Instituto Tecnológico
y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Electrónica, Sistemas e Informática

Maestría en Diseño Electrónico

Metodología para el diseño de filtros EMI

TRABAJO RECEPCIONAL que para obtener el **GRADO** de
Maestro en Diseño Electrónico

Presenta: JUAN CHRISTIAN ORLANDO LOZANO TORRES

Asesor: DR. ALEJANDRO TAPIA HERNÁNDEZ

Tlaquepaque, Jalisco. Agosto del 2025.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la oportunidad de llegar a este momento, por su amor y por poner en mi corazón el deseo de seguir aprendiendo.

Agradezco a mi esposa e hijos por apoyarme y permitirme tomar el tiempo para realizar este trabajo de investigación, es tiempo que no les dediqué a ellos… les agradezco infinitamente.

Agradezco al Dr. Alejandro Tapia Hernández por la mentoría, dedicación y paciencia durante la realización de este trabajo, su guía como mentor me ha permitido descubrir que su conocimiento como profesionista es admirable.

Agradezco a Continental Automotive por la oportunidad, la confianza y el apoyo que recibí.

Agradezco a mis colegas de trabajo Eugenio, Jorge y Antonio por sus compartir sus bastos conocimientos y la dedicación a nuestro trabajo.

Finalmente agradezco al coordinador de la carrera el Dr. Omar Humberto Longoria Gándara y docentes del ITESO que estuvieron presentes y dispuestos a ayudar a lo largo de esta investigación.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi bella esposa y a mis hijos… ellos son quienes me inspiran día con día.

A mis padres porque nunca han dejado de confiar en mí, por su amor incondicional, por sus palabras y por el ejemplo que han sido para mí.

RESUMEN

Actualmente, uno de los principales retos en el diseño de productos electrónicos, ya sea como productos de consumo, automotriz, médico, aeronáutico, incluso espacial, es alcanzar el desempeño para el cual fueron diseñados funcionalmente desde su definición y al mismo tiempo cumplir con las especificaciones requeridas y especificaciones del mercado para su futura comercialización. Estos requerimientos garantizan en gran parte la seguridad del usuario y la integración de estos productos con su entorno funcional.

Principalmente uno de los retos a los cuales se enfrentan los ingenieros en electrónica en la actualidad es minimizar el fenómeno de emisiones radiadas y conducidas que existe entre los diversos dispositivos electrónicos que se encuentran operando dentro de un mismo entorno, mismo que, en caso de no comportarse dentro de los niveles indicados en los estándares y regulaciones pueden ocasionar el malfuncionamiento del producto e incluso, ocasionar problemas en otros dispositivos que se encuentren en su entorno.

En este trabajo de investigación se busca desarrollar una metodología que permita analizar y optimizar el diseño de filtros EMI desde las primeras propuestas de diseño con el propósito de cumplir con los estándares de compatibilidad electromagnética. A través esta metodología se emplearán técnicas de análisis matemático y simulaciones de circuitos electrónicos que permitan evaluar condiciones de prueba teóricas y propuestas de mejora en los diseños y de esta manera predecir el comportamiento del producto en condiciones reales.

En Continental Automotive los ingenieros en electrónica no cuentan con alguna metodología clara y única que permita diseñar y optimizar de manera anticipada los filtros EMI utilizados principalmente en fuentes conmutadas que se utilizan en los productos. Normalmente los circuitos utilizados en cada diseño son módulos generales de fuentes conmutadas y/o módulos analógico-digitales que procesan datos a alta velocidad, Dichos módulos típicamente cuentan con una propuesta inicial de diseño de filtro EMI dictada por el fabricante, en consecuencia, las optimizaciones se detectan después de realizar las primeras validaciones eléctricas, generando esta condición un incremento en costo y en el tiempo de validación.

Este trabajo de investigación se enfocado al desarrollo de una metodología que permita desarrollar, analizar y optimizar el análisis de filtros EMI mediante el uso de simulaciones en el software ADS (Advanced Design System).

El objetivo particular busca desarrollar una metodología que permita analizar el comportamiento y optimizar el diseño de filtros EMI durante etapas tempranas de diseño.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS 2
DEDICATORIA 3
RESUMEN 4
TABLA DE CONTENIDO 5
LISTA DE FIGURAS 7
LISTA DE TABLAS 8
LISTA DE FÓRMULAS 9
LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS 10

1. INTRODUCCIÓN 11

1.1. ANTECEDENTES 12
1.2. JUSTIFICACIÓN 12
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12
1.4. HIPÓTESIS 13
1.5. OBJETIVOS 13
1.5.1. Objetivo General 13
1.5.2. Objetivos Específicos 13
1.6. NOVEDAD CIENTÍFICA, TECNOLÓGICA O APORTACIÓN 13

2. ESTADO DEL ARTE O DE LA TÉCNICA 14

3. MARCO TEÓRICO/CONCEPTUAL 15

3.1. QUÉ ES UN FILTRO EMI 15
3.1.1. ¿Por qué es importante tener un buen diseño de filtro EMI? 16
3.2. COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA (EMC) 17
3.2.1. Retos de la compatibilidad electromagnética 18
3.3. SOFTWARE DE SIMULACIÓN 18
3.4. REQUERIMIENTOS Y ESTÁNDARES EMC 18
3.5. IMPEDANCIA 19
3.6. ESR (EQUIVALENT SERIES RESISTANCE) 20

