencia 4KHz	58
Fig.38. Esquema para elaboración de ecuaciones por Kirchhoff	60
Fig.39. Circuito trifásico de control y de fuerza del inversor	64
Fig.40. Simulación Simulink a) Voltaje y b) Corriente	65
Fig.41. Parámetros de desfase a) 0° , b) 120° c) -120°	66
Fig.42. a) Rampa de corriente, b) Voltaje no cambiante	67
Fig.43. a) Parámetros de rampa en el tiempo, b) Herramienta de parámetros de secuencia repetitiva.....	67
Fig.44. Código Matlab utilizado en simulación.	68
Fig.45. Launchxl – F2806x	69
Fig.46. Code Composer Studio	70
Fig.47. Diagrama de bloques. Desfase, Generador, Carga	71
Fig.48. a) PCB Impresa al revés b) Diseño del circuito c) PCB cara frontal.	73
Fig.49. a) Placa PCB dos caras.....	73
Fig.50. a) Inductor trifásico	74
Fig.51. a) Inductores 5mHz	74
Fig.52. a) Ondas trifásicas desfasadas.....	75
Fig.53. Conmutación trifásica	76
Fig.54. Acercamiento ondas trifásicas	76
Fig.55. SPWM y ondas inversas.....	77
Fig.56. Punto partida tres ondas sinusoidales	78
Fig.57. Aceleración máxima tres ondas sinusoidales.....	78
Fig.58. Conexión del inversor trifásico a la carga RL. a) Etapa de control, inversor trifásico y “DSP”, b) Etapa de carga Resistiva, c) Etapa de carga inductiva L”	79
Fig.59. Onda sinusoidal con carga de la Fase 1	80
Fig.60. Onda sinusoidal con carga de la Fase 1 y Fase 2	80
Fig.61. Forma de onda de voltaje de una fase.....	81
Fig.62. Forma de onda en arranque inicial entre la Fase1 y Fase 2	82
Fig.63. Forma de onda en arranque inicial entre la Fase1 y Fase 2, figura representativa en Matlab	82
Fig.64. Forma de onda en velocidad media entre la Fase1 y Fase2.....	83

Fig.65. Forma de onda en velocidad media entre la Fase1 y Fase2.....	83
Boceto representativo en Matlab	83
Fig.66. Forma de onda en velocidad máxima entre la Fase1 y Fase2.....	84
Fig.67. Forma de onda en velocidad máxima entre la Fase1 y Fase2, Boceto de Matlab.	84
Fig.68.a) Forma de onda del voltaje en motor brushless, b) Forma de onda de la corriente en motor brushless.	85
Fig.69. Forma de onda de corriente en velocidad mínima.	86
Fig.70. a) Forma de onda de corriente en velocidad mínima, datos filtrados en Matlab.	86
Fig.71. Forma de onda de corriente en velocidad media en un motor brushless	87
Fig.72. Forma de onda de corriente en velocidad media en un motor brushles, boceto Matlab	87
Fig.72. Forma de onda de corriente en velocidad media en un motor brushles, boceto Matlab	88
Fig.73. Imagen ilustrativa de la desconexión de la placa DSP, sobrepasando 5A	89

Índice de tablas

Tabla 1: Potencias y marcas del scooter eléctrico (Cenergía, 2020).	29
Tabla 2: Ecuaciones fundamentales utilizadas.....	57
Tabla 3: Valores comerciales utilizados	64
<i>Tabla 3: Parámetros de la placa “DSP”</i>	70
Tabla 4. Elementos individuales del inversor.....	72

Resumen

En la actualidad los convertidores de potencia son utilizados en muchas aplicaciones eléctricas tanto en alto, medio y bajo voltaje, teniendo una importancia notable en el campo de la electricidad a nivel mundial. El utilizar un control de voltaje o corriente en un convertidor de potencia da por resultado distintos parámetros controlados en distintas aplicaciones deseadas.

Los motores brushless en la actualidad utilizan convertidores de potencia, para el control de velocidad y eficiencia de: Drones, Scooters eléctricos, autos de control remoto, entre otros.

De tal forma que se implementó el control de arranque de un motor brushles teniendo en cuenta parámetros editables y programables en el microcontrolador LAUNCHXL-F28069D. Iniciando con la creación de tres ondas sinusoidales desfasadas con un offset predefinido de 0.5; Utilizando el principio de la modulación SPWM para el control de la amplitud en 67 puntos programados en el microcontrolador. En cada una de las ondas se controla la amplitud y a su vez la corriente y el voltaje en un determinado tiempo. El control de la amplitud es editable y controlable con un potenciómetro y a su vez es observable en el osciloscopio de 3 canales.

Palabras claves: SPWM, convertidor de potencia, Microcontrolador, Offset.

Abstract

Nowadays power converters are used in many electrical applications in high, medium and low voltage, having a remarkable importance in the field of electricity worldwide. The use of voltage or current control in a power converter results in different controlled parameters in different desired applications.

Brushless motors currently use power converters for speed control and efficiency of: Drones, electric scooters, remote control cars, among others.

In such a way that the starting control of a brushless motor was implemented taking into account editable and programmable parameters in the microcontroller LAUNCHXL-F28069D. Starting with the creation of three out-of-phase sine waves with a predefined offset of 0.5; using the principle of SPWM modulation to control the amplitude at 67 points programmed in the microcontroller. In each of the waves the amplitude is controlled and in turn the current and voltage in a certain time. The amplitude control is editable and controllable with a potentiometer and in turn is observable on the 3-channel oscilloscope.

Keywords: SPWM, power converter, Microcontroller, Offset.

Introducción.

A1. Contextualización

Los Scooter eléctricos son mini vehículos que trabajan a voltajes entre 48-60V en su sistema además trabajan con motores eléctricos de potencia con distintos rangos de valor de 250W hasta 2000W. Pueden llegar a velocidades hasta 100 Km/h, dependiendo del modelo, son mini vehículos apropiados para ciudades pequeñas. Los scooter eléctricos además cuentan con distintas formas de control como lo es en los motores brushless los cuales *cuentan con conexión del sensor "Hall" el cual le indica al controlador la posición y además la polarización de los electroimanes que tiene motor de esta forma permite la aceleración de estos motores.*(AriasGornzales, 2020) Al acelerar horizontalmente, se va a ejercer una fuerza sobre el eje trasero y como consecuencia de esta aceleración que ejerza también existirá una fuerza normal, que además es diferente sobre cada eje de esta forma la aceleración también es una parte fundamental del controlador principal teniendo una relación con el precio del scooter (Dahgero, 2018).

Al acelerar horizontalmente, se va a ejercer una fuerza sobre el eje trasero y como consecuencia de esta aceleración que ejerza también existirá una fuerza normal, que además es diferente sobre cada eje de esta forma la aceleración también es una parte fundamental del controlador principal teniendo una relación con el precio del Scooter (Dahgero, 2018).

El motor sin escobillas o Brushless son motores que están contruidos con uno o más sensores de posición los cuales están ubicados en el eje del rotor, haciéndose estos de tal forma síncronos al movimiento del motor de esta forma este puede obtener una lectura indicada de la posición en la que se encuentra. Por razones de costo, confiabilidad, además de empaque mecánico, en específicos y el rotor se encuentra inmerso en un fluido, se desea normalmente que este sistema opere de una forma sin sensores de posición (Sensor Hall) esta técnica se la llama también Sensorless.

Así mismo en el motor brushles existen sensores de corriente, basados en el efecto Hall, el efecto hall es importante en los motores ya que el control de estos se encuentran

actualmente en el diseño del controlador general, se encuentran diseñados en forma de pinza la cual está construida a partir de materiales los cuales son ferro-magnéticos, que al envolver *el conductor por donde circula la corriente a medir o también “confinan” el flujo haciéndolo de esta forma transitar (en el entrehierro) por una placa semiconductor en donde se lleva a cabo el efecto (Quiñonez, Ivan, Auriol & Garcia, 2017).*

El convertidor Buck-Boost, *también llamado convertidor “flyback” es un inversor, el cual convierte una tensión de entrada en una tensión de salida negativa o igual, la cual es regulada también esta puede ser mayor o menor a su vez que el valor absoluto total de la tensión de entrada. En un pequeño ejemplo no ilustrativo se puede decir que en un diagrama de circuito básico está conformado un por un MOSFET además un Diodo(D), estos tendrían el objetivo o la función de ser un interruptor, además un Inductor (L) y también un Capacitor (C), (Siendo el capacitor un ejemplo hipotético) y por último una Resistencia (R) que están conectados en paralelo. (Torres Ángel David et al., 2019).*

En caso de tener un arranque en un motor. este es capaz de tener un suministro de tensión que durante el arranque tiende al aumento desde un valor el cual es inicial hasta la tensión que se le tiene asignada del motor de esta forma va siguiendo una rampa o llamada también (relación lineal) ajustable. Normalmente, el arrancador controla además la corriente del motor durante el arranque, de forma si es demasiado elevada esta reduce la tensión de una forma transitoria. Una forma además de regulación es que el arrancador proporcione una tensión de tal forma que la corriente del motor sea constante, pero esta será durante el arranque hasta que la tensión sea igual a la asignada y de aquí a partir de ese momento, el arranque prosigue a tensión constante e igual a la asignada (Ángel & Pozueta, 2017).

Realizando una comparativa con la actual forma de control de velocidad de un mini *scooter en el mercado, se utilizan las “ESC”. Estos son controladores que tienen así mismo distintas funciones como las limitaciones de la velocidad o también de distancia de carga máxima por duración de la batería (AriasGornzales, 2020)*

Los variadores para estos motores brushles “ESC” además crean una corriente alterna trifásica a partir de una corriente que es continua la cual proveniente de la batería. De

esta forma este voltaje le sirve al ESC antes mencionado para determinar como de rápido o también en qué dirección se debe girar el motor en cualquier instante. Ya obtenida esta información el ESC es capaz de averiguar cómo envía la corriente a los electroimanes del motor para que este gire (FvpMax, 2016).

El controlador original de un scooter eléctrico en la actualidad cumple las funciones de recibir y transmitir señales de voltaje, que sea adecuado para el funcionamiento de la rueda eléctrica, y de los dispositivos periféricos como lo es el acelerador y el freno eléctricos (Esteban Leiva & Emilio Osorio, 2019).

A2. Planteamiento del problema

En la actualidad muchas personas al subirse a un Scooter eléctrico han notado fácilmente que el Scooter tiene un inconveniente en el arranque, esto se debe a que; El convertidor de potencia realiza un cambio de voltaje-corriente brusco al motor, de esta forma provoca un cambio violento en el torque de arranque del motor. Por esta razón el Scooter tiene un arranque brusco y puede provocar un accidente tanto a la persona que está conduciendo o a las personas que se encuentren en su alrededor. Sin embargo, cambiar solo el controlador no bastaría si se quiere tener un control total de la potencia y torque los cuales son suministrados al motor. Colocar un limitador de corriente no bastaría tampoco, ya que para tener un arranque que se adapte al confort del usuario es necesario una rampa de corriente que determine un transiente deseado en el torque de arranque.

EL PROBLEMA.

¿Cómo implementar un convertidor con control de arranque suave para un motor de scooter?

A3. Justificación del problema.

En la actualidad, es evidente el uso de un Scooter en distintas ciudades, teniendo un uso significativo por su forma de transporte más viable, por su economía y por el fácil acceso a este, de tal forma que los usuarios en la actualidad deciden comprar un scooter eléctrico, pero tienen el inconveniente al iniciar con la conducción de este siendo un arranque bastante fuerte que puede llegar a ser peligroso.

Para evitar estos inconvenientes en el arranque, este trabajo propone un diseño e implementación de un convertidor electrónico con un lazo de control de corriente predefinido, o lazo abierto, ya que controlando la corriente se controla el torque del motor, de esta manera si se coloca una referencia de corriente en forma de rampa, el torque del motor irá incrementándose en el arranque hasta el valor nominal, lo que producirá que el Scooter venza la inercia en forma suave y no tendrá los problemas del arranque brusco.

La importancia de la realización de un sistema de arranque del motor viene dado principalmente por tener un arranque más suave que cumpla con la comodidad del usuario de esta forma el usuario tiene mayor seguridad al momento de iniciar su manejo. Además, los principales beneficiarios del uso del nuevo prototipo de controlador de arranque serán las personas que no tengan experiencia del manejo de un Scooter o a su vez personas de la tercera edad que buscan un transporte seguro al momento de iniciar su trayecto diario.

Es posible entender que es un tema de actualidad, por la razón de que el scooter eléctrico tiene bastante acogida en muchas ciudades del mundo y cada vez más usuarios adquieren uno de estos.

A4. Alcance del proyecto.

El presente proyecto tiene como objetivo implementar un convertidor de potencia con un control de arranque para un motor de scooter eléctrico o Brushless. Para ello se utilizará una fuente de voltaje-corriente en la cual que se utilizará a 30V.

El convertidor será un Buck-Boost "*Inversor*" capaz de convertir el voltaje de dicha fuente, según como sea necesario para el motor o la carga simulando al motor.

Para el control de arranque se usará un control de corriente donde la referencia de corriente será una señal de rampa desde un valor mínimo hasta un valor máximo que será ajustable.

Para el diseño del convertidor se dimensionará los elementos pasivos, se utilizará la referencia de la curva predefinida de lazo de control abierto.

Una vez diseñado el sistema se procederá a la simulación en Matlab/Simulink del mismo, ajustando la rampa de referencia.

Cuando la simulación esté realizada se procederá a la implementación del prototipo, para ello se diseñará las tarjetas en circuito impreso, se soldarán las mismas, se programará el control de la modulación junto a el sistema PWM y se realizará las pruebas respectivas variando la rampa de referencia de corriente.

A5. Viabilidad del trabajo.

En la actualidad, es evidente el uso de un Scooter en distintas ciudades, teniendo un uso significativo por su forma de transporte más viable, por su economía y por el fácil acceso a este, de tal forma que los usuarios en la actualidad deciden comprar un scooter eléctrico, pero tienen el inconveniente al iniciar con la conducción de este siendo un arranque bastante fuerte que puede llegar a ser peligroso.

Para evitar estos inconvenientes en el arranque, este trabajo propone un diseño e implementación de un convertidor electrónico con un lazo de control de corriente, ya que controlando la corriente se controla el torque del motor, de esta manera si se coloca una referencia de corriente en forma de rampa, el torque del motor irá incrementándose en el arranque hasta el valor nominal, lo que producirá que el motor venza la inercia en forma suave y no tendrá los problemas del arranque brusco.

A6. Objetivo General

Implementar un convertidor de potencia con control de arranque en un motor de scooter eléctrico para suavizar el torque en el arranque del motor, mediante el diseño del circuito y la simulación.

A7. Objetivos Específicos

1. Describir el funcionamiento de las partes eléctricas del scooter, el conversor de potencia y estrategias de control de torque en un motor de scooter eléctrico.
2. Diseñar el convertidor de potencia, para el funcionamiento del motor mediante una curva de comportamiento predefinida en lazo abierto y obtener el arranque suave.
3. Implementar el convertidor de potencia con una curva de arranque predefinida en un lazo abierto.

Capítulo 1

Descripción funcional de las partes del Scooter Eléctrico y estrategias de control en un Motor Brushless

El resultado de la investigación bibliográfica permitió la descripción de las partes más significativas de un Scooter Eléctrico; La literatura enfatizó la definición del tipo de convertidor de potencia utilizado en la implementación y los tipos de conexión de un inversor; explicando de forma concisa las estrategias de control o modulación para el motor brushless.

1. Scooter Eléctrico

El Scooter eléctrico, es un vehículo impulsado por un motor sin escobillas o motor brushless; teniendo como función principal recorrer distancias cortas en poco tiempo. Existen varias marcas de Scooter; cada marca tiene distintas características y su estructura varía dependiendo de la potencia del motor (Cattini, 2021).

1.1. Diagrama en bloques de un Scooter Eléctrico

El sistema de un Scooter eléctrico denotado en el diagrama de bloques propuesto por (Lin & Fu,1999) en la Figura 1; indica un sistema formado por el controlador, el convertidor, el motor, la transmisión, la batería y la rueda.

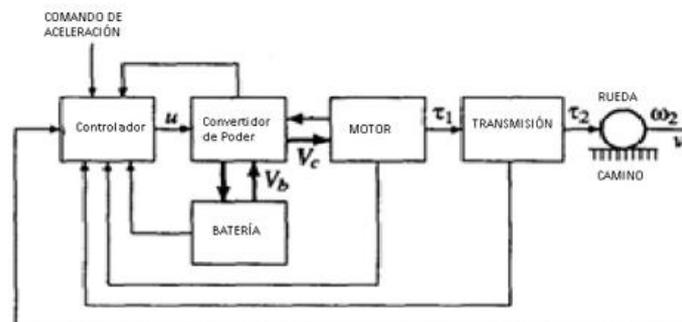


Fig.1. Diagrama de bloques de un Scooter Eléctrico
Fuente : (Lin & Fu, 1999).

En efecto, el diagrama presentado en la Figura 1 exterioriza las distintas partes de un Scooter Eléctrico. Por lo tanto; el convertidor, el motor y el controlador de aceleración, fueron tomados en cuenta para la investigación de la presente implementación.

1.2. Descripción funcional de las partes del Scooter Eléctrico

El Scooter eléctrico consta de distintas partes como se observó en el diagrama propuesto por (Lin & Fu,1999); mencionado en la Figura1. El presente apartado describe las partes utilizadas en la implementación: El motor, el controlador y el inversor.

1.2.1. El Motor sin escobillas o Motor Brushless

El motor Brushless es un tipo de motor síncrono. Este significa el campo magnético generado por el estator y el campo magnético generado por el rotor gira en la misma frecuencia(Padmaraja Yedamale & Microchip Technology Inc., 2003).

En el “mundo de los motores eléctricos” existen diferentes tipos. De tal forma que Los motores de corriente continua convencionales son altamente eficientes y sus características hacerlos adecuados para su uso como servomotores. Sin embargo, su único inconveniente es que necesitan un conmutador y escobillas que están sujetas a desgaste y requieren mantenimiento. Cuando las funciones de conmutador y escobillas fueron implementadas por interruptores de estado sólido, motores sin mantenimiento fueron realizados. Estos motores ahora se conocen como motores sin escobillas (Kenjō & Nagamori, 1985).

Los motores DC, convencionales constan de un rotor, además de un estator en el cual constan imanes permanentes a diferencia de un motor CC. Un motor DC sin escobillas en años pasados era complicado de construir. La construcción del DC sin escobillas es muy similar al motor convencional AC también conocido como imán permanente como se puede observar en la Figura 2(Kenjō & Nagamori, 1985).

Es necesario conocer la estructura del motor sin escobillas, de tal forma que así mismo como los motores convencionales AC tienen su rotor y estator, pero con características diferentes como se mencionó en el párrafo anterior.

La estructura de un motor brushless es compacta y funcional , reduciendo de esta forma su tamaño y su peso en comparación con otro tipo de motores(Kenjō & Nagamori, 1985).

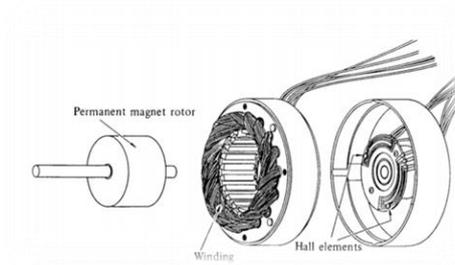


Fig.2. Estructura de un motor brushless; Imanes permanentes, Sensor hall, devanado.
Fuente: (Kenjō & Nagamori, 1985).

Los devanados del inducido son parte del estator y el rotor, este además se compone por varios imanes. Los devanados en un motor sin escobillas se pueden decir que son similares a los de un motor AC polifase y el motor es más ortodoxo y eficiente que tiene un conjunto de devanados trifásicos y este se opera en excitación bipolar Figura 3 (Kenjō & Nagamori, 1985).

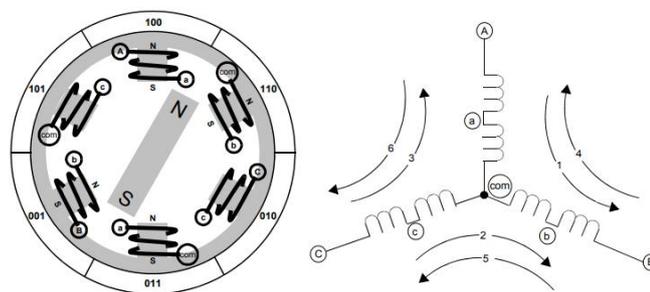


Fig.3. Estructura del motor brushless DC
Fuente: (Brown, 2019)

En la Figura 3 se observa los imanes permanentes, las bobinas y la conexión que existe, y sus diferentes fases. Cabe mencionar que los motores DC sin escobillas son muy diferentes a los motores síncronos AC ya que los Motores sin escobillas utilizan un sensor Hall para determinar la posición de los devanados del motor, al detectar el sensor; el motor gira; *de esta forma producen señales para controlar los “interruptores electrónicos”* cabe mencionar que no todos los Motores utilizan este tipo de sensores(Brown, 2019).

1.2.2. Secuencia de giro y pulsos eléctricos de un Motor Brushless

La forma más fácil de conocer el momento correcto para conmutar las corrientes de los devanados es por medio de una posición de sensor. Muchos fabricantes de motores BLDC suministran Motores con sensor de posición de efecto Hall de tres elementos. Cada elemento sensor emite un nivel alto digital para 180 grados eléctricos de rotación eléctrica, y un bajo nivel para los otros 180 grados eléctricos. Los tres sensores están desplazados entre sí por 60 grados por lo que cada salida del sensor esté alineada con uno de los circuitos electromagnéticos (Brown, 2019).

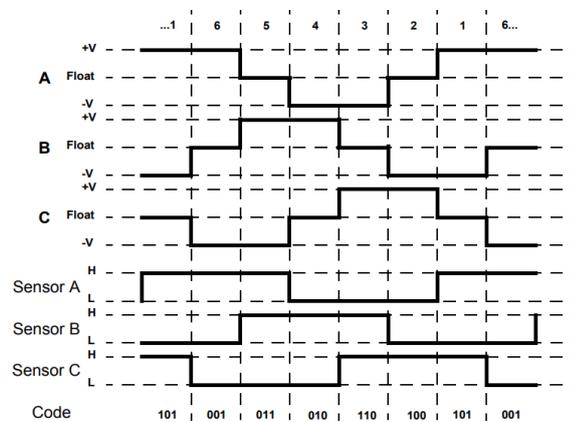


Fig.4. Conmutación de corrientes de los devanados BLDC.

Fuente: (Brown, 2019).

Los números en la parte superior de la Figura 4 corresponden a las fases actuales que se muestran en la Figura 3. Es evidente a partir de Figura 4 que las tres salidas del sensor se superponen de tal una forma de crear seis códigos únicos de tres bits correspondientes a cada una de las fases de accionamiento. Los números se muestra alrededor de la periferia del diagrama del motor en La Figura 3 representa el código de posición del sensor. El norte El polo del rotor apunta al código que se emite en esa posición del rotor. Los números son los niveles lógicos del sensor. donde el bit más significativo es el sensor C y el menos El bit significativo es el sensor A (Brown, 2019).

1.2.3. Campo magnético en el Motor Brushless

La Ley de Faraday y el electromagnetismo van de la mano; para entender esta ley es necesario comprender acerca de la inducción electromagnética; se puede decir que la inducción electromagnética es un fenómeno que ocurre en el momento en el que un conductor se mueve en el seno de un campo magnético (Kuperstein et al., 2010).

“El campo magnético y el Motor Brushless están estrechamente relacionados” (Kenjō & Nagamori, 1985). En la Figura 5 se aprecia el campo magnético que genera el imán que se encuentra en el estator del motor.

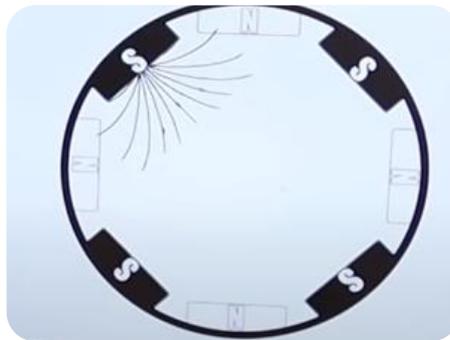


Fig.5. Campo electromagnético proporcionado por los imanes permanentes del estator.

La Figura 5 indica la representación de un flujo magnético que crea el *imán* "S". Por ley de Faraday, tomando en referencia. “Si se desplaza o se mueve un imán delante de una bobina, esto inducirá una corriente dentro de la mencionada bobina” (Kuperstein et al., 2010).

De tal forma que si aquella bobina tiene una resistencia, esta bobina creará una caída de voltaje. Es posible leer la caída de voltaje en la bobina mediante sensores, pulsos etc.

De esta forma empieza un ciclo de trabajo en cada uno de los los imanes permanentes, creando un flujo magnético.

1.2.4. Marcas y Motores.

Motor Brushless	Tipos de Marcas
500W	Eco-BIKE
280 W	Electric-Scooter Wtepeng
100 W	Electric-Scooter HiGear
10W	Electric Coolplay

Tabla 1: Potencias y marcas del scooter eléctrico (Cenergía, 2020).

El Motor de un Scooter Eléctrico es un motor tipo Brushless, de tal forma que se lo nombrará a partir de esta sección con el nombre de “Motor Brushless”.

Se observa los distintos tipos de potencias que existen en el mercado; tomando en cuenta la Tabla1.

Al ser un documento de experimentación de motores brushless, se procede a realizar la experimentación con distintos tipos de motores, con el objetivo de obtener el funcionamiento correcto del inversor trifásico.

1.3. Controlador del Scooter Eléctrico

Se controla la velocidad en un motor Eléctrico Brushless de distintas maneras, una de las formas es mediante el componente llamado “E.S.C” o “Controlador - Cerebro”.

El E.S.C es el conjunto de transistores que funcionan en forma de Switch trifásico para el paso de corriente y voltaje, convirtiendo el voltaje DC de las baterías de un Scooter eléctrico en a un voltaje AC para el Motor Brushless(FvpMax, 2016).

La función principal del “E.S.C.” es el control de velocidad en un Scooter eléctrico siendo un dispositivo o un grupo de dispositivos que sirven para gobernar de alguna forma el desempeño de un motor eléctrico(Journal, 2020).

Un controlador de Scooter eléctrico incluye un manual de medios automáticos para el arranque o para el motor, tiene distintas características (E-Bike, 2020).

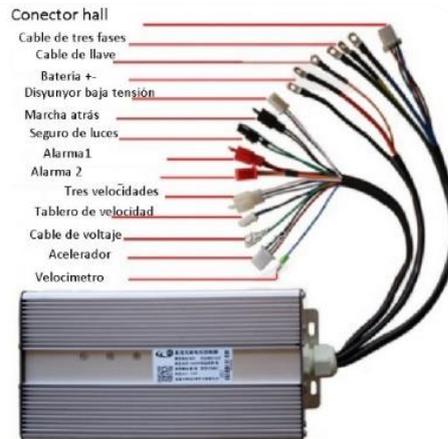


Fig.6. Controlador de velocidad o Esc.
Fuente: (E-Bike, 2020)

Como se observa en la Figura 6, el “Cerebro *del Scooter*” es una de las partes más importantes. Se lo llama controlador por sus multifunciones que consta, entre estas funciones, las más importantes:

- El control de arranque (Corriente)
- Velocímetro
- Control de voltaje suministrado por la batería.
- Control de luces delanteras y traseras.

Siendo el control de arranque la parte implementada en la presente investigación, no se dará mayor hincapié acerca del velocímetro, control de voltaje suministrado por la batería y el control de luces.

2. Convertidores de potencia.

Existen distintos convertidores de potencia de los más importantes se tiene al Buck, Boost, Inversor, Convertidor Buck-Boost entre otros.

2.2. Convertidor Buck-Boost (Reductor -Elevador)

El convertidor Buck-Boost, es un tipo de convertidor conmutado DC-DC también conocido por el nombre de convertidor “reductor-elevador”. La principal aplicación de este convertidor, que como su nombre indica puede trabajar tanto de convertidor elevador como de reductor, se encuentra en aquellas fuentes conmutadas en las que se desea que la polaridad de la tensión de salida sea contraria a la existente a la entrada del convertidor(Ortega, 2002).

En la Figura 7 se observa el esquema de un convertidor DC-DC de tipo Buck-Boost.

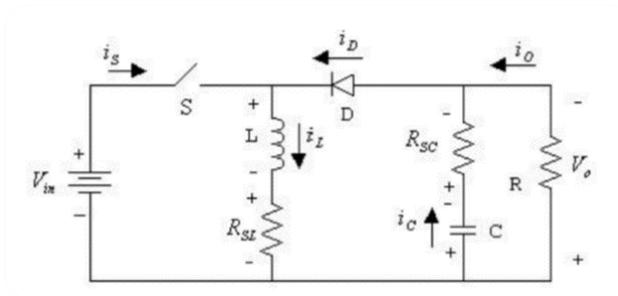


Fig.7. Convertidor Buck-Boost
Fuente: (Ortega, 2002)

2.2.1. Funcionamiento del convertidor “Buck-Boost”

El funcionamiento del convertidor va mediante el suministro de voltaje que este puede ser menor o también mayor que el mismo voltaje de la entrada, de ahí se le conoce como el “reductor-elevador”; en sí la polaridad del voltaje de la salida es en cierta forma opuesta a el voltaje de la entrada. Cabe mencionar además que este regulador se lo conoce como inversor(Aguirre et al., 1992).

En su método de funcionamiento cuando "S" o el interruptor está cerrado, la fuente "V_{in}" la cual es la entrada se conecta a la bobina, siendo al mismo tiempo que el diodo conocido como "D" queda de esta forma polarizado inversamente. A consecuencia de lo dicho, la intensidad que circula por la inductancia de esta forma crece de una forma lineal y almacenando energía(Ortega, 2002). De forma que transcurrido el " T_{ON} ", el interruptor antes

mencionado se abrirá, con lo que la energía la cual fue almacenada en la bobina será transferida por el diodo hacia el resto del circuito.

Así mismo durante el intervalo " T_{OFF} ", del convertidor, en este caso la fuente no va a suministrar ningún tipo de energía, lo que quiere decir que se distingue al igual que en los convertidores antes mencionados, existiendo igualmente dos modos de operación dependiendo de la corriente del inductor o " L ", se anule en el periodo de operación.

2.2.2. Modo de conexión continua y discontinua

El convertidor tiene la forma de conexión continua y discontinua siendo de topología tanto tipo " OFF " y " ON " siendo la conexión continua aquella que el transistor al estar conmutado de forma periódica con la frecuencia de $f = 1/T$, de esta forma el circuito presentara dos topologías según el tipo de estado que se encuentre el interruptor, esto quiere decir por ejemplo si $t = 0$, empezara a conducir el interruptor conocido como " S " en topología tipo " ON ", se observa en la Figura 8 el circuito equivalente de dicha topología. (Ortega, 2002)

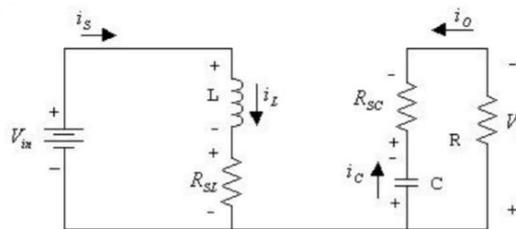


Fig.8. Convertidor tipo "Buck-Boost" en topología tipo "On", en el intervalo de $0 < t < T_{ON}$ Fuente:(John Jairo García Ortiz & Suasti, 2021)

De igual forma en el caso de la topología en tipo " OFF ", al conocer un tiempo " δt " después de dicho tiempo, el interruptor cambia a bloqueo en la mencionada topología " OFF ", de esta forma genera una sobretensión la cual hace que el diodo " D " conduzca en marcha libre manteniendo de esta forma la continuidad de la corriente que pasa por " L ". (John Jairo García Ortiz & Suasti, 2021)

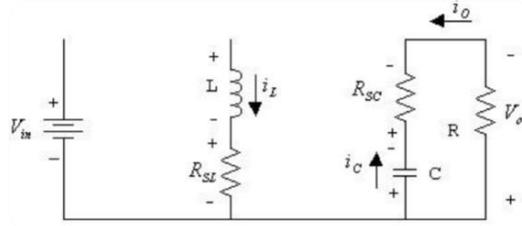


Fig.9. Convertidor tipo "Buck-Boost" en topología tipo "Off"
Fuente: :(John Jairo García Ortiz & Suasti, 2021)

Se observa la Figura.9 la cual en un instante determinado como por ejemplo $T = T_{OFF}$ la corriente en i_L se anula.

2.3. Inversores

Los inversores son utilizados en electrónica de potencia, al momento de realizar en específico un tipo de conversión de energía, ya sea en conversión continua-alterna o (DC/AC) (Canteli, 2013).

En la Figura 10 se observa el ejemplo de un circuito inversor monofásico.

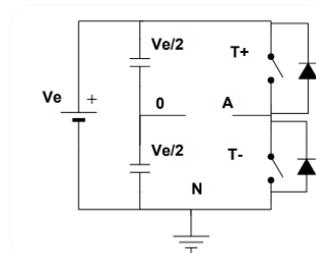


Fig.10. Gráfico de un inversor en conjunto con una fuente denotada como V_e Inversor
Fuente: (González, 2018)

En el circuito de la Figura 10 se observa a dos interruptores $T +$ y $T -$, de tal forma que la tensión de entrada será constante con un valor V_e ; los condensadores funcionan como fuentes Dc, y se dividen por el V_e común, para luego los $T +, T -$ sean los semiconductores complementarios, switch(González, 2018).

2.3.1. Inversores monofásicos

Existen distintos tipos de inversores. Inversor monofásico, inversor bifásico e inversor trifásico; en la presente investigación se utilizó un inversor trifásico, para entender su

funcionamiento es necesario comprender acerca del inversor monofásico, ya que el inversor trifásico está compuesto por tres ramas o tres fases(González, 2018).

Los inversores monofásicos son capaces de generar voltaje alterno a partir de una fuente continua, de una fase, ha eso se debe el nombre inversor monofásico (González, 2018).

Se observa en la Figura 11 un inversor monofásico, cabe mencionar que estos inversores pueden estar en medio puente y puente completo.

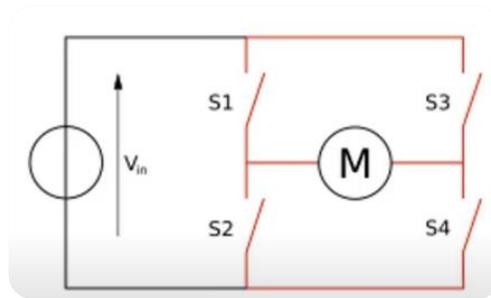


Fig.11.Inversor monofásico puente completo.

En caso del puente completo, o puente H, este es utilizado generalmente para el control de giro de un motor o si se desea generar un voltaje AC, a partir de un voltaje DC.

En caso de ser medio puente, este inversor requiere un tipo de fuente de tres conductores, para lo cual, si un transistor está activo, su voltaje inverso es V_{in} , en vez de ser $V_{in}/2$, Figura12 (González, 2018).

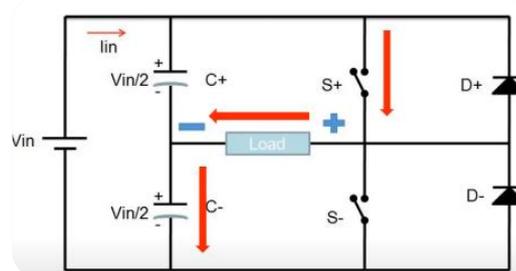


Fig.12. Circuito medio puente

2.3.2. Inversores Trifásicos

Los inversores trifásicos, tiene una lógica igual al de los monofásicos, pero utilizan tres fases, dicho lo anterior se puede decir también que son usados en alta potencia, siendo tres inversores medio puente o puente completo y se encuentran conectados en paralelo; siendo necesario el uso de tres transformadores, 12 transistores y 12 diodos(González, 2018),Figura 13.

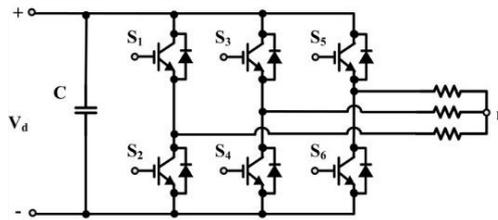


Fig.13. Inversor trifásico

En efecto el Inversor trifásico de Figura 13 fue utilizado en la presente implementación principalmente por su robustez en potencias altas, corrientes y voltajes variables.

3. Estrategias de control de corriente de un Motor Brushless

Se puede realizar el control de Maquinas eléctricas y motores brushless mediante las estrategias de control en Lazo abierto y en Lazo cerrado.

3.2. Lazo Cerrado

El control en lazo cerrado es un algoritmo que aparece ante una necesidad de corregir algún tipo de extravíos de salida frente a una referencia de voltaje o corriente de forma automática de un motor. Siendo el automatismo evaluativo el que dé a conocer el control de corriente y voltaje del motor mediante un sensor el cual actuaría automáticamente en consecuencia(S. Sinadrives, 2021) Figura14.

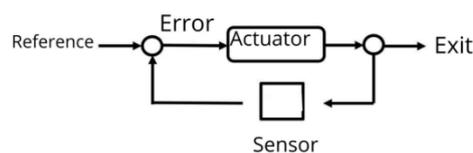


Fig.14. Referencia de un control de Lazo Cerrado (S. Sinadrives, 2021).

Al ser el control de Lazo cerrado, el controlador de velocidad del motor se utilizaría mediante señales y sensores para el movimiento del motor brushless.

3.3. Lazo Abierto

El control de potencia en lazo abierto es un algoritmo preciso en la estimación de la potencia tanto en la salida como en la entrada, tomando valores puntuales en el tiempo, sin necesidad de utilizar sensores o medidores de Voltaje-Corriente. (Moreno Delgado et al., 2018) Figura15.



Fig.15. Referencia de un control de Lazo Cerrado (S. Sinadrives, 2021).

En lazo abierto, el control de la velocidad del motor utilizaría una referencia de corriente y voltaje para el arranque del motor, siendo actuada dicha referencia por un acelerador o un potenciómetro en forma de rampa en el tiempo.

En efecto, al considerar los dos tipos de estrategias de control de torque de un motor-Scooter eléctrico; se utilizó la estrategia de control a Lazo abierto de tal forma que la implementación se realizó mediante el control de corriente y voltaje en el tiempo ejecutando una rampa de corriente en las tres ramas o fases.

3.3.1. Modulación ancho de pulso (PWM) y control de Lazo Abierto

Para el control de velocidad del motor trifásico en lazo abierto es necesario tener en cuenta los tipos de ondas que el motor brushless utiliza para su funcionamiento.

Los tipos de ondas que utiliza un motor trifásico brushless son en forma senoidal y están desfasadas a 120° o 180° entre sí (Moreno Delgado et al., 2018).

3.3.2. Modulación PWM

La modulación PWM es la generación de pulsos con una frecuencia determinada o dada, se hace variar el ciclo del trabajo o llamado también “Duty Cycle”, siendo el caso de los

convertidores , al obtener dicha forma de onda , mediante la comparación de una señal triangular con la frecuencia fija de un nivel de tensión continua, en donde se observa a continuación en la Figura 16(González, 2018).

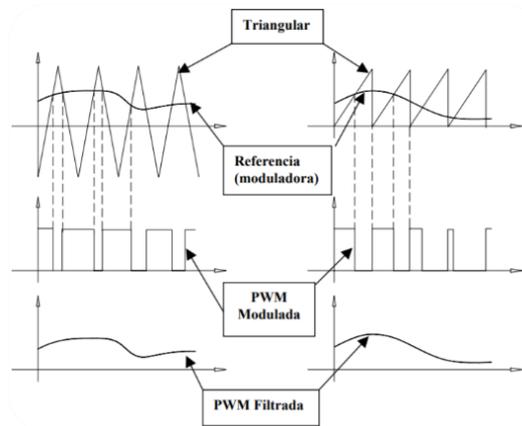


Fig.16. Formas posibles de generación de señal PWM
Fuente: González, 2018)

Cabe mencionar además si sea el caso de ser una señal sinusoidal en modulación de ancho de pulso, se la conoce como SPWM donde la señal de referencia es seno y la señal portadora es triangular. De tal forma que los pulsos de la activación se producen en el momento de la comparación de estas dos señales, y el ancho de pulso sería la variación en proporción a la amplitud de la onda seno. La frecuencia es la referencia determinativa de la salida del inversor(Namboodiri & Wani, 2014).

3.3.2.1. Técnicas de modulación de señal PWM

Existen dos formas de modular una señal PWM. En el siguiente apartado se indicó la diferencia entre estas modulaciones y se eligió la modulación indicada para el control del motor brushless en la presente investigación.

3.3.2.2. Señal Bipolar

La señal bipolar es el momento en el cual los interruptores en superior e inferior en la misma pata del inversor funciona de forma complementaria con un interruptor encendido otro apagado, por lo tanto, se debe considerar dos señales de activación independientes, según la Figura 17. V_{g1} , V_{g3} (Namboodiri & Wani, 2014).

Las dos señales activadas al comparar con la onda de modulación sinusoidal v y la onda portadora triangular V_{cr} . Dado que la forma de onda de V_{AB} cambia entre voltajes de CC positivos y negativos, este esquema se denomina PWM bipolar.

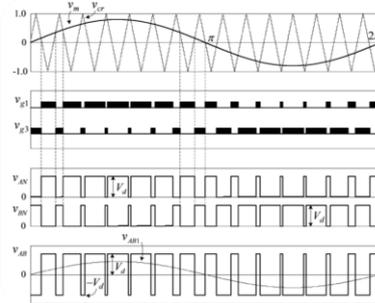


Fig. 17. Formas de onda esquema modulación bipolar
Autor: (Namboodiri & Wani, 2014)

3.3.2.3. Señal Unipolar

La modulación unipolar, es aquella que requiere dos ondas de modulación sinusoidales, las cuales son la misma magnitud y también la frecuencia, pero 180° fuera de fase. Las dos ondas de modulación son comparadas con una onda portadora triangular común, generando dos señales de puerta, para los dos interruptores $S1$ y $S2$, se puede observar que estos dos superiores no se conmutan de forma simultánea, a lo que se distingue del PWM bipolar en el que los cuatro se conmutan al mismo tiempo. El voltaje de salida además del inversor cambia entre cero $+V_d$ durante medio ciclo positivo o entre cero $-V_d$ durante el semiciclo negativo de la frecuencia que es fundamental, de esta forma el esquema se denomina modulación unipolar. El inversor conmutado unipolar ofrece las pérdidas de conmutación reducidos. En términos de eficiencia, el inversor conmutado unipolar parece tener una cierta ventaja. (Namboodiri & Wani, 2014)

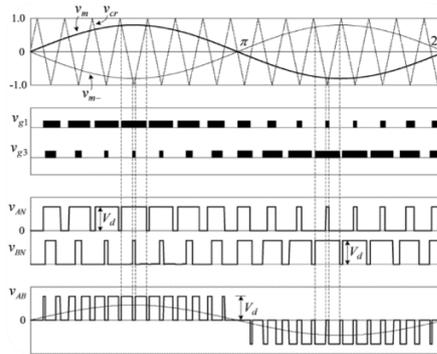


Fig. 18. Formas de esquema de modulación unipolar
 Autor: (Namboodiri & Wani, 2014)

3.4. Modulación utilizada

Al realizar la comparación entre la modulación Unipolar y Bipolar de una señal PWM. Se utilizó la modulación Unipolar, en la implementación, mediante un microcontrolador se programó tres tipos de ondas senoidales desfasadas 120° unas de otras, de tal forma que al utilizar este tipo de modulación es posible tener menos armónicos y obtener mayor eficiencia.

CAPÍTULO 2

Diseño del inversor trifásico para el funcionamiento del motor brushless, simulación del control de voltaje-corriente en lazo abierto

La investigación bibliográfica permitió realizar la descripción de los parámetros que rigen al sistema principal del inversor trifásico y el modelado matemático del convertidor de potencia permitió entender el tipo de onda trifásica que el motor brushless necesita para su funcionamiento; el resultado de la curva de comportamiento predefinida en lazo abierto del motor es justificado en la simulación de MATLAB/Simulink.

2.1. Metodología

La implementación empleó la presente metodología con el fin de dar a conocer las etapas de experimentación del inversor trifásico en una carga inicial para la posterior experimentación en un motor brushless; se observa en la Figura 19 la unión de distintas características de la metodológica expuesta.

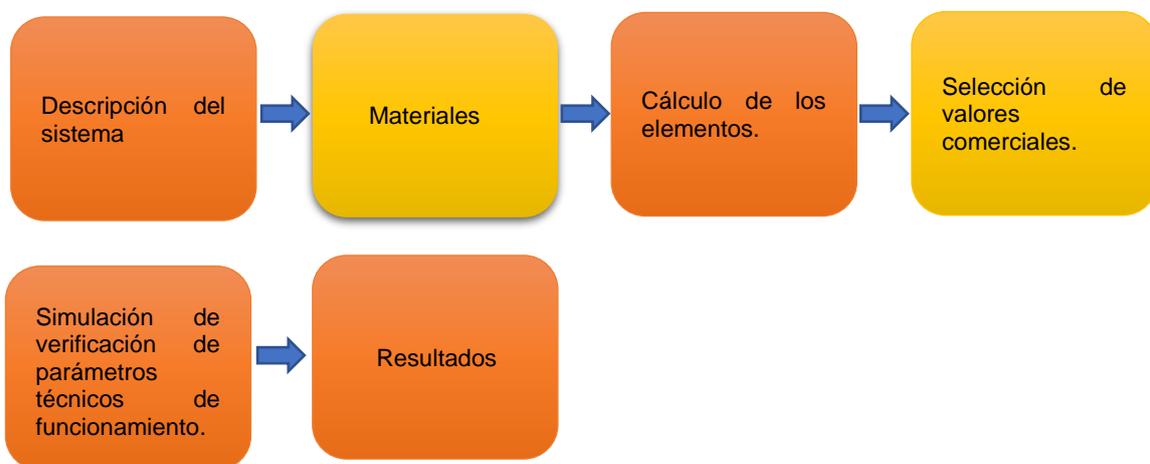


Fig.19. Metodología

2.2. Descripción del Sistema

El modelo matemático del sistema trifásico compuesto por un inversor convertidor DC/AC permitió entender el tipo de onda requerida para el funcionamiento del motor brushless. La programación significó parte influyente en la creación de las ondas tipo “Seno” necesarias para un motor trifásico, realizando el control de voltaje y corriente mediante una curva de comportamiento predefinida en lazo abierto. El estudio del sistema de alimentación

de un motor brushless permitió utilizar una fuente de voltaje-corriente simulando al banco de baterías DC que rigen al sistema de alimentación principal comercial.

2.2.1. Diagrama de bloques representativo del sistema

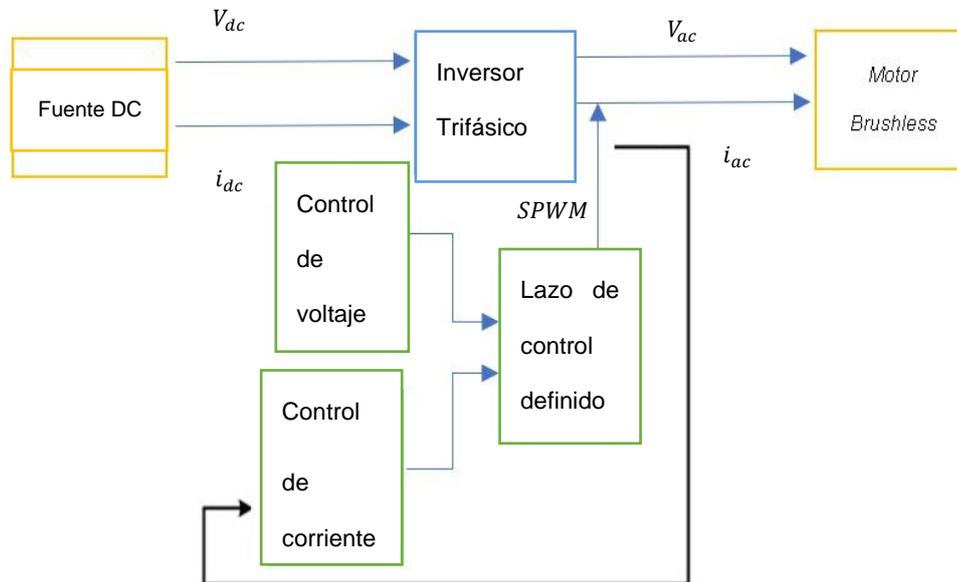


Fig.20 Diagrama de bloques de la implementación

La descripción de la Figura 20 refiere a los elementos que conforman el sistema de la presente implementación, se aprecia el sistema de alimentación principal de voltaje y corriente denotadas como V_{dc} , i_{dc} ; la salida del convertidor permite observar la conversión de potencia DC en AC de tal forma que la señal SPWM fundada por el control de lazo predefinido establece una conexión entre el inversor y el motor, siendo complemento para el correcto funcionamiento del motor trifásico brushless.

2.2.2. Equipos utilizados en la implementación

En la presente implementación se utilizaron los siguientes equipos:

- Fuente DC
- Osciloscopio de 4 canales
- Puntas diferenciales
- Microcontrolador

Cabe mencionar que la presente investigación se llevó a cabo en los laboratorios de la carrera de electricidad de la Universidad Técnica del Norte, los equipos se muestran a continuación:



Fig.21. Multímetro
2.0
Fuente: FLUKE



Fig.22. Fuente Voltaje,
Corriente
Fuente: Sorensen



Fig.23. Osciloscopio de cuatro
canales Rigol,
Fuente: Rigol ADS1014D



Fig.24. Osciloscopio
Hantek 2 canales
Fuente: Hantek 2 canales



Fig.25. Puntas diferenciales de
voltaje y corriente,
Fuente: Ct3683

2.2.2.1. Fuente DC

La fuente DC es un dispositivo que transforma la energía dada por la red, proporcionando una señal tipo DC o de tensión continua con el objetivo de alimentar a un circuito propuesto.

La fuente DC fue parte inicial de alimentación de la presente implementación en el circuito.

2.2.2.2. Osciloscopio de 4 canales

El nombre osciloscopio viene dado de la palabra oscilaciones, es capaz de registrar oscilaciones de distintos tipos de ondas y las presenta en una pantalla. La palabra canales

viene dada a el número de entradas que tiene un osciloscopio, en donde cada entrada significa una oscilación de un tipo de onda determinada (Alessio, 2007).

2.2.2.3. Puntas Diferenciales

Las puntas diferenciales son instrumentos de medición capaces de medir el voltaje entre dos puntos, tienen distintas características de medición, son capaces de detectar el tiempo en milisegundos de una señal de voltaje o de corriente, dependiendo del modelo.

Las puntas diferenciales son parte importante de un osciloscopio dado a que se conectan a la entrada de un osciloscopio (Alessio, 2007).

2.2.2.4. Microcontrolador

El microcontrolador es un hardware o dispositivo eléctrico capaz de realizar distintos tipos de tareas. Estas tareas se las realizan mediante procesos lógicos o algoritmos programables en un específico lenguaje de programación (Daniel N'ova, 2021).

2.2.3. Herramientas de utilizadas en la implementación.

En la implementación se utilizó distintos tipos de herramientas, siendo herramientas precisas como: modelos matemáticos, ecuaciones dadas de diseños y distintos tipos de softwares.

2.2.4. Descripción de Software utilizado

Las herramientas de software utilizadas se describen a continuación.

- Matlab – Simulink.
- Code Composer Studio.
- Hantek 6022BE.

2.2.4.1. Matlab – Simulink

Matlab es una herramienta de programación y calculo numérico utilizado para el análisis de distintos datos de algoritmos. Consta de distintas herramientas. En la presente implementación se utilizó la herramienta de Simulink, cabe mencionar que es necesario tener una licencia para el uso de Matlab por lo que se optó en utilizar la licencia estudiantil Matlab-2022.

2.2.4.2. Code Composer Studio

Code Composer Studio es un software libre utilizado en el desarrollo de aplicaciones para procesadores integrados de Instrumental Texas, siendo una herramienta de programación amigable con el usuario (Instrumental Texas, 2022).

2.2.4.3. Hantek 6022BE

Es un Software libre parte de la herramienta del osciloscopio físico de Hanktek, permite observar los distintos tipos de ondas y parámetros indicados en la presente implementación.

2.3. Características operativas del inversor en un motor trifásico

Las características operativas son los distintos parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del inversor trifásico, tomando en cuenta la selección de la frecuencia de conmutación y los modelos matemáticos necesarios para la realización del inversor trifásico.

2.3.1. Frecuencia utilizada

La Frecuencia de conmutación de un Mosfet viene estrechamente relacionada con el inversor el cual consta de 6 transistores, o MOSFETS; al seleccionarlos se elige una frecuencia de conmutación. Si el valor de pérdidas por conmutación es el propio valor que la suma de ajenas pérdidas como las resistivas del inversor, se hace reseña a la noción de frecuencia de conmutación crítica. Por lo que al optar una frecuencia de conmutación que se localiza sobre el valor crítico, el resto de las pérdidas serían menores a las pérdidas por conmutación, haciendo que la eficiencia del convertidor disminuya al aumentar la frecuencia de conmutación(Ribes-Mallada et al., 2011).

Cabe mencionar que el cambio de voltaje y corriente en el dispositivo semiconductor no es breve, incitando en cada conmutación pérdidas distintas. En efecto cuantas más veces por segundo se active y desactive el transistor, se disipará más potencia(Ribes-Mallada et al., 2011).

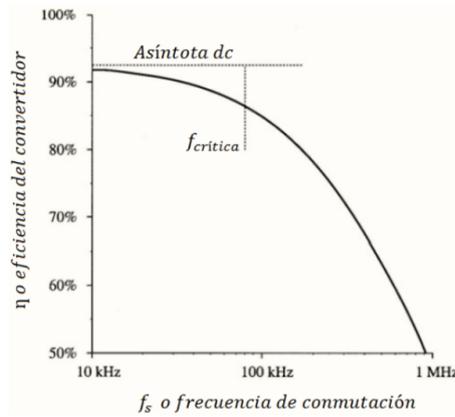


Fig.26. Eficiencia vs Frecuencia de Conmutación

Fuente: (Ribes-Mallada et al., 2011)

De tal forma que existe otro tipo de frecuencia referida como frecuencia total o dado por la fórmula.

$$F = \frac{1}{T} \quad (1)$$

$F = \text{Frecuencia}$

$T = \text{Periodo de Oscilación}$

2.3.2. Modelos matemáticos del inversor (VSI)

Cualquier inversor puede ser constituido por uno o varios voltajes de entrada de corriente continua, que por medio de un conjunto de interruptores pueden ser conectados a una carga mono o polifásica para obtener de manera alternada semiciclos positivos y negativos en la salida (Rodríguez Gilberto Jose, 2010).

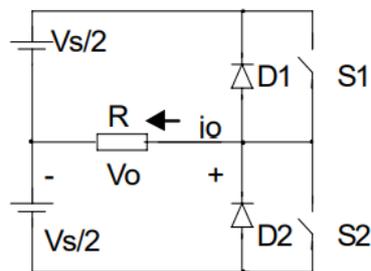


Fig.27. Circuito básico de un inversor
Fuente: (Rodríguez Gilberto Jose, 2010)

El principio de funcionamiento de un inversor se basa principalmente en la conducción de un interruptor durante un semiperíodo, es un instante el cual se le aplica a la carga una

tensión igual a $V_s/2$, junto con la obligación de una conducción la cual es alternada de igual forma no es simultánea de ambos interruptores, (Rodriguez Gilberto Jose, 2010). La tensión de salida se expresa:

$$V_{o_RMS} = \left(\frac{2}{T_0} * \int_0^{T_0/2} \frac{V_s^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_s}{2} \quad (2)$$

2.3.2.1. El inversor puente completo

Se utilizo la estructura tipo puente completo a diferencia de un medio puente por la razón de ser más robusto a diferencia de un medio puente, esto se refiere a que existe mayor control de conmutación en la salida del inversor. De tal forma que, en todos los inversores, si la carga es netamente resistiva pura, la forma de la onda de corriente es la igual que la de tensión. Sin embargo, sea el caso cuando la carga dispone de componentes reactivas, la intensidad estará desfasada positiva o negativamente. En los intervalos en los que la corriente y tensión no coincidan en signo, los interruptores se cortarán precisando la incorporación de diodos en antiparalelo, para viabilizar un conmutador bidireccional en corriente (Rodriguez Gilberto Jose, 2010). En la siguiente Figura se observa los instantes en los cuales indican los distintos intervalos de funcionamiento del interruptor.

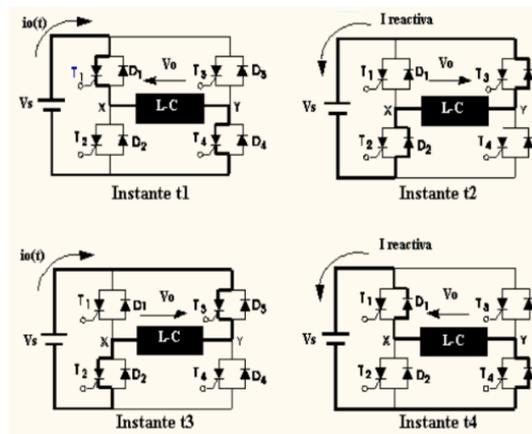


Fig.28. Instantes de conmutación de un inversor full puente
 Fuente: (Rodriguez Gilberto Jose, 2010)

La interpretación de la Figura 28 consta de cuatro graficas indicando los distintos instantes de conmutación que existen en un inversor full puente, siendo distintas configuraciones de conmutación.

Tomando en cuenta lo anterior mencionado y a V_{ek} como voltaje de entrada se tiene que el voltaje de salida del puente "H" o full puente:

$$v_{Hk} = (S_{ka} - S_{kb} - S_{kc})V_{ek}$$

Al modular, el voltaje de salida puente H promedio será:

$$v_{Hk} = (DT_{sa} - DT_{sb} - DT_{sc})V_{ek} \quad (3)$$

2.3.2.2. Ecuaciones de conmutación del inversor (VSI)

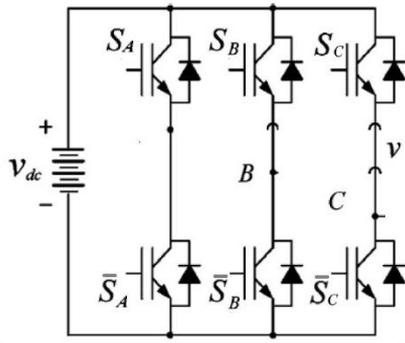


Fig.29. Inversor

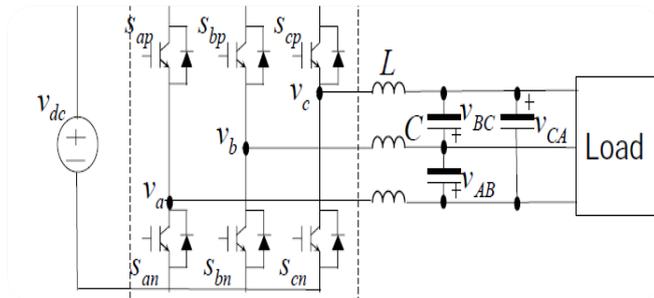


Fig.30. Relación de inversor en conjunto con la carga "VSI"

Un inversor trifásico, consta por tres ramas individuales o tres ramas monofásicas, denotadas como A, B, C (Marulanda et al., 2017). De tal forma que el diseño en monofásico permitió reconocer las ecuaciones fundamentales para el inversor trifásico de la presente investigación:

$$S_A = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \begin{cases} \text{si } S'_A \text{ ON}' \text{ y } \overline{S_A'} \text{ OFF}' \\ \text{si } S'_A \text{ OFF}' \text{ y } \overline{S_A'} \text{ ON}' \end{cases} \quad (4)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \begin{cases} \text{si } S'_B \text{ ON}' \text{ y } \overline{S_B'} \text{ OFF}' \\ \text{si } S'_B \text{ OFF}' \text{ y } \overline{S_B'} \text{ ON}' \end{cases} \quad (5)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \begin{cases} \text{si } S'_C \text{ ON}' \text{ y } \overline{S_C'} \text{ OFF}' \\ \text{si } S'_C \text{ OFF}' \text{ y } \overline{S_C'} \text{ ON}' \end{cases} \quad (6)$$

Las ecuaciones presentadas indican la conmutación del momento de configuración de la Figura 29.

2.3.2.3. Modelo promedio del inversor (VSI)

Observamos en el circuito de la Figura 30 mostrando los componentes del inversor en conjunto con el motor.

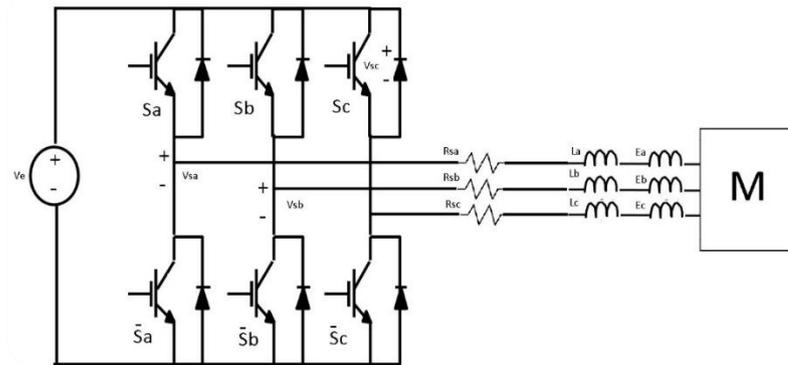


Fig.30. Esquema para el modelado del inversor Full Punte.

De tal forma se indica de referencia al voltaje de entrada denotado como V_e , siendo V_{sab} , V_{sbc} y V_{sca} las entradas del voltaje al motor, tomando en cuenta la lógica del encendido y apagado de los Switchs (S_a , S_b , S_c) indicados en el apartado anterior. Se toma la lógica siguiente:

$$S_a = 1$$

$$V_{sa} = V_e$$

$$S_a = 0$$

$$V_{sa} = 0$$

$$V_{sa} = S_a V_e$$

$$\begin{cases} V_{sa} = V_e \\ V_{sa} = 0 \\ V_{sa} = S_a V_e \end{cases} \quad (7)$$

2.4. Características operativas de programación para el inversor trifásico

Las características operativas de programación son parámetros utilizados para la lectura del funcionamiento del inversor trifásico en conjunto con la carga inicial experimental para su posterior uso en un motor brushless.

2.4.1. Modulación SPWM

La implementación de la técnica SPWM se realiza haciendo uso de una tabla de valores que cambian senoidalmente, la cual se carga en la memoria del microcontrolador y se accede a ella cíclicamente; multiplicando este valor de la tabla por la frecuencia de salida se obtiene el valor de ciclo útil correspondiente a cada valor de la tabla, resultando en una variación senoidal del ciclo útil a la salida. Dado que el inversor es trifásico, se utilizan tres punteros desfasados 120 grados uno con respecto del otro (Aganza et al., 2006).

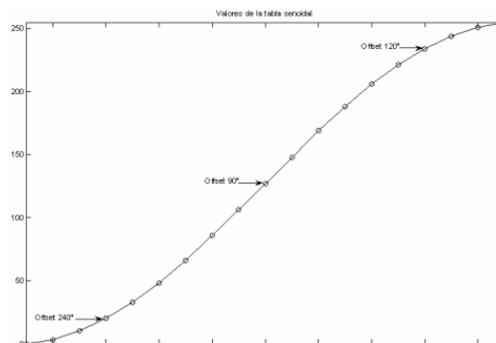


Fig.31. Punteros en la tabla de valores senoidales para la generación del voltaje de salida del inversor.

Fuente: (Aganza et al., 2006)

2.4.2. Señal triangular y señal moduladora

La comparación entre la señal triangular y una señal moduladora dan por resultado una señal SPWM, eso viene dado por lo siguiente.

Llamaremos a "*D*" al *Duty Cycle* y la comparación de señal triangular "*Carrier*" y Señal moduladora "*V_m*".

$$V_{pwm} = \begin{cases} V_m > Carrier = 1; \\ V_m < Carrier = 0; \end{cases}$$

En donde

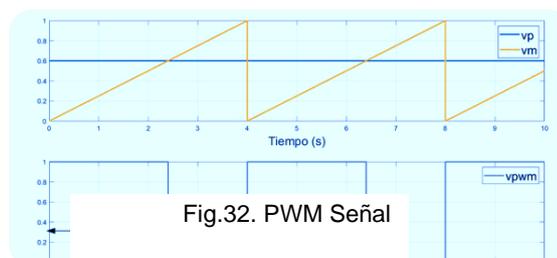


Fig.32. PWM Señal

Mediante la ley de triángulos, o semejanza de triángulos, en donde participan tanto la señal moduladora y la señal portadora, siendo DT el periodo en porcentaje en donde $V_m = 1$ se obtiene:

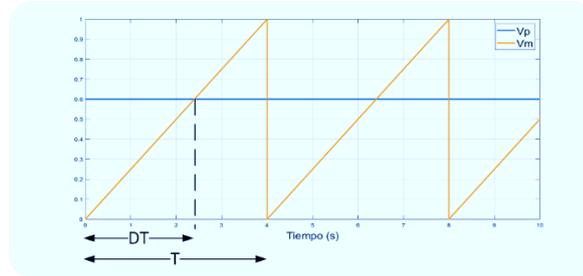


Fig.33. Duty Cycle señal PWM

$$\begin{cases} \frac{V_p}{T} = \frac{V_m}{DT} \\ D = \frac{V_m}{V_p} \end{cases} \quad (8)$$

En la Figura 34 se observa que para cada valor de ciclo útil se genera un voltaje instantáneo, y la suma de este voltaje a través del tiempo da el voltaje promedio de salida; el cual como se puede observar es del tipo senoidal C

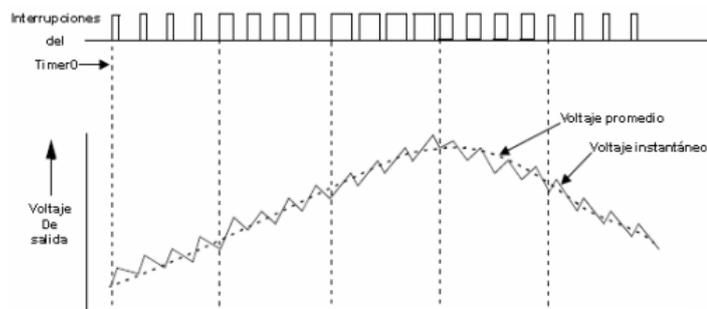


Fig.34. Voltaje instantáneo y promedio generado mediante las interrupciones del timer0 y los valores de la tabla senoidal.

Fuente: (Aganza et al., 2006)

El semiciclo de voltaje de salida mostrado en la Figura 34 corresponde al voltaje en un MOSFET de una rama del puente inversor. La frecuencia de salida se encuentra dada por el temporizador timer del microcontrolador (Aganza et al., 2006). Se indica a continuación.

$$Timer = \frac{\frac{F_{osc}}{4}}{2(NPT - 1) * PT0 * f} \quad (9)$$

F_{osc} = Frecuencia interna de trabajo microcontrolador.

NPT = Numero de puntos de la tabla Senoidal.

$PT0$ = Prescalizador Temporizador Timer.

f = Valor digitalizado proveniente del potenciómetro del convertido ADC.

En relación con la modulación SPWM en un motor trifásico, se utilizó los fundamentos de la modulación unipolar, en donde el "Switch" "A" se modula con "A" y el Switch "B" se modula con "B", de igual forma el Switch "C" con "C"

2.4.3. Onda sinusoidal

Existen distintos tipos de ondas, entre ellas se encuentran las ondas triangulares, rectangulares, dientes de sierra y la onda tipo seno.

La literatura del capítulo uno permitió identificar los distintos parámetros de la onda utilizada en la presente implementación, esto se refiere a la utilización de la onda tipo seno.

Partiendo de la ecuación:

$$x(t) = A * Sin(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

De tal forma que:

A = Es la amplitud utilizada

Sin = Es la funcion utilizada

ω = Es el espacio de formas diferenciales

t = El tiempo de la onda

φ = Fase de desplazamiento de la onda seno

2.4.4. Control de desfase de una onda trifásica en simulación

El presente capítulo presenta la función de Matlab para conseguir el desfase en una onda senoidal, para ello se utilizó la herramienta: *'Sine wave'*

Los parámetros repetitivos de secuencia Muestra una secuencia repetitiva de números especificados en una tabla de pares de valores de tiempo. Los valores de tiempo deben aumentar monótonamente.

2.4.5. Control de desfase de una onda trifásica en la implementación

El control de desfase viene dado por distintos parámetros en un microcontrolador, el microcontrolador adapta algoritmos programados y específicos mediante la creación de tres ondas sinusoidales desfasadas en los tiempos de 0° , 120° y -120° .

2.4.6. Control de la velocidad en simulación

El control de velocidad se refiere a cambiar o modificar las tres ondas sinusoidales En el tiempo, esto se refiere a que en el tiempo se modifica la amplitud para ello en la simulación se utilizó la herramienta *'Parámetros repetitivos de secuencia'*.

Los parámetros repetitivos de secuencia Muestra una secuencia repetitiva de números especificados en una tabla de pares de valores de tiempo. Los valores de tiempo deben aumentar monótonamente.

2.4.7. El inductor

Las bobinas constituyen un elemento común en cualquier circuito de un sistema de energía eléctrica siendo parte esencial en un inductor, ya que estas almacenan energía en forma de un campo magnético (Aguirre et al., 1992).

Para el dimensionamiento del inductor, se debe tener en cuenta que la conmutación del inversor conmuta con un nivel l , dada como un $(1 - d)T$, $(1 + d)T$ en los casos respectivamente, siendo así que el voltaje:

$$V_l = V_s - V_o \quad (11)$$

Cuando $V_s = l$

$$lV_s = (V_o + V_L)(1 - d)T$$

Cuando $V_s = l + 1$

$$lV_s = (V_0 + V_L)dT$$

Con su voltaje medio

$$V_{medio} = (l + d)V_s$$

El voltaje del inductor correspondiente con el voltaje promedio de salida se tiene que:

$$V_l = V_s - V_{0prom} = L \frac{\Delta i}{\Delta T}$$

Despejando el valor de L:

$$L \frac{\Delta i}{\Delta T} = (l + 1)V_s - (l - d)V_s$$

$$L = \frac{V_o(1-d)}{\Delta i(P*f)} \quad (12)$$

L = Inductancia.

V_o = Voltaje utilizado.

d = Duty Cycle.

f = Frecuencia.

2.4.8. La Resistencia eléctrica

Tiene el nombre de resistencia eléctrica por la oposición que sienten los electrones al estar desplazados a través de algún tipo de material, se denota a la resistencia con la letra R y tiene como unidad del sistema internacional el ohm representado por Ω . Existen materiales independientes de resistencia esto quiere decir que en ellos pasan voltaje y corriente, (Guao O'rg, 2015). La fórmula para calcular la corriente es:

$$R = \frac{V}{I} \quad (13)$$

La letra 'R', representa a la *resistencia eléctrica*, a su vez la letra 'V' representa al *voltaje de alimentación o voltaje del sistema* y la letra 'I' representa a la *corriente utilizada*.

2.5. Diseño de los elementos del sistema de carga para el inversor

El sistema de carga para el inversor es la simulación física del motor brushless, tiene como objetivo poder analizar el comportamiento de las ondas de salida del inversor para experimentación posterior con un motor brushless, este compuesto se encuentra conformado por tres resistencias, tres inductancias y un potenciómetro.

2.5.1. Sistema de Carga en Simulink

En el software Matlab – Simulink, se utilizó un sistema de tres resistencias y tres inductancias virtuales, cada una de las resistencias constan de valores igual al igual que las inductancias, dado que el sistema de un motor se encuentra conformado por parámetros de funcionamiento muy parecidos al sistema de carga planteado, los resultados del funcionamiento son los mismos.

2.5.2. Pruebas de señal SPWM en la carga

Las pruebas con carga resistiva constan de tres resistencias y tres inductancias conectadas en estrella; con el objetivo de conocer el comportamiento de las señales trifásicas; tanto de la corriente como del voltaje. De esta forma el inductor en conjunto con la carga resistiva simula al motor brushless para su posterior conexión en el estudio de las ondas sinusoidales resultantes (Aganza et al., 2006).

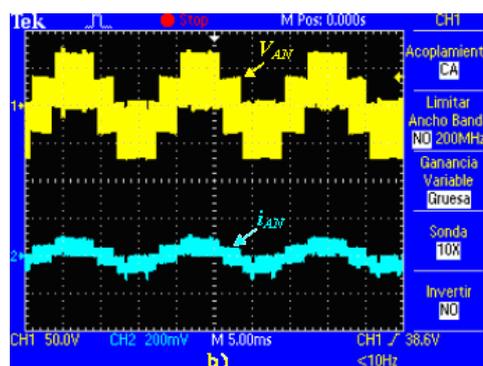


Fig.35. Voltaje de fase (V_{AN}) y corriente de fase (I_{AN})
Fuente: (Aganza et al., 2006)

Como indica la Figura 35 se observa la señal en el osciloscopio tanto del voltaje como de la corriente, señal proporcionada por la conexión del inductor en conjunto de la carga en conexión estrella (Aganza et al., 2006).

2.6. Tabla de Ecuaciones

En el siguiente apartado indican las diferentes ecuaciones utilizadas para el cálculo de los elementos utilizados en la investigación.

Nombres	Ecuaciones Utilizadas
(1) Frecuencia	$F = \frac{1}{T}$
(2) Tensión de salida	$V_{o_RMS} = \left(\frac{2}{T_0} * \int_0^{T_0} \frac{V_s^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_s}{2}$
(3) Voltaje puente H promedio	$v_{Hk} = (DT_{sa} - DT_{sb} - DT_{sc})V_{ek}$
(4) Configuración Conmutación 1	$S_A = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \begin{cases} \text{si } S'_A ON' y \overline{S'_A OFF'} \\ \text{si } S'_A OFF' y \overline{S'_A ON'} \end{cases}$
(5) Configuración Conmutación 2	$S_b = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \begin{cases} \text{si } S'_B ON' y \overline{S'_B OFF'} \\ \text{si } S'_B OFF' y \overline{S'_B ON'} \end{cases}$
(6) Configuración Conmutación 3	$S_c = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \begin{cases} \text{si } S'_C ON' y \overline{S'_C OFF'} \\ \text{si } S'_C OFF' y \overline{S'_C ON'} \end{cases}$
(7) Modelo promedio del Inversor	$\begin{cases} V_{sa} = V_e \\ V_{sa} = 0 \\ V_{sa} = S_a V_c \end{cases}$
(8) Señal triangular, señal modulator	$\begin{cases} \frac{V_p}{T} = \frac{V_m}{DT} \\ D = \frac{V_m}{V_p} \end{cases}$
(9) Frecuencia de salida del microcontrolador	$Timer = \frac{\frac{F_{osc}}{4}}{2(NPT - 1) * PT0 * f}$
(10) Ecuación fundamental de la onda sinusoidal	$x(t) = A * Sin(\omega t + \varphi)$

(11) Voltaje del inductor	$V_l = V_s - V_o$
(12) Formula general del inductor	$L = \frac{V_o(1-d)}{\Delta i(P * f)}$
(13) Resistencia eléctrica	$R = \frac{V}{I}$
(14) Modelo promedio del Switch y Duty Cycle	$\begin{cases} V_{sa} = d_a V_e \\ V_{sb} = d_b V_e \\ V_{sc} = d_c V_e \end{cases}$
(15) Modelo de voltaje en tres ramas	$\begin{cases} V_{ab} = V_e(d_a - d_b) \\ V_{bc} = V_e(d_b - d_c) \\ V_{ca} = V_e(d_c - d_a) \end{cases}$
(16) Duty Cycle de tres fases	$\begin{cases} d_a = A \text{sen}(\omega t) \\ d_b = A \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ d_c = A \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$
(17) Ecuaciones de rango del Duty Cycle de tres fases	$\begin{cases} d_a = A \text{sen}(\omega t) + \frac{1}{2} \\ d_b = A \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ d_c = A \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \end{cases}$
(18) Número de puntos de la generación de la onda senoidal	$F = \frac{4\text{kHz}}{60 \text{ Hz}}$
(19) Ecuación de la onda sinusoidal trifásica	$\begin{cases} d_a = \frac{1}{2} + \frac{a}{2} \text{sen } \omega t \\ d_b = \frac{1}{2} + \frac{a}{2} \text{sen } \omega t - 120 \\ d_c = \frac{1}{2} + \frac{a}{2} \text{sen } \omega t + 120 \end{cases}$

(20) Voltaje de tres fases en un motor brushless o trifásico eléctrico	$\begin{cases} V_a = A \operatorname{sen}(\omega t) + \frac{V_e}{2} \\ V_b = A \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{V_e}{2} \\ V_c = A \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{V_e}{2} \end{cases}$
(21) Sistema trifásico AC para un motor Brushless	$\begin{cases} V_{ab} = V_e A \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \\ V_{ac} = V_e A \operatorname{sen}(\omega t - \pi) \\ V_{ca} = V_e A \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{5\pi}{3}\right) \end{cases}$

Tabla 2: Ecuaciones fundamentales utilizadas.

3. Cálculo de los elementos

EL cálculo de los elementos partió a través de las ecuaciones fundamentales de un inductor, resistencia y conceptos básicos de ley de ohm y Kirchhoff; el resultado de los elementos permitió utilizar valores comerciables aproximados los cuales fueron utilizados para el inversor y se utilizó las resistencias en conjunto de las inductancias calculadas en la carga de la simulación en Matlab.

Cabe mencionar *que referirse a "Carga", significa* que el motor brushless será simulado con inductancias y resistencias; siendo inicialmente utilizado para la simulación en Matlab/Simulink y para el estudio físico del comportamiento de las ondas trifásicas en conjunto con el inversor modelado para su posterior implementación en un motor Brushless.

3.1. Frecuencia utilizada

La simulación permitió utilizar una frecuencia de conmutación de 4KHz, siendo una frecuencia de conmutación que se encuentra en el rango de eficiencia del inversor. Mientras menor frecuencia, las ondas sinusoidales tienden a deformarse en el pico más alto de corriente-voltaje, como indica la Figura 36.



Fig.36. Frecuencia 1KHz

De tal forma que la eficiencia de conmutación es mínima como indica la Figura 36, teniendo en cuenta que al momento de tener menor valor de conmutación el disparador o switch del Mosfet tiene menos posibilidad de leer correctamente las ondas sinusoidales simuladas en Matlab.

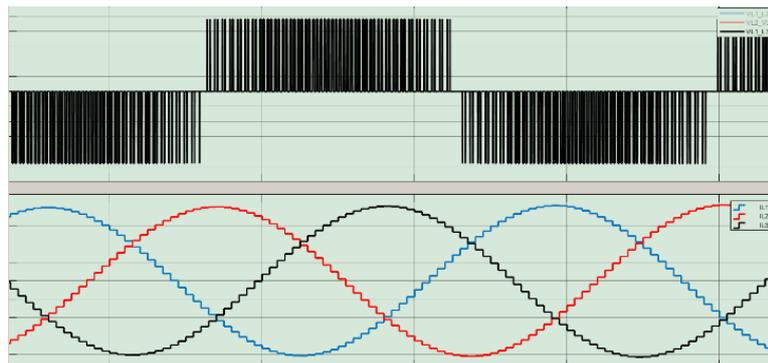


Fig.37. Frecuencia 4KHz

Como se observa la Figura 37 no se encuentra deformada como en la Figura anterior, siendo una frecuencia adecuada para la conmutación de los Mosfets en un inversor.

La frecuencia es el número de ciclos por segundo de una onda “*seno*” de corriente alterna (CA). De tal forma que la frecuencia es la velocidad a la que la corriente cambia de sentido por cada segundo esta se mide en hercios (Hz); donde 1 hercio es igual a 1 ciclo por segundo (F.Fluck, 2020).

Los circuitos y los equipos generalmente están diseñados para funcionar a una frecuencia fija o variable. En este caso los motores trifásico brushless están diseñados para funcionar a 50Hz -60Hz, Los motores diseñados para funcionar a una frecuencia la cual se

encuentra fija funcionan de forma anormal, siempre y cuando se operen en una frecuencia diferente a la especificada (F. Fluck, 2020).

De tal forma que la frecuencia de conmutación utilizada es de 4Khz y la frecuencia de trabajo de la onda senoidal completa es de 60Hz.

3.2. Inductor implementado en la carga

De la ecuación (12), en la implementación del inductor se utilizó el número de fases multiplicadas por la frecuencia y la corriente, llamaremos a la variable P como fase.

$$P = 3$$

Para obtener el valor del inductor fue necesario tomar en cuenta rizado de corriente a un 5% a 12 A con un valor de 0,6 siendo además que el ciclo de trabajo o Duty es a 4% o 0,04 del voltaje $V_o = 48$ y la frecuencia de conmutación es de 4KHz, se tiene que el valor del inductor será:

$$L = 4.16mHz$$

Al no existir un valor comercial de 4.16 se realiza una aproximación a 5 mHz.

3.3. Potenciómetro o resistencia variable

Cabe mencionar que al ser una onda senoidal en la cual la conmutación varía en el tiempo y el valor del Duty Cycle es variable, este depende de la utilización de un medio de aumento o en su contrario para variar la velocidad. En la presente implementación se utilizó un potenciómetro, con un valor de 1k Ohmio, tomando en cuenta la fórmula de la ecuación (13).

3.4. Ecuaciones del inversor trifásico

Las ecuaciones del inversor trifásico constan de los parámetros de suitcheo de conmutación de los Mosfets para ello es necesario tener en cuenta que de la ecuación (7) se tiene que el voltaje $V_{s\alpha}$ es la posición del switch $S_\alpha * V_e$ toma en referencia el siguiente parámetro:

$$\begin{cases} V_{sa} = S_a V_e \\ V_{sb} = S_b V_e \\ V_{sc} = S_c V_e \end{cases}$$

Al indicar el modelo promedio de las ecuaciones antes mencionadas se tiene lo siguiente

$$\begin{cases} \langle V_{sa}^s = S_a V_e \rangle \\ \langle V_{sb}^s = S_b V_e \rangle \\ \langle V_{sc}^s = S_c V_e \rangle \end{cases}$$

El modelo voltaje promedio del Switch y Duty Cycle

$$\begin{cases} V_{sa} = d_a V_e \\ V_{sb} = d_b V_e \\ V_{sc} = d_c V_e \end{cases} \quad (14)$$

La Ecuación anterior indica el voltaje promedio de las tres ramas en conjunto de los valores del Duty Cycle en cada una de las ramas; indica la relación entre el voltaje de cada rama y el Duty Cycle de cada uno de los Switchs o conmutaciones.

3.4.1. Modulación del Duty Cyclea

El apartado anterior indica la configuración de la relación entre los voltajes de las ramas y el Duty Cycle de cada uno de ellos. En efecto que $d_a V_e$, $d_b V_e$, $d_c V_e$ respectivamente están basadas en el modelo promedio indicado en la ecuación (7).

La modulación de las ecuaciones fundamentales se realizó mediante el teorema de las mallas Kirchhoff como se observa en el circuito de la Figura 26.

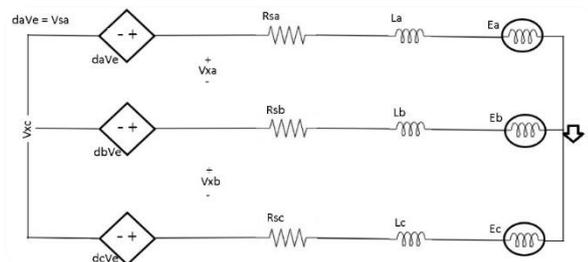


Fig.38. Esquema para elaboración de ecuaciones por Kirchhoff

Mediante mallas de Kirchhoff se tiene que:

$$V_{xa} = d_a V_e - d_b V_e = V_e (d_a - d_b)$$

$$\begin{cases} V_{ab} = V_e(d_a - d_b) \\ V_{bc} = V_e(d_b - d_c) \\ V_{ca} = V_e(d_c - d_a) \end{cases} \quad (15)$$

Al utilizar una señal seno en la ecuación (10) entonces se tiene lo siguiente:

$$d_a - d_b = \frac{V_p}{V_e} \text{sen}(\omega t)$$

$$d_a - d_b = A \text{sen}(\omega t)$$

$$d_a = V_e d_a = V_p \text{sen}(\omega t)$$

$$d_b = V_e d_b = V_p \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$d_c = V_e d_c = V_p \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\begin{cases} d_a = A \text{sen}(\omega t) \\ d_b = A \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ d_c = A \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (16)$$

Al tener en cuenta que los valores del Duty Cycle se encuentran entre los valores de 0 a 1, es necesario la utilización de offset o compensación el cual lleva el valor de $\frac{1}{2}$ para cada una de las ecuaciones del Duty Cycle de esta forma cumplirían con los valores de rango del Duty Cycle.

$$\begin{aligned} d_a &= A \text{sen}(\omega t) + \frac{1}{2} \\ d_b &= A \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ d_c &= A \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (17)$$

3.4.2. Conmutación de Switchs

De tal forma que se utilizaron 67 puntos para la generación de voltaje de salida del inversor utilizado en la implementación, el cálculo utilizado; es la relación entre la frecuencia de conmutación y la frecuencia total antes mencionada.

$$F = \frac{4\text{kHz}}{60\text{Hz}} \quad (18)$$

resumidamente, activando y desactivando los transistores en la forma física, siendo La señal SPWM funciona esta la técnica de modulación utilizada se debe tomar en cuenta distintos parámetros.

3.4.3. Ecuación de la onda sinusoidal

La realización de la onda sinusoidal viene dada a partir de la ecuación (10) de una onda sinusoidal.

De tal forma que se realiza la comparación de la onda *Sin* en conjunto con V_m en donde las ecuaciones del D. Cycle:

$$\begin{cases} da = \frac{1}{2} + \frac{a}{2} \text{sen } \omega t \\ db = \frac{1}{2} + \frac{a}{2} \text{sen } \omega t - 120 \\ dc = \frac{1}{2} + \frac{a}{2} \text{sen } \omega t + 120 \end{cases} \quad (19)$$

Siendo la estrategia utilizada en la presente tesis para la modulación trifásica, la modulación unipolar, partiendo de la ecuación mencionada, y de la modulación promedio antes realizada se indicará las ecuaciones.

3.4.4. Ecuaciones del motor Trifásico

Siendo de referencia las ecuaciones antes mencionadas del Duty Cycle:

$$\begin{cases} da = A \text{sen}(\omega t) + \frac{1}{2} \\ db = A \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ dc = A \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \end{cases}$$

Dado que, en la instancia de ecuaciones antes mencionadas podrían ingresar al motor valores DC y AC, a lo que motor al ser brushless, únicamente deberían ingresar señales AC, tomando en cuenta lo mencionado se tiene que:

$$\begin{cases} Va = A\text{sen}(\omega t) + \frac{V_e}{2} \\ Vb = A\text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{V_e}{2} \\ Vc = A\text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{V_e}{2} \end{cases} \quad (20)$$

De tal forma que a cada fase se le aporta con $V_e/2$ como un valor DC.

Al observar, las ecuaciones; el motor no registra dichas ecuaciones, dado que el motor no observa los voltajes de fase neutro, ya que el motor no tiene un neutro predefinido, entonces el motor observa únicamente la diferencia entre sus fases de tal forma que:

$$V_{ab} = V_e A \text{sen} \omega t + \frac{V_e}{2} - V_e A \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{V_e}{2} \quad (21)$$

Al ser sistemas trifásicos se elimina el contenido DC, de tal forma se tiene lo siguiente:

$$\begin{cases} V_{ab} = V_e A \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \\ V_{ac} = V_e A \text{sen}(\omega t - \pi) \\ V_{ca} = V_e A \text{sen}\left(\omega t - \frac{5\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (22)$$

Siendo los tres voltajes, sin contenido DC.

4. Selección de valores comerciales.

En la selección de valores comerciales, se encuentran los elementos pasivos, como el inversor VSI, dado esto es necesario indicar que no se puede usar un valor determinado en, inductores o así mismo en resistencias, siendo utilizado únicamente los valores universales estándar.

Es importante indicar además que al realizar el redimensionamiento del circuito existió cambios en la salida tanto de corriente como de voltaje; de tal forma los elementos como resistencias e inductancias tuvieron variación dependiendo de la salida del inductor.

Se utilizo un valor comerciable de un inductor como referencia en la cual se mostrará en la siguiente tabla, a continuación.

Frecuencia	Resistencia	Potenciómetro	Inductor
8KHz	15 Ω	10k	5mHz
4KHz	15 Ω	10k	5mHz

Tabla 3: Valores comerciales utilizados

5. Simulación de verificación de parámetros técnicos de funcionamiento

Para el entendimiento de mejor forma acerca del circuito control de corriente, se procede a observar en la herramienta de Matlab Simulink, una figura representativa o circuito en el que se trabajó, como se muestra en la siguiente Figura:

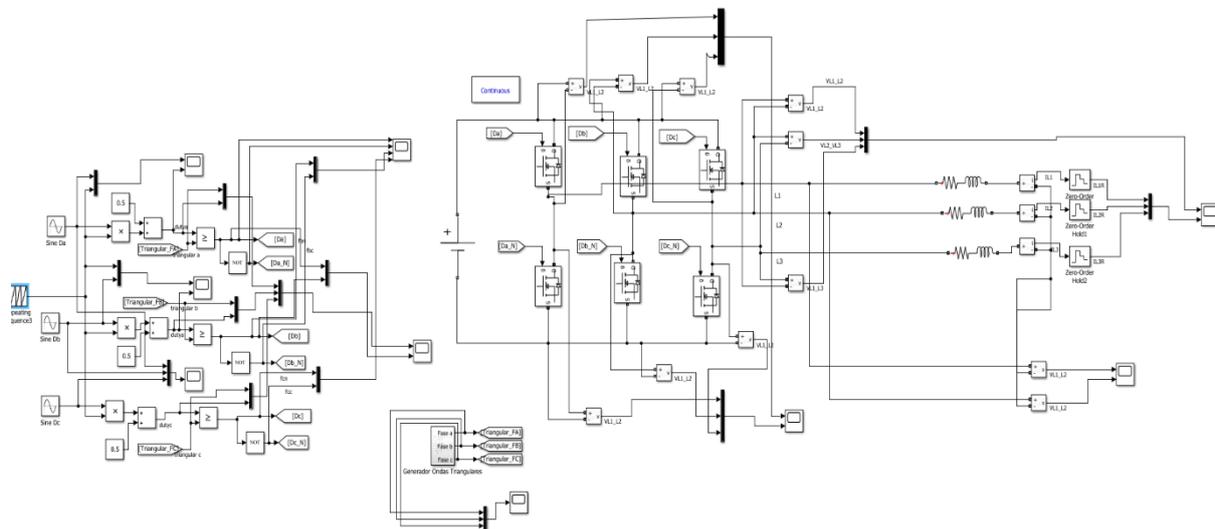


Fig.39. Circuito trifásico de control y de fuerza del inversor

Se observa en la Figura 39 el sistema del circuito del inversor en 3 bloques. Se tiene tanto el circuito de control el cual es el encargado de crear la señal senoidal; señal que se encuentra desfasada en 0° como la primera onda sinusoidal, -120° , la segunda onda sinusoidal y 120° como la tercera onda sinusoidal.

Es importante analizar también la señal moduladora o señal comparadora SPWM en conjunto de las ondas sinusoidales antes mencionadas para ello mediante la función '*Generador de ondas Triangulares*' del segundo bloque se encuentran las ondas comparadoras triangulares para su posterior modulación en SPWM.

La presente Figura indica además el circuito de Fuerza; en él se encuentran varios elementos; como es el inversor en conjunto con 6 Mosfets; además se aprecia la carga resistiva simulando al motor.

5.1. Funcionamiento del sistema de simulación planteado

De la literatura del apartado 2.4.8 permitió indicar la modulación de las ondas sinusoidales tomadas del Osciloscopio de Simulink, indicando el desfase que se encuentre entre ellas y el voltaje existente.

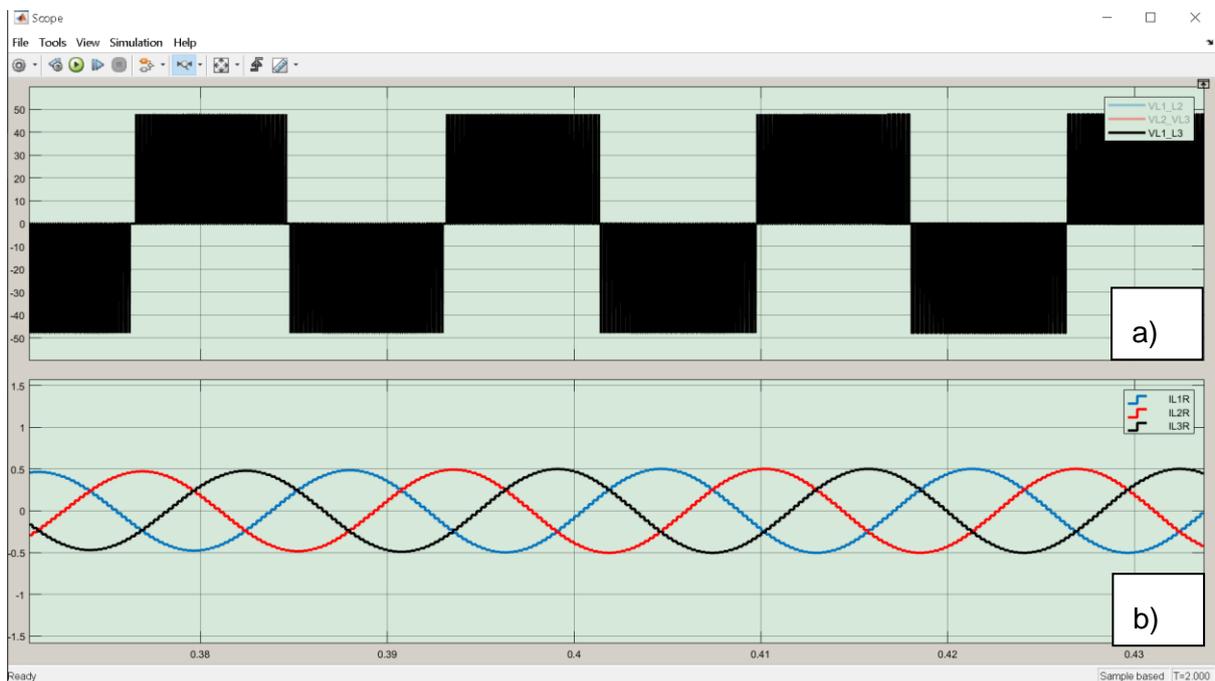


Fig.40. Simulación Simulink a) Voltaje y b) Corriente

La Figura 40 permite indicar la señal de salida del voltaje y de la corriente del convertidor inversor; indicando el desfase que se encuentra entre las ondas sinusoidales, desfase dado por:

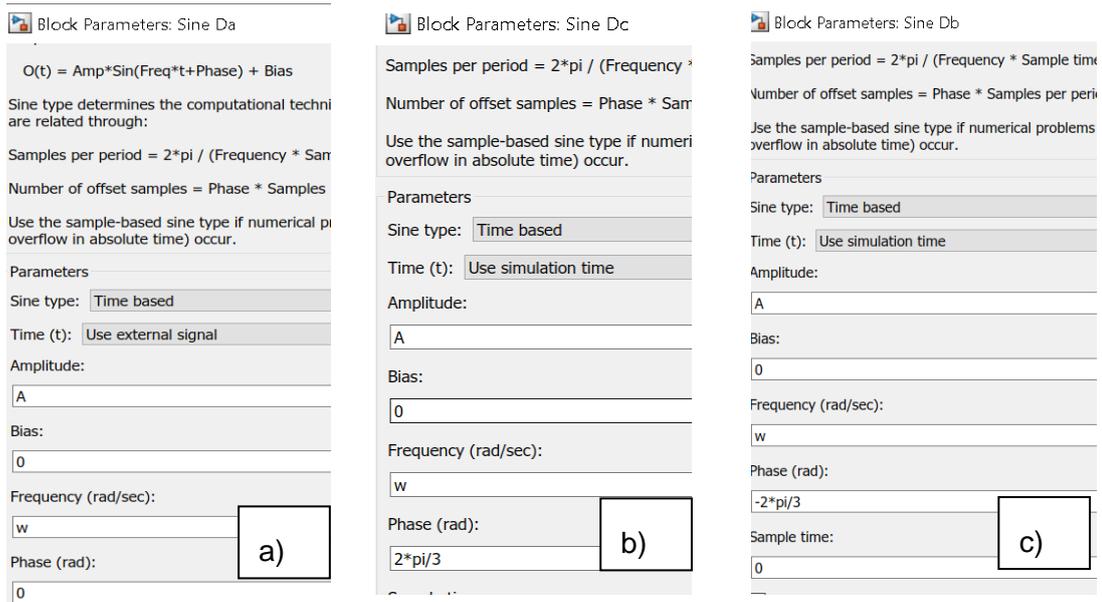


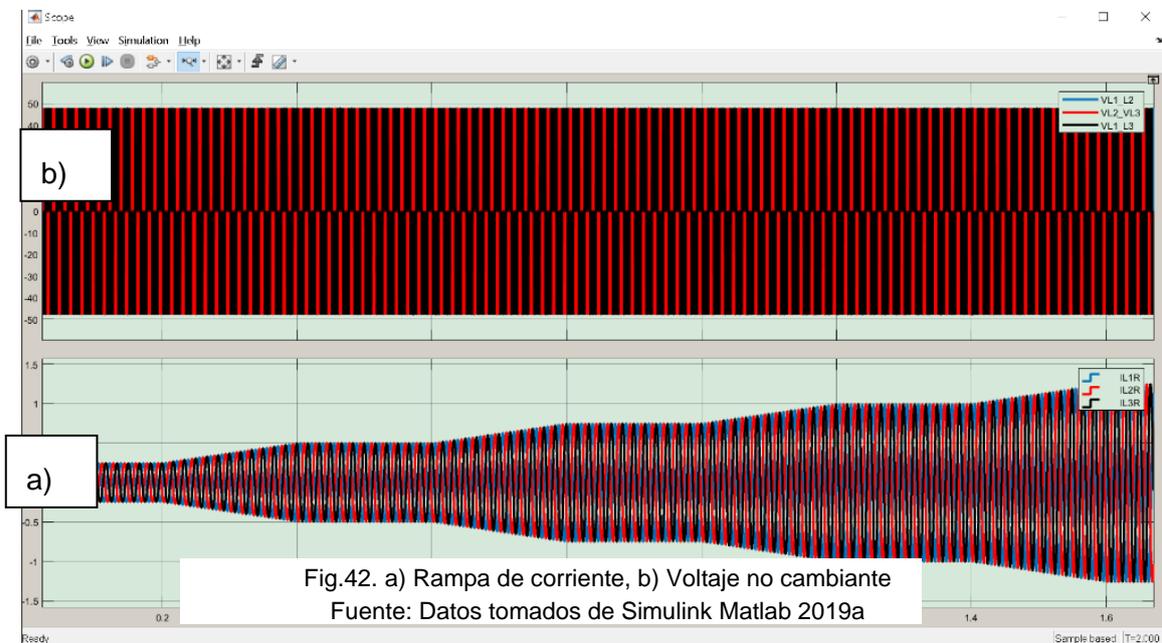
Fig.41. Parámetros de desfase a) 0°, b) 120° c) –120°
Fuente: Datos tomados de Simulink Matlab 2019a

En los parámetros indicados se encuentran los desfases de las tres ondas sinusoidales, se encuentran denotados como a) 0°, b) 120° c) –120°.

Cabe mencionar que el voltaje utilizado para la simulación es 48V, voltaje el cual es variable y no fijo, esto se debe a que es dependiente del tipo de motor utilizado en la implementación. En la Figura 41 literal a), se optó por la desactivación de dos fases para la mejor visualización del voltaje y su comportamiento.

5.2. Rampa de corriente resultante

El control de velocidad resultante se indica en la Figura 41, existiendo un tipo de '*Rampa*' en el inicio del arranque, se aprecia el instante en que la corriente se modifica con el paso del tiempo para obtener una rampa al inicio de la simulación; cambiando así la amplitud de las ondas sinusoidales en el tiempo. Se observa además que el voltaje DC de entrada se mantiene estable en todo momento.



Cabe mencionar que se cambió los colores de las señales para tener mejor visualización en la presente simulación.

De tal forma que la referencia de “rampa” está expresada por parámetros cambiantes en el tiempo, indicados en la Figura 43.

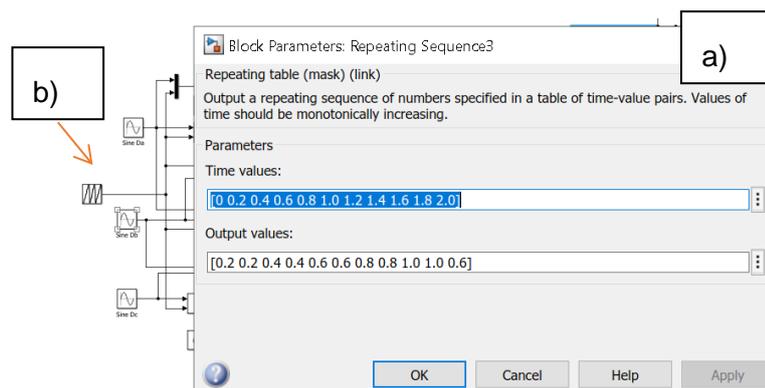


Fig.43. a) Parámetros de rampa en el tiempo, b) Herramienta de parámetros de secuencia repetitiva.
Fuente: Datos de Simulink Matlab 2019a

Datos inicializados desde 0.2 hasta 0.6 como indica la Figura 42.

5.2.1. Simulación de las ecuaciones en Matlab

Del código de la Figura 44, y tomando en cuenta los distintos parámetros utilizados para la simulación, se identifica a los desfases de las ondas seno, además de la amplitud, frecuencia, y periodo en el cual se realizó la simulación.

```
ers\DELL\OneDrive\Escritorio\Tesis pruebas\Pruebas co
1 -   clc;
2 -   clear;
3 -   A = 0.4
4 -   fc = 4000
5 -   Torque = 100
6 -   f = 60
7 -   t = 1/fc
8 -   w = 2*pi*f
9
10 -  Da = A*sin(w*t)+1/2
11 -  Db = A*(sin(w*t -2*pi/3))+1/2
12 -  Dc = A*(sin(w*t +2*pi/3))+1/4
```

Fig.44. Código Matlab utilizado en simulación.

CAPITULO 3

Implementación del convertidor de potencia

La simulación en Matlab/Simulink permitió realizar la Implementación del convertidor de potencia "Inversor", con los parámetros precisos para el funcionamiento en un motor brushless y en una carga simulando al motor. El resultado de la curva predefinida en lazo abierto de la implementación Matlab/Simulink condescendió la observación del comportamiento de la corriente y el voltaje en desemejantes parámetros de arranque.

3.1. Generación de pulsos

La generación de pulsos PWM, están caracterizados por parámetros de las entradas de la placa del microcontrolador DSP LAUNCHXL-F2806x; permitiendo crear señales PWM del Duty Cycle. Estas señales están encargadas de activar y desactivar a los Switchs o Mosfets del inversor.

LAUNCHXL-F2806x es el microcontrolador utilizado en la implementación, las características del núcleo vienen dadas por el procesador a F2806x con MCU Delfino C2000

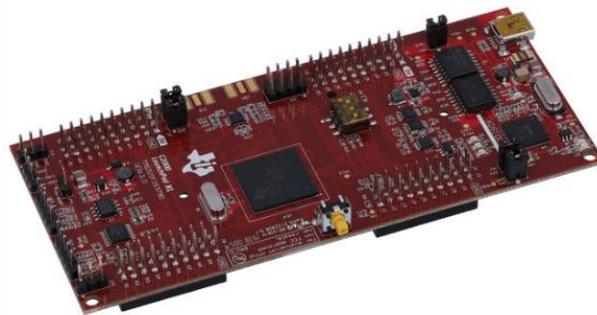


Fig.45. Launchxl – F2806x
Fuente: Instrumental Texas (2022)

La empresa Texas Instruments (TI) permite presentar a una placa de 20*10Cm compacta rojiza. Es una placa económica y funcional en el ámbito de las aplicaciones de control digital en alto rendimiento. En la presente implementación se referirá a LAUNCHXL-F2806x con el nombre de "DSP"(Instrumental Texas, 2022).

Las principales características se detallan en la Tabla 3.

Características	Descripción
Conector USB	XDS100v2
Pines	4x20
Frecuencia	200 MHz
Memoria Flash	1 MB
PWM	24 canales
Dual Core	32 bits
Periféricos ADC	16 bits

Tabla 3: Parámetros de la placa “DSP”.

Fuente: Instrumental Texas (2022)

Se utilizó el Software Code Composer Studio, al existir compatibilidad con el *microcontrolador “DSP”, siendo de acceso libre, se realizó la programación adecuada para la presente implementación.* Al ser un Software libre. El Software permite realizar distintas tareas con sus variadas herramientas, con el objetivo de optimizar funciones en un entorno de desarrollo integrado Code Composer Studio. El IDE posee una interfaz de usuario maquina con herramientas de fácil acceso y visibles para el programador, de esta forma el trabajo de la programación es menos compleja y altamente eficaz. Siendo un Software capaz de tener integrado sus propias librerías evitando la descarga de librerías externas. De tal forma que el resultado es un entorno de desarrollo con muchas funciones de fácil acceso y controlables para desarrollador (Instrumental Texas, 2022).

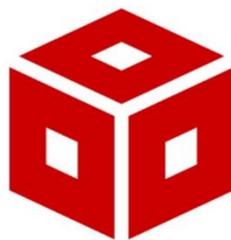


Fig.46. Code Composer Studio
Fuente: Instrumental Texas (2022)

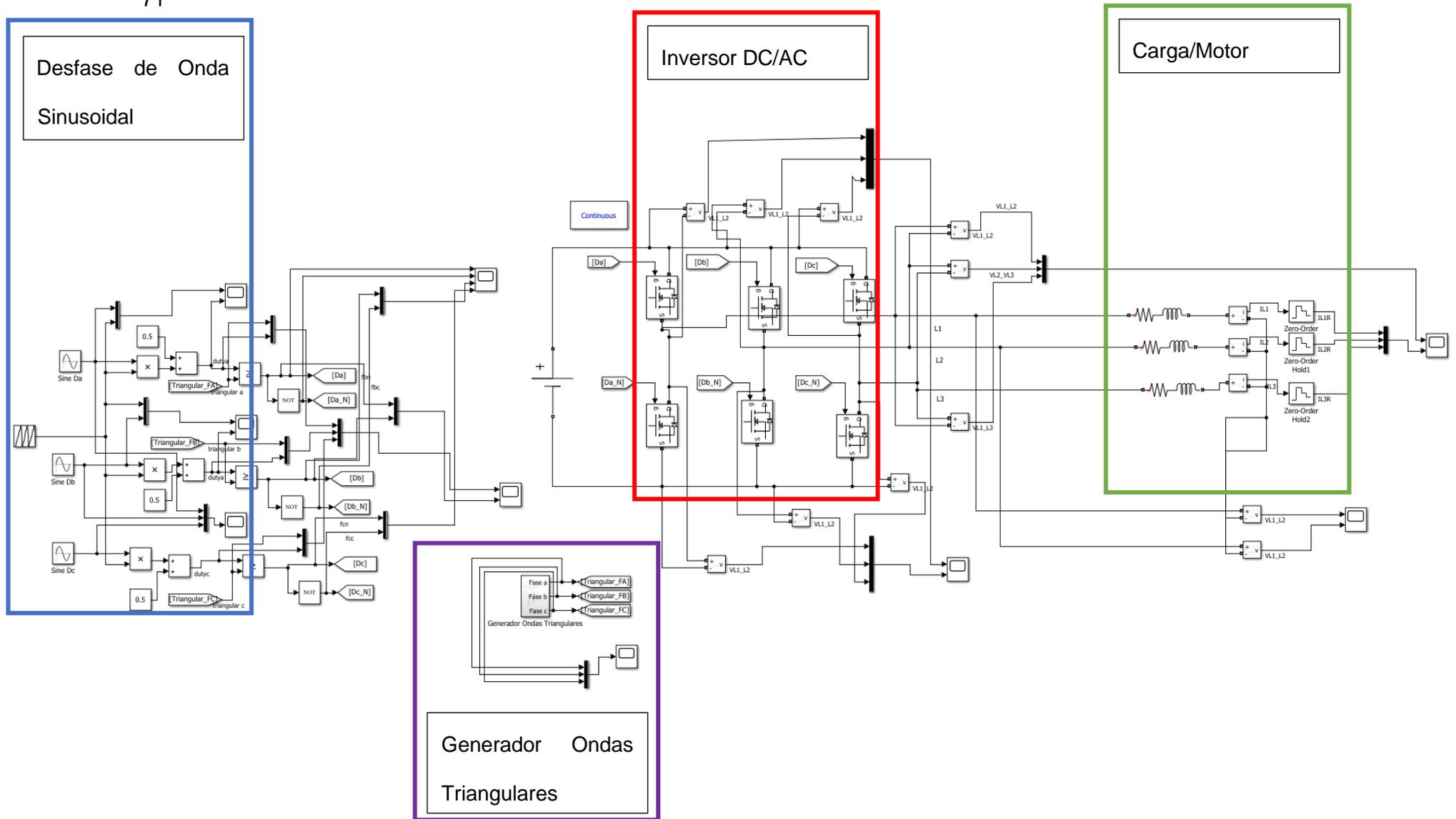


Fig.47. Diagrama de bloques. Desfase, Generador, Carga

3.1.2. Sistema físico de conversión del inversor.

El convertidor Inversor se encarga de tomar el voltaje 'DC'; energía proveniente de la fuente de voltaje del laboratorio y lo transforma en Voltaje AC. Siendo una conversión necesaria para el funcionamiento del motor Brushless o la carga. Los elementos utilizados para la construcción del inversor se indican en la siguiente Tabla.

Código	Descripción	Característica
PEME1-S5-S5-S	Convertidor DC/DC	5 [V] 1 [W]
PEME1-S5-S15-S	Convertidor DC/DC	15 [V] 1 [W]
CRM1206AJW-222ELF	Resistencia	2.2[K Ω] 5% ½ [W]
UCC5320	Driver	2 [A] / 2 [A]
STP30N10F7	Mosfet N-CH	100 [V] 32 [A]
GRM21BR6YA106ME43L	Capacitor cerámico	10 [μ F] 50 [V]
GRM21BC81H475KE11L	Capacitor cerámico	4.7 [μ F] 50 [V]
ERJ-14YJ100U	Resistencia SMD	10 [Ω] 5% ½ [W]
ERJ-P06J510V	Resistencia SMD	51 [Ω] 5% ½ [W]
GCD21BR71H104KA01L	Capacitor cerámico	0.1[μ F] 50 [V]
CL21B224KBFNFNE	Capacitor cerámico	0.22 [μ F] 50 [V]
ESR18EZPJ221	Resistencia SMD	220 [Ω] 5% ½ [W]

Tabla 4. Elementos individuales del inversor.

Los componentes indicados en la Tabla 6 permiten realizar la descripción de la construcción del inversor DC/AC, cabe mencionar que al ser un inversor trifásico; se utilizó cada uno de los componentes individuales tres veces en tres placas iguales; placas que se *las referirá con el nombre de 'PCBs'*. Es importante indicar además que es una implementación construida a través de un diseño propuesto por el tutor de la presente tesis el PhD. Vivert del Pino.

La unificación de los componentes indicados en la Tabla 6 da como resultado las PCBs indicada en la Figura 46. De tal forma que el controlador UCC5320 es aquel que permite enviar los pulsos de activación/desactivación a cada uno de los Mosfet de las tres tarjetas, el

controlador utiliza voltajes de +15 [V] y -5 [V] para su funcionamiento siendo importante añadir al diseño fuentes aisladas que conviertan el voltaje de entrada en el necesario para el driver.

Para la construcción de las placas PCBs, fue ineludible realizar la impresión del diseño propuesto por el PhD Vivert del Pino. Tomando en cuenta las distintas características a utilizar, se realizó el pedido para la impresión de las placas PCBs.

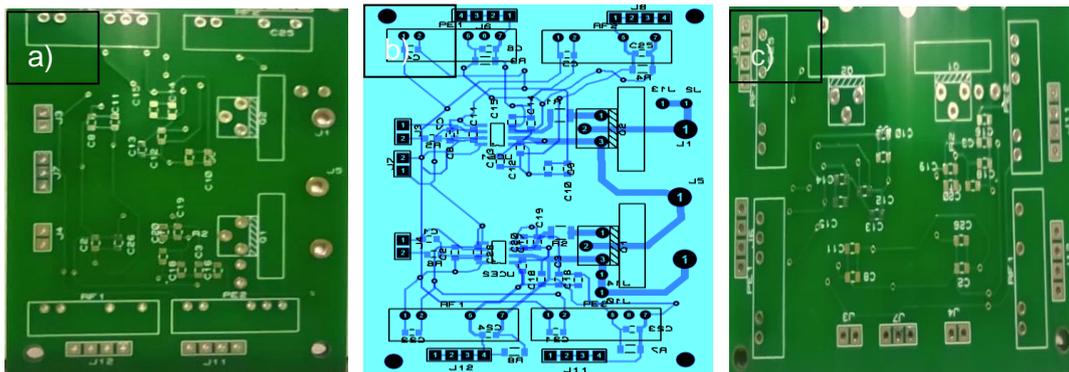


Fig.48. a) PCB Impresa al revés b) Diseño del circuito c) PCB cara frontal.

La Figura 49 permite indicar el resultado de la impresión y el diseño de una tarjeta 'PCB'. Es importante mencionar que al ser un inversor trifásico se utilizará tres tarjetas con iguales características.

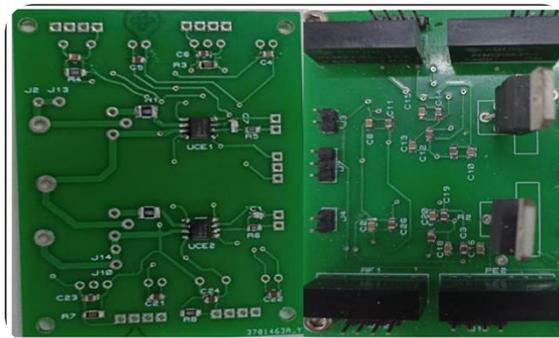


Fig.49. a) Placa PCB dos caras

Se observa en la Figura 49 la placa PCB ensamblada con sus distintos elementos, de los cuales destacan principalmente los Mosfets, Drivers y controladores de voltaje. De tal forma parte de las otras dos tarjetas conectadas entre sí.

La Figura 50 permite indicar la conexión entre placas PCBs, formando el inversor trifásico con sus respectivas entradas DC y salidas AC.

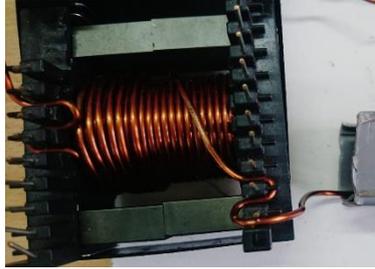


Fig.50. a) Inductor trifásico

De tal forma que las borneras indicadas en la parte 1, son fragmento principal de alimentación DC del inversor, las borneras de la parte 2 permiten indicar las tres salidas del inversor, salidas indicadas como: Fase1, Fase2 y Fase 3.

3.2. Etapa de la carga

El mencionar la “Carga”; se refiere a realizar una carga resistiva inductiva como indica el diagrama de bloques de la Figura 45 sección (Carga/Motor). El objetivo es dar a conocer los distintos parámetros que pueden existir antes de conectar al motor, esto se refiere a que *al mencionar la palabra “Carga” Indica que es el motor “Simulado”, de tal forma que puede dar a conocer los parámetros de Corriente y Voltaje de salida esperados en cada fase. De esta forma continuar con la conexión del motor brushless.*

En la Figura 50 se encuentran los tres inductores de 5mHz cada uno respectivamente



Fig.51. a) Inductores 5mHz

Como se observa en la Figura 52, los inductores de la *literal "a"*, son parte principal de la carga en conjunto con las resistencias.

3.3. Resultados experimentales iniciales con carga

El identificar los distintos parámetros de un resultado experimental esperado, da a conocer la certeza de la presente implementación, para ello se identificaron distintos tipos de resultados paso a paso indicados en el siguiente enunciado.

3.3.1. Resultados experimentales de programación

La Figura 52 permite indicar el sistema experimental inicial conectado. Cabe mencionar que se encuentra únicamente la conexión de la 'DSP' en conjunto con las señales PWM de la salida en el Osciloscopio, siendo la programación inicial que crea la forma de onda Sinusoidal en conjunto de los tiempos muertos y el desfase respectivo indicado en la simulación del capítulo anterior.

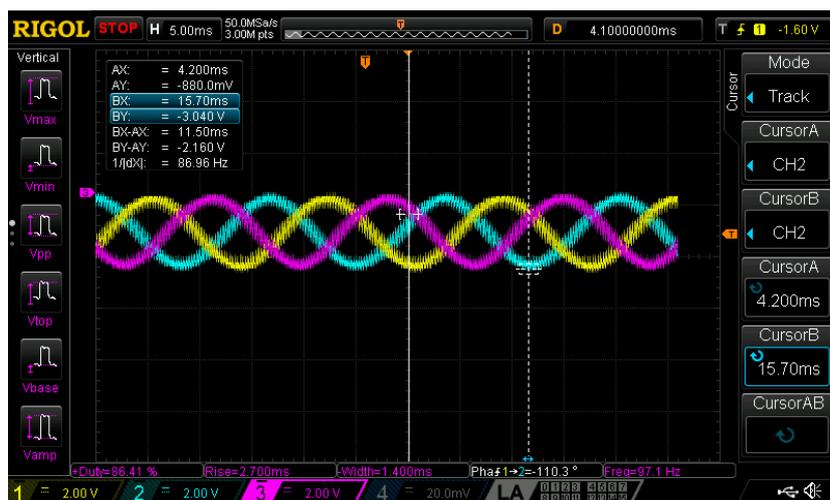


Fig.52. a) Ondas trifásicas desfasadas

La Figura 52 *permite indicar el tipo de onda creada por el programa en la "DSP"* teniendo en cuenta sus respectivos tiempos muertos, siendo una onda sinusoidal con desfases de 0, 120° y -120°.

En efecto la onda que se observa es trifásica con tiempos muertos e idónea para un motor trifásico brushless. Cabe mencionar que se utilizó un filtro RL para observar las ondas en forma de onda sinusoidal.

3.3.2. Resultados experimentales iniciales de la conexión entre placas PCBs

La conexión se realizó entre las placas PCBs como indica la Figura 53 formando un inversor trifásico, de tal forma al realizar la conmutación a 4kHz. Se aprecia el funcionamiento de las ondas en correcta conmutación inicial con desfase de 0° , 120° , -120°

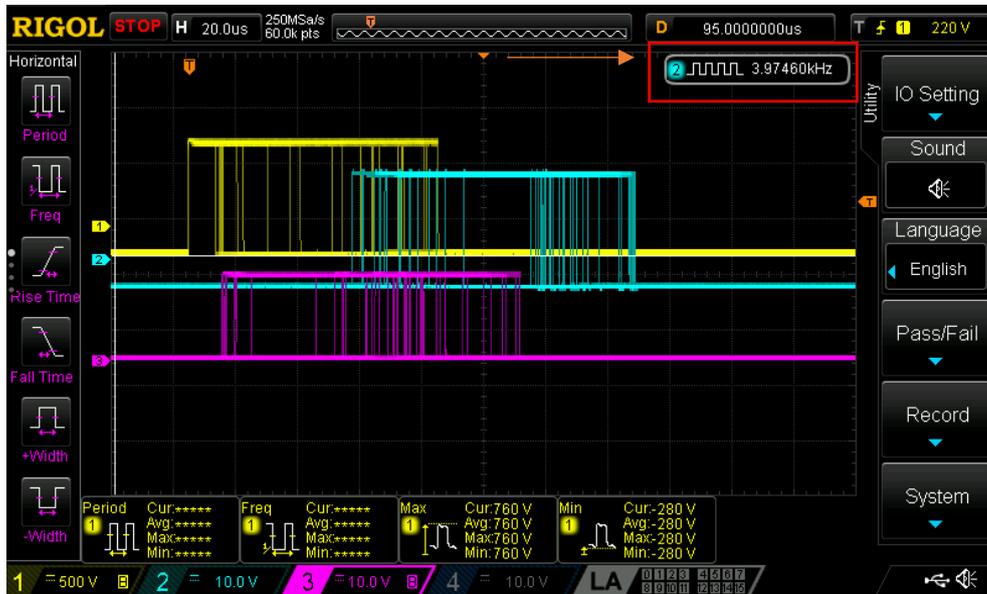


Fig.53. Conmutación trifásica

En la Figura 53 se aprecia la conmutación de las tres ondas trifásicas, cabe mencionar que se observan de distintas formas o en pocas palabras disparejas, esto se debe a que al momento de la conmutación cada una de las ondas se mueven en los distintos puntos de la onda sinusoidal, siendo variables dependiendo de la amplitud de la onda creada como indica Figura 30.

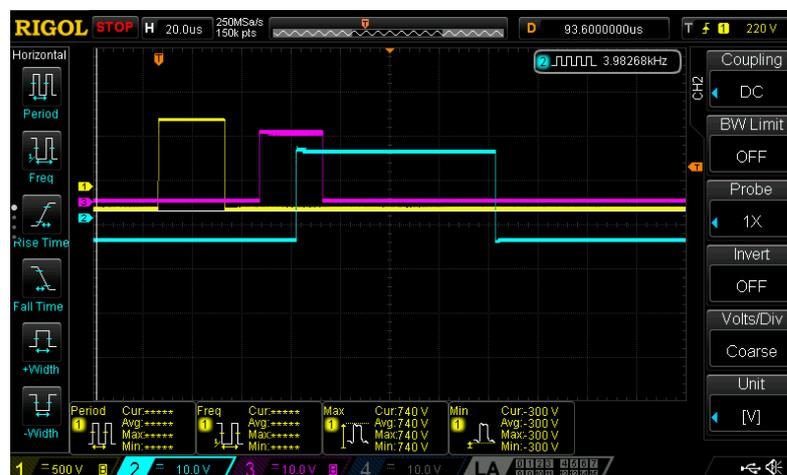


Fig.54. Acercamiento ondas trifásicas

En la Figura 54 se aprecia un acercamiento de las tres ondas trifásicas sinusoidales observando el correcto desfase entre ellas, siendo únicamente tomados en cuenta tres señales SPWM sin sus respectivas ondas inversas.

3.3.2.1. Resultado experimental inicial de ondas trifásicas y sus inversas.

Al realizar las pruebas en un osciloscopio de 4 canales, no es posible tomar en cuenta las tres ondas sinusoidales en conjunto con sus señales inversas. Es por ello que en la Figura 54 se aprecia dos señales o dos "Fases" en las cuales se encuentran desfasadas correctamente a 0, 120° en conjunto con sus ondas inversas. Cabe mencionar que la frecuencia de trabajo es de 4kHz como indica el recuadro resaltado en la Figura 55.

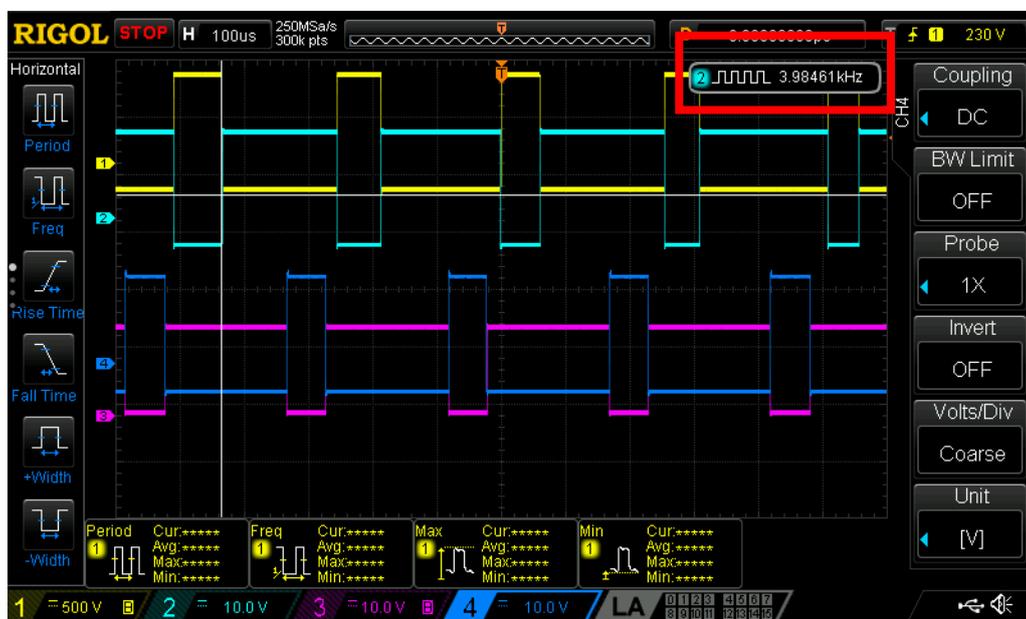


Fig.55. SPWM y ondas inversas

Se observa en la Figura 55 el desfase de las tres ondas trifásicas, obteniendo una frecuencia de 4Khz.

3.3.2.2. Resultado experimental de ondas trifásicas y el control de la amplitud, en constancia de la existencia de la rampa de corriente

Cabe mencionar que es necesario controlar la amplitud de la onda senoidal para poder tener un control del arranque del motor, de tal forma que en la Figura 56 indica el estado inicial de control de velocidad, esto quiere decir que se darán parámetros iniciales de arranque

teniendo como punto partida el inicio de la onda sinusoidal con menor amplitud en sus puntos originarios de la señal SPWM.

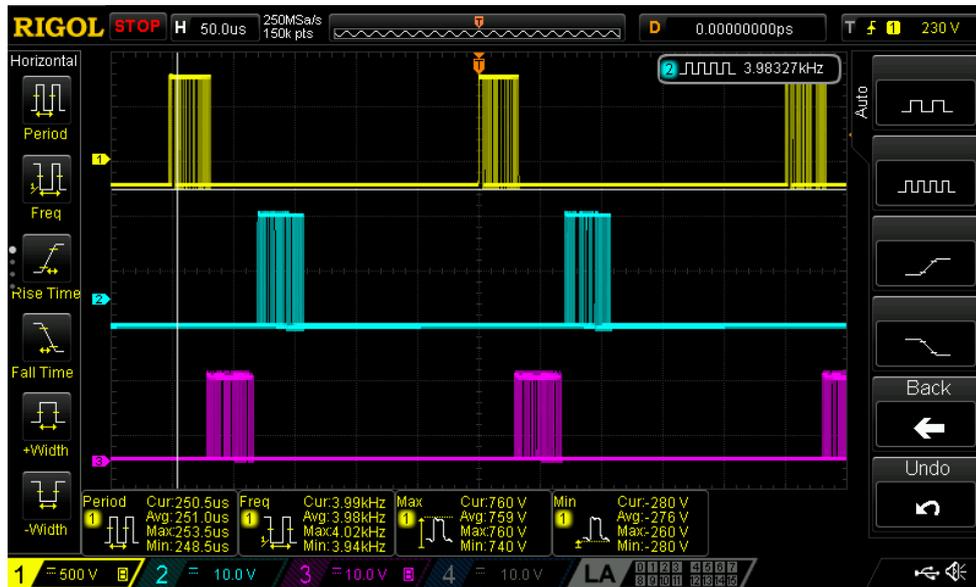


Fig.56. Punto partida tres ondas sinusoidales

Se tomó en cuenta la visualización de la presente prueba experimental, de tal forma que las tres ondas se encuentran separadas unas de otras, indicando principalmente su cambio en la amplitud, siendo parámetros indicados por el potenciómetro el cual rige este cambio como se observa en la Figura 57. Cabe mencionar que la frecuencia de conmutación se encuentra fija.



Fig.57. Aceleración máxima tres ondas sinusoidales

La Figura 57 permite indicar los parámetros máximos de aceleración, se observa el cambio de las ondas trifásicas en el tiempo, al ser correctamente cambiantes la frecuencia se encuentra siempre constante.

3.3.3. Resultados experimentales iniciales con la Carga/Motor

La simulación presentada en la Figura 33 permite indicar las señales de Voltaje y de corriente respectivas en conjunto de la carga, cabe mencionar que fue necesario realizar el resultado experimental en una carga. La carga consta de tres resistencias y tres inductores, el conectarlos entre sí se refiere a realizar la simulación un motor trifásico como indica la Figura 58, de tal forma que se puede observar el comportamiento de las señales de salidas del inversor.

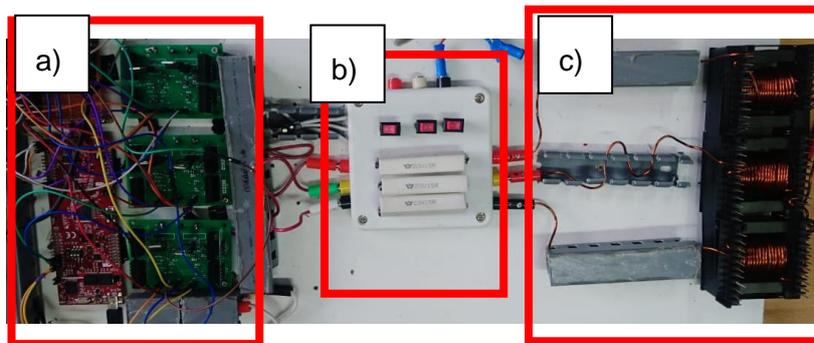


Fig.58. Conexión del inversor trifásico a la carga RL. a) Etapa de control, inversor trifásico y "DSP", b) Etapa de carga Resistiva, c) Etapa de carga inductiva L"

La Figura 58 permite indicar la conexión hacia la carga, esta se encuentra conformada por la etapa de control, la etapa de la resistencia y la etapa de la impedancia. Todo el circuito interconectado.

3.3.3.1. Señal de Corriente

La Figura 59 permite indicar la señal de corriente de salida el inversor conectado a la carga, indicando la forma de onda antes planteada en la simulación, cabe mencionar que existen tres ondas sinusoidales desfasadas, siendo esta la primera onda sinusoidal de la línea 1 o Fase 1

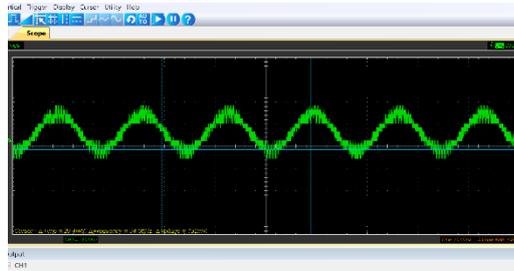


Fig.59. Onda sinusoidal con carga de la Fase 1

Siendo una onda sinusoidal inicial sin desfase, o con un desfase de 0° . Con los parámetros iniciales de entrada DC de 12 V y una corriente de 1A.

Fase 1 y Fase 2

Con los parámetros indicados anteriormente, en la Fase 1 y Fase2 permite indicar lo siguiente:

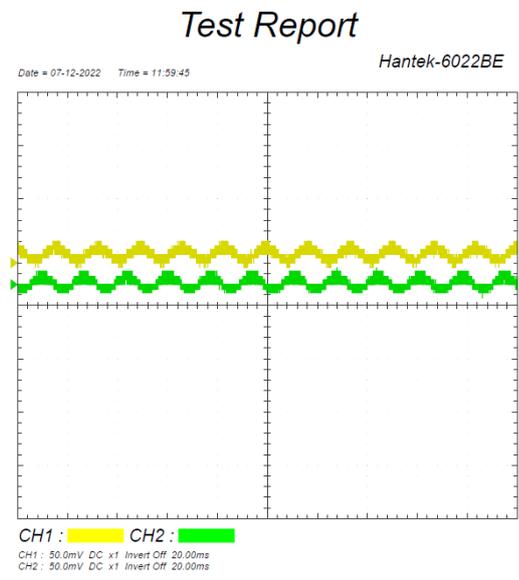


Fig.60. Onda sinusoidal con carga de la Fase 1 y Fase 2

Siendo dos ondas sinusoidales desfasadas de 0 y -120° , cumpliéndose el desfase respectivo para el correcto funcionamiento de la carga en dos fases. De igual manera la tercera fase se encuentra desfasada 120° , para el funcionamiento de la carga. Se realizó la medición en dos fases por la razón de que existen dos puntas diferenciales de potencia.

3.3.3.2. Señal de Voltaje

La Figura 33 permite indicar la señal de referencia simulada en conjunto con la carga, siendo una señal de voltaje la cual puede ser variable, dependiendo de los parámetros a

elegir. El programa está capacitado para soportar hasta 50 Voltios en la entrada, pero puede tener variaciones dependiendo del tipo de pruebas a la carga o al motor que se desee realizar. La experimentación inicial se la realizo con un voltaje de entrada de 12 V en DC para tener un voltaje de salida de 12 V AC. La forma de onda se observa en la Figura 61.

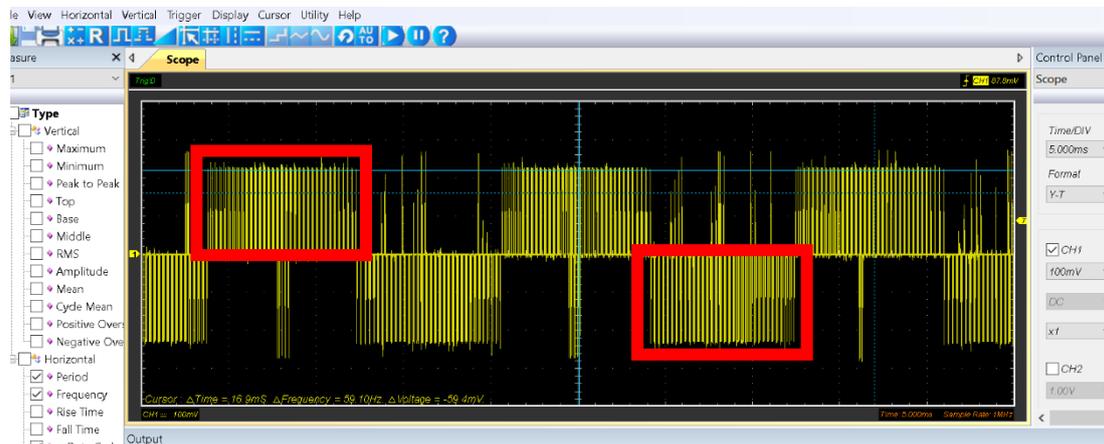


Fig.61. Forma de onda de voltaje de una fase

En la Figura 57 se observa la forma de onda de una fase, para tener mejor visión acerca del voltaje, se observa que existe ruido, esto se debe al campo magnético que generan los inductores , es posible mitigar a este tipo de ruidos con una jaula de Faraday , pero no se realizará en la presente implementación ya que el objetivo es observar el funcionamiento del inversor en comparación con la simulación planteada de tal forma que, en las señales deben ser correctas para un motor brushless o motor de scooter.

En efecto se observa el funcionamiento de la salida del inversor, siendo un inversor apto para realizar la experimentación en un motor brushless.

3.3.3.3. Rampa de corriente.

Para la rampa de corriente es importante tener instantes de medición, pero en un osciloscopio no se puede observar con claridad a diferencia de la simulación es por ello que se escribirán datos de medición tomados en distintos tiempos además de la corriente con distintos parámetros. Se realizó la medición con dos pinzas diferenciales de corriente, las existentes del laboratorio.

3.3.3.3.1 Instante de velocidad inicial con potenciómetro en arranque de la carga

Como se observa en la Figura 62 se aprecia el momento inicial de arranque de la carga, indicando la señal de corriente entre la Fase1 y Fase 2.

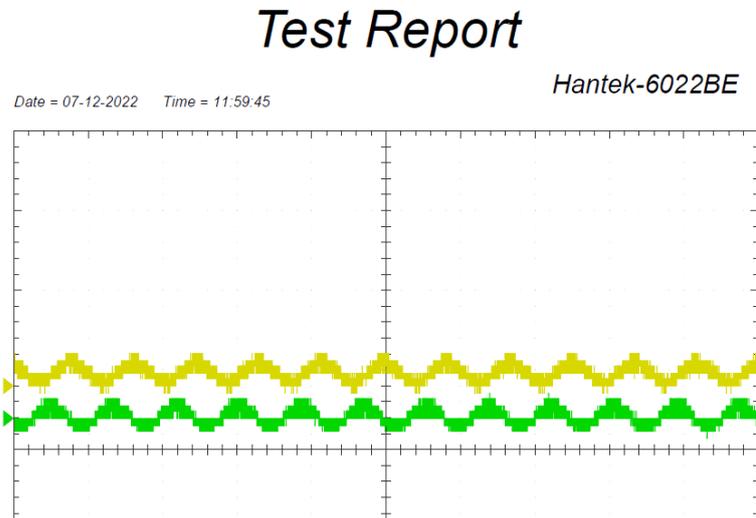


Fig.62. Forma de onda en arranque inicial entre la Fase1 y Fase 2

Con los parámetros de 12 voltios en la entrada DC, en una medición de 10,00ms en el tiempo. Se obtuvo 0.02 amperios, 12 voltios de respuesta en la salida del conversor AC.

Se tomaron datos de medición a partir del osciloscopio, teniendo en cuenta las dos señales de dos Fases, se procedió a indicar en Matlab una Figura representativa más clara y concisa.

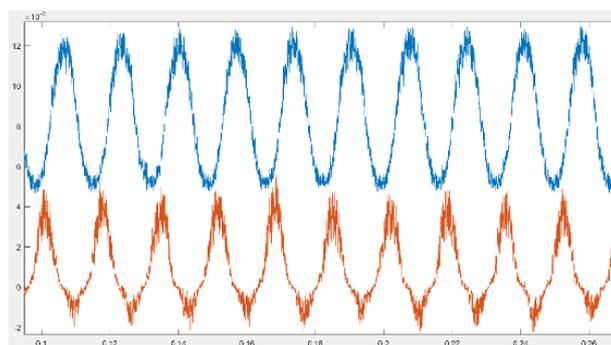


Fig.63. Forma de onda en arranque inicial entre la Fase1 y Fase 2, figura representativa en Matlab

La Figura 63 permite indicar dos señales filtradas, mediante el software de Matlab, se aplicó un filtro de señales para poder observar con mejor claridad, se encuentran desfasadas de 0° y 120° , cabe mencionar que se utilizó la licencia para estudiantes de Matlab para

poder realizar los filtros correspondientes para este tipo de ondas sinusoidales

3.3.3.3.2. Instante de velocidad media con potenciómetro en la carga

La Figura 64 permite indicar el momento de velocidad o arranque medio en la carga, con un voltaje de entrada de 12 V DC y una respuesta de 12 V AC en 0.03 Amperios.

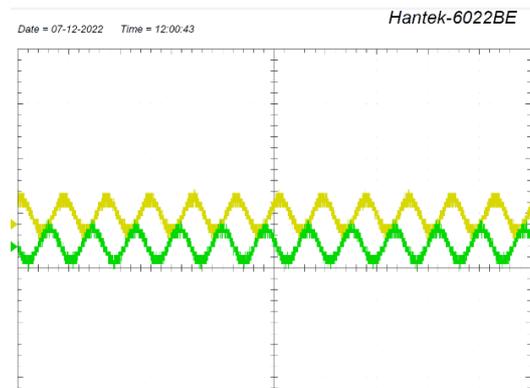


Fig.64. Forma de onda en velocidad media entre la Fase1 y Fase2

De tal forma que se puede apreciar la medición entre la Fase 1 y la Fase 2, se observa el cambio de la corriente en el tiempo, esto se refiere a el cambio de la amplitud, utilizando *una velocidad “media”*.

En la Figura 65, se observan los datos mencionados en Matlab, siendo un boceto representativo del comportamiento de la corriente entre dos fases.

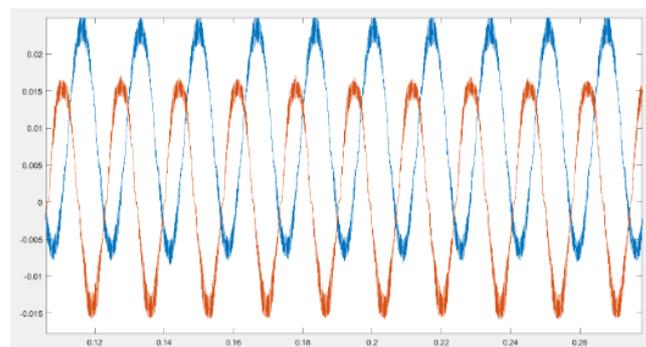


Fig.65. Forma de onda en velocidad media entre la Fase1 y Fase2
Boceto representativo en Matlab

La Figura 65 permite indicar la forma de dos ondas filtradas, tomando en cuenta que la onda sinusoidal de color azul es de la Fase 1 y la onda de color rojo es de la Fase 2; Cabe mencionar

que no inician en el punto 0, esto se lo realizó así para mejor observación del comportamiento de las ondas separadas una de otra.

3.3.3.3.3. Instante de velocidad máxima en el convertidor inversor hacia una carga RL.

En la Figura 66 se observa el instante de velocidad máxima, siendo datos tomados a partir de la Fase 1 y Fase.

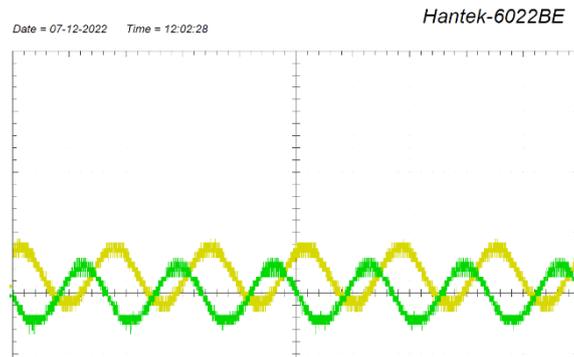


Fig.66. Forma de onda en velocidad máxima entre la Fase1 y Fase2

Con datos iniciales de 12V DC de entrada, obteniendo una salida de 12 Voltios de salida a 0.5 A de corriente.

Se observa el cambio de la amplitud en el tiempo entre dos fases, cabe mencionar que la medición se realizó en dos fases por motivos a que existen solo dos pinzas amperimétricas de medición en los laboratorios.

En la siguiente Figura se observa la representación de las dos ondas en Matlab, siendo datos obtenidos del osciloscopio.

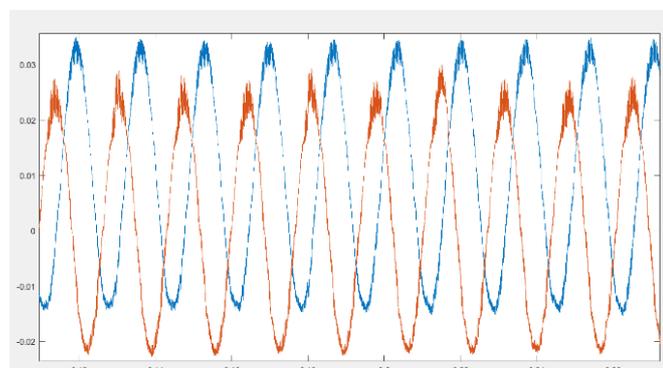


Fig.67. Forma de onda en velocidad máxima entre la Fase1 y Fase2, Boceto de Matlab.

La Figura 67 permite indicar una versión de la Figura 66 en Matlab, Se utilizó un filtro, esto se realizó mediante la toma de datos en el osciloscopio con el objetivo de observar con mayor claridad la relación que existe del cambio de la amplitud con la velocidad y su respectivo desfase. Cabe mencionar que se utilizó el Software Matlab con licencia estudiantil.

3.4. Resultados iniciales con motor brushless o motor de scooter eléctrico

Para un motor brushless, se utilizaron distintas medidas con el objetivo de indicar el cambio de la amplitud en el tiempo; De la misma manera se indica el arranque, tomando mediciones en distintas "Aceleraciones" del motor.

Para la conexión se procedió a desconectar las tres fases provenientes del inversor las cuales se encontraban conectadas a la carga y se procedió a conectar directamente al motor.

3.4.1. Figura demostrativa del funcionamiento del convertidor potencia en un motor brushless

La siguiente Figura permite indicar el resultado gráfico del funcionamiento del convertidor de potencia en un osciloscopio.

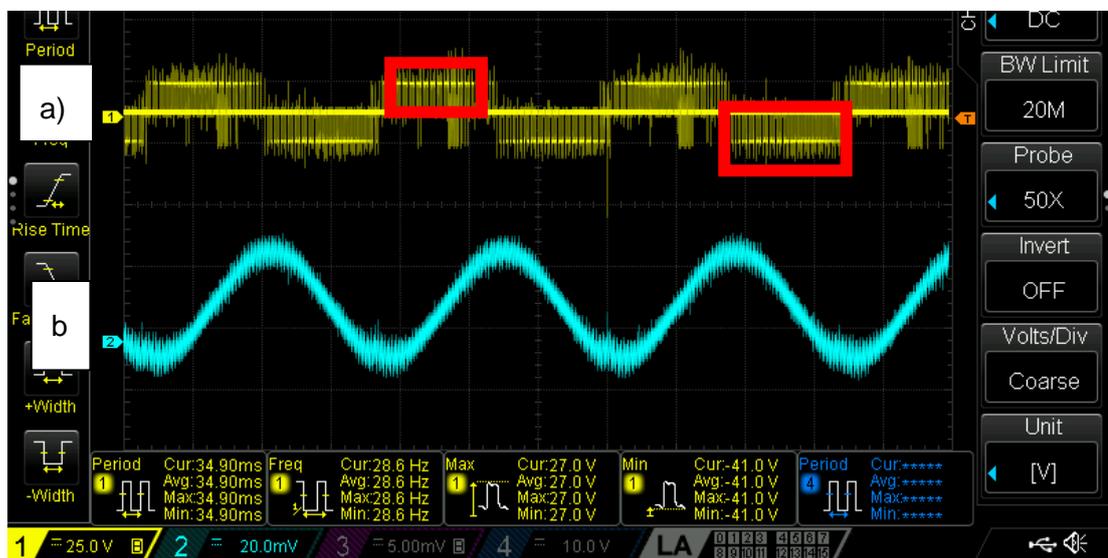


Fig.68.a) Forma de onda del voltaje en motor brushless, b) Forma de onda de la corriente en motor brushless.

De tal forma que, en la Figura 68 se observa tanto la forma de la onda de voltaje y la forma de la corriente.

Con datos iniciales de 7V en DC se obtuvo una salida de 7V y 1.5 A en AC. No obstante, se tomó a esta ilustración como la figura demostrativa del funcionamiento del *convertidor “inversor” en un motor brushless*.

3.4.2. Funcionamiento de arranque inicial del convertidor inversor en un motor brushless

Como se observa en la Figura 63, indica el estado de la corriente o arranque iniciales, teniendo en cuenta que se realizó la medición con la punta diferencial de corriente.

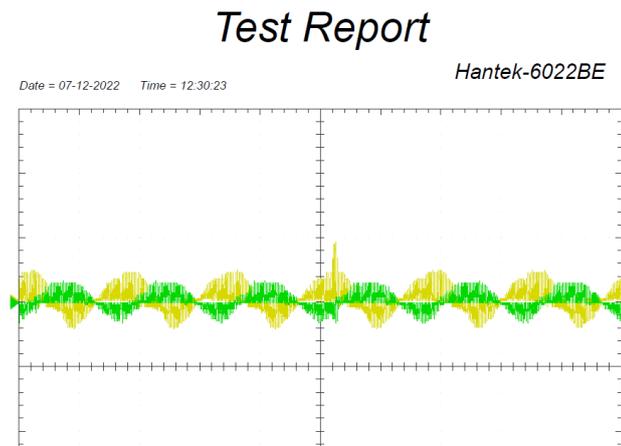


Fig.69. Forma de onda de corriente en velocidad mínima.

La Figura 69 indica el comportamiento de la corriente en dos fases utilizando una aceleración mínima. Con parámetros de voltaje de entrada de 12 v DC y que a su vez dio una respuesta convertida De a 12 V y 2 amperios en AC..

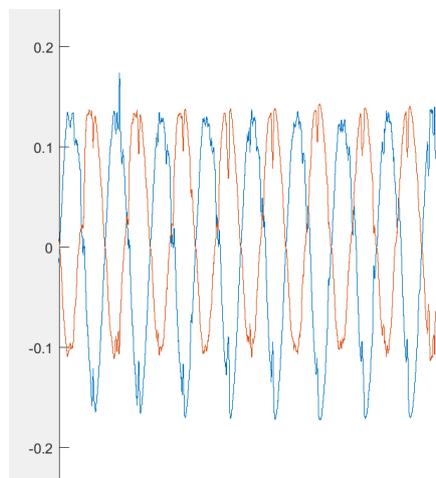


Fig.70. a) Forma de onda de corriente en velocidad mínima, datos filtrados en Matlab.

La Figura 70 es un boceto sinusoidal de la medición del osciloscopio entre la Fase 1 y la Fase 2 en el tiempo. Se utilizó un filtro en Matlab con el objetivo de observar con mayor claridad el comportamiento de las ondas sinusoidales al tener su amplitud en velocidad 2/10.

3.4.3. Funcionamiento de arranque en velocidad media a partir del convertidor inversor en un motor brushless o motor de scooter eléctrico

En la Figura 71 se observa el comportamiento de la corriente en la Fase 2 y Fase 3, cabe mencionar que se realizó las mediciones en dos fases diferentes a las anteriores, esto se debe con el propósito experimental de indicar el funcionamiento completo del convertidor “inversor” en un motor trifásico brushless.

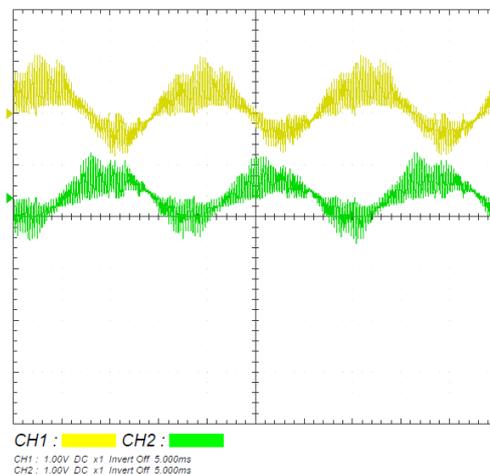


Fig.71. Forma de onda de corriente en velocidad media en un motor brushless

Utilizando una alimentación de 12 V en DC se obtuvo un resultado de voltaje alterno en 11V y una corriente de 3.5 amperios AC. Cabe mencionar que a partir de una velocidad fija o un cambio de amplitud en una escala de 5/10 en el arranque existe mayor amperaje.

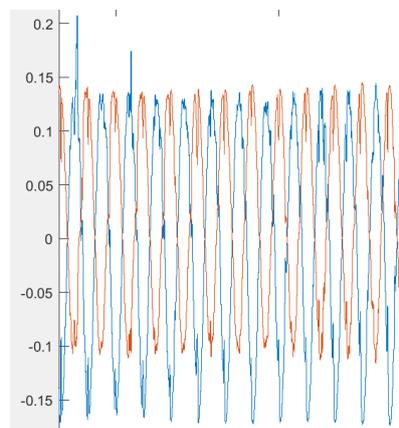


Fig.72. Forma de onda de corriente en velocidad media en un motor brushless, boceto Matlab

La Figura 72 permite indicar el resultado de un filtro en Matlab a la medición tomada en la Figura 71, con el objetivo de observar con mayor claridad el comportamiento de las ondas sinusoidales al tener su amplitud en velocidad 5/10.

3.4.4. Funcionamiento del motor brushless en velocidad máxima a partir de un convertidor de potencia “Inversor”

En la Figura 73 se observa el comportamiento de la corriente en el motor brushless en la Fase 1 y Fase 2.

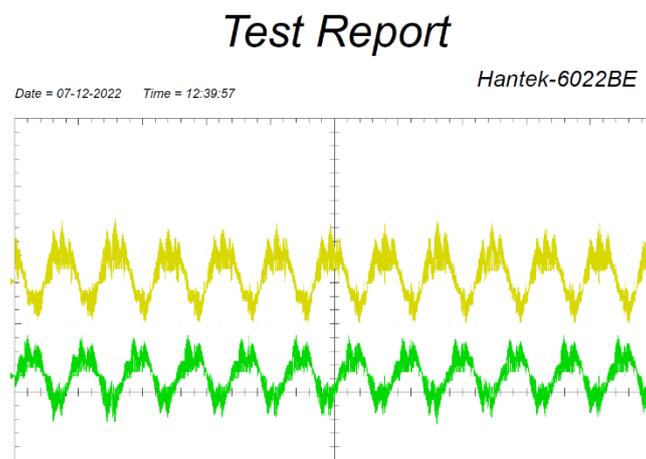


Fig.72. Forma de onda de corriente en velocidad media en un motor brushless, boceto Matlab

En la Figura 73, se observa claramente el cambio de amplitud, utilizando una escala de 10,00ms al igual que las anteriores mediciones. El voltaje de entrada utilizando en el inversor es de 12V DC, obteniendo una salida de 11V y 5 amperios en corriente alterna.

Es importante mencionar el tipo de motor utilizado para la medición, se utilizó un motor brushless de 60W aproximadamente, se utilizó este motor con el objetivo de realizar mediciones, esto se refiere a que el microcontrolador “DSP” se desconecta en 5 A. El convertidor inversor sigue funcionando, pero no es posible monitorear y editar la velocidad deseada

No obstante, en la Figura 73 se observa un filtro de las señales sinusoidales principales de la medición realizada en la Figura 72.

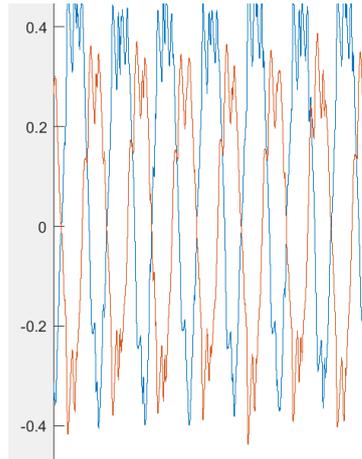


Fig.73. Imagen ilustrativa de la desconexión de la placa DSP, sobrepasando 5A

La Figura 73 indica un boceto de las ondas sinusoidales, observando con mayor claridad el cambio de la amplitud al momento de realizar la medición en velocidad máxima, teniendo de referencia a una escala de 10/10 en velocidad. Cabe mencionar que se utilizó un filtro de señal para observar con mayor claridad en Matlab.

De tal forma que el sistema de conversión DC/AC y aceleración del motor brushless está diseñado para un voltaje máximo de 50V y 15 amperios, como se muestra en la simulación del capítulo anterior. El sistema puede tener mejoras en un futuro, realizando más pruebas experimentales, en otro tipo de microcontrolador más robusto, por ejemplo, FPGA entre otros.

CONCLUSIONES

El arranque de un motor brushless, está relacionado con el campo magnético que generan los imanes permanentes, este campo magnético, puede ser tomando en cuenta con un sensor hall, pero es posible el funcionamiento del motor brushless sin necesidad del sensor hall.

Al variar la frecuencia, las tres ramas de las señales SWPM de salida se distorsionan, teniendo tres ondas trifásicas distorsionadas al momento de utilizar la velocidad máxima del convertidor inversor. La señal de salida hacia el motor o a la carga no es la adecuada para su correspondiente funcionamiento.

El microcontrolador o "DSP" no permite utilizar lecturas mayores a 5 Amperios, debido a la robustez del equipo, pero es posible el funcionamiento del inversor en motores de mayor potencia; El controlador está programado para utilizar voltajes desde 5V a 48 V y a su vez tener corrientes desde 0.5 a 20 A. El convertidor inversor funciona correctamente, no obstante, el microcontrolador puede encontrarse desconectado.

RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar motores de menor potencia, esto se debe tener en cuenta, solo *si se desea la lectura de las ondas trifásicas en el tiempo mediante la "DSP"*. Los parámetros de velocidad deben ser mejorados en un futuro estudio, el cambio de variación de la amplitud en el tiempo genera pulsos inestables al momento de utilizar la variación de la amplitud máxima la cual es controlada por el potenciómetro.

Es importante realizar el análisis de los ruidos existentes en la señal voltaje, al tener en cuenta otro tipo de frecuencia y distintos parámetros en la modulación SPWM, como en los puntos generados en cada una de las ondas es posible tener un mejoramiento significativo en el control de la amplitud de las tres ondas seno.

Se recomienda realizar la experimentación en un microcontrolador más robusto con el objetivo de observar el comportamiento de las ondas sinusoidales en su máxima velocidad de esta manera se puede obtener mejora en el control de arranque.

ANEXOS

1- Código

```

/*
 * Tesis.c
 *
 * Created on: 26 may. 2022
 * Author: DELL
 */
 * main.c
 */
#include "math.h"
#include "F2806x_Device.h" // F2806x Headerfile Include File
#include "F2806x_Examples.h"
//-----Incluir libreria epwm//
#include "DSP28x_Project.h"

// #include "flash_programming_c28.h" // Flash API example header file
// #include "F021_F2837xD_C28x.h"
// /* pi */

#define M_PI 3.14159265358979323846 /* pi */

#define tope 500
#define hdiv 0
#define div 0
#define N 400
//
// Function Prototypes
//
void ConfigureADC(void);
//*****//
void InitEPwm1Example(void);
void InitEPwm2Example(void);
void InitEPwm3Example(void);
//*****//
void SetupADCEpwm(Uint16 ch0);

// Aqui para configurar mas pares de PWM *****

```

```

void InitEPwmGpio(void);
//void Conf_DAC();
interrupt void adca1_isr(void);

//
// Defines
//
#define NN 525
#define RESULTS_BUFFER_SIZE 256
#define MARGEN 0xFFFFFFFF
#define REFERENCE_VREF 1
#define DACA 1
#define DACB 2
#define DACC 3
#define REFERENCE REFERENCE_VREF
#define DAC_NUM DACA

//
// Globals/
//
//int var = 0, I_V = 0;

//int DAC_1 = 0;
//volatile struct DAC_REGS* DAC_PTR[4] = {0x0,&DacaRegs,&DacbRegs,&DaccRegs};
//estaba asi //
//Uint16 dacval = 2048;
//volatile Uint16 bufferFull;

Uint16 duty=375;
Uint16 r;
int16 S[N];
Uint16 k=0;
//----Configuracion EPWM Globals//

//-----Definicion tiempo muerto valores maximos y valores minimos//

#define EPWM1_MAX_DB 0x03FF

```

```

#define EPWM2_MAX_DB 0x03FF
#define EPWM3_MAX_DB 0x03FF

#define EPWM1_MIN_DB 0
#define EPWM2_MIN_DB 0
#define EPWM3_MIN_DB 0
//----Direccion en la que se mueve la banda muerta o tiempo muerto

#define DB_UP 1
#define DB_DOWN 0
//-----//
void main(void)
{

//

// Step 1. Initialize System Control:
// PLL, WatchDog, enable Peripheral Clocks
// This example function is found in the F2837xD_SysCtrl.c file.

    InitSysCtrl();

//

// Step 2. Initialize GPIO:
// This example function is found in the F2837xD_Gpio.c file and
// illustrates how to set the GPIO to it's default state.
//unsigned 3753=0;
//-----ASigno ep1 Pines de las patitas//
    InitEPwm1Gpio();
    InitEPwm2Gpio();
    InitEPwm3Gpio();
// Skipped for this example

//

// Step 3. Clear all interrupts and initialize PIE vector table:
// Disable CPU interrupts
//
    DINT;

```

```

//
// Initialize the PIE control registers to their default state.
// The default state is all PIE interrupts disabled and flags
// are cleared.
// This function is found in the F2837xD_PieCtrl.c file.
//
    InitPieCtrl();

//
// Disable CPU interrupts and clear all CPU interrupt flags:
//
    IER = 0x0000;
    IFR = 0x0000;

//
// Initialize the PIE vector table with pointers to the shell Interrupt
// Service Routines (ISR).
// This will populate the entire table, even if the interrupt
// is not used in this example. This is useful for debug purposes.
// The shell ISR routines are found in F2837xD_DefaultIsr.c.
// This function is found in F2837xD_PieVect.c.
//

// configureDAC(DACA);
// configureDAC(DACB);
// configureDAC(DACC);

    InitPieVectTable();

    EALLOW;

    EALLOW;
    // Call Flash Initialization to setup flash waitstates. This function must
    // reside in RAM.
//---PARTE de pievectTable---//
    SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 0;
    EDIS;

//---- Initialize and activate PWM1,PWM2,PWM3, PWM4 and GPIO aux. -----

```

```

    InitEPwm1Gpio();
InitEPwm1Example();
    InitEPwm2Gpio();
InitEPwm2Example();
    InitEPwm3Gpio();
    InitEPwm3Example();
//void configGPIO(void);
//-----//
    SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1;
    EDIS;

    EALLOW;

//Estos bits indican la dirección dentro de la tabla de vectores PIE desde la que se obtuvo el
vector. //
    // REVISAR YA ESTA REPÉTIDO
    // PieVectTable.ADCA1_INT = &adca1_isr
    //function for ADCA interrupt 1
    EDIS;
    //CONTADORES HABILITACION DE INTERRUPTACIONES//

//-----//

ConfigureADC();

ConfigureEPWM();

SetupADCEpwm(2);

IER |= M_INT3; //Enable group 1 interrupts
//Habilitacion de EPWM en el pie del grupo 3//

PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx1 = 1;
    PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx2 = 1;
    PieCtrlRegs.PIEIER3.bit.INTx3 = 1;

EINT; // Enable Global interrupt INTM
ERTM; // Enable Global realtime interrupt DBGM
//-----//

```

```

EALLOW;

SysCtrlRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1; //571 MELLOW POR CPYSYSREGS// No hay
ese registro PAGINA 70 PARA HABILITAR EN 1

EPwm6Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 1; //enable SOCA
EPwm6Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2; //unfreeze, and enter up count mode
/* for (r=0;r<N;++r)

    {
        S[r]=(int16)(tope*sin(2*M_PI*r/N));
        // r=r+1;
    }
*/

while(1)
    {
// if (vant!=AdcaResultRegs.ADCRESULT0)
//     {
//         GpioDataRegs.GPETOGGLE.bit.GPIO131 = 1;
//     }
//     vant=AdcaResultRegs.ADCRESULT0;
//     GpioDataRegs.GPETOGGLE.bit.GPIO131= AdcaRegs.ADCINTFLG.bit.ADCINT1;
// }
//-----configuracion del tiempo muerto interrupciones-----//

//-----Configuracion de los 3 EPWM De interrupcciones tiempo muerto-----//
//pilaS VOID
void configGPIO(void)
{
    EALLOW;

    GpioCtrlRegs.GPAMUX1.bit.GPIO14 = 1; //Modos de bajo consumo HALT y STANDBY y
    activación/desactivación de resistencias pullup internas //0 a 15 .

    GpioCtrlRegs.GPBMUX1.bit.GPIO33 = 0; // registro (GPIO32-GPIO44
    GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO31 = 0; //habilitar pullup on "GPIO6" ))GPIO0-GPIO31((
    GpioCtrlRegs.GPBDIR.bit.GPIO33 = 1; (((GPIO32-GPIO58))Controla la dirección de los
    pines GPIO cuando el pin especificado está configurado en modo GPIO.

    EDIS;
}

```

```

void ConfigureADC(void)
{
    EALLOW;

    //
    //write configurations /aqui me quedeeeeeeeeee////
    //pagina 537 del manual Prescaler 1597 otra tarjeta = CLKDIV2EN
    AdcRegs.ADCCTL2.bit.CLKDIV4EN = 1; //set ADCCLK para 4 , es = 1 cambio
programacion 547 revisar! !!

    //La resolución del ADC determina qué tan finamente se cuantifica el rango analógico en
valores digitales.

    //
    //
    AdcSetMode(ADC_ADCA,
ADC_RESOLUTION_12BIT,ADC_SIGNALMODE_SINGLE); EN pagina 517 Solo trabaja mi
placa con 12 bits no hay q seleccionar los 12 ??
//SOC A
    AdcRegs.ADCCTL2.bit.CLKDIV4EN = 0; //set ADCCLK divider to /4
    //AdcSetMode(ADC_ADCA, ADC_RESOLUTION_12BIT, ADC_SIGNALMODE_SINGLE);
    AdcRegs.ADCCTL1.bit.INTPULSEPOS = 1;
    AdcRegs.ADCCTL1.bit.ADCPWDN = 1; //Todos los circuitos analógicos dentro del núcleo
están encendidos.//
// AdccRegs.ADCCTL2.bit.PRESCALE = 6; //set ADCCLK divider to /4
// AdcSetMode(ADC_ADCC, ADC_RESOLUTION_12BIT, ADC_SIGNALMODE_SINGLE);
//
//
//Set pulse positions to late
//
// AdcaRegs.ADCCTL1.bit.INTPULSEPOS = 1;

//AdccRegs.ADCCTL1.bit.INTPULSEPOS = 1;*/
//
//power up the ADC
//
//AdcaRegs.ADCCTL1.bit.ADCPWDNZ = 1;

//AdccRegs.ADCCTL1.bit.ADCPWDNZ = 1;*/
//
//delay for 1ms to allow ADC time to power up
//
DELAY_US(1000);

```

```

EDIS;

//
// ConfigureEPWM - Configure EPWM SOC and compare values
//
void ConfigureEpwm(void)
{
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 0; // Disable SOC on A group
    EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = 4; // Select SOC on up-count
    EPwm1Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = 1; // Generate pulse on 1st event

    EPwm1Regs.TBPRD = tope; // Set timer period
    //EPwm6Regs.TBPHS.bit.TBPHS = 0x0000; // Phase is 0
    EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000; // Clear counter
    // Setup TBCLK
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2; // Count up
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Disable phase loading
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = hdiv; // Clock ratio to SYSCLKOUT
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = div;
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_NO_ACTION; // Set PWM2A on Zero
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_NO_ACTION;
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.CBU = AQ_NO_ACTION; // Set PWM2A on Zero
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.CBD = AQ_NO_ACTION;
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.ZRO = AQ_SET;
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.PRD = AQ_CLEAR;
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 0; // Set compare A value to 2048 counts

    EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.SWFSYNC = 1;
//*****
    EPwm2Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 0; // Disable SOC on A group
    EPwm2Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = 4; // Select SOC on up-count
    EPwm2Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = 1; // Generate pulse on 1st event

    EPwm2Regs.TBPRD = tope; // Set timer period
    //EPwm6Regs.TBPHS.bit.TBPHS = 0x0000; // Phase is 0
    EPwm2Regs.TBCTR = 0x0000; // Clear counter

```

```

// Setup TBCLK
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2; // Count up
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Disable phase loading
EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = hdiv; // Clock ratio to SYSCLKOUT
EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = div;
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_NO_ACTION; // Set PWM2A on
Zero
EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_NO_ACTION;
EPwm2Regs.AQCTLB.bit.CBU = AQ_NO_ACTION; // Set
PWM2A on Zero
EPwm2Regs.AQCTLB.bit.CBD = AQ_NO_ACTION;
EPwm2Regs.AQCTLB.bit.ZRO = AQ_SET;
EPwm2Regs.AQCTLB.bit.PRD = AQ_CLEAR;
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = 0; // Set compare A value to 2048
counts

EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;
EPwm2Regs.TBCTL.bit.SWFSYNC = 1;

//*****
EPwm3Regs.ETSEL.bit.SOCAEN = 0; // Disable SOC on A group
count
EPwm3Regs.ETSEL.bit.SOCASEL = 4; // Select SOC on up-
1st event
EPwm3Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = 1; // Generate pulse on

EPwm3Regs.TBPRD = tope; // Set timer period
//EPwm6Regs.TBPHS.bit.TBPHS = 0x0000; // Phase is 0
EPwm3Regs.TBCTR = 0x0000; // Clear counter
// Setup TBCLK
EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = 2; // Count up
phase loading
EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Disable
SYSCLKOUT
EPwm3Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = hdiv; // Clock ratio to
EPwm3Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = div;
PWM2A on Zero
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_NO_ACTION; // Set
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_NO_ACTION;
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.CBU = AQ_NO_ACTION;
// Set PWM2A on Zero
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.CBD = AQ_NO_ACTION;

```

```

EPwm3Regs.AQCTLB.bit.ZRO = AQ_SET;
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.PRD = AQ_CLEAR;
EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 0; // Set compare A
value to 2048 counts

```

```

EPwm3Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;
EPwm3Regs.TBCTL.bit.SWFSYNC = 1;

```

```

//EDITS;
}
//-----CONFIG -----EPWM//
void SetupADCEpwm(Uint16 ch_0)
{
//*****//
//Hace que cada uno sincroniza el pwm con el ADC y cuando se dsee que dispare el adc//
Uint16 acqps;

//Toma ya el valor predeterminado de 12 bits , entonces qu poner

acqps = 14; //

EALLOW;

// Se va a sensar unicamente un Sensor de ADCEpwm por lo tanto se elije el canal ch_0
//ADC A)
AdcRegs.ADCSOC0CTL.bit.CHSEL = ch_0; // vload
AdcRegs.ADCSOC0CTL.bit.ACQPS = acqps; //sample window is 100 SYSCLK cycles
AdcRegs.ADCSOC0CTL.bit.TRIGSEL = 5; //trigger on ePWM6 SOCA/C

AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1SEL = 0 ;//end of SOC2 will set INT1 flag
AdcRegs.INTSEL1N2.bit.INT1E = 1 ; //enable INT1 flag
AdcRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1; //make sure INT1 flag is cleared

//*****//

```

```

    EDIS;
}

//
//ADCINTFLGCLR adca1_isr - Read ADC Buffer in ISR
//
interrupt void adca1_isr(void)
{

    /* GpioDataRegs.GPESET.bit.GPIO131 = 1;
//adquirir senal

    * v_bat[0]=AdccResultRegs.ADCRESULT0-voff-1;
v_bat[1]=AdcaResultRegs.ADCRESULT1-voff-7;
v_bat[2]=AdcbResultRegs.ADCRESULT1-voff-27;
v_bat[3]=AdccResultRegs.ADCRESULT1-voff-9;
v_bat[4]=AdcaResultRegs.ADCRESULT2-voff+4;
i_o=AdcbResultRegs.ADCRESULT0-ioff;

// calculando v out de fb
for (j=0;j<5;++j)
{
    v_H[j]=((int32)(v_bat[j])*(int32)(u_i[1]+u_v[1][j]))/1000;
}

//generando referencia de corriente
//I_ref=(3*S[(k)%N])/26;
    k=k+1;
    if (k>10*N)
        k=0;
I_ref=230;
    // current control
e_i[1]=I_ref-i_o;
if(e_i[1]>250)
    e_i[1]=250;
if(e_i[1]<-250)
    e_i[1]=-250;
u_i[1]=u_i[0]+(e_i[1]);

```

```
if(u_i[1]>1000)
    u_i[1]=1000;

if(u_i[1]<-1000)
    u_i[1]=-1000;

u_i[0]=u_i[1];

//en state

//bypass system
for (j=0;j<5;++j)
{
    if (v_bat[j]>550)
    {
        en[j]=1;
    }
    if (v_bat[j]<400)
    {
        en[j]=0;
    }

    if (en[j]==1)
    {
        v_Hn[j]=v_H[j];
        v_Hp[j]=v_H[j];
    }
    else
    {
        v_Hn[j]=v_H[(j+4)%5];
        v_Hp[j]=v_H[(j+6)%5];
    }
}

//balancing
for (j=0;j<5;++j)
{e_v[0][j]=e_v[1][j];
    e_v[1][j]=en[j]*(2*v_H[j]-v_Hn[(j+4)%5]-v_Hp[(j+6)%5]);
```

```

    if(e_v[1][j]>600)
        e_v[1][j]=600;
    if(e_v[1][j]<-600)
        e_v[1][j]=-600;
}

for (j=0;j<5;++j)
{
    u_v[1][j]=u_v[0][j]-u_v[0][j]/200-e_v[1][j]/5;

    if(u_v[1][j]>1000)
        u_v[1][j]=1000;

    if(u_v[1][j]<-1000)
        u_v[1][j]=-1000;

    if(AdccResultRegs.ADCRESULT2<3000)
    {
        u_v[1][j]=0;
        e_v[1][j]=0;
        e_v[0][j]=0;
    }

    u_v[0][j]=u_v[1][j];
}

//u_i[1]=500;

for (j=0;j<5;++j)
{
    //375[j]=tope/2+u_i[1]+u_v[1][j];
    375[j]=tope/2+u_i[1]+u_v[1][j];
    // 375[j]=1500+u_v[1][j];
    //375[j]=tope/2+150*(j+1);
    //375[j]=1500;
}*/

```

```

//375[0]=200;
// 375=0.45*S[(20*k)%N]+tope/2;
// k=k+1;
// if (k>10*N)
//   k=0;

//}
// DAC_PTR[DACA]->DACVALS.all = AdcbResultRegs.ADCRESULT0; //io
/// DAC_PTR[DACB]->DACVALS.all = AdcaResultRegs.ADCRESULT1; //bat2
// for (p=0;p<4;++p)
// {
//   375[p]=1000;
//
// }
//
//

//375=(tope+S[k/100])>>1;
//   k=++k;
//if (k==100*N)
//  k=0;

EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 375; //375 = 375
EPwm1Regs.CMPB = tope-375;

EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = tope-375;
EPwm2Regs.CMPB = 375;

//
// EPwm5Regs.CMPA.bit.CMPA = 375[4];
// EPwm5Regs.CMPB.bit.CMPB = tope-375[4];

//a DIFERENCIA DEL ANTEIOR AQUI PARA limpiar el registro pag120 Manual
GpioDataRegs.GPACLEAR.bit.GPIO31 = 1;

AdcRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1; //clear INT1 flag
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;

```

```

//AdcbRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;
// PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1; ES solo 1 ADC?preguntar
// AdccRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;
// PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;

}

void InitEPwm1Example()
{

    EPwm1Regs.TBPRD = tope;           // Set timer period
    EPwm1Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0;   // Phase is 0
    EPwm1Regs.TBCTR = 0x0000;        // Clear counter
    // Setup TBCTL
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Estos bits establecen el
    modo de operación del contador de base de tiempo de la siguiente manera MODO DE
    CUENTA progresiva
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Disable phase loading
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = hdiv; // Clock ratio to SYSCLKOUT
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = div; // Slow just to observe on
    // Setup compare0
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = 375; // 375 = 375 DEFINIR 375=??? no en nombre sino
    en valores??
    EPwm1Regs.CMPB = tope-375;
    // Set actions
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR; // Set PWM2A on Zero
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_SET;
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.CBU = AQ_CLEAR; // Set PWM2A on Zero
    EPwm1Regs.AQCTLB.bit.CBD = AQ_SET;
    // Active Low complementary PWMs - setup the deadband // Generate INT on 3rd event
    // Generate INT on 3rd event
    // dephase
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 1;
    //Cambio de fase mejorar
    EPwm1Regs.TBCTL.bit.SWFSYNC = 1; // to make the pulses phase shifted

}

```

```

void InitEPwm2Example()
{
    EPwm2Regs.TBPRD = tope;           // Set timer period
    EPwm2Regs.TBCTR = 0x0000;        // Clear counter
    // Setup TBCLK
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Count up
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Disable phase loading
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = hdiv; // Clock ratio to SYSCLKOUT
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = div; // Slow just to observe on
    // Setup compare0
    EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA = tope - 375;
    EPwm2Regs.CMPB = 375;
    // Set actions
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR; // Set PWM2A on Zero
    EPwm2Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_SET;
    EPwm2Regs.AQCTLB.bit.CBU = AQ_CLEAR; // Set PWM2A on Zero
    EPwm2Regs.AQCTLB.bit.CBD = AQ_SET;
    // dephase
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 0;
    EPwm2Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 1;
    EPwm2Regs.TBPHS.half.TBPHS = tope/2; //335 pagina
    // Este bit le permite sincronizar módulos ePWM con una fase de alta resolución en un
    SYNCIN,
    // EPwm2Regs.TBCTL.bit.SWFSYNC = 1; // to make the pulses phase shifted
}

void InitEPwm3Example()
{

```

```

    EPwm3Regs.TBPRD = tope;           // Set timer period
    EPwm3Regs.TBPHS.half.TBPHS = 0x0000; // Phase is 0
    EPwm3Regs.TBCTR = 0x0000;        // Clear counter
    // Setup TBCLK
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Count up
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_DISABLE; // Disable phase loading
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = hdiv; // Clock ratio to SYSCLKOUT
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = div; // Slow just to observe on
    // Setup compare0
    EPwm3Regs.CMPA.half.CMPA = 375;

```

```

EPwm3Regs.CMPB = tope-375;
// Set actions
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR;      // Set PWM2A on Zero
EPwm3Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_SET;
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.CBU = AQ_CLEAR;      // Set PWM2A on Zero
EPwm3Regs.AQCTLB.bit.CBD = AQ_SET;

//PWM complementarios bajos activos: configure la banda muerta // Generar INT en el tercer
evento // Generar INT en el tercer evento
    // desfasar
    EPwm3Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = 1;
    //Este bit le permite sincronizar módulos ePWM con una fase de alta resolución en un
    SYNCIN,
    // EPwm3Regs.TBCTL.bit.SWFSYNC = 1; // to make the pulses phase shifted
}

//void Conf_DAC(){
// EALLOW;
//DacaRegs.DACCTL.bit.SYNCSSEL = 5; Posiblemente innecesario
//DacaRegs.DACCTL.bit.LOADMODE = 1; /* Actualización con el SYSCLK; 1 Usa PWM
(arriba) y 0 Usa SYSCLK*/
//DacaRegs.DACCTL.bit.DACREFSEL = 1; /* Referencia de conversión con los voltajes de
ADC */
//DacaRegs.DACOUTEN.bit.DACOUTEN = 1; /* Habilita la salida del DAC */
//EDIS;
//}

/*void configureDAC(Uint16 dac_num)
{
    EALLOW;
    DAC_PTR[dac_num]->DACCTL.bit.DACREFSEL = REFERENCE;
    DAC_PTR[dac_num]->DACOUTEN.bit.DACOUTEN = 1;
    DAC_PTR[dac_num]->DACVALS.all = 0;
    DELAY_US(10); // Delay for buffered DAC to power up
    EDIS;
}
*/
//
// End of file
//

```

BIBLIOGRAFÍA

Autor. (2021). *Fotografías Scooter eléctrico Ricardo Vaca*. Ibarra.

Cattini. (01 de 05 de 2021). *Cattini.Com*. Obtenido de Cattini.Com: <https://www.cattini.com>

Cenergía. (27 de 11 de 2020). *Cenergía. ORG*. Obtenido de Cenergía. ORG: <https://cenergia.org.pe/blog/moto-scooter-electrica-convencional-gasolina-cuanto-ahorran/>

E-Bike. (2020). *E-Bike.com*. Obtenido de E-Bike.com: https://www.flingvo.com/index.php?main_page=product_info&products_id=668059

Greenline. (04 de 05 de 2021). *Green line*. Obtenido de Green line: <https://glperu.com>

Sur, S. s. (19 de 12 de 2018). *Solar Sierra Sur*. Obtenido de Solar Sierra Sur: <https://solarsierrasur.com/baterias-inteligentes-para-autoconsumo/>

Aganza, A., Pérez, J., & Beristain, J. (2006). Inversor trifásico SPWM para el control de velocidad de un motor de inducción implementado en el microcontrolador PIC18F2431. *RIEE&C, Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.*, 2(1), 7–15. https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v2/art2_diciembre2006.pdf

Aguirre, N., Carvajal, A., & Martínez, S. (1992). Convertidor Buck-Boost Diseño de un Regulador Conmutado. *Academia Accelerating the World's Research*, 26(6), 1294–1301.

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38953667/Paper_Convertidor_DC_a_DC_Buck-Boost-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1667172711&Signature=NvaVatDW3jC5tXxttHhxO4~WC2wToSYtKidaG6YCOvk-IzcdFqki8E99YhZxHFzKB78Syqied042RzF8OHjj5QfIUzdPOV7z6U5fh0WBdhBm5B9NP3KvT-Bc9a8fu0lcaTIXUv8jQaB7splfk6VdXT~1YVNyef6tqygdX9TrlBYIDAb2VleEYxeTBZBok2-Bf1O3ngQSqyj-3thiyFV6mrZGpKg-yYEr6a2I2NikZ1LhVBsF8UXiVHHcWpf7l8XtKzeF3jrmIOY9jIMUahulTe2aC~XBdcfYDsHwMK2GACF41~3MjXNF7d3i5rlwCcNJUwNDmlSu0PmWEnwNBrB47w__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Alessio, R. (2007). *Rigol 1052E Datsheet*. 81(3), 1–16.

- <https://www.rigolna.com/products/digital-oscilloscopes/1000/>
- Brown, W. (2019). *AN857 - Brushless DC Motor Control Made Easy*. 1, 48. <http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn012037.pdf>
- Canteli, M. M. (2013). REGULACIÓN, CONTROL Y PROTECCIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS. *Fax*, 942, 201385. <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1986/course/section/2310/convertidores.pdf>
- Daniel N'ova. (2021). *EL microcontrolador*. 1, 1–5. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/760/4/A4.pdf>
- F.Fluck. (2020, May 1). *Frecuencia*. <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/electrica/que-es-la-frecuencia>
- FvpMax. (2016, December 21). *Variador electrónico (ESC): Qué es y cómo funciona - FpvMax*. <https://www.fpvmax.com/uncategorized/variador-electronico-esc-funcional/>
- González, J. D. (2018). *Inversores Pwm*. 1–26. <http://ieee-pels-ies.es/Pels/Pdf/Leccion Inversores Juan Diaz.pdf>
- Guao O'rg. (2015, March 2). *Resistencia Eléctrica*. Facultad de Ciencias de Universidad Central de Venezuela. <https://guao.org/sites/default/files/B.3 Resistencia Eléctrica.pdf>
- Instrumental Texas. (2022, May 15). *LAUNCHXL-F28379D Texas Instruments | Distributors, Price Comparison, and Datasheets | Embedded Processors and Controllers | Octopart*. <https://octopart.com/launchxl-f28069m-texas+instruments-53115339?r=sp>
- John Jairo García Ortiz, & Suasti, J. F. B. (2021). *Universidad Internacional del Ecuador: Estudio comparativo de diseño estructural en vehículos L3 de tipo eléctrico y de motor de combustión interna. TUTOR DE TESIS : Ing Gorky Reyes*. 54.
- Journal, I. (2020). IRJET- Design and Development of Electric scooter. 5, 1, 7.
- Kenjō, T., & Nagamori, S. (1985). *Permanent-magnet and brushless DC motors*. In *Oxford University Press*. https://scholar.google.es/scholar?hl=en&q=electronic+motors&btnG=&as_sdt=1%2C5&as_sdt=4
- Kuperstein, G., Murguía, A., Trespalacios, R., & Barakat Colegio Marymount, G. (2010). *Péndulo Para Ilustrar La Ley De Faraday: Variación De La Fuerza Electromotriz Y Mecánica Al Cambiar En Número*. 1–12. http://es.wikipedia.org/wiki/Fuerza_de_Lorentz
- Lin, J. S., & Fu, L. C. (1999). Model analysis and controller design of electric motorcycles. *Proceedings of the American Control Conference*, 4(June), 2698–2702. <https://doi.org/10.1109/acc.1999.786560>
- Marulanda, J., Ordoñez, J., & Mosquera, F. (2017). Design and construction of a Boost type dc / dc converter with adjustable PWM. *Scientia et Technica*, 22(1), 9–14.
- Moreno Delgado, Á. J., Hernández Bonilla, C. M., Miramá Pérez, V. F., & Quintero Flórez, V. M. (2018). Algoritmo de control de potencia para el simulador básico a nivel de sistema

- LTE. *Entramado*, 14(2), 300–318. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/ENTRAMADO.2.4764>
- Namboodiri, A., & Wani, H. (2014). Unipolar and Bipolar PWM Inverter. *IJIRSRT - International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(7), 7. <http://www.ijirst.org/articles/IJIRSTV1171111.pdf>
- Ortega, V. G. (2002). Simulador Convertidores DC-DC. *Universitat Rovira I Virgili*, 182. deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/197pub.pdf
- Padmaraja Yedamale, & Microchip Technology Inc. (2003). Brushless DC (BLDC) Motor. *MICROCHIP, DS00885A*(2003 Microchip Technology Inc.), 1–20. [http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless DC \(BLDC\) Motor Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals.pdf)
- Ribes-Mallada, U., Leyva, R., & Garcés, P. (2011). Assessment of direct VRM topologies. *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 765–768. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2011.5937678>
- Rodriguez Gilberto Jose. (2010). *TEMA 11 Inversores Índice*. 1, 4–7. https://www.uv.es/emaset/iep00/temas/IEP11_0607.pdf
- S. Sinadrives. (2021). *Control en lazo: abierto / cerrado. Gestión de la maquinaria. SINADRIVES*. <https://sinadrives.com/es/control-de-maquinaria-control-en-lazo-abierto-cerrado/>