

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA EXCITATRIZ
DE UN ALTERNADOR DE AUTOMÓVIL BASADO EN EL MODELO IEEE TIPO
DC1A**

**CESAR ANDRÉS PRADA VEGA
FERNEY LEONARDO MANRIQUE LIZARAZO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA EXCITATRIZ
DE UN ALTERNADOR DE AUTOMÓVIL BASADO EN EL MODELO IEEE TIPO
DC1A**

**CESAR ANDRÉS PRADA VEGA 2080313
FERNEY LEONARDO MANRIQUE LIZARAZO 2073649**

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Ingeniero Electricista, Dr

Codirector

JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

Ingeniero Electricista, MsC

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELAS DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

En este punto de mi existencia en donde he alcanzado un paso importante en mi formación tanto humana como académica, he aprendido que la constancia y dedicación son las bases que construyen cualquier meta, además es necesario reconocer que esto no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas por esto dedico este paso alcanzado a:

Mis padres por su constancia y apoyo.

Mi tía, mi hermana y demás familia y seres queridos.

A los profesores que he conocido a lo largo de mi formación desde niño hasta hoy día.

A mis amigos.

Al director y codirector de este proyecto como también a los profesores que pusieron su aporte ya sea con una opinión o con su ayuda directa.

A mi compañero Ferney Manrique.

A mi novia.

A la biblioteca y a los demás organismos de la UIS que facilitaron mi formación.

Cesar Andrés Prada Vega

Así como Uróboros, esta tesis marca el final de mi ciclo académico y más que un logro personal, este nuevo escalón de ascenso en mi vida representa el trabajo arduo y constante de mi familia; así que todas las líneas escritas en este papel son dedicadas a mis amados padres, quienes depositaron toda su confianza y buena actitud ante todas las vicisitudes que se presentaron durante esta etapa que finalmente culmina, a mis hermanos, los cuales me ayudaron a impulsar de regreso a la batalla cuando tuve una caída. Por último a Cesar Prada, el cual fue mi compañero durante este camino que algunas veces estuvo lleno de espinas pero permanecíamos de pie ante cualquier posibilidad y gracias a eso podemos decir “meta cumplida”.

Ferney Leonardo Manrique Lizarazo

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	18
2. ESTRUCTURA DEL MODELO DE CONTROL IEEE TIPO DC1A.....	19
2.1 INTRODUCCIÓN.....	19
2.2 ESTRUCTURA GENERAL DE UN SISTEMA DE CONTROL DE UNA MAQUINA SÍNCRONA	19
2.3 EXCITATRIZ DE CD	22
2.4 PRINCIPALES TIPOS DE CONTROL DE EXCITACIÓN	29
2.4.1 Sistemas de excitación tipo Cd	29
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL.....	32
3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPIC.....	34
3.1.1 Proceso de diseño del convertidor.....	34
3.1.2 Construcción del pwm para conmutación del Mosfet.....	38
3.1.3 Etapa de potencia y aislamiento	40
3.2 CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR.....	41
3.2.1 Construcción del restador	42
3.2.2 Contrucción del controlador	43
3.2.3 Acondicionamiento de la señal de salida del alternador	46
4. OBTENCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO.....	48
4.1 PRUEBA DE RESISTENCIA DE ARMADURA	48
4.2 PRUEBA DE VACIO	49
4.3 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO	51
4.4 PRUEBA DE CARACTERÍSTICA EXTERNA	53
4.4.1 Característica externa de la máquina con el circuito de control.....	53

4.4.2 Característica externa de la máquina sin el sistema de control	55
4.5 RESPUESTA AL ESCALON.....	56
5. CONCLUSIONES	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama funcional de bloques del sistema de control de excitación del generador síncrono.....	20
Figura 2. Excitatriz de CD con excitación independiente.....	22
Figura 3. Curva de saturación de carga a resistencia constante.	24
Figura 4. Diagrama de bloques de una excitatriz en CD.....	27
Figura 5. Excitatriz de DC auto-excitada.....	28
Figura 6. Diagrama de bloques del sistema de excitación tipo DC1A.....	30
Figura 7. Diagrama de bloques simplificado del sistema de control.	32
Figura 8. Alternador de automóvil junto a las partes que lo componen.	33
Figura 9. Regulador de tensión de alternador.....	33
Figura 10. Puente rectificador trifásico de onda completa utilizado en un alternador.....	34
Figura 11. Topología del SEPIC.	35
Figura 12. Configuración del comparador.....	38
Figura 13. Configuración del circuito regulador Zener	39
Figura 14. Puente rectificador de onda completa.....	40
Figura 15. Esquema del opto-acoplador	41
Figura 16. Amplificador Restador de la tensión con ganancia unitaria.	42
Figura 17. Controlador Proporcional implementado.....	44
Figura 18. Bloque de acción proporcional.....	45
Figura 19. Bloque del amplificador inversor de tensiones.....	46
Figura 20. Esquema del rectificador junto al divisor de tensión	46
Figura 21. Diagrama de bloques del sistema de control de la excitatriz implementado.	47

Figura 22. Montaje realizado para la prueba de vacío.	49
Figura 23. Curva característica de vacío de la máquina síncrona.	50
Figura 24. Montaje realizado para la prueba de cortocircuito.	51
Figura 25. Curva de corto circuito de la máquina síncrona.	52
Figura 26. Curva de característica externa registrada con el sistema de control implementado	54
Figura 27. Curva de característica externa registrada con el sistema de control implementado	56
Figura 28. Curva de respuesta a la entrada escalón.	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones de diseño del convertidor SEPIC.....	35
Tabla 2. Resultados tabulados de la prueba de vacío.	50
Tabla 3. Resultados tabulados de la prueba de corto circuito.	52
Tabla 4. Resultados tabulados de la prueba de característica externa funcionando con el sistema de control.	54
Tabla 5. Resultados tabulados de la prueba de característica externa funcionando sin el sistema de control.	55

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Simulación del diseño del convertidor DC-DC (SEPIC)	66

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA EXCITATRIZ DE UN ALTERNADOR DE AUTOMOVIL SIGUIENDO EL MODELO IEEE DC1A*

AUTORES: FERNEY MANRIQUE LIZARAZO**
CESAR ÁNDRES PRADA VEGA

PALABRAS CLAVES: Control, Excitatriz, Alternador, Generador Síncrono.

DESCRIPCIÓN:

En la generación de energía eléctrica por medio del generador síncrono se encuentran incluidas variables que afectan el funcionamiento del mismo, una de estas variables que tiene enorme influencia en el desempeño de la máquina y en la posibilidad de hacerla manipulable según su requerimiento, es el campo magnético generado por el rotor.

En este trabajo de grado se realizó un control de la tensión trifásica de salida de la máquina por medio del campo. Se transformó un alternador de automóvil en un generador síncrono, suprimiéndole su puente rectificador trifásico y su regulador de tensión. El sistema de control de la excitatriz del campo fue diseñado tomando como fundamento el modelo propuesto en la norma IEEE tipo DC1A. La excitatriz fue construida por medio de un convertidor DC-DC conocido como SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) el cual sustituye la máquina de DC utilizada como excitatriz en el modelo. Además se construyó un controlador analógico de naturaleza proporcional el cual reemplaza al regulador automático de tensión propuesto de igual forma en el modelo. Sintonizando el control de manera práctica se realizaron una serie de pruebas cuyos resultados han sido plasmados en el presente documento.

En este proyecto se aplicaron en forma práctica y directa conceptos estudiados a lo largo de la carrera. Se aprendió más sobre la electrónica de potencia y el funcionamiento de los convertidores DC-DC así como de la máquina síncrona y sus sistemas de control de la excitatriz.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Director Dr. Hermann Raúl Vargas Torres, Codirector MsC Jaime Guillermo Barrero Pérez.

ABSTRACT

TITLE: DESIGNING AND CONSTRUCTION OF THE CONTROL SYSTEM FROM VEHICLE ALTERNATOR PRIMARY MOTOR FOLLOWING IEEE DC1A MODEL.

AUTHORS: FERNEY MANRIQUE LIZARAZO**
CESAR ÁNDRES PRADA VEGA

KEYWORDS: Control, Primary motor, Alternator, Synchronous generator.

DESCRIPTION

In electric power generation throughout synchronous generator are included variables that affecting the operation from itself, one of this variables which has a great influence in the performance of the machine and the possibility to do more manipulable according to its requirement, it's the magnetic field generated for rotor.

In this thesis it built a control the three-phase output voltage of the machine by means of the field. It transformed one vehicle alternator in a synchronous generator, it take its bridge rectifier off and its voltage regulator. The control system of the field primary motor was designed based on a model proposed by norm DC1A from IEEE. The primary motor was built throughout a DC-DC converter known as SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) which replaces the DC machine used like primary motor in the model. Besides it built an analogic control with proportional character which replaces the automatic voltage regulator proposed in the model too. Syntonizing the control in practical way it did a series of testes which results had been written in this document.

This project will be implemented in a practical and direct concepts studied along the race. He learned more about the power electronics and the operation of DC-DC converters and synchronous machine and its control systems exciter.

* Work degree

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications, Director Dr. Hermann Raul Vargas Torres, MSc Co Guillermo Barrero Jaime Perez.

INTRODUCCIÓN

Es notorio el crecimiento demográfico que ocurre actualmente en el mundo, este a su vez va de la mano con el aumento en el consumo energético. En Colombia, uno de los recursos que más se emplea para producir la energía eléctrica es el hídrico. El tipo de generador eléctrico más utilizado en este caso es el generador síncrono.

El buen funcionamiento en la generación de la energía eléctrica depende en gran medida de una adecuada manipulación de estas máquinas, es decir que si un operario nota que en cierta zona es requerido un nivel de potencia determinado pueda jugar con las variables de los alternadores del sistema de potencia. Para una máquina síncrona existen parámetros que se pueden controlar tales como la tensión de salida, la potencia a entregar, su frecuencia de trabajo entre otras.

El campo magnético de una máquina síncrona realiza un control directo sobre el nivel de tensión generada y también puede controlar la potencia reactiva que entrega la máquina, para esta función existen gran variedad de métodos y modelos en la actualidad. Muchos de estos se encuentran normalizados en el Institute Of Electric And Electronic Engineering (IEEE). En este proyecto el objeto de estudio fue el modelo de control IEEE tipo DC1A utilizado como punto de partida para la construcción del circuito de control de un pequeño generador síncrono o alternador de automóvil presente en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Inicialmente se estudió cada una de los bloques que conformaban el modelo IEEE tipo DC1A reduciéndolo básicamente en tres etapas, una de ellas es la excitatriz la cual se encarga de suministrar energía en DC, que en este modelo viene dada por un generador en DC acoplado al eje de la máquina síncrona, otra etapa pertenece

al circuito de control junto a su compensación y la tercera es la conformada por los elementos de protección eléctrica tanto del circuito de control como de la máquina.

En el presente trabajo de grado, en la construcción del circuito realizado la excitatriz fue implementada mediante un convertidor DC-DC conocido como SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) el cual entrega la corriente necesaria al campo del alternador, manipulable mediante su nivel de tensión y controlado a su vez por un PWM (Pulse Width Modulation). Este convertidor es manejado mediante un elemento de control sencillo conocido como control proporcional el cual depende del ajuste adecuado del valor de la ganancia del sistema. Al tratarse de un generador síncrono pequeño fueron utilizados únicamente elementos de protección contra corto circuito para el campo de la máquina y para el actuador o SEPIC.

Al implementarse este sistema se observó que el comportamiento del generador responde al comando del operario de forma rápida logrando sacar provecho de la funcionalidad del mismo debido a la estabilidad que presenta frente a perturbaciones y a su vez el ajuste de su nivel de tensión de salida es controlado mediante un potenciómetro.

En la caracterización de los generadores síncronos existen unas pruebas conocidas como pruebas de corto circuito y de circuito abierto, mediante las cuales se pueden obtener parámetros de los mismos. Estas pruebas se realizaron utilizando el circuito de control y obteniendo las curvas que representan su comportamiento, adicionalmente se realizó la prueba de característica externa de la máquina síncrona. Esta etapa representa la culminación del trabajo realizado consiguiendo así el alcance de cada uno de los objetivos de este proyecto.

1. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La estructura del presente documento es la siguiente:

- **Capítulo 2: Estructura del modelo de control IEEE tipo DC1A.** En este capítulo se hace una descripción de los requerimientos de un sistema de control de excitación vistos desde la óptica del sistema de potencia. En la descripción de la estructura general de la excitación, se presenta el diagrama de bloques correspondiente al modelo IEEE tipo DC1A.
- **Capítulo 3: Diseño y construcción del circuito de control.** En este capítulo se muestra paso a paso el procedimiento realizado en la construcción del prototipo de sistema de control de la excitatriz para el alternador constituido por el SEPIC y un controlador proporcional junto con los elementos que hacen parte del funcionamiento de cada uno.
- **Capítulo 4: Pruebas de funcionamiento.** Se describen las pruebas realizadas así como los datos obtenidos y los registros de funcionamiento del sistema.
- **Capítulo 5: Conclusiones.** Se presentan las conclusiones obtenidas en el trabajo de tesis así como las sugerencias y aportes para trabajos futuros en este campo.
- **Referencias.** En este capítulo se presentan los archivos y documentos, así como la bibliografía que fueron utilizados como base en el desarrollo de esta tesis.

2. ESTRUCTURA DEL MODELO DE CONTROL IEEE TIPO DC1A

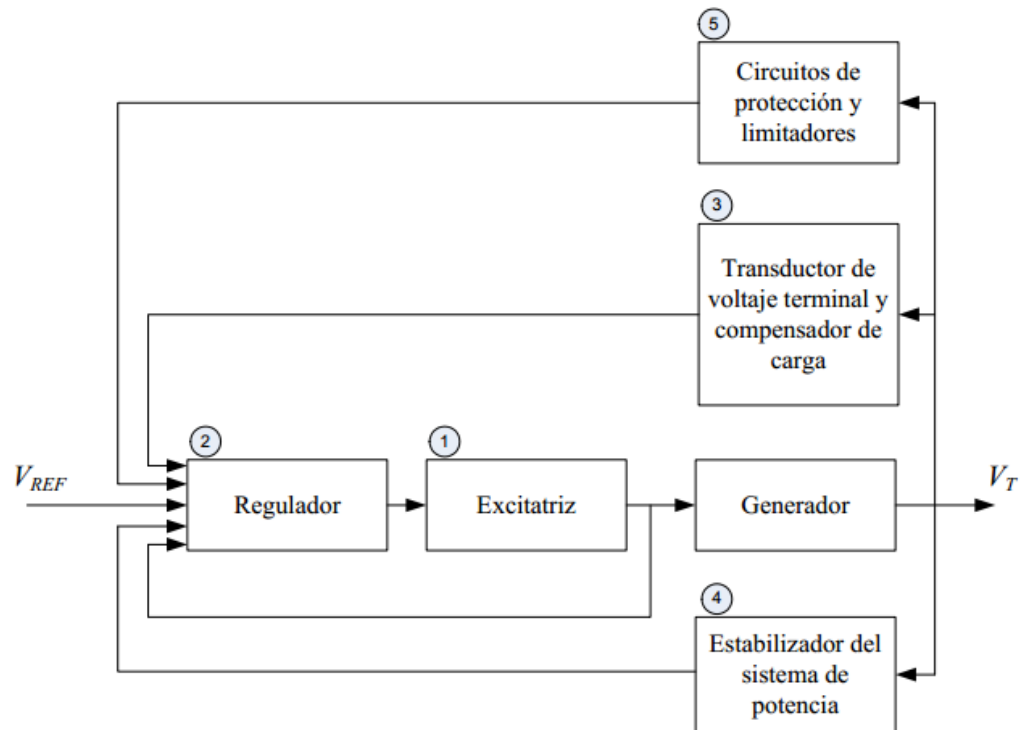
2.1 INTRODUCCIÓN

El generador o máquina síncrona cuenta con sistemas diseñados para controlar sus diversas funciones, entre ellas la tensión en sus terminales y el flujo de potencia activa o reactiva. En este capítulo se planteará de manera sencilla el funcionamiento básico de un sistema de control y principalmente el sistema de control IEEE tipo DC1A.

2.2 ESTRUCTURA GENERAL DE UN SISTEMA DE CONTROL DE UNA MAQUINA SÍNCRONA

En la figura 1 se puede observar el esquema funcional de un sistema de control de la excitatriz estándar por medio de diagramas de bloques, esto relacionado a un generador síncrono de potencia. Paso seguido se hace una pequeña descripción de cada uno de los subsistemas que se encuentran señalados y numerados. [1], [4].

Figura 1. Diagrama funcional de bloques del sistema de control de excitación del generador síncrono.



Fuente [4]

(1) Excitatriz. Suministra corriente continua al rotor (campo) del generador síncrono [1], [4].

(2) Regulador. Su función es procesar y amplificar las señales de control provenientes de la entrada a un nivel y forma determinados de manera apropiada para controlar la excitatriz. Este elemento regulador incluye varias funciones, entre ellas, las de regular la tensión y estabilizar el sistema de excitación (compensación serie por reducción de la ganancia transitoria o por retroalimentación) [1], [4].

(3) Transductor de la tensión terminal y compensador de carga. Mide la tensión en las terminales de la maquina síncrona, paso seguido la rectifica, la filtra a un valor determinado en CD, luego la compara con un valor de referencia que es igual al valor de tensión deseado en las terminales. Además, tiene la capacidad de proporcionar compensación de carga (compensación por caída de tensión o pérdidas reactivas). Si se quiere mantener constante, según sea requerida, la tensión en un punto eléctricamente distante del generador, (como por ejemplo, un punto posterior al transformador elevador del generador) o en un punto interno [1], [4].

(4) Estabilizador del sistema de potencia. Suministra una señal adicional a la entrada del regulador cuyo objetivo es amortiguar oscilaciones del sistema de potencia. Ciertas señales usadas frecuentemente son la desviación de velocidad del rotor, la potencia de aceleración y la desviación de frecuencia [1], [4].

(5) Circuitos de protección y limitadores. Incluyen una gran variedad de funciones de control y protección, las cuales garantizan que no se excedan los límites de capacidad de la excitatriz y el generador síncrono. Algunas funciones de uso común son limitar la máxima excitación, limitar la tensión terminal, limitar la corriente de campo, la regulación y protección Volts/Hertz, además limitar la subexcitación. En el sistema de excitación los circuitos de protección y medición suelen ser diferentes circuitos y sus señales de salida pueden ser aplicadas al sistema de excitación en diferentes lugares como una suma de entrada o una entrada de acceso controlado. Por una mejor utilidad, se han agrupado y se muestran en forma de un solo bloque en la figura 1 [1], [4].

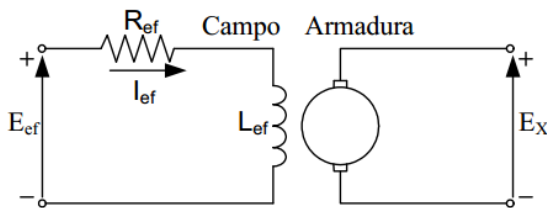
2.3 EXCITATRIZ DE CD

Las de tipo corriente directa (CD) pueden ser de excitación independiente o auto-excitadas [1], [4].

Excitatriz de CD con excitación independiente

En la figura 2 se observa el esquema de una excitatriz de CD con excitación independiente. La tensión de campo de la excitatriz es E_{ef} , la resistencia del bobinado de campo es R_{ef} también incluye cualquier valor de resistencia externa del circuito de campo. La salida de tensión de la excitatriz es E_x [1], [3], [4].

Figura 2. Excitatriz de CD con excitación independiente.



Fuente [4]

Con relación a la figura 2:

$$E_{ef} = I_{ef}R_{ef} + L_{ef} \frac{dI_{ef}}{dt} \quad (1)$$

Se puede observar en la ecuación que, L_{ef} modela la inductancia del circuito de campo. El eje del generador se utiliza además para controlar la excitatriz. Que también puede controlarse por separado. En cualquiera de los casos se asume

una velocidad fija ya que los efectos de variación de velocidad se toman como despreciables [3], [4].

La tensión de salida de la excitatriz está dada por la ecuación (2) [1], [4].

$$E_x = K_x L_{ef} I_{ef} \quad (2)$$

La constante K_x depende de la configuración del bobinado de armadura y de la velocidad de la máquina [4].

Despejando K_x se obtiene la ecuación (3):

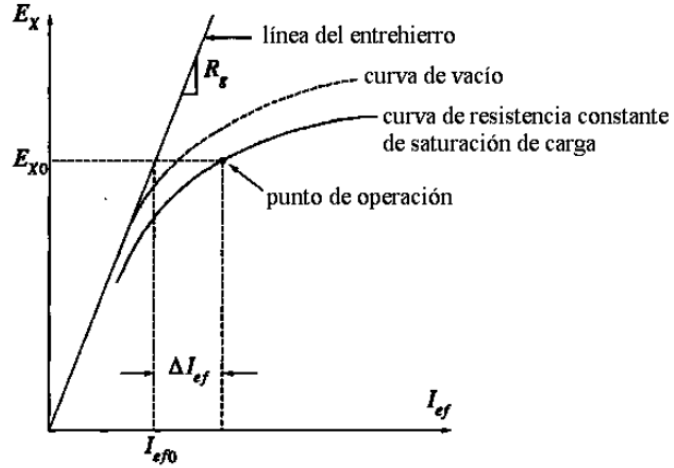
$$K_x = \frac{E_x}{L_{ef} I_{ef}} \quad (3)$$

y se obtiene I_{ef} como ecuación (4):

$$I_{ef} = \frac{E_x}{L_{ef} K_x} \quad (4)$$

La tensión de salida E_x es una función no lineal de la corriente de campo de la excitatriz I_{ef} debido a la saturación magnética. La tensión E_x se ve también afectada por la carga. Para modelar excitatrices en CD se tiene en cuenta la regulación de carga y la saturación, empleando la curva de resistencia constante de saturación de carga, que se muestra en la figura 3 [4].

Figura 3. Curva de saturación de carga a resistencia constante.



Fuente [4]

En la figura 3, R_g está definida como la pendiente de la línea del entrehierro y ΔI_{ef} representa la desviación de la curva de saturación de carga de la línea del entrehierro. Se tiene mirando la figura 3 la ecuación (5) [4]:

$$I_{ef} = \frac{E_x}{R_g} + \Delta I_{ef} \quad (5)$$

En la cual ΔI_{ef} es una función no lineal de E_x esta se expresa como ecuación (6) [4]:

$$\Delta I_{ef} = E_x S_e(E_x) \quad (6)$$

En la cual $S_e(E_x)$ es una función de saturación que depende de E_x [4].

Reemplazando las ecuaciones (4), (5) y (6) en la ecuación (1) se obtiene [4]:

$$E_{ef} = \left(\frac{E_x}{R_g} + E_x S_e(E_x) \right) R_{ef} + L_{ef} \frac{d}{dt} \left(\frac{E_x}{L_{ef} K_x} \right)$$

Entonces la ecuación de la excitatriz con excitación independiente es [4]:

$$E_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} E_x + R_{ef} S_e(E_x) E_x + \frac{1}{K_x} \frac{dE_x}{dt} \quad (7)$$

La ecuación (7) relaciona la entrada E_{ef} y la salida E_x . La ecuación (7) se puede escribir en un sistema en por unidad conveniente tomando como valores base a E_x y I_{ef} . Los valores base necesarios para obtener la tensión nominal del generador síncrono en la línea del entrehierro se obtienen así [1], [4].

$$E_{xbase} = E_{fdbase} \quad (8a)$$

$$I_{efbase} = \frac{E_{fdbase}}{R_g} \quad (8b)$$

$$R_{gbase} = R_g \quad (8c)$$

En donde E_{fd} es la tensión de salida de la excitatriz y I_{fd} es la corriente de campo del generador síncrono [5], [4].

Dividiendo la ecuación (7) en E_{xbase} , se obtiene [4]:

$$\frac{E_{ef}}{E_{xbase}} = \frac{R_{ef}}{R_g} \frac{E_x}{E_{xbase}} + R_{ef} S_e(E_x) \frac{E_x}{E_{xbase}} + \frac{1}{K_x} \frac{d}{dt} \left(\frac{E_x}{E_{xbase}} \right)$$

Que en por unidad se representa como [4]:

$$\bar{E}_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} \bar{E}_x + R_{ef} \bar{S}_E(\bar{E}_x) \bar{E}_x + \frac{1}{K_x} \frac{d\bar{E}_x}{dt} \quad (9)$$

La constante K_x definida por la ecuación (3) se puede expresar en por unidad en la ecuación (10) como [4]:

$$K_x = \frac{E_x}{L_{ef} I_{ef}} = \frac{E_{xbase} \bar{E}_x}{L_{ef} I_{efbase} \bar{I}_{ef}} = \frac{E_{xbase} \bar{E}_x}{L_{ef} \left(\frac{E_{xbase}}{R_g} \right) \bar{I}_{ef}} = \frac{R_g \bar{E}_x}{L_{ef} \bar{I}_{ef}} \quad (10)$$

Sustituyendo K_x de la ecuación (10) en la ecuación (9), se puede escribir como [4]:

$$\bar{E}_{ef} = \frac{R_{ef}}{R_g} \bar{E}_x + R_{ef} \bar{S}_E(\bar{E}_x) \bar{E}_x + \frac{L_{ef} \bar{I}_{ef}}{R_g \bar{E}_x} \frac{d\bar{E}_x}{dt} \quad (11a)$$

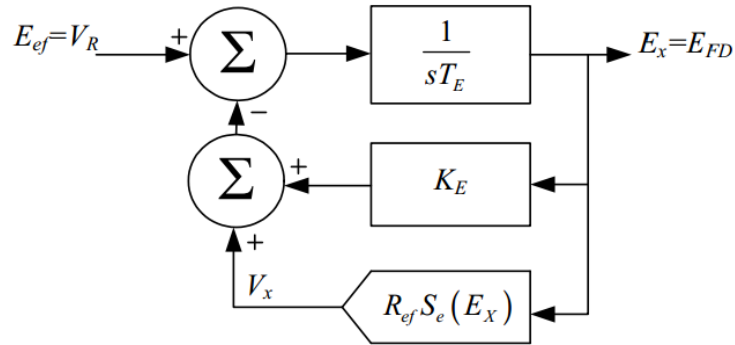
dónde:

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} \quad (11b)$$

$$T_E = \frac{L_{ef} \bar{I}_{ef}}{R_g \bar{E}_x} \quad (11c)$$

Estas ecuaciones (11a), (11b) y (11c) representan la relación entre entrada y salida de la excitatriz de CD con excitación independiente. En esta excitatriz la entrada de tensión E_{ef} es la tensión de salida del regulador de tensión V_R . En la figura 4 la tensión E_x que es la salida de la excitatriz de CD aplica directamente al devanado de campo del generador síncrono. Se representa el diagrama de bloques de la excitatriz con excitación independiente en la figura 4. Donde todas las variables están en valores por unidad [1], [4].

Figura 4. Diagrama de bloques de una excitatriz en CD.



Fuente [4]

Al ajustar la resistencia del circuito de campo R_{ef} se afecta a K_E como también a la función de saturación $S_E(E_x)$, aunque no afecta al tiempo de integración T_E [4].

Para simular el efecto de saturación de la excitatriz se suele utilizar la función exponencial o Euler que se observa en la ecuación (12) [1], [4].

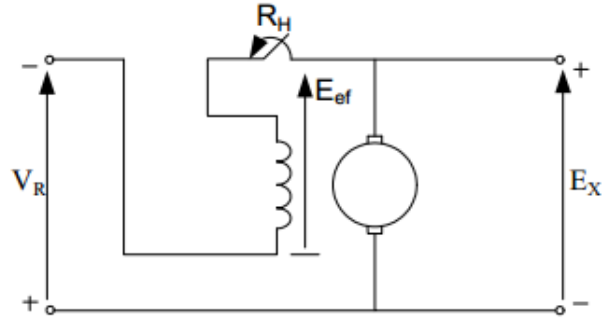
$$V_x = E_x S_E(E_x) = A_{EX} e^{B_{EX} E_x} \quad (12)$$

Excitatriz de CD auto excitada

En la figura 5 se puede observar el modelo de una excitatriz de CD auto-excitada. En este modelo la salida V_R se encuentra en serie con el campo shunt de la excitatriz. Entonces la tensión en por unidad del devanado de campo de la excitatriz de CD está dada por la ecuación (13) [1], [4].

$$\bar{E}_{ef} = \bar{V}_R + \bar{E}_x \quad (13)$$

Figura 5. Excitatriz de DC auto-excitada.



Fuente [1]

En este caso también aplica la relación entre los valores de \bar{E}_{ef} y \bar{E}_x en por unidad. Si se reemplaza \bar{E}_{ef} de la ecuación (13) en la ecuación (9), se obtiene la ecuación (14) [4]:

$$\bar{V}_R + \bar{E}_x = \frac{R_{ef}}{R_g} \bar{E}_x + R_{ef} \bar{S}_E(\bar{E}_x) \bar{E}_x + \frac{1}{K_x} \frac{d\bar{E}_x}{dt} \quad (14)$$

De la ecuación (10) [4]:

$$K_x = \frac{R_g \bar{E}_x}{L_{ef} \bar{I}_{ef}}$$

Reescribiendo la ecuación (14) [4]:

$$\bar{V}_R = \frac{R_{ef}}{R_g} \bar{E}_x + R_{ef} \bar{S}_E(\bar{E}_x) \bar{E}_x + \frac{L_{ef} \bar{I}_{ef}}{R_g \bar{E}_x} \frac{d\bar{E}_x}{dt} - \bar{E}_x$$

Finalmente se obtienen las ecuaciones (15a), (15b) y (15c) como [4]:

$$\bar{V}_R = \bar{E}_x \left(\frac{R_{ef}}{R_g} - 1 \right) + R_{ef} \bar{S}_E(\bar{E}_x) \bar{E}_x + \frac{L_{ef} \bar{I}_{ef}}{R_g \bar{E}_x} \frac{d\bar{E}_x}{dt} \quad (15a)$$

$$K_E = \frac{R_{ef}}{R_g} - 1 \quad (15b)$$

$$T_E = \frac{L_{ef} \bar{I}_{ef}}{R_g \bar{E}_x} \quad (15c)$$

En las ecuaciones (15a), (15b) y (15c) se hace una representación de la relación entre entrada y salida de esta excitatriz, se puede observar que en esta ecuación el diagrama de bloques de la figura 4 es válido para la excitatriz en CD auto-excitada. A pesar de que el diagrama de bloques es válido en ambos casos es importante señalar que K_E toma diferentes valores dependiendo del tipo de excitatriz de CD [4].

2.4 PRINCIPALES TIPOS DE CONTROL DE EXCITACIÓN

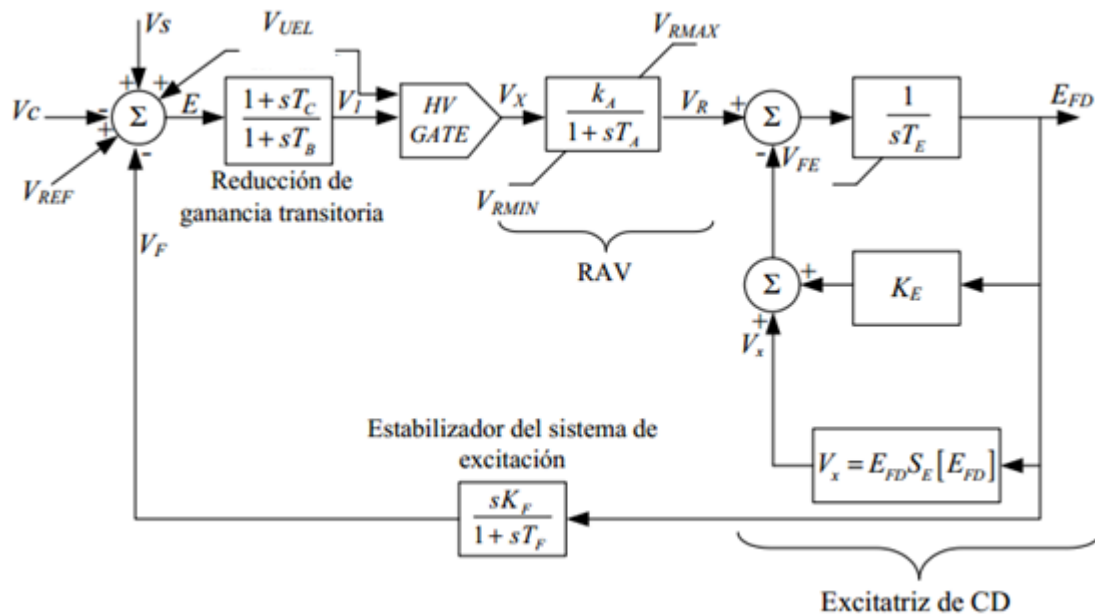
Existen tres tipos de sistemas de excitación clasificados con base en la fuente de energía, estos son [4]:

- a) Sistemas de excitación tipo CD: Se usa un generador de corriente continua como la fuente de energía del sistema de excitación.
- b) Sistemas de excitación tipo CA: Se usa un alternador y rectificadores fijos o rotatorios para producir la corriente continua necesaria para el campo del generador síncrono.
- c) Sistemas de excitación tipo ST: la energía de excitación es suministrada a través de transformadores o devanados de un generador auxiliar y un rectificador.

2.4.1 Sistemas de excitación tipo Cd. En la figura 6 se observa el modelo de sistema de control de la excitatriz tipo DC1A en CD, este modelo en ocasiones ha sido implementado ampliamente en la industria con el fin de representar otros

tipos de sistemas cuando no existen datos disponibles para ellos, o cuando se requiere simplificar un modelo [2], [4].

Figura 6. Diagrama de bloques del sistema de excitación tipo DC1A.



Fuente [4]

En la figura 6 se observa que la tensión V_C es la salida del transductor de tensión terminal y compensador de carga. En el sumador V_C es restada del valor de referencia determinado V_{REF} , V_F es la retroalimentación estabilizadora esta se resta también y la señal de estabilización del sistema de potencia V_S se adiciona con el fin de producir una señal de tensión de error. Estas dos últimas son cero en estado estacionario, dejando solo el error de la señal de tensión en las terminales [4].

Esta señal resultante se amplifica en el regulador. La constante T_A y la ganancia K_A , que están asociadas al regulador de tensión se indican incluyendo además los límites típicos “non-windup” los cuales están definidos por V_{RMIN} y V_{RMAX} de saturación o limitaciones suministradas del amplificador de potencia [4].

Se utiliza la salida del regulador de tensión V_R para controlar la excitatriz, que como se mencionó anteriormente puede ser de excitación independiente o auto excitada [4].

Para la representación de excitatrices con excitación independiente se usa un valor para $K_E = 1$ [2], [4].

Generalmente se utiliza una señal derivada de la tensión de campo con el fin de lograr estabilizar el sistema de excitación [2], [4].

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL

Este circuito controla el campo magnético de un alternador de automóvil como el que se observa en la figura 8, al cual se le ha extraído el regulador automático (figura 9) y además se ha retirado el puente rectificador trifásico (figura 10). De esta manera se logró convertir el alternador de automóvil en un pequeño generador síncrono estándar. El circuito consta de una excitatriz implementada por medio de un SEPIC y un controlador proporcional que se encarga de ajustar la tensión de salida trifásica a un nivel deseado.

En la figura 7 se muestra un diagrama de bloques simplificado del sistema de control de la excitatriz implementada.

Figura 7. Diagrama de bloques simplificado del sistema de control.

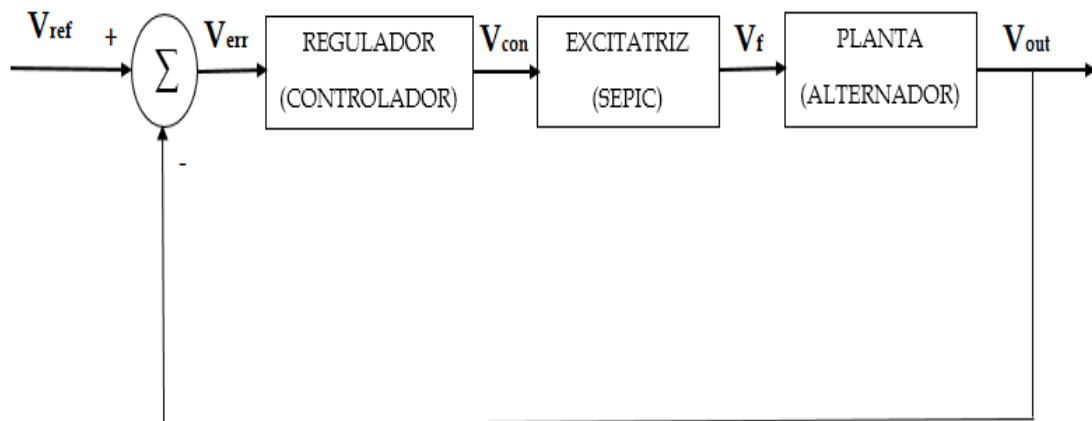
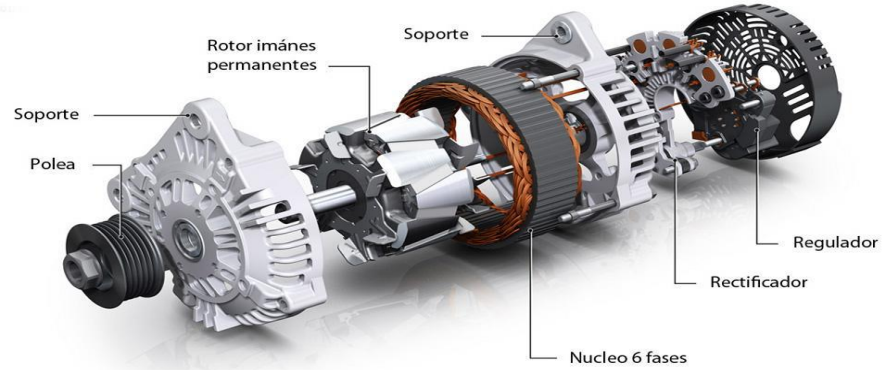


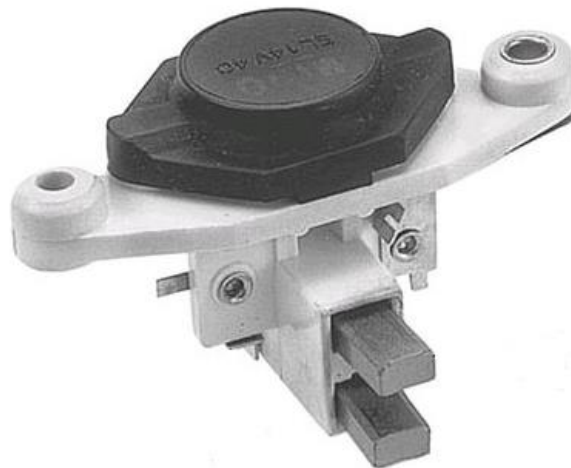
Figura 8. Alternador de automóvil junto a las partes que lo componen.

Alternador



Fuente [6]

Figura 9. Regulador de tensión de alternador.



Fuente [7]

Figura 10. Puente rectificador trifásico de onda completa utilizado en un alternador.



Fuente [8]

3.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEPIC

Este convertidor tiene dos condensadores, dos bobinas y dos interruptores, uno de ellos es un diodo y el otro un transistor. Por medio del ciclo de trabajo de un PWM se controla el nivel de tensión en la salida del convertidor. Se indicará el proceso efectuado para el diseño del circuito, es decir, el cálculo de cada uno de sus componentes. Los cálculos para el diseño del SEPIC fueron realizados por medio de las ecuaciones que se encuentran en el documento “Designing A SEPIC converter” [9].

3.1.1 Proceso de diseño del convertidor. Se indica el proceso realizado para el diseño del convertidor elevador-reductor SEPIC. El diseño se inició obteniendo los parámetros de tensión y corriente que maneja el campo (rotor) del alternador, estos fueron tomados de un catálogo de vehículos FORD [14].

En la figura 11 se observa el circuito del convertidor y los componentes que lo conforman.

Figura 11. Topología del SEPIC.

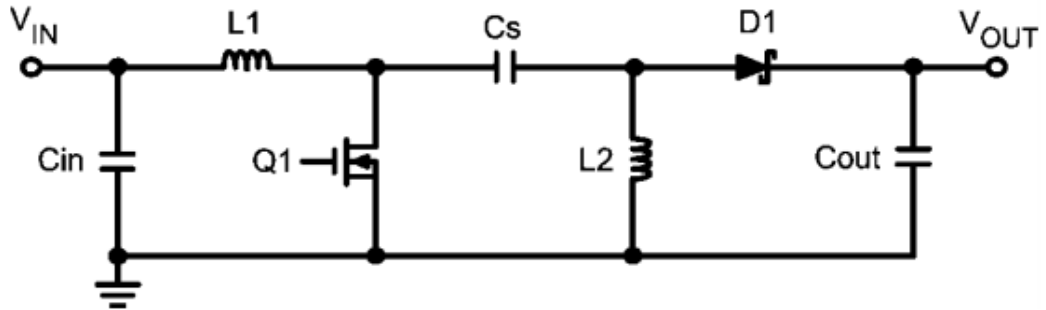


Tabla 1. Especificaciones de diseño del convertidor SEPIC

ESPECIFICACIONES		
Tensión de entrada (V_{in})	12	V
Tensión de salida (V_{out})min	0,01	V
Tensión de salida (V_{out})max	12	V
Corriente De Salida	3	A
Frecuencia Conmutación (f_{sw})	350-450	kHz

En la tabla 1 se presentan las especificaciones para el diseño de la excitatriz. Para este diseño se obtuvo un tiempo de establecimiento de 10 ms aproximadamente en la corriente entregada al campo del alternador. (Ver anexos).

Se inicia con el cálculo de los ciclos de trabajo mínimo y máximo donde el convertidor podrá operar, se tomara la tensión de caída del diodo (V_D) como 0.5 para fines del presente diseño, además se utilizó la frecuencia de 350 kHz en la cual los condensadores y bobinas tendrán valores más críticos [9]:

$$D_{max} = \frac{V_{out(max)} + VD}{V_{in} + V_{out(max)} + VD} = 0,5102 \quad (16)$$

$$D_{min} = \frac{V_{out(min)} + VD}{V_{in} + V_{out(min)} + VD} = 0,0407 \quad (17)$$

Se calcula el rizo de corriente de entrada del inductor L1, ver ecuación (18). Una buena regla para determinar este rizo es aproximarlos al 40% de la corriente máxima de entrada [9].

$$\Delta I_l = I_{out} * \frac{V_{out(max)} * (40\%)}{V_{in}} = 1,2 \text{ A} \quad (18)$$

Cálculo del valor de las inductancias L1 y L2 en la ecuación (19) [9]:

$$L1 = L2 = L = \frac{V_{in} * D_{max}}{\Delta I_l * f_{sw}} = 14,57E - 6 \text{ H} \quad (19)$$

Las bobinas utilizadas fueron de 22 μH (Valor comercial), su referencia es SER2900 [15].

Las correspondientes corrientes pico que soportan las bobinas calculadas anteriormente se hallan en las ecuaciones (20) y (21) así [9]:

$$I_{l1(peak)} = I_{out} * \left(\frac{V_{out(max)} + VD}{V_{in}} \right) \left(1 + \frac{40\%}{2} \right) = 3,75 \text{ A} \quad (20)$$

$$I_{l2(peak)} = I_{out} * \left(1 + \frac{40\%}{2} \right) = 3,6 \text{ A} \quad (21)$$

El diodo debe tener la capacidad de manejar la corriente máxima de salida y además ser de respuesta rápida [9]. Se utilizaron dos diodos Schottky de 3 A puestos en paralelo para garantizar un mayor manejo de corriente, su referencia es 1N5822 [21].

Se calcula ahora a capacidad máxima de soporte en Amperes del MOSFET junto con su valor RMS en las ecuaciones (22) y (23) [9].

$$IQ1(peak) = I11(peak) + I12(peak) = 7,35 \text{ A} \quad (22)$$

$$IQ1(rms) = Iout * \sqrt{\frac{(Vout(max)+Vin+VD)*(Vout(max)+VD)}{Vin^2}} = 4,375 \text{ A} \quad (23)$$

Ahora se halla en la ecuación (24) la potencia de disipación del MOSFET que es aproximadamente [9]:

$$PQ = IQ1^2(rms) * Rds(ON) * Dmax + (Vin + Vout(max))(IQ1(peak)) * \left(\frac{Qgd * fsw}{Ig}\right) \quad (24)$$

$$PQ = 0,6215 \text{ W}$$

Se usó para el circuito el MOSFET con referencia IRF2807 [16].

La selección del capacitor CS del SEPIC, depende de la corriente eficaz y se calcula en la ecuación (25) [9]:

$$Ics(rms) = Iout * \sqrt{\frac{Vout(out)+VD}{Vin}} = 3,0618 \text{ A} \quad (25)$$

La tensión pico a pico de rizado en el capacitor CS se calcula con la ecuación (26) [9]:

$$\Delta V_{CS} = \frac{Iout * Dmax}{Cs * fsw} = 2,18E-1 \text{ V}$$

(26)

En el presente diseño, la selección del capacitor de salida debe ser capaz de soportar la máxima corriente RMS, entonces la corriente RMS se indica en la ecuación (27) [9]:

$$I_{Cout(rms)} = I_{Cs(rms)} = 3,0618 \text{ A} \quad (27)$$

Se asume un rizado del 2% de la tensión de salida mínima, la resistencia equivalente en serie del capacitor se calcula ahora en la ecuación (28) [9]:

$$ESR \leq \frac{V_{out(min)} * 2\% * 0,5}{I_{l1(peak)} + I_{l2(peak)}} = 1,3591E-9 \ \Omega \quad (28)$$

El valor de la capacitancia mínima para el capacitor de salida está dado en la ecuación (29) [9]:

$$C_{out} \geq \frac{I_{out} * D_{max}}{V_{out(max)} * 2\% * 0,5 * f_{sw}} = 3,6442E-5 \text{ F} \quad (29)$$

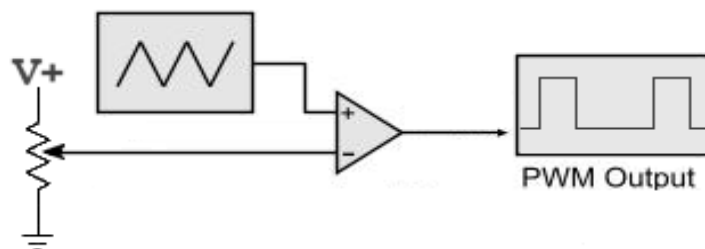
Los capacitores implementados fueron electrolíticos de 1000 μF a 25 V [17].

Y la corriente en el capacitor de entrada está dada por la ecuación (30) [9]:

$$I_{cin(rms)} = \frac{\Delta I}{\sqrt{12}} = 0,3464 \text{ A} \quad (30)$$

3.1.2 Construcción del pwm para conmutación del Mosfet. Mediante la implementación del comparador LM311 [11], se introduce la señal triangular y la de corriente continua, mediante las cuales se genera un PWM al cual se le controla su ciclo de trabajo por medio de la señal de continua. La estructura de este comparador se observa en la figura 12.

Figura 12. Configuración del comparador.

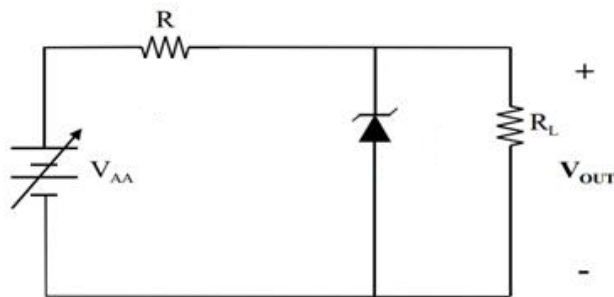


Fuente [10]

Con un generador de señales se proporciona la señal triangular o portadora, la cual limita con su tensión pico el rango de tensión en CD que controla el ciclo de trabajo del PWM, este rango simboliza el error del proceso de control en lazo cerrado.

Con un diodo Zener 1N4732A [13] de 4,7 V, se limita de igual forma el ciclo de trabajo máximo al cual opera el convertidor SEPIC. Este circuito se observa en la figura 13.

Figura 13. Configuración del circuito regulador Zener



Fuente [12]

Observando la figura 13 se tiene que:

$$V_{AA} = \text{Tension del error}$$

$$V_{out(max)} = 4,7 V$$

$$R = 1 k\Omega$$

$$R_L = 100 k\Omega$$

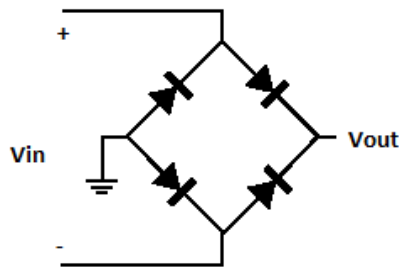
El correcto funcionamiento del SEPIC requiere de una señal de continua que tome valores desde cero hasta un valor máximo positivo determinado por el ciclo de trabajo máximo. Si la tensión de error llegase a ser negativa el convertidor pasaría

a trabajar en su ciclo de trabajo máximo lo que podría ocasionar daños en el campo del alternador debido a que la alimentación sería mayor a la tensión máxima de campo.

Las tensiones de error de control negativas se producen cuando la señal de salida de la planta es mayor que la señal de referencia, esto debido a que el error se obtiene de restar la tensión de salida a la señal de referencia.

Mediante un rectificador de onda completa cuya referencia es W005 [19] se convierte cualquier error negativo en positivo y de esta forma se permite que el generador no sufra daños en su devanado de campo el circuito del rectificador se observa en la figura 14.

Figura 14. Puente rectificador de onda completa

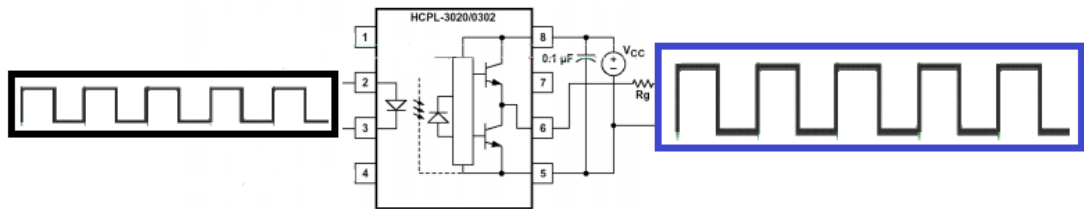


Al rectificador de onda completa se le ingresa la tensión error amplificada por la ganancia es decir la salida del controlador y este se encarga de convertir los valores negativos en positivos.

3.1.3 Etapa de potencia y aislamiento. Para el circuito SEPIC fue necesario añadir una etapa de aislamiento debido a que es un convertidor no aislado, además se debe garantizar que el PWM tenga la capacidad de hacer conmutar el

MOSFET. Para esto se utilizó un opto-aislador cuya referencia es HCPL3120 [18]. En la figura 15 se observa el esquema de la etapa de aislamiento la cual separa el circuito de control de la etapa de potencia que representa el MOSFET.

Figura 15. Esquema del opto-acoplador



Fuente [18]

Este componente tiene la función de aislar la etapa de control de la etapa de potencia. Al optoaislador le ingresa una señal PWM y este se encarga de sacar la misma señal amplificada en tensión y además con la capacidad en corriente para hacer conmutar el MOSFET, este opto-aislador maneja una corriente pico de 1 A. Este montaje se polarizó a 15 V y 0 V, la resistencia $R_g = 5 \Omega$ y además se añadieron dos diodos Zener opuestos de 18 V para limitar los picos de tensión por encima de este valor.

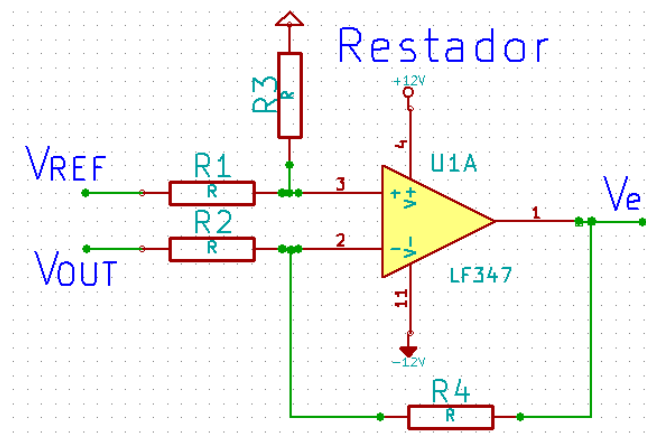
3.2 CONSTRUCCIÓN DEL CONTROLADOR

Se muestra el procedimiento para la construcción del controlador de la excitatriz que se llevó a cabo en el proyecto por medio de amplificadores operacionales llevando a cabo un proceso práctico de sintonización. El controlador es de naturaleza proporcional al cual ingresa la tensión en los terminales del generador

rectificada y además pasada por un divisor de tensión óhmico el cual fue diseñado para reducir estos niveles a valores más manejables disminuyendo en una escala aproximada de 10 V a 1 V. Esta señal se resta a una señal de referencia o de control la cual representa el nivel deseado en la salida trifásica de la máquina.

3.2.1 Construcción del restador. Se construyó un restador para obtener el error entre la tensión de referencia y la tensión de salida en C.C en las terminales del alternador. El procedimiento se llevó a cabo por medio de un amplificador operacional LF347 [20] con la configuración mostrada en la figura 16:

Figura 16. Amplificador Restador de la tensión con ganancia unitaria.



En la figura 16 V_+ y V_- son de $+12V$ y $-12V$ respectivamente límites suficientes para ajustar el rango de variación de control del controlador proporcional de acuerdo a la hoja de datos del amplificador operacional [20]. Además de esto se configuraron R_1 , R_2 , R_3 Y R_4 con iguales valores de $1\text{ k}\Omega$ para obtener una ganancia unitaria en el restador que no afecte el valor del error.

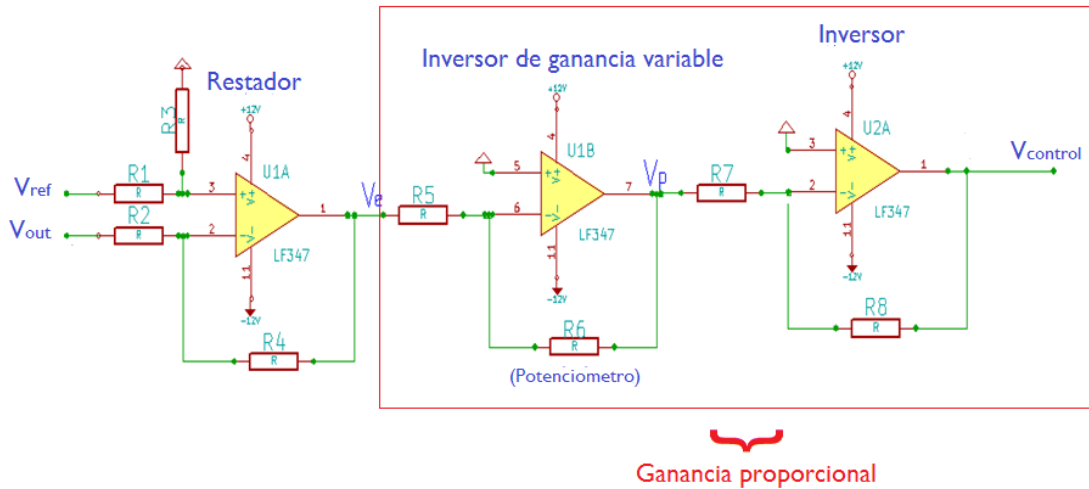
Se registraron errores de control máximos de aproximadamente -4 V y 4 V , entonces para alimentar el SEPIC (excitatriz) en la etapa del comparador que controla el ciclo de trabajo se limitó el valor de continua máximo por medio de un zener y el valor mínimo por medio de un puente rectificador que convierte los errores negativos en positivos como se mencionó anteriormente. Así se consiguió un correcto funcionamiento del SEPIC (excitatriz). Seguido se obtuvo el valor de la ganancia proporcional adecuada para el sistema.

3.2.2 Contrucción del controlador. Se implementó un control proporcional con ganancia variable de 1 hasta 100. Posteriormente por medio de pruebas prácticas en un banco del laboratorio de máquinas se ajustó la ganancia en un valor determinado.

Para la construcción del proporcional se utilizaron dos etapas en cascada de un amplificador operacional inversor, esto con la finalidad de obtener un proporcional no inversor y con ganancia de fácil ajuste. Para esto se utilizó el LF347 .

Luego de hacer el montaje del control proporcional con estos elementos, se procedió a hacer la prueba en lazo cerrado iniciando todo con una ganancia de 1 y variándola poco a poco hasta tener un buen comportamiento del control del sistema y una rápida respuesta. El valor de ganancia se ajustó en $K_p=20,8$. En la Figura 17 se observa un esquema del controlador implementado.

Figura 17. Controlador Proporcional implementado



En este circuito los bloques del restador y proporcional se implementaron por medio del circuito integrado LF347 como se mencionó anteriormente ya que presenta buenas características para funciones de control. Este amplificador cuenta con un bajo offset de salida debido a su entrada FET lo que evitó problemas que se pudieran presentar en los amplificadores con el sistema operando en estado estable.

La constante de control está dada por la ecuación (31) que se ajusta con los elementos pasivos:

$$K_p = \frac{R6}{R5} \quad (31)$$

La función de transferencia del controlador proporcional está dada por la ecuación (32):

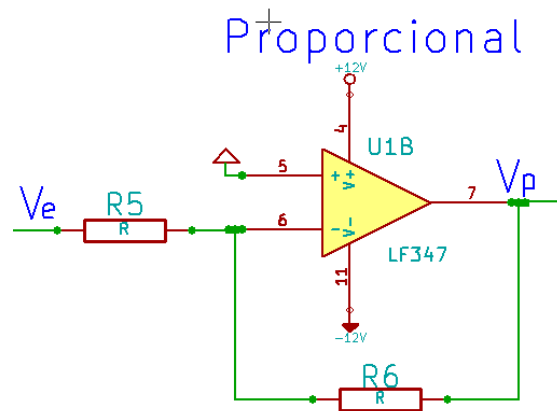
$$K_p(s) = K_p \quad (32)$$

La construcción del circuito del controlador proporcional (P) cuenta con el siguiente procedimiento: tiene dos etapas de amplificadores operacionales, en las cuales cada una tiene una función en el controlador proporcional:

Etapa 1: Acción Proporcional

La acción proporcional se representa por el amplificador operacional U1B que tiene una configuración de amplificador inversor, donde la ganancia está dada por las resistencias $R6=100\text{ k}\Omega$ (variable) y $R5=1\text{ k}\Omega$. Se observa la configuración en la Figura 18.

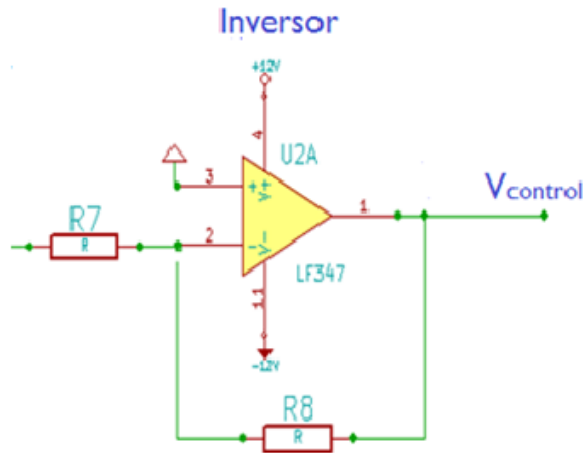
Figura 18. Bloque de acción proporcional



Etapa 2: Inversor

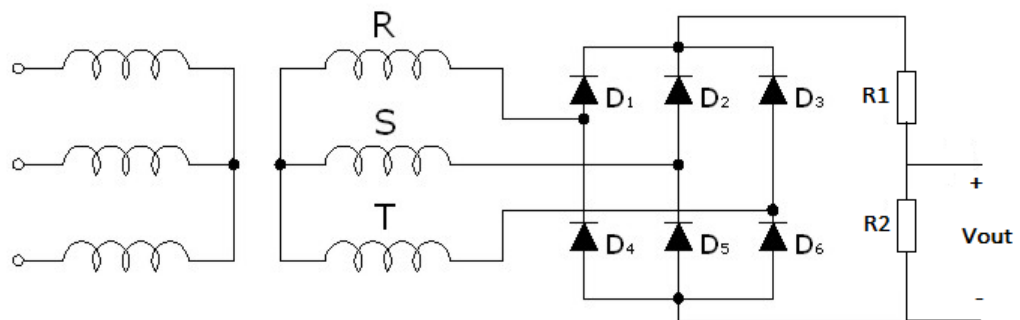
Esta etapa del amplificador inversor la representa el amplificador operacional U2A. Cuenta con las resistencias $R7$ y $R8$ las cuales tienen valores de $1\text{ k}\Omega$ para no agregar ninguna ganancia a la señal de entrada V_p proveniente del proporcional. Además, este circuito permite la inversión de la polaridad proveniente del amplificador inversor (Proporcional). Este circuito se observa en la figura 19.

Figura 19. Bloque del amplificador inversor de tensiones.



3.2.3 Acondicionamiento de la señal de salida del alternador. Como no es posible utilizar la tensión trifásica del alternador para el sistema de control, esta fue rectificadada por medio de un puente trifásico de diodos y posteriormente dividida con un divisor de tensión, esto con el fin de tener una señal de salida con un valor pequeño y en DC para efectos de control. El esquema de este circuito se muestra en la figura 20.

Figura 20. Esquema del rectificador junto al divisor de tensión

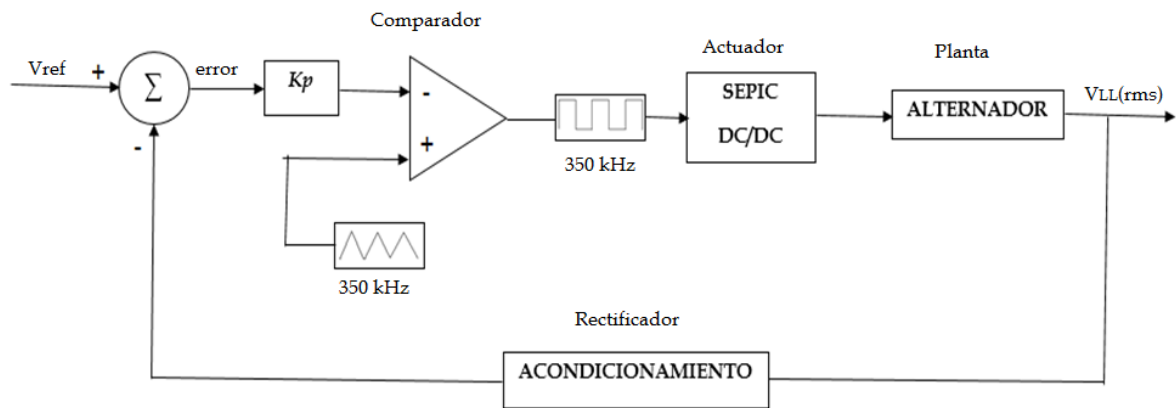


La tensión promedio en DC a la salida de un rectificador trifásico es aproximadamente 1,35 veces la tensión RMS línea a línea, entonces, con el divisor de tensión se buscó eliminar esta proporción de 1,35 y a la vez dividir en 10 la tensión línea a línea RMS para conseguir una señal de control lo más próxima posible a la relación 10 a 1 entre la tensión de línea RMS y la tensión en DC rectificada y así poder manejar niveles de control tipo señal que no afectarán los límites de funcionamiento de los amplificadores operacionales.

Se logró encontrar los valores comerciales de resistencias $R1=15\text{ k}\Omega$ y $R2=1,2\text{ k}\Omega$ que cumplieran con este requerimiento.

En la figura 21 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control de la excitatriz implementado en este proyecto.

Figura 21. Diagrama de bloques del sistema de control de la excitatriz implementado.



4. OBTENCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO

Se describen las pruebas realizadas al alternador funcionando de manera conjunta con la excitatriz (SEPIC) y el sistema de control (Proporcional) en lazo cerrado.

Se realizaron tres pruebas fundamentales para cualquier máquina síncrona las cuales son la medición de la resistencia de armadura, la prueba de vacío y la prueba de corto circuito. Mediante estas pruebas se obtuvieron las curvas características de la máquina y el valor de la resistencia de armadura. CCC (Característica de corto circuito) y CCA (Característica de saturación a corto circuito) [5]. Además se realizaron las pruebas de característica externa y de respuesta al escalón.

4.1 PRUEBA DE RESISTENCIA DE ARMADURA

Conociendo inicialmente la conexión de los devanados de armadura, la cual es en estrella, se utilizó un óhmetro para medir la resistencia entre dos de las terminales, la cual es el valor de la resistencia de dos de las fases del devanado de armadura en estrella puestas en serie. Entonces, la resistencia de armadura por fase es la mitad del valor obtenido.

Se realizó una serie de mediciones y de estas se obtuvo el promedio los datos se observan en las ecuaciones (33) y (34):

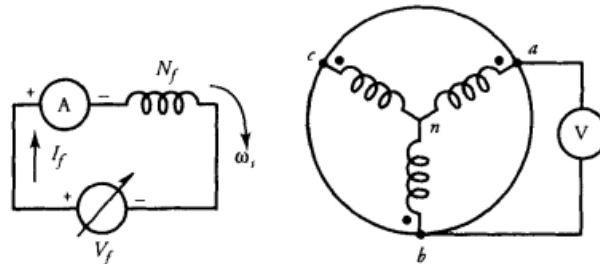
$$R_a (\text{linea-linea}) = 0,995 \Omega \quad (33)$$

$$R_a = \frac{R_a (\text{linea-linea})}{2} = 0,4975 \Omega \quad (34)$$

4.2 PRUEBA DE VACIO

Esta prueba se realizó a velocidad nominal de 6000 rpm [22] dejando el devanado de armadura abierto. Se varió el nivel de tensión de referencia en el sistema de control de la excitatriz registrando paulatinamente la corriente en el campo y variando esta desde 0 A hasta 2,4 A y registrando la tensión obtenida en las terminales. En la figura 22 se puede observar el montaje para el desarrollo de esta prueba.

Figura 22. Montaje realizado para la prueba de vacío.



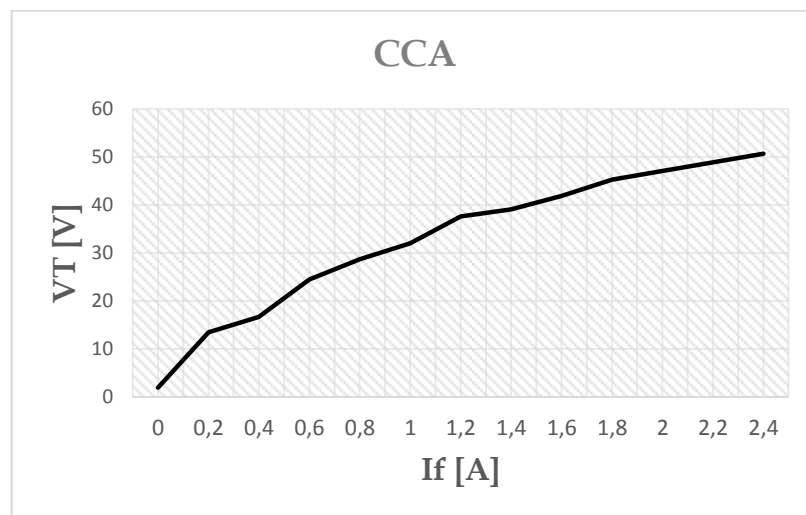
Se obtuvieron los siguientes datos registrados en la tabla 2:

Tabla 2. Resultados tabulados de la prueba de vacío.

If [A]	VT [V]
0	1,941
0,2	13,5
0,4	16,7
0,6	24,5
0,8	28,7
1	32
1,2	37,6
1,4	39,1
1,6	41,9
1,8	45,3
2	47,1
2,2	48,9
2,4	50,7

En la figura 23 se observa la curva característica de vacío para el alternador.

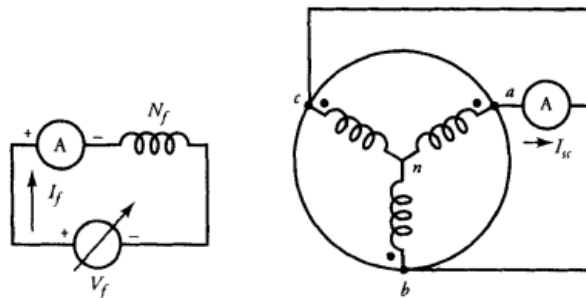
Figura 23. Curva característica de vacío de la máquina síncrona.



4.3 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO

Esta prueba se realizó de igual manera a la velocidad nominal de 6000 rpm, cortocircuitando los tres devanados de armadura y se efectuó con el sistema de control de la excitatriz en lazo abierto, consiguiendo hacer pasar aproximadamente 10 A por fase. Se registró la corriente de corto circuito colocando un ampermetro en una de las fases y a su vez se midió la corriente de campo con un miliampermetro. En la figura 24 se observa el montaje realizado para esta prueba.

Figura 24. Montaje realizado para la prueba de cortocircuito.



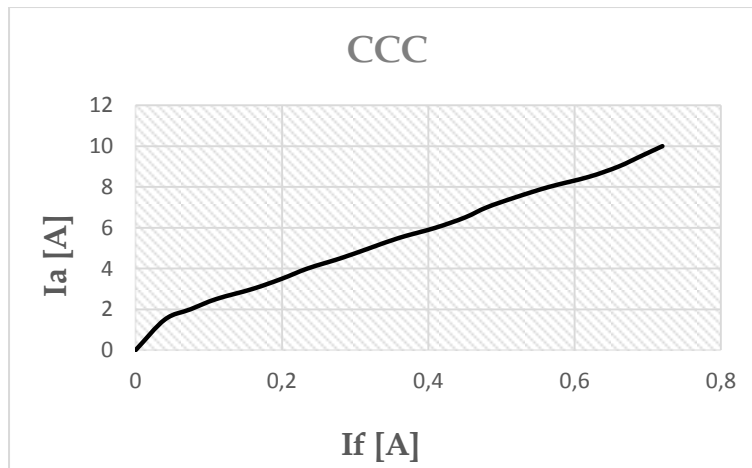
Se obtuvieron los siguientes datos registrados en la tabla 3:

Tabla 3. Resultados tabulados de la prueba de corto circuito.

If [A]	Ia [A]
0	0
0,04	1,5
0,075	2
0,11	2,5
0,16	3
0,2	3,5
0,235	4
0,28	4,5
0,32	5
0,36	5,5
0,41	6
0,45	6,5
0,48	7
0,52	7,5
0,565	8
0,62	8,5
0,66	9
0,69	9,5
0,72	10

En la figura 25 se observa la curva característica de corto circuito para el alternador.

Figura 25. Curva de corto circuito de la máquina síncrona.



4.4 PRUEBA DE CARACTERÍSTICA EXTERNA

Esta prueba muestra el comportamiento de la tensión en los terminales de la máquina con respecto a una variación en la carga. Se realizó ajustando la tensión en los bornes del devanado del estator a un valor fijo o de referencia, paso seguido se agregó carga resistiva aumentando progresivamente la corriente de armadura y registrando los valores que tomó la tensión en los terminales de la máquina.

La prueba fue realizada únicamente con carga resistiva debido a no contar con la disponibilidad suficiente de cargas capacitivas e inductivas en el laboratorio, además, se realizó de dos maneras, la primera con el circuito de control alimentando el campo y la segunda alimentando el campo por medio de una fuente de corriente continua.

4.4.1 Característica externa de la máquina con el circuito de control. Se realizó la prueba con carga resistiva y con el sistema de control implementado funcionando.

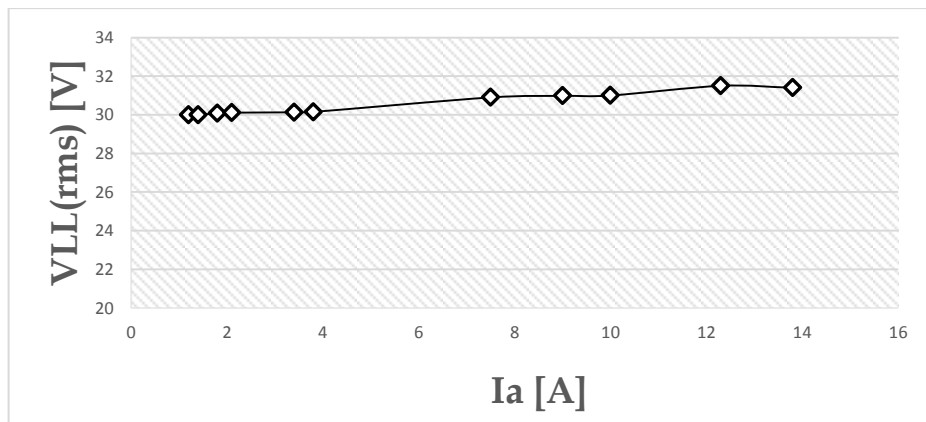
Se obtuvieron los siguientes resultados tabulados en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados tabulados de la prueba de característica externa funcionando con el sistema de control.

Control	
Ia [A]	VLL(rms) [V]
1,2	30
1,4	30
1,8	30,08
2,1	30,11
3,4	30,13
3,8	30,15
7,5	30,9
9	30,98
10	31
12,3	31,5
13,8	31,4

En la figura 26 se observa la curva de característica obtenida con el sistema de control funcionando.

Figura 26. Curva de característica externa registrada con el sistema de control implementado



4.4.2 Característica externa de la máquina sin el sistema de control. Se realizó la prueba con carga resistiva y sin el sistema de control, alimentando el campo con una fuente de continua.

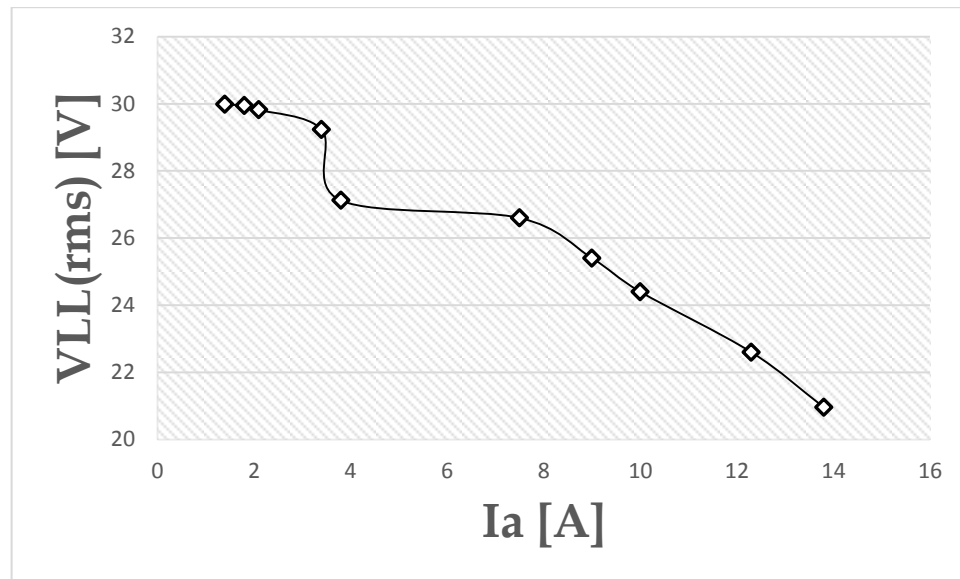
Se obtuvieron los siguientes resultados tabulados en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados tabulados de la prueba de característica externa funcionando sin el sistema de control.

No Control	
la	VLL(rms)
1,2	30,03
1,4	29,98
1,8	29,94
2,1	29,82
3,4	29,23
3,8	27,12
7,5	26,6
9	25,4
10	24,4
12,3	22,6
13,8	20,96

En la figura 27 se observa la curva de característica obtenida alimentando el campo del alternador con una fuente de DC.

Figura 27. Curva de característica externa registrada con el sistema de control implementado



4.5 RESPUESTA AL ESCALON

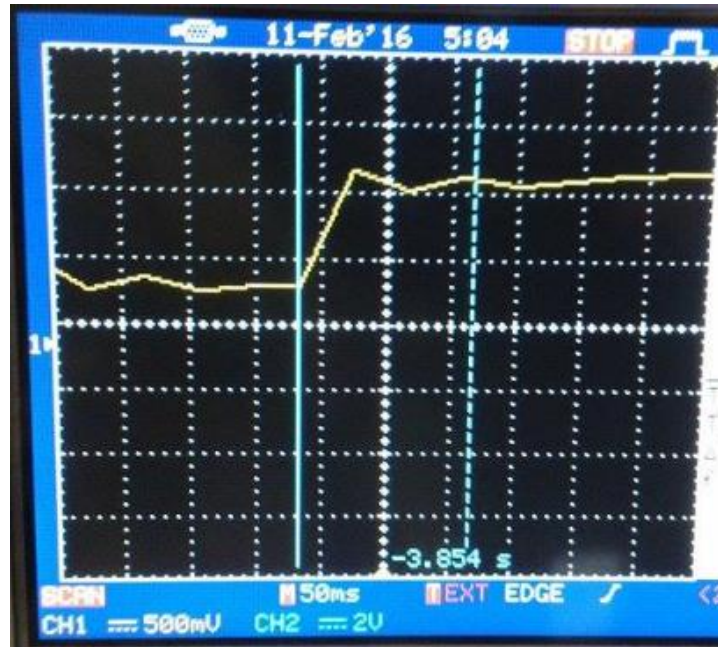
Se realizó la prueba de respuesta al escalón ingresando al sistema una entrada súbita o entrada escalón y registrando por medio de un osciloscopio la respuesta transitoria del sistema. Esta prueba busca estimar el tiempo de establecimiento. Por medio de un puente rectificador trifásico y alimentando una carga se procedió a registrar la tensión de salida y su comportamiento.

Esta prueba nos da una idea aproximada ya que lo ideal sería registrar el valor RMS de la tensión trifásica de salida y no se cuenta con el instrumento adecuado para hacer este registro.

El tiempo de establecimiento T_s obtenido fue de aproximadamente 137ms.

Se puede observar la respuesta al escalón en la figura 28.

Figura 28. Curva de respuesta a la entrada escalón.



5. CONCLUSIONES

- Se consiguió implementar un modelo de control para una máquina síncrona estudiando el funcionamiento del modelo IEEE tipo DC1A y tomando como base algunas de las principales etapas del mismo.
- El control proporcional ajusta la salida a un valor de referencia y mantiene este nivel frente a pequeñas perturbaciones en la carga y en el SP, entonces para probar la estabilidad de este circuito se debe ajustar el nivel de referencia con carga y realizar pequeñas variaciones en la misma.
- El sistema de control responde de manera adecuada y es estable ante pequeñas perturbaciones en la velocidad y ante perturbaciones en la carga, mantiene el nivel de tensión trifásica con un rango aproximado del 5%, se debe tener en cuenta la regulación de tensión de la máquina y el tipo de carga a alimentar ya que esto influye en su tensión de salida.
- En los sistemas de control de la excitatriz para grandes máquinas de potencia es necesario contar con circuitos de protección de varios tipos. En este sistema con fines académicos las protecciones utilizadas fueron solo de corto circuito por medio de fusibles.
- Este pequeño sistema de control podría utilizarse a su vez para acoplarse a una máquina de mayor potencia y así conseguir manejar potencias mayores teniendo en cuenta los requerimientos de protección necesarios en la máquina síncrona, esta hipótesis se deja como una idea para trabajos futuros.
- En este proyecto se aplicaron en forma práctica y directa conceptos estudiados a lo largo de la carrera. Se aprendió más sobre la electrónica de potencia y el funcionamiento de los convertidores DC-DC así como de la máquina síncrona y sus sistemas de control de la excitatriz.
- A diferencia de los sistemas de control de la excitatriz para grandes generadores síncronos, en este sistema se suprimieron las etapas del

transductor y compensador de carga y el estabilizador del sistema de potencia debido a que el alternador es una máquina síncrona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control. The EPRI Power system engineering series, McGraw Hill 1994, New York, NY, USA.

[2] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Power Engineering Society. Energy Development and Power Generation Committee. IEEE Std 421.5-2005, IEEE, Nueva York, N. Y., USA.

[3] IEEE Committee Report (1981). "IEEE Excitation System Models for Power System Stability Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981, IEEE, Nueva York, N. Y., USA.

[4] Sintonización del regulador Bandler Decs. [Online]. Disponible en internet: <<http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5698/SINTONIZACION.pdf?sequence=1>>

[5] Bhag S. Guru, Hüseyin R. Hiziroğlu. Maquinas Eléctricas y Transformadores.

[6]. Averías del alternador. [Online]. Disponible en internet: <<http://www.rodes.com/mecanica/alternador-del-coche-que-es-y-averias-frecuentes/>>

[7]. Regulador de tensión del alternador de automóvil. [Online]. Disponible en internet: <http://www.automotive.com.mx/content/site/module/catalogo/op/producto/producto_id/4752/format/html/>

- [8]. Puente rectificador trifásico. [Online]. Disponible en internet:
<<http://www.garef.net/showcat1.php?Bcat=2&Bsubcat=1&Bprod=4>>
- [9]. Designing A SEPIC converter. [Online] Disponible en internet:
<<http://www.mikrocontroller.net/attachment/82372/SEPIC.pdf>>
- [10]. PWM por comparación.[Online]. Disponible en internet:
<<https://hackaday.io/project/4689-improve-the-haber-process/log/19194-using-the-uc3525-pulse-width-modulator>>
- [11]. Datasheet LM311. [Online] Disponible en internet:
<<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM311.pdf>>
- [12].Resumen Diodo Zener. [Online]. Disponible en internet:
<<http://www.monografias.com/trabajos96/diodo-zener-resumen/diodo-zener-resumen.shtml>>
- [13]. Datasheet diodo Zener 1N4732A. [Online]. Disponible en internet:
<<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/85816.pdf>>
- [14]. Ford. Manual de taller para camiones Vol 1B 1977
- [15]. Datasheet Inductores. [Online] Disponible en internet:
<<http://www.coilcraft.com/pdfs/ser2900.pdf> >
- [16]. Datasheet MOSFET IRF2807. [Online] Disponible en internet:
<<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf2807pbf.pdf>>
- [17]. Datasheet Capacitores electrolíticos. [Online] Disponible en internet:
<<http://5hertz.com/pdfs/04102.pdf>(Capacitor electrolítico)>

[18]. Datasheet Opto-acoplador HCPL 3120. [Online] Disponible en internet:
<<http://www.avagotech.com/docs/AV02-0161EN>>

[19]. Puente rectificador monofásico W005. [Online]. Disponible en internet:
<<http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheet/good-ark/W10M.pdf>>

[20]. Datasheet Amplificador operacional LF347. [Online]. Disponible en internet:
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf147.pdf>>

[21]. Datasheet Diodos 1N5822. [Online] Disponible en internet:
<<http://www.farnell.com/datasheets/107972.pdf>>

[22]. Tena Sánchez José Guillermo. Sistemas de carga y arranque.

BIBLIOGRAFÍA

Averías del alternador. [Online]. Disponible en internet: <<http://www.rodes.com/mecanica/alternador-del-coche-que-es-y-averias-frecuentes/>>

Bhag S. Guru, Hüseyin R. Hiziroğlu. Maquinas Eléctricas y Transformadores.

Datasheet Amplificador operacional LF347. [Online]. Disponible en internet: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf147.pdf>>

Datasheet Capacitores electrolíticos. [Online] Disponible en internet: <<http://5hertz.com/pdfs/04102.pdf>(Capacitor electrolítico)>

Datasheet diodo Zener 1N4732A. [Online]. Disponible en internet: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/85816.pdf>>

Datasheet Diodos 1N5822. [Online] Disponible en internet: <<http://www.farnell.com/datasheets/107972.pdf>>

Datasheet Inductores. [Online] Disponible en internet: <<http://www.coilcraft.com/pdfs/ser2900.pdf> >

Datasheet LM311. [Online] Disponible en internet: <<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM311.pdf>>

Datasheet MOSFET IRF2807. [Online] Disponible en internet: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf2807pbf.pdf>>

Datasheet Opto-acoplador HCPL 3120. [Online] Disponible en internet:
<<http://www.avagotech.com/docs/AV02-0161EN>>

Designing A SEPIC converter. [Online] Disponible en internet:
<<http://www.mikrocontroller.net/attachment/82372/SEPIC.pdf>>

Ford. Manual de taller para camiones Vol 1B 1977

IEEE Committee Report (1981). "IEEE Excitation System Models for Power System Stability Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981, IEEE, Nueva York, N. Y., USA.

IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Power Engineering Society. Energy Development and Power Generation Committee. IEEE Std 421.5-2005, IEEE, Nueva York, N. Y., USA.

P. Kundur, Power System Stability and Control. The EPRI Power system engineering series, McGraw Hill 1994, New York, NY, USA.

Puente rectificador monofásico W005. [Online]. Disponible en internet:
<<http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheet/good-ark/W10M.pdf>>

Puente rectificador trifásico. [Online]. Disponible en internet:
<<http://www.garef.net/showcat1.php?Bcat=2&Bsubcat=1&Bprod=4>>

PWM por comparación.[Online]. Disponible en internet:
<<https://hackaday.io/project/4689-improve-the-haber-process/log/19194-using-the-uc3525-pulse-width-modulator>>

Regulador de tensión del alternador de automóvil. [Online]. Disponible en internet: <http://www.automotive.com.mx/content/site/module/catalogo/op/producto/producto_id/4752/format/html/>

Resumen Diodo Zener. [Online]. Disponible en internet: <<http://www.monografias.com/trabajos96/diodo-zener-resumen/diodo-zener-resumen.shtml>>

Sintonización del regulador Bandler Decs. [Online]. Disponible en internet: <<http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5698/SINTONIZACION.pdf?sequence=1>>

Tena Sánchez José Guillermo. Sistemas de carga y arranque.

ANEXOS

ANEXO A. Simulación del diseño del convertidor DC-DC (SEPIC)

Se analiza el comportamiento del convertidor DC-DC para su ciclo de trabajo mínimo y máximo para las frecuencias de 350 kHz y 450 kHz, observando las corrientes en las bobinas y la tensión en la salida, con el cuidado de que opere en modo continuo, es decir las corrientes en las bobinas L1 Y L2 y no sean menores que cero.

El circuito cuenta con los siguientes parámetros:

$$C_{in}=22 \mu F$$

Todos los capacitores tienen una resistencia serie aproximada de $0,01 \Omega$.

$$L1=L2=22 \mu H$$

Las bobinas tienen una resistencia serie aproximada de $0,0256 \Omega$.

El MOSFET tiene una resistencia $R_{DS(ON)}= 0,013 \Omega$ y una tensión del diodo interno de 1,2V.

La resistencia de campo y la inductancia de campo en el rotor del alternador fueron obtenidas por medio de instrumentos de medida y sus valores son:

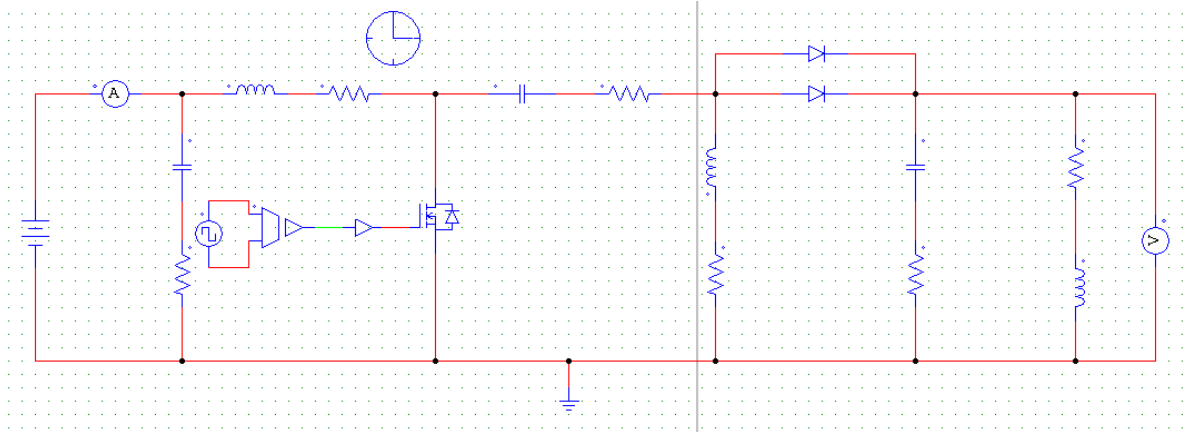
$$R_f \approx 4 \Omega$$

$$L_f \approx 9,224 \text{ mH}$$

Los diodos en paralelo cuentan con las mismas características y fueron puestos de esa manera para aumentar la capacidad de corriente del convertidor.

La caída en los diodos es de $0,525 \text{ V}$.

Figura A1. Circuito del convertidor SEPIC.



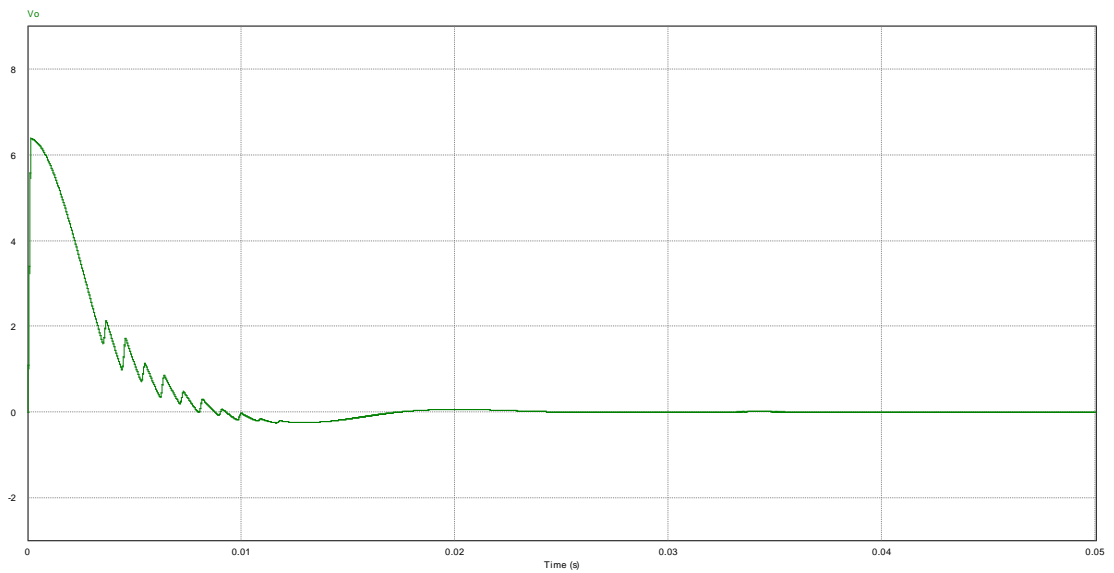
Frecuencia: 350 kHz

Ciclo de trabajo al mínimo

$D=0,01$

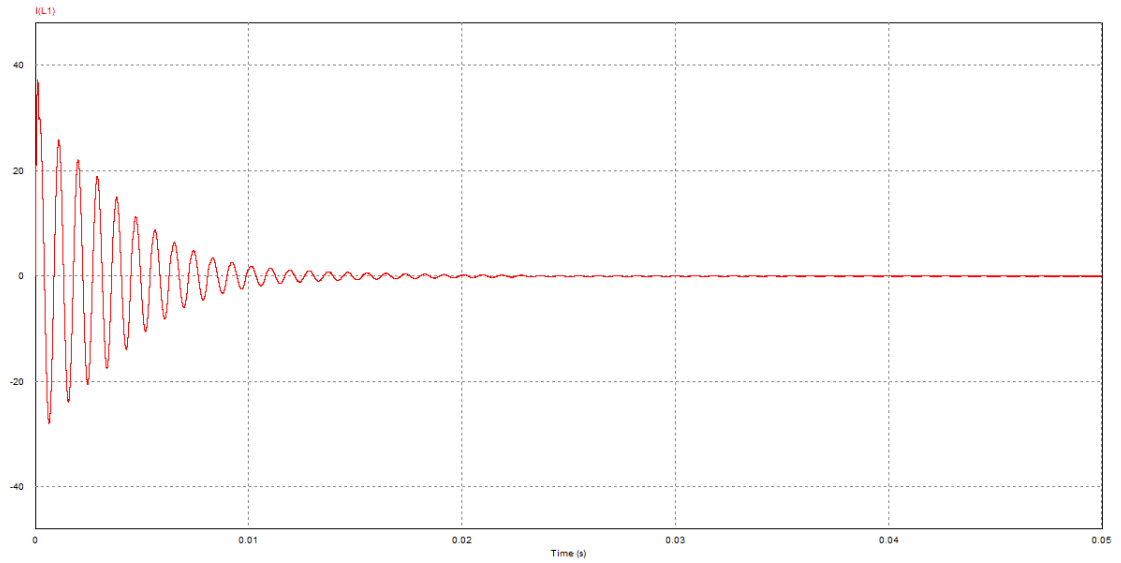
Tensión de salida

Figura A2. Tensión de salida para el ciclo de trabajo mínimo a una frecuencia de 350 kHz.



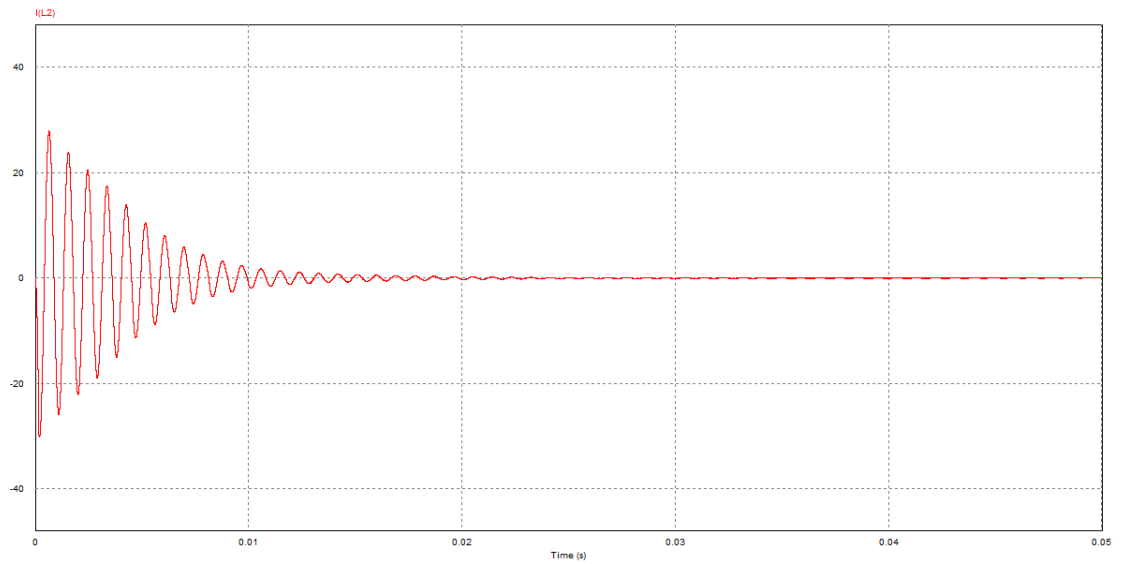
Corriente de L1

Figura A3. Corriente en la bobina 1 para el ciclo de trabajo mínimo a una frecuencia de 350 kHz.



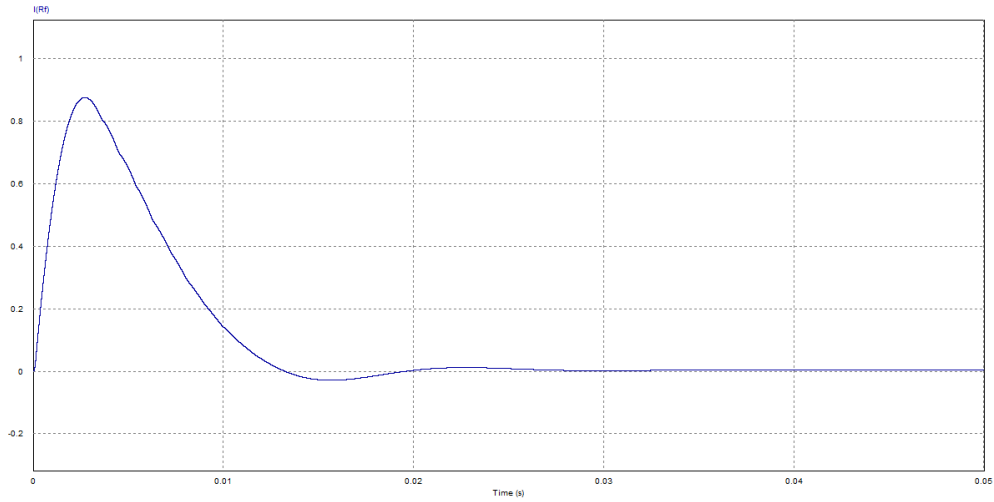
Corriente de L2

Figura A4. Corriente en la bobina 2 para el ciclo de trabajo mínimo a una frecuencia de 350 kHz.



Corriente de salida

Figura A5. Corriente de salida para el ciclo de trabajo mínimo a una frecuencia de 350 kHz.

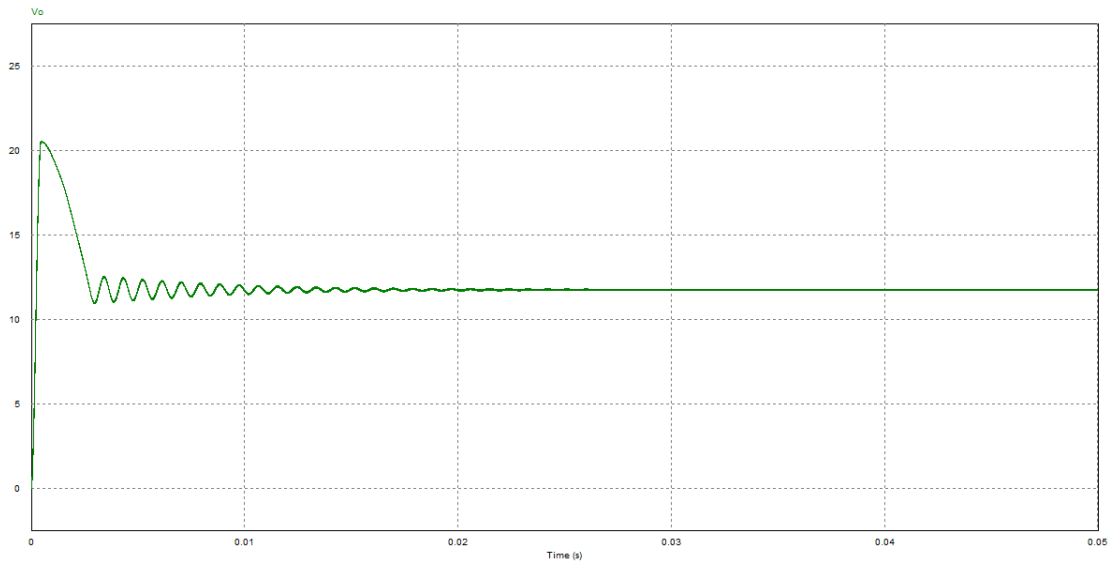


Ciclo de trabajo al máximo

$D=0,51$

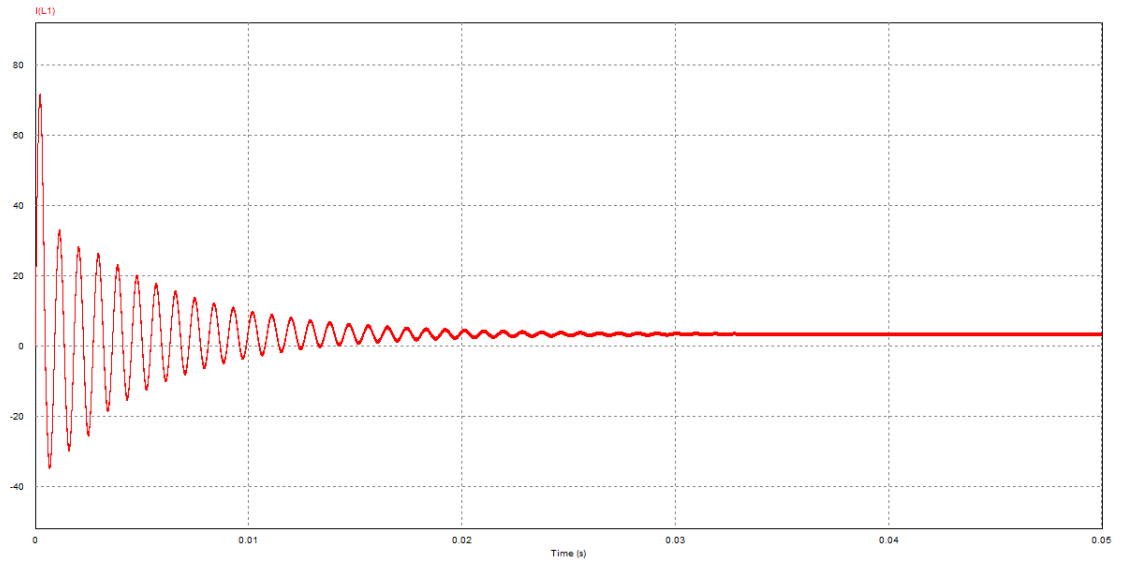
Tensión de salida

Figura A6. Tensión de salida para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 350 kHz.



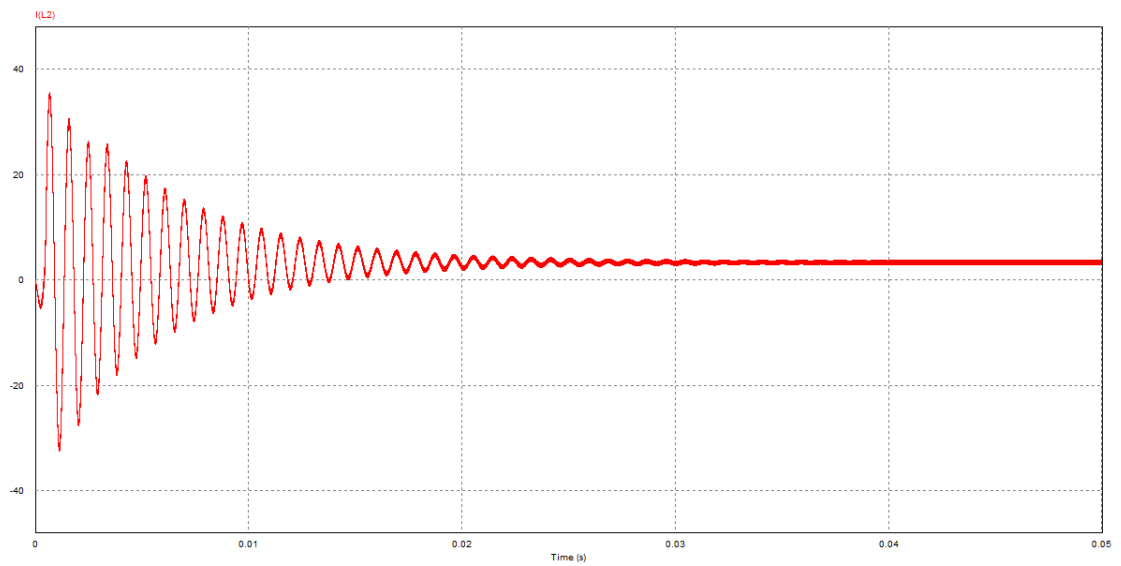
Corriente de L1

Figura A7. Corriente en la bobina 1 para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 350 kHz.



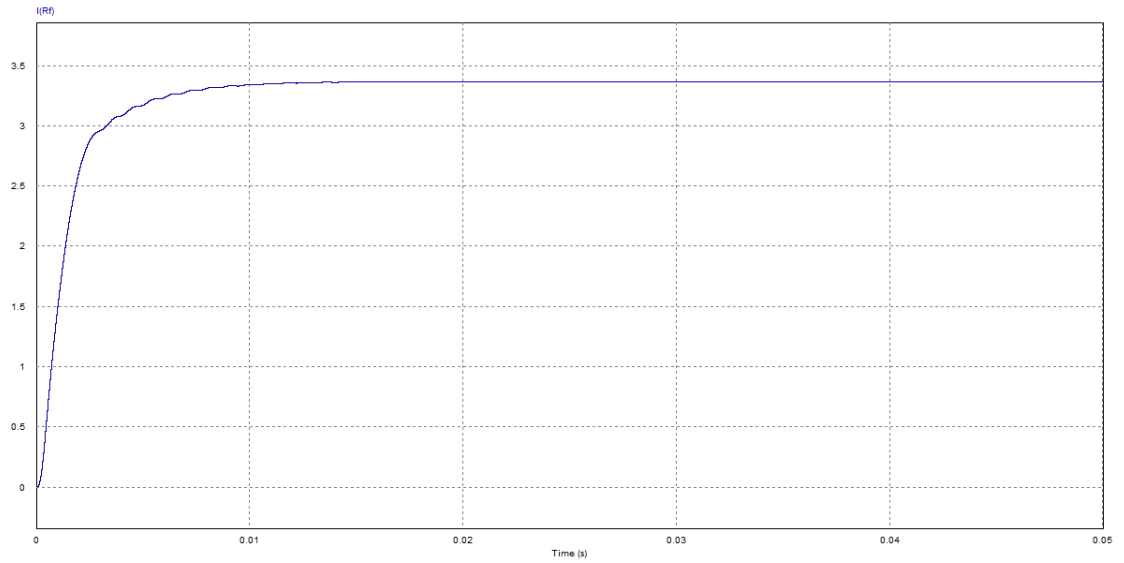
Corriente de L2

Figura A8. Corriente en la bobina 2 para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 350 kHz.



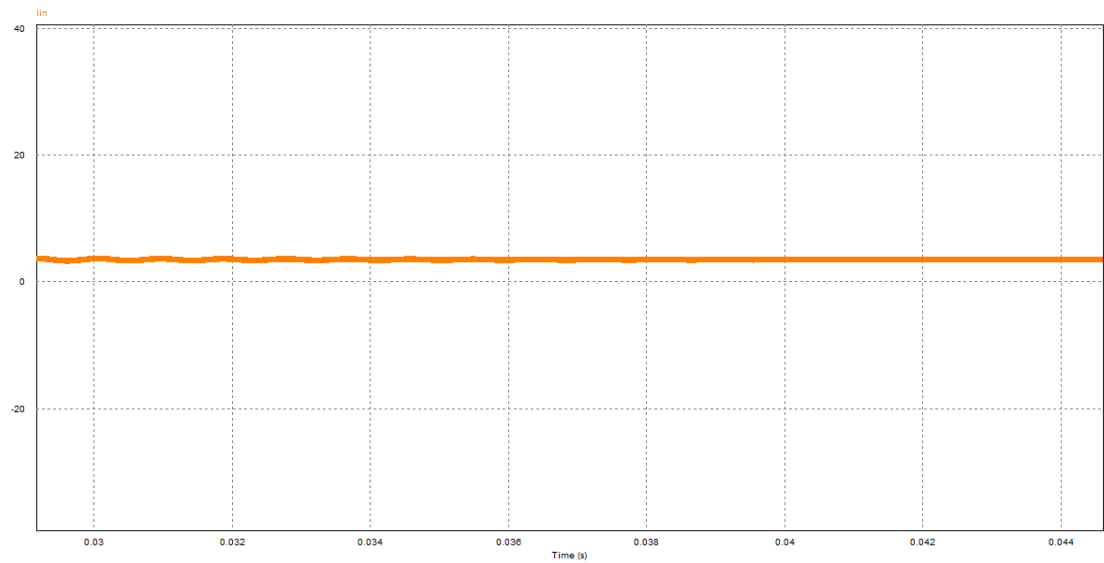
Corriente de salida

Figura A9. Corriente de salida para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 350 kHz.



Corriente de entrada en estado estable

Figura A10. Corriente de entrada en estado estable a una frecuencia de 350 kHz.



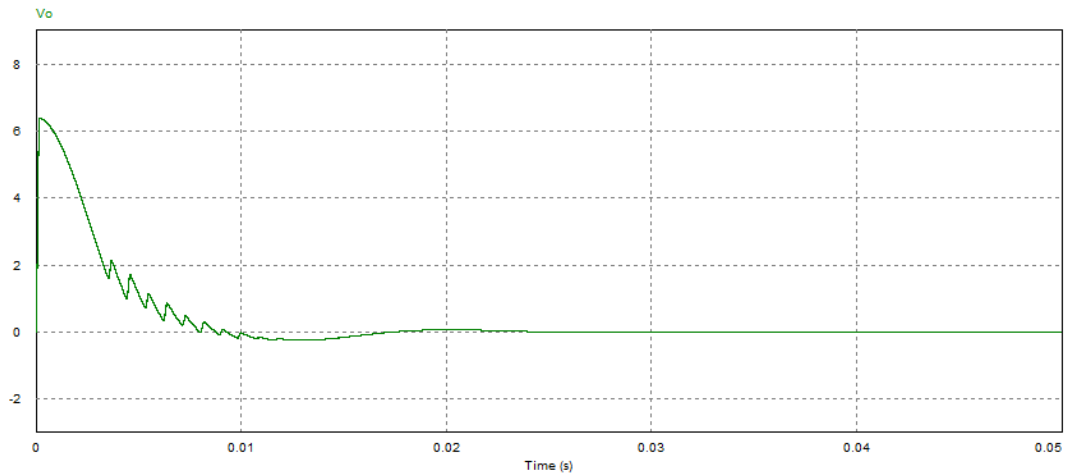
Frecuencia: 450 kHz

Ciclo de trabajo al mínimo

$D=0,01$

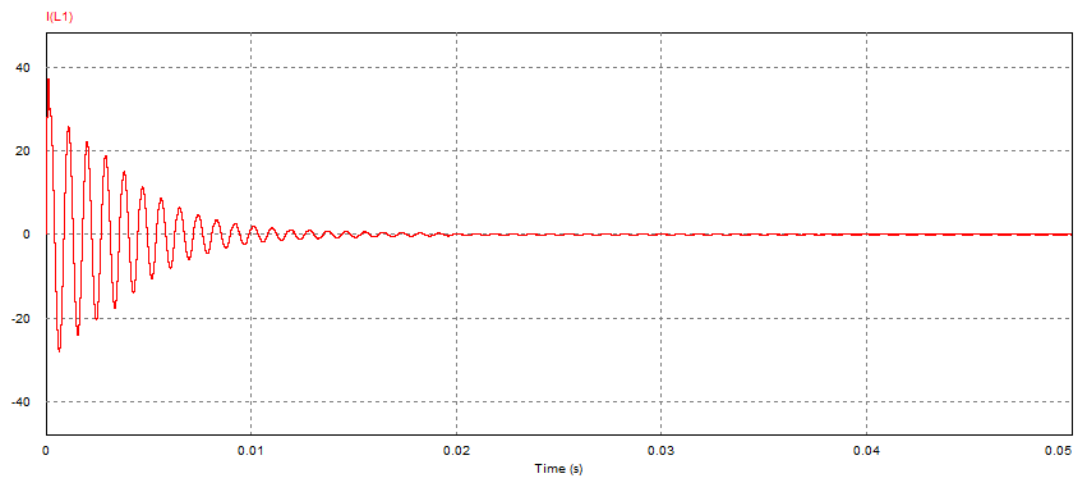
Tensión de salida

Figura A11. Tensión de salida para el ciclo de trabajo mínimo a una frecuencia de 450 kHz.



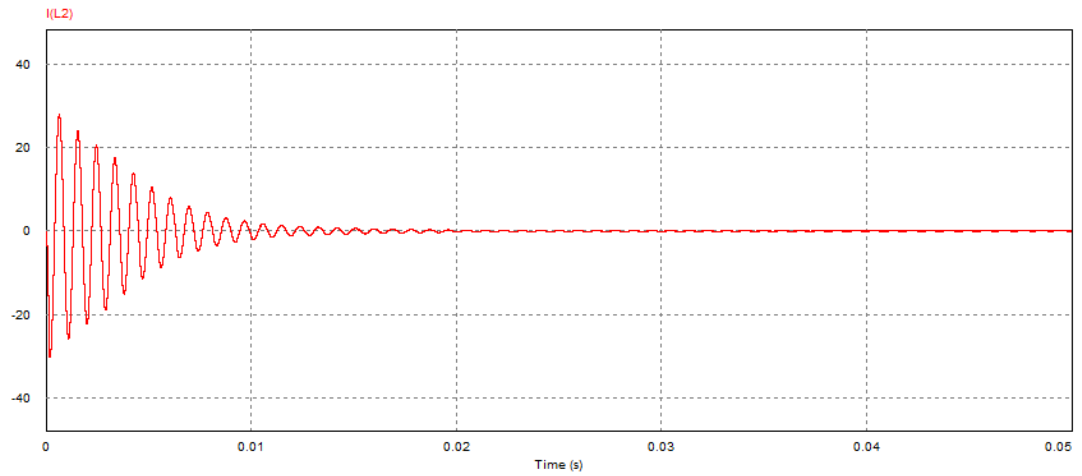
Corriente de L1

Figura A12. Corriente en la bobina L1 para el ciclo de trabajo mínimo a una frecuencia de 450 kHz.



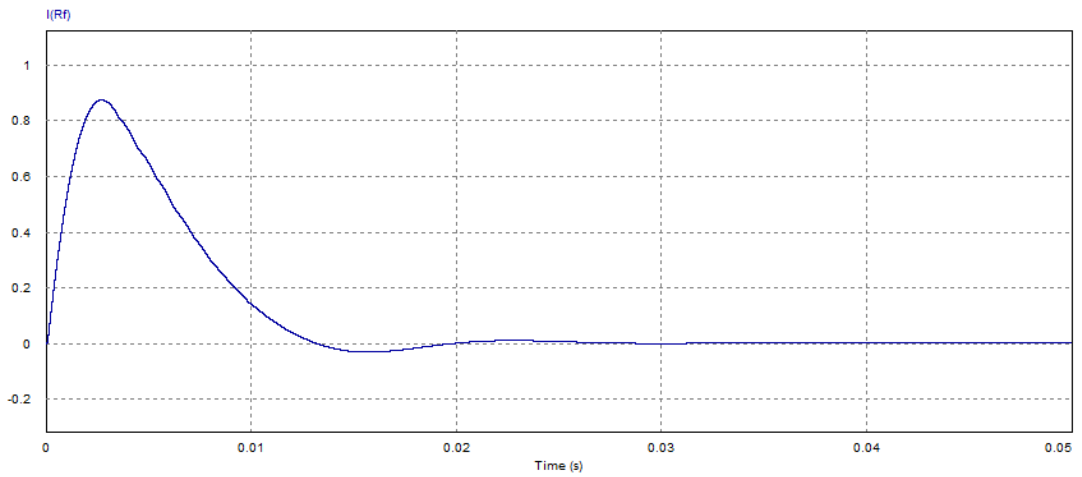
Corriente L2

Figura A13. Corriente en la bobina L2 para el ciclo de trabajo mínimo a una frecuencia de 450 kHz.



Corriente de salida

Figura A14. Corriente de salida para el ciclo de trabajo mínimo a una frecuencia de 450 kHz.

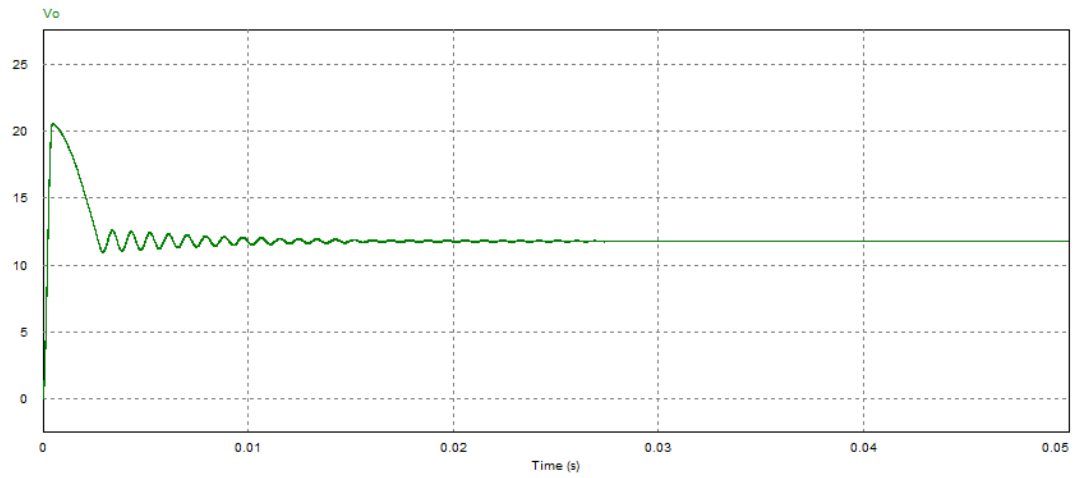


Ciclo de trabajo al máximo

$D=0,51$

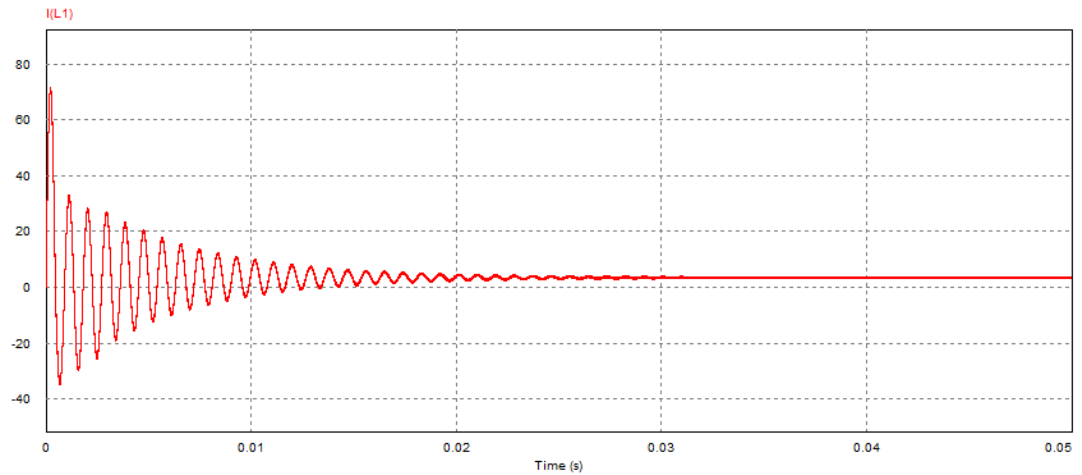
Tensión de salida

Figura A15. Tensión de salida para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 450 kHz.



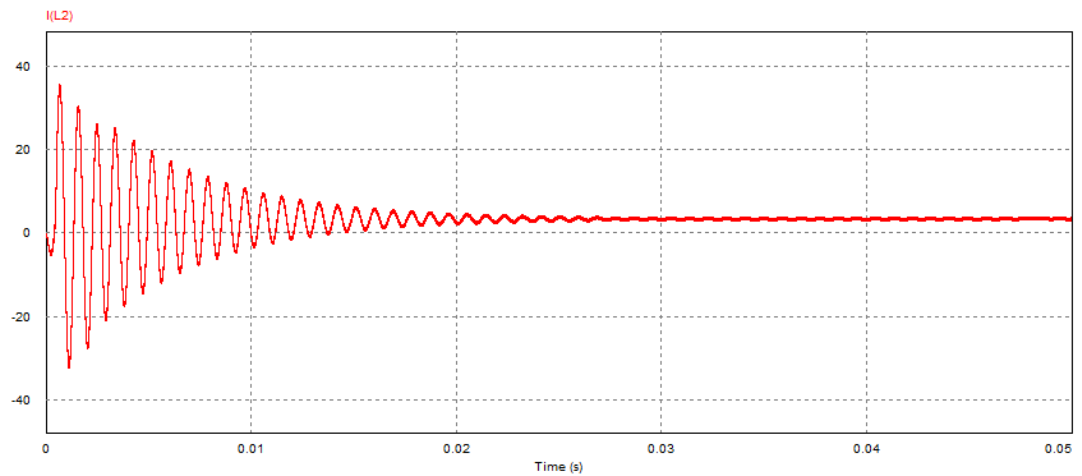
Corriente de L1

Figura A16. Corriente en la bobina L1 para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 450 kHz.



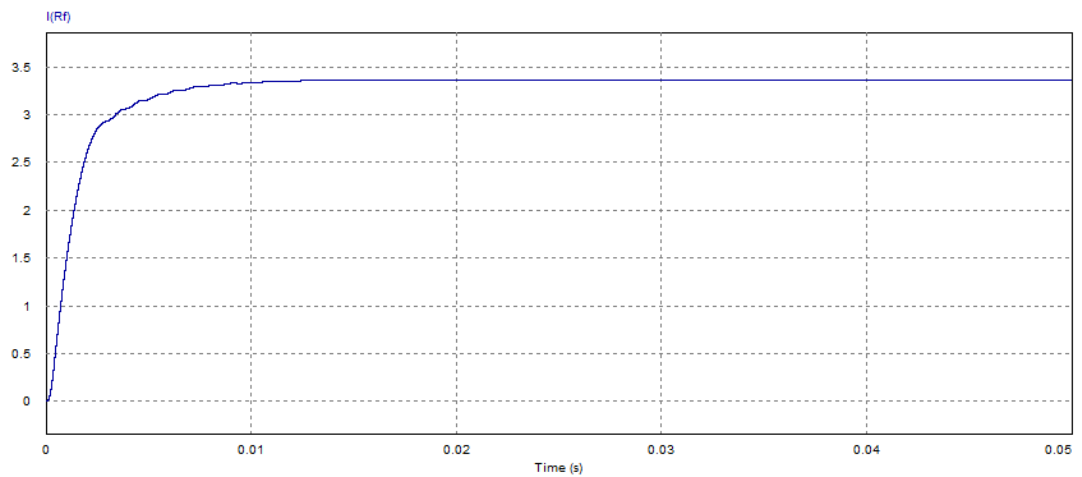
Corriente de L2

Figura A17. Corriente en la bobina L2 para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 450 kHz.



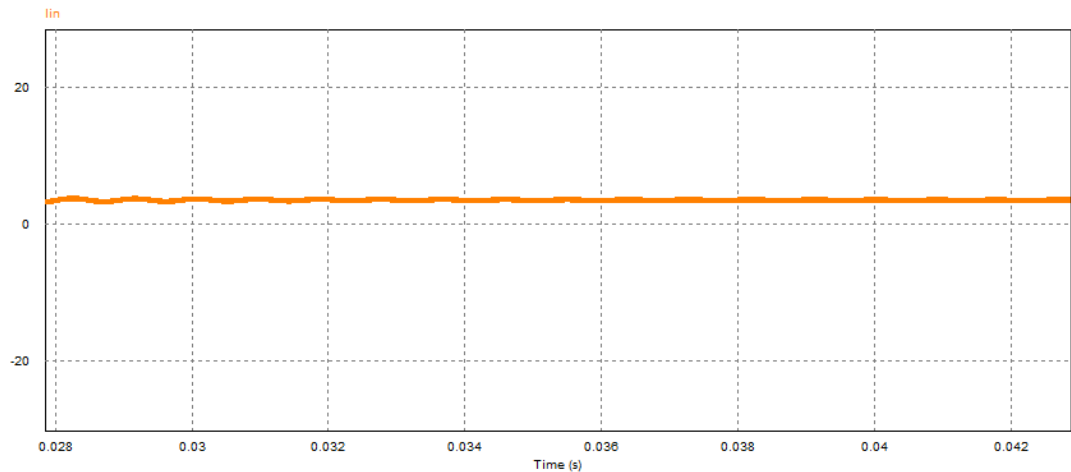
Corriente de salida

Figura A18. Corriente de salida para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 450 kHz.



Corriente de entrada en estado estable

Figura A19. Corriente de entrada en estado estable para el ciclo de trabajo máximo a una frecuencia de 450 kHz.



Se observa un adecuado comportamiento del convertidor DC-DC. Se debe tener un poco de cuidado con los picos transitorios de corriente, los cuales podrían afectar el MOSFET, por lo tanto se inicia el funcionamiento del SEPIC con el ciclo de trabajo mínimo y después de obtener estado estacionario se manipula el nivel de referencia hasta el punto deseado o setpoint.