4. DESARROLLO METODOLÓGICO 21

4.1. ANÁLISIS DE CASO 21
4.2. REQUERIMIENTOS PREVIOS 22
4.2.1. Frecuencias de pruebas requeridas por el cliente. 23
4.2.2. Tabla de frecuencias 23
4.3. MÉTODO ANALÍTICO 24
4.3.1. Selección de inductor Lf 24
4.3.2. Cálculo de atenuación requerida del filtro 25
4.3.3. Capacitancia de entrada en la fuente conmutada (C_{in}) 25
4.3.4. Selección de capacitancia Cf 26

4.3.5. Capacitor de amortiguamiento Cd 27
4.3.6. Frecuencia de corte del filtro 28
4.4. SIMULACIÓN EN ADS 29
4.4.1. Función Tune Parameters (Optimización) 31
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 35
5.1. RESULTADOS 35
5.2. DISCUSIÓN 36
6. CONCLUSIONES 37
6.1. CONCLUSIONES 37
6.2. TRABAJO FUTURO 37
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Marco Conceptual de la Metodología 15
Figura 2 Filtro EMI Básico 15
Figura 3 Interacción de Compatibilidad Electromagnética 17
Figura 4 Elementos de la Impedancia 19
Figura 5 ESR vs Frecuencia para Capacitores con Dieléctrico X7R 20
Figura 6 Secuencia de la Metodología 21
Figura 7 Topología y Representación General del Filtro EMI [10] 22
Figura 8 Circuito de Filtro EMI en Aplicación 22
Figura 9 Representación General del Filtro EMI y su Conexión con el Sistema 24
Figura 10 Capacitancia en la Entrada del Filtro 25
Figura 11 Circuito Filtro EMI Bateria-Fuente Conmutada 29
Figura 12 Respuesta Filtro EMI sin Amortiguamiento 29
Figura 13 Circuito Filtro EMI Bateria-Fuente Conmutada-ERS 30
Figura 14 Respuesta Filtro EMI con Amortiguamiento 30
Figura 15 Frecuencia de Corte -3dB 30
Figura 16 Selección de Componentes 31
Figura 17 Ajuste de Valor de Componente 31
Figura 18 Respuesta Inductor 1 uH 32
Figura 19 Respuesta Inductor 2.2 uH 32
Figura 20 Respuesta Inductor 3.3 uH 32
Figura 21 Respuesta Inductor 4.7 uH 33
Figura 22 Respuesta Inductor 6.8 uH 33
Figura 23 Respuesta Inductor 10 uH 33
Figura 24 Confirmación de Cambios 34
Figura 25 Circuito Optimizado 34
Figura 26 Hoja de Datos del Inductor Seleccionado 36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Acrónimos Utilizados 10
Tabla 2 Límites Máximos en Pruebas de Emisiones Radiadas CISPR 25 23
Tabla 3 Valores de Impedancia en Inductores 28
Tabla 4 Valores Iniciales del filtro EMI 35
Tabla 5 Análisis de Inductores de Valores Comerciales 35

LISTA DE FÓRMULAS

Formula 1 Atenuación del Filtro.....25
Formula 2 Duty Cycle 26
Formula 3 Selección de Capacitancia Cf.....27
Formula 4 ESRd Capacitor de amortiguamiento.....27
Formula 5 Frecuencia de Corte.....28

LISTA DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

EMI	Interferencia electromagnética
EMC	Compatibilidad electromagnética
ADS	Advanced Design System
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
ESR	Equivalent Series Resistor

Tabla 1 Acrónimos Utilizados

1. INTRODUCCIÓN

La competitividad entre fabricantes de productos electrónicos, los estándares internacionales y las demandas de productos innovadores por parte de los usuarios mantiene a los grupos de diseño, desarrollo e innovación en un constante ciclo de investigación y generación de propuestas y conceptos a fin de cubrir todas estas necesidades. Sin embargo, dentro de esta fase de investigación frecuentemente se presentan retos importantes y obstáculos para los cuales una solución debe ser planteada y al mismo tiempo debe garantizar el perfecto funcionamiento durante su operación.

Enfocándonos en la industria automotriz existen grandes retos a los que se enfrentan los diseñadores en cada solución que será presentada a los exigentes usuarios, desde cumplir con la comodidad de manejo con propuestas de conectividad digital o el uso de tecnologías limpias o alternativas, hasta aspectos tan importantes como la seguridad durante la conducción y la adaptación a la estructura vial mejorando la movilidad en el entorno, y por último, y no menos importante, la autonomía de conducción entre los vehículos, lo cual es una solución que se encuentra en desarrollo y a corto plazo se prevé que será una característica común entre los vehículos en circulación.

El diseño de filtros EMI hoy en día es una parte fundamental del diseño de cualquier sistema electrónico, ya que su comportamiento debe garantizar el adecuado funcionamiento del producto con su entorno y en caso de ser un sistema de seguridad debe garantizar la integridad del usuario. Un mal diseño de filtros EMI puede traer como consecuencia costos innecesarios al producto, horas de rediseño, gastos de revalidación, compra de material adicional para prototipos de prueba, entre otros, adicionalmente a esto se pueden generar retrasos en el cronograma de desarrollo del producto y crear negociaciones innecesarias con el cliente a fin de ajustar el plan de desarrollo del producto.

1.1. Antecedentes

Conforme los años pasan, la tecnología se moderniza, las memorias tienen mayores densidades, los microprocesadores realizan operaciones a mayor velocidad, su tamaño y peso es menor, en general, todo tiene un mejor desempeño, pero al mismo tiempo esto conlleva nuevos retos de diseño para los ingenieros, uno de ellos es la generación de ruido eléctrico en todo sistema digital-analógico. Es importante mencionar que este ruido siempre ha existido, sin embargo, es en los últimos años cuando su contribución es más perceptible y perjudicial para los dispositivos electrónicos.

Ante esta situación, las metodologías de diseño electrónico deben también considerar un análisis más extenso y cuidadoso en el diseño de filtros EMI, considerando desde los requerimientos del cliente, los estándares internacionales de diseño y las propias normas de diseño del grupo de trabajo.

1.2. Justificación

Tener dispositivos electrónicamente compatibles con el medio ambiente y que al mismo tiempo cumplan con los requerimientos de susceptibilidad e inmunidad a señales de otros dispositivos electrónicos se ha convertido en una prioridad de los fabricantes de productos electrónicos automotrices, ya que de esto depende su comercialización en los mercados nacionales e internacionales. No obstante, el cumplir con las regulaciones de cada país reduce las probabilidades de accidentes vehiculares ocasionados por fallas en los dispositivos de manera considerable.

En particular, el filtro EMI en cada circuito eléctrico debe ser considerado como un circuito critico ya que con un correcto diseño se pueden cumplir los requerimientos anteriormente mencionados y evitar revalidaciones innecesarias que solo generan incremento en el costo del diseño y tiempo que pueden comprometer la fabricación del producto en el tiempo establecido. De aquí, la importancia de desarrollar una metodología que este enfocada a estas prioridades y sirva de referencia al grupo de desarrollo en general.

1.3. Planteamiento del problema

Considerando que los filtros EMI son en gran medida parte de la solución a problemas de susceptibilidad e inmunidad requeridas para que un producto electrónico sea aprobado para su comercialización y uso, es requerido que durante la fase de diseño exista una metodología que optimice su diseño y asegure su correcto desempeño con la menor cantidad de recursos disponibles.

1.4. Hipótesis

El desarrollo de una metodología permitirá optimizar el desempeño eléctrico de los filtros EMI, de manera tal, que los costos de diseño serán reducidos al proponer soluciones analizadas y modeladas cumpliendo con los requerimientos solicitados y asegurando la correcta funcionalidad del producto.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Desarrollar una metodología que permita analizar, modelar y optimizar el diseño de filtros EMI garantizado el correcto desempeño en el circuito al cual será implementado.

1.5.2. Objetivos Específicos:

Robustecer a través de la metodología el desempeño de los filtros EMI de acuerdo con los requerimientos establecidos y en consecuencia tener un impacto positivo en el costo y tiempo de desarrollo del producto.

1.6. Novedad científica, tecnológica o aportación

El trabajo de investigación aporta una metodología de autoaprendizaje, la cual está basada en el proceso sistemático para analizar y proponer soluciones de filtros EMI que cumplan con los requerimientos del producto y al mismo tiempo se alineen con los esfuerzos y tiempos presentados para su desarrollo.

2. ESTADO DEL ARTE O DE LA TÉCNICA

Alrededor del año 1890 varios trabajos de investigación se enfocaron en mejorar el desempeño de las líneas de transmisión a larga distancia insertando bobinas en intervalos regulares a lo largo de los cables, los resultados fueron desalentadores y no mostraron un progreso real. Fue hasta el año 1899 cuando Michael I. Pupin descubrió que existía una relación entre la distancia en los intervalos de las bobinas y la longitud de onda de la señal que se propaga en el cable, después de numerosos cálculos Pupin descubrió que el amortiguamiento se puede reducir sustancialmente colocando estas bobinas en las líneas de telégrafos y teléfonos [1].

Este efecto permitió que se pudieran responder más incógnitas que se tenían en ese momento y permitió desarrollar más aplicaciones como eliminadores de armónicos de generadores de frecuencias, en este año 1915 se define con el nacimiento del filtro eléctrico.

Usando como base la teoría de líneas de transmisión se desarrolló una teoría basada en el uso de una impedancia dentro de determinados intervalos, llamada “teoría de parámetros de imagen” en la cual se descubrió que el filtro no funcionaba adecuadamente ya que la impedancia varia con la frecuencia y lo que se consiguió fue solo tener bandas de paso planas y grandes picos de transmisión en los límites del filtro.

En el año 1930 S. Butterworth solucionó este problema dividiendo el filtro en secciones de orden igual o mayor a cuatro y separó cada sección por amplificadores, además introdujo en el diseño de filtros la utilización de funciones de transferencia para facilitar los cálculos del diseño, este trabajo fue publicado en el año 1930.

A lo largo de las décadas de 1960, 1970 y 1980, los investigadores se alarmaron cada vez más por la interferencia de las emisiones electromagnéticas. En 1967, el ejército de los EE. UU. Emitió la Norma Militar 461A que estableció requisitos de prueba y verificación para los dispositivos electrónicos que se utilizan en aplicaciones militares, así como límites de emisiones y susceptibilidad para los nuevos equipos electrónicos militares. Además, en 1979, la FCC de EE. UU. impuso límites legales a las emisiones electromagnéticas de todos los equipos digitales. Estas regulaciones han seguido evolucionando a lo largo de los años a medida que los sistemas se han vuelto más rápidos, más pequeños y potentes y, como tal, son más propensos a interferir con las operaciones de otros sistemas eléctricos [2].

3. MARCO TEÓRICO/CONCEPTUAL

Como soporte para el desarrollo del trabajo de investigación se tomará como referencia el siguiente marco conceptual, el cual muestra las principales líneas de investigación y conceptos que permitirán explicar cada uno de los conceptos que utilizaremos durante su elaboración.

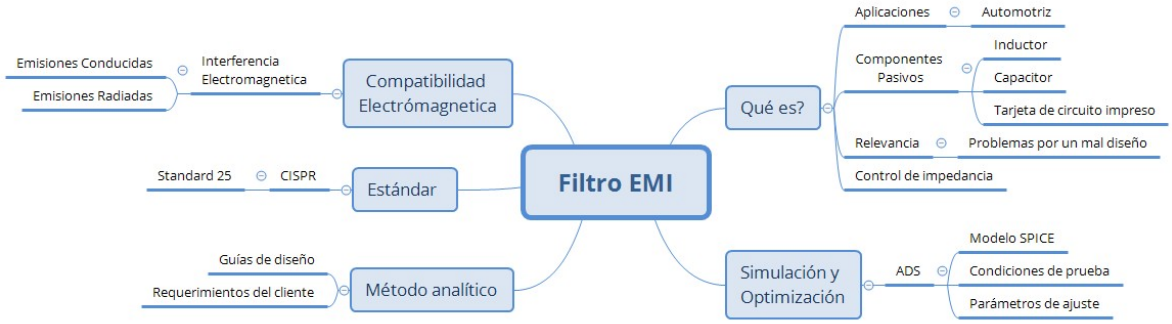

Figura 1 Marco Conceptual de la Metodología

3.1. Qué es un filtro EMI

EMI, o Interferencia Electromagnética (Electro-Magnetic Interference), se define como las señales eléctricas no deseadas que pueden ser transmitidas a partir de emisiones conducidas o radiadas, la propagación es a través de los conductores de forma conducida o radiada en el aire como campo magnético o campo eléctrico.

Por lo tanto, un filtro EMI se puede definir como un filtro eléctrico cuya función principal será reducir el ruido electrónico en alta frecuencia de un dispositivo, ya sea del sistema o hacia el sistema, el cual puede causar o ser susceptible a interferencia con otros dispositivos [3].

Básicamente un filtro EMI está formado por componentes pasivos (capacitores e inductores) como un circuito LC, en conjunto, desvían el ruido de alta frecuencia de retorno hacia la fuente de alimentación o a la tierra del sistema.

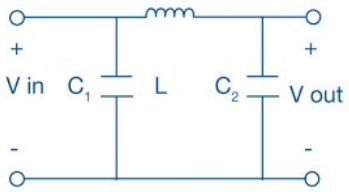

Figura 2 Filtro EMI Básico

Cuando se introduce una señal en el filtro EMI, el ancho de banda de las frecuencias se encuentra con el primer condensador, esto reduce el ancho de banda proporcionando una baja impedancia contra la señal. El ancho de banda reducido se envía luego al inductor, que otorga la energía para pasar a través del segundo condensador y ser liberada como una señal de salida, incluso con el ancho de banda reducido [4].

3.1.1. ¿Por qué es importante tener un buen diseño de filtro EMI?

La importancia de diseñar y optimizar un filtro EMI garantiza que los equipos funcionen de manera adecuada, por una parte, durante su operación no afecta la funcionalidad de equipos que se encuentran en el entorno y por otra parte no son susceptibles a fallar cuando un equipo cercano se encuentra en operación, como ejemplo, actuadores controlados por equipos electrónicos pueden ser activados de manera involuntaria o no puede ser posible su activación en el momento adecuado. Otra problemática puede ser la perdida de comunicación entre sistemas o subsistemas de un equipo electrónico a causa de interferencia que puede provenir de un equipo externo o incluso dentro de él mismo.

Las consecuencias de un mal diseño se pueden clasificar según su criticidad:

- Un sistema de seguridad puede ignorar una señal
- Una instrucción puede cesar sin motivo aparente
- Un equipo puede dejar de funcionar en un intervalo de tiempo
- Un equipo que envíe alertas puede enviar alertas falsas
- Un sistema puede activarse por una señal de activación externa

Siendo las más críticas las que pueden ocurrir en sistemas de seguridad y que pueden poner en riesgo al usuario. La severidad no es la misma en un sistema de reproducción de radio FM que permite interferencias de ruido que son percibidas por el usuario a un sistema de bolsas de aire que se pueden activar sin razón alguna mientras el usuario se encuentra conduciendo.

Si el filtro EMI no es diseñado correctamente no solo tiene repercusiones como gastos innecesarios como rediseños, validaciones adicionales, horas de desarrollo, incluso, reclamos de garantías por parte del cliente, las consecuencias van más allá como considerar el equipo como una fuente de peligro o accidentes durante su operación.

Un buen diseño de filtro EMI trae consigo las siguientes ventajas:

- **Mejora el desempeño.** Los filtros EMI mejoran considerablemente el desempeño de un circuito al mejorar la eficiencia y reducir las interrupciones durante se operación.
- **Mejora la confiabilidad del producto.** Los filtros EMI juegan un papel critico durante las pruebas de confiabilidad del producto a las que son sometidos, estos filtros en cierta parte protegen al circuito de amenazas externas del entorno en el que operan,
- **Ayuda al cumplimiento de estándares requeridos.** Todos los productos electrónicos para poder ser comercializados deben alinearse a los estándares requeridos por las entidades gubernamentales de cada destino de venta. Los filtros EMI ayudan a cumplir estos estándares para su comercialización y así evitar multas y acciones legales por el incumplimiento de estos.
- **Mejora la seguridad del usuario.** Un buen diseño de filtros EMI disminuye en gran medida las condiciones inseguras de operación del producto, ya que son reducidas o eliminadas las interferencias que pueden ocasionarlas.

3.2. Compatibilidad Electromagnética (EMC)

La compatibilidad electromagnética se puede definir como la habilidad de un dispositivo, equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en su entorno electromagnético sin producir ruido electromagnético a su entorno [5], en otras palabras, los dispositivos, equipos o sistemas pueden operar sin ser afectados por interferencias externas y al mismo tiempo deben operar sin interferir y afectar la operación de dispositivos que se encuentran en el entorno.

[6]La compatibilidad electromagnética se logra cuando:

- Los productos electrónicos no interfieren con su entorno (emisiones).
- El entorno no afecta la operación de los productos electrónicos (inmunidad).
- Cuando el producto electrónico no interfiere con el mismo (integridad de señal)

Analizando las formas en las cuales las señales se pueden propagar entre sistemas, podemos ver que la energía se transfiere de una fuente a un receptor (en este caso "la víctima") a través de algún camino en el cual se acople, cabe mencionar que la energía que es transmitida entre la fuente y el receptor en este caso es energía indeseada en el sistema.

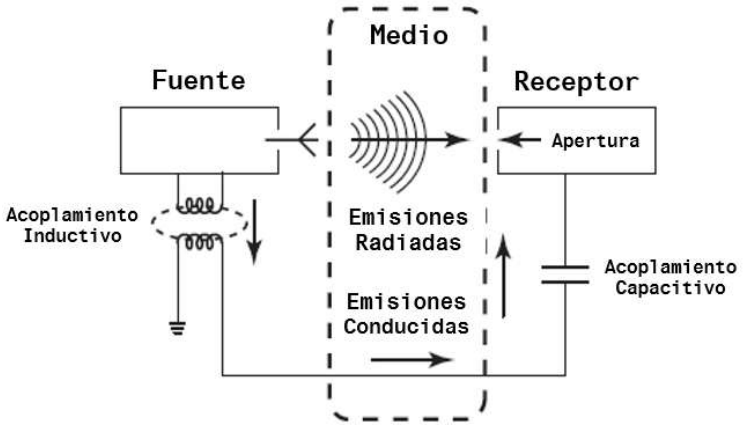

Figura 3 Interacción de Compatibilidad Electromagnética

La energía puede ser propagada en conexiones de líneas de transmisión o alimentación, entre los sistemas o subsistemas, a esto se le conoce como *emisiones conducidas*, otra forma en la que energía es transferida es a través de las ondas electromagnéticas de la fuente al receptor, *emisiones radiadas.*

3.2.1. Retos de la compatibilidad electromagnética

Definitivamente, un reto importante al que se enfrentan los ingenieros en electrónica es diseñar productos que funcionen de manera adecuada dentro de un entorno electromagnético que conforme pasan los años tiene más factores que lo hacen susceptible a fallar o por otra parte a interferir con otros dispositivos en operación.

Considerando que el diseño del filtro EMI será utilizado en productos automotrices y debido a la complejidad y elevada cantidad de dispositivos que están vinculados dentro de un mismo sistema electrónico, un gran reto para en el diseño de filtros EMI es minimizar considerablemente los riesgos de interferencia y susceptibilidad del producto.

3.3. Software de Simulación

Las herramientas de simulación de circuitos eléctricos cada vez tomar mayor importancia en el desarrollo de diseños de productos electrónicos, ya que se han convertido en una herramienta que permite modelar y predecir el comportamiento del circuito durante su operación en diferentes escenarios de prueba, por otra parte, la utilización de un software de simulación es una opción menos costosa, en comparación con la compra de material, construcción y validación por segunda, tercera o más ocasiones. Podemos considerar lo anterior como la justificación de su integración en la metodología que desarrollaremos a través de este trabajo de investigación.

Durante nuestra investigación haremos uso del software de simulación ADS (Advanced Design System), ya que esta herramienta cuenta con las características necesarias para desarrollar los análisis que se pretenden realizar.

3.4. Requerimientos y estándares EMC

La compatibilidad electromagnética no es solo un índice importante de rendimiento, sino también un requisito legal para cualquier dispositivo antes de su comercialización. Empleando estándares, gobiernos aseguran que la EMC esté controlada en el diseño y en el uso de equipo electrónico. Los estándares de EMC suelen tener una sección explicando los términos técnicos y otras secciones para definir el equipo de prueba, métodos de prueba, medición aceptable y los límites específicos que deben cumplirse [7]. Fuera de EE. UU., Las regulaciones del Comité Internacional Especial sobre Interferencias Radioeléctricas (CISPR, de su título francés) forma parte del Comité Electrotécnico Internacional (IEC), es ampliamente aceptado.

3.5. Impedancia

La impedancia (Z) se define como la resistencia eléctrica que se genera en un circuito eléctrico cuando una corriente alterna intenta pasar a través de ella. A diferencia de la resistencia en corriente continúa, la impedancia se expresa a través de números complejos, es decir, con una parte real y una parte imaginaria [8].

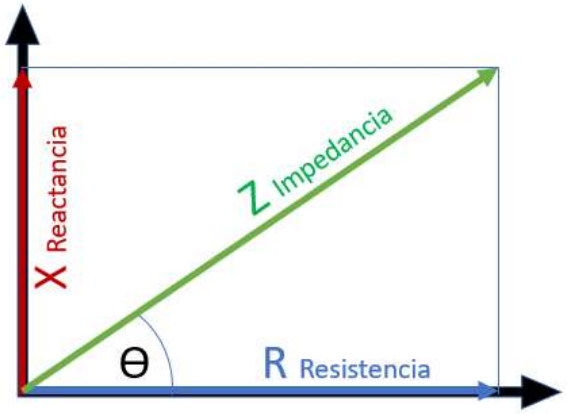

Figura 4 Elementos de la Impedancia

Si se analiza el comportamiento de la corriente y la tensión de forma vectorial en circuitos puramente inductivos y capacitivos, se aprecia que los vectores surgen en sentido opuesto sobre el eje imaginario. De lo anterior deducimos que la reactancia es igual a:

$$X = X_L - X_C$$

X_L: reactancia inductiva
X_C: reactancia capacitiva

Donde sí:

$X > 0$ el circuito es inductivo
$X < 0$ el circuito es capacitivo
$X = 0$ el circuito es resistivo

3.6. ESR (Equivalent Series Resistance)

En el mundo ideal los capacitores podrían diseñarse de manera que no presenten resistencia. Sin embargo, esto es prácticamente imposible de lograr ya que se siempre habrá algún tipo de resistencia interna en el capacitor que aparece en serie con la capacitancia. Conocida como resistencia equivalente en serie (ESR), el nivel de esta resistencia variará en el capacitor de pendiendo de varios factores incluyendo los materiales dieléctricos utilizados, frecuencia de operación de la aplicación, calidad y confiabilidad del capacitor. El valor de ESR puede ser muy pequeño en algunas instancias y puede ser despreciable para algunos simples diseños o aplicaciones de baja frecuencia. Sin embargo, para algunas aplicaciones de alta potencia o frecuencia, tener en cuenta el valor de ESR en los cálculos generales de impedancia puede ser crucial para mantener la eficiencia operativa o prevenir posibles fallas.

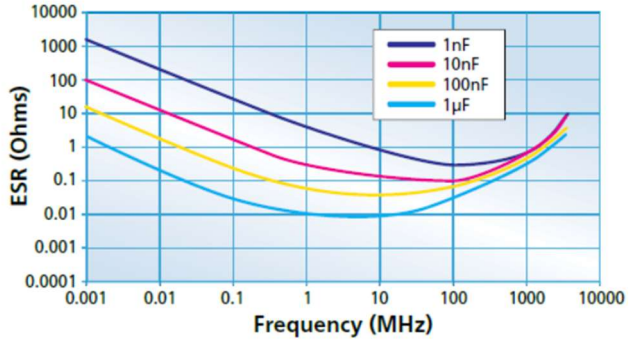

Figura 5 ESR vs Frecuencia para Capacitores con Dieléctrico X7R [9]

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de cómo el ESR puede cambiar con respecto al cambio de frecuencia de operación en referencia a capacitores con dieléctrico X7R [9].

4. DESARROLLO METODOLÓGICO

Este trabajo de investigación consta de tres partes en su desarrollo, primeramente, permitirá analizar a mayor profundidad los requerimientos eléctricos que se deberán cumplir de acuerdo con la especificación de cada cliente, posteriormente, a través de un método analítico, se propondrá una solución que busque cumplir con los requerimientos antes mencionados, y, por último, con ayuda de un modelado comportamental se optimizará la solución si así lo requiriera.

El desarrollo de la metodología está conformado por cinco etapas, cada una considera lo siguiente:

Figura 6 Secuencia de desarrollo de la Metodología

4.1. Análisis de caso

Aunque la metodología puede ser aplicada en cualquier producto electrónico, para esta investigación en particular analizaremos el comportamiento de un filtro EMI en un sistema que está conectado directamente a la batería del vehículo, que a su vez alimenta una fuente conmutada que alimentará el sistema electrónico. Se considera que el filtro EMI estará localizado entre las líneas de entrada de alimentación y la fuente conmutada. El filtro EMI del sistema está conformado por dos capacitores cerámicos y un inductor con topología de filtro “pi”.

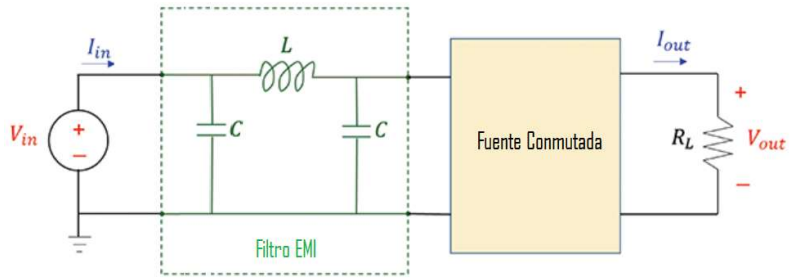

Figura 7 Topología y Representación General del Filtro EMI [10]

Para nuestro análisis consideraremos el siguiente diagrama donde se muestran las capacitancias e inductancias con valores propuestos que se pretenden reutilizar de diseños previos. A través del análisis se puede confirmar si los valores satisfacen el comportamiento eléctrico esperado en el nuevo diseño o si necesitan ser optimizados para mejorar su desempeño.

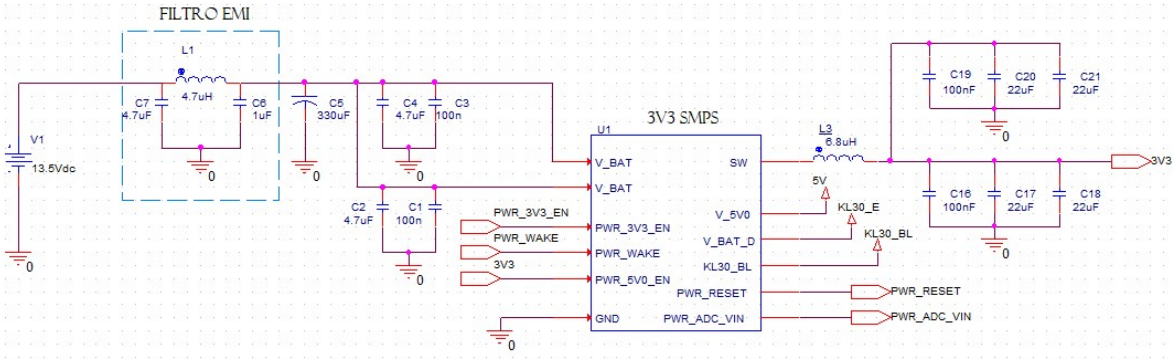

Figura 8 Circuito de Filtro EMI en Aplicación

4.2. Requerimientos previos

Antes de iniciar con la parte analítica de la metodología, es importante, primeramente, tener identificados los requerimientos a los que será sujeto el diseño, así como también las características de operación del dispositivo, estos permitirán determinar si el diseño operara dentro de los límites establecidos. Entre la información más importante que debe estar disponible podemos mencionar lo siguiente:

- Criterios eléctricos de aceptabilidad del cliente.
- Consumo de corriente del circuito.
- Hojas de datos de los componentes del filtro EMI y fuentes conmutadas, así como de los componentes que se encuentren conectados en las líneas de entrada alimentación.
- Tabla de frecuencias de operación los dispositivos del circuito.

4.2.1. Frecuencias de pruebas requeridas por el cliente.

A continuación, se muestran las frecuencias de interés solicitadas por el cliente y sus límites de emisiones máximos a considerar durante las pruebas de emisiones conducidas radiadas. Es importante revisar durante las validaciones que los niveles de emisiones conducidas o radiadas no superen los niveles permitidos por el cliente. Como referencia en este trabajo utilizaremos las recomendaciones indicadas en el estándar CISPR 25.

Banda de operación	Frecuencia en MHz		Límite en dBs	Banda de operación	Frecuencia en MHz		Límite en dBs
Radio AM	0.535	1.605	20	Analogue UHF	820	960	20
Radio FM	76	108	26	GLONASS	1590.78	1616.59	0
TV Band	41	944	16	Wi-Fi / Bluetooth	2402	2494	26
RKE	300	450	20	Wi-Fi	5150	5350	26
DAB III	171	245	26	Wi-Fi	5470	5725	26
TPMS	315	433.92	20	V2X (Wi-Fi)	5850	5925	50
SDARS	2320	2345	32	GPS L5	1567.42	1583.42	10

Tabla 2 Límites Máximos en Pruebas de Emisiones Radiadas CISPR 25

4.2.2. Tabla de frecuencias

De la información más importante que podemos necesitar desde el inicio del análisis es la tabla de frecuencias de operación del sistema, esta tabla nos dará una referencia de cuáles son las frecuencias en las que esperamos encontrar niveles altos de emisiones radiadas o conducidas, la siguiente tabla nos muestra un listado de los principales componentes y su frecuencia de operación, enseguida las frecuencias en las que se encuentran los armónicos de la frecuencia fundamental de cada uno de ellos.

Tabla de frecuencias de operación

Referencia	Dispositivo	Señal	Frecuencia MHz	1er ármonico MHz	2do ármonico MHz	3er ármonico MHz	4to ármonico MHz	5to ármonico MHz	6to ármonico MHz	7mo ármonico MHz	8vo ármonico MHz	9no ármonico MHz	10mo ármonico MHz	11vo ármonico MHz	12vo ármonico MHz	Rise Time
IC1700	MPQ4313	Buck mínimo	0.339	0.678	1.017	1.356	1.695	2.034	2.373	2.712	3.051	3.39	3.729	4.068	4.407	>100ns Modulo
		Buck (Min y Max valores son 339 y 533 kHz)	0.43	0.86	1.29	1.72	2.15	2.58	3.01	3.44	3.87	4.3	4.73	5.16	5.59	>100ns Modulo
		Buck máximo	0.533	1.066	1.599	2.132	2.665	3.198	3.731	4.264	4.797	5.33	5.863	6.396	6.929	>100ns Modulo
IC8500	LP8866	Boost mínimo	0.372	0.744	1.116	1.488	1.86	2.232	2.604	2.976	3.348	3.72	4.092	4.464	4.836	
		LED Driver (Boost) (Min y Max valores son 417 y 498 kHz)	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.4	2.8	3.2	3.6	4	4.4	4.8	5.2	
		Boost máximo	0.428	0.856	1.284	1.712	2.14	2.568	2.996	3.424	3.852	4.28	4.708	5.136	5.564	
IC1050	TPS61029	Boost mínimo	0.48	0.96	1.44	1.92	2.4	2.88	3.36	3.84	4.32	4.8	5.28	5.76	6.24	
		Boost (Min y Max valores son 480 y 720 kHz)	0.6	1.2	1.8	2.4	3	3.6	4.2	4.8	5.4	6	6.6	7.2	7.8	
		Boost máximo	0.72	1.44	2.16	2.88	3.6	4.32	5.04	5.76	6.48	7.2	7.92	8.64	9.36	
IC18050	BD9S100 1V25	Buck mínimo	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	6ns
		Buck (Min y Max valores son 2.0 y 2.4 MHz)	2.2	4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4	17.6	19.8	22	24.2	26.4	28.6	6ns
		Buck máximo	2.4	4.8	7.2	9.6	12	14.4	16.8	19.2	21.6	24	26.4	28.8	31.2	6ns
IC19050	BD9S100 1V8	Buck mínimo	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	
		Buck (Min y Max valores son 2.0 y 2.4 MHz)	2.2	4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4	17.6	19.8	22	24.2	26.4	28.6	
		Buck máximo	2.4	4.8	7.2	9.6	12	14.4	16.8	19.2	21.6	24	26.4	28.8	31.2	

Tabla 2.4 Frecuencias de operación en el diseño y sus respectivas fuentes de emisión.

4.3. Método Analítico

Con referencia a la nota de aplicación "Simple Success With Conducted EMI From DC-DC Converters" nos basaremos para el desarrollo del método analítico [11]. A continuación, se muestra la forma general de la topología de un filtro EMI, donde se considera que:

V_B = es la entrada del filtro EMI
V_A = es la salida del filtro EMI

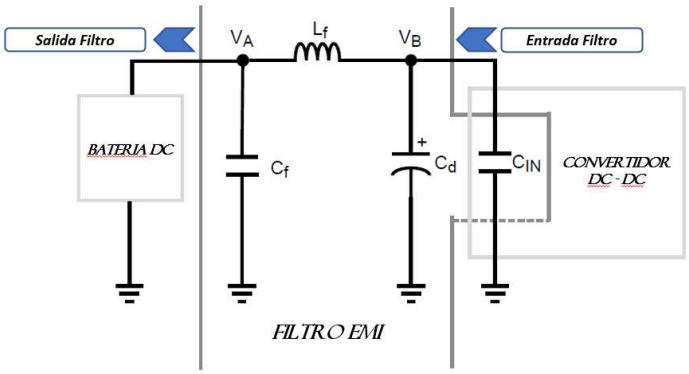

Figura 9 Representación General del Filtro EMI y su Conexión con el Sistema

C_f y C_d son las capacitancias que se tienen que definir a través de los cálculos que realizaremos posteriormente, cuyos valores dependerán del nivel de atenuación requerido en el filtro, la frecuencia de operación de la fuente conmutada, el ciclo de trabajo y de la capacitancia de entrada y salida de la fuente conmutada.

C_{IN} se define como la capacitancia total en la entrada del filtro.

El método analítico se basa en cuatro pasos que permiten determinar las características del filtro, así como, sus respectivas inductancias, capacitancias y resistencias en cada uno de sus elementos. El estándar EMI recomienda considerar que el filtro debe ser diseñado para que atenúe un ruido mayor a 50 dBuV que será producido por la fuente conmutada.

V_{max}: 50dBuV

4.3.1. Selección de inductor L*f*

Para la selección del inductor en aplicaciones de baja y mediana potencia se recomienda un valor entre 1µF y 10µF (considerando valores comerciales), ya que el inductor determina la frecuencia de resonancia del circuito, sin embargo, se debe considerar la corriente máxima que será conducida a través del inductor.

Para este análisis, se considera por recomendación del fabricante del circuito intregrado de la fuente conmutada un valor inicial de inductancia de 4.7 µH.

4.3.2. Cálculo de atenuación requerida del filtro

Para determinar este valor utilizaremos la siguiente ecuación la cual representa una aproximación del ripple de la corriente entrada de la fuente conmutada.

$$|Att|dB = 20\log\left(\frac{\frac{Ipk}{\pi^2 FsCin}\sin\pi D}{1\mu V}\right) - Vmax$$

Formula 1 Atenuación del Filtro

Donde:

I_{pk}: Corriente máxima de entrada en la fuente conmutada.

F_S: Frecuencia de operación de la fuente conmutada.

D: Ciclo de trabajo de la fuente conmutada.

C_{in}: Capacitancia de entrada en la fuente conmutada.

V_{max}: Nivel máximo de ruido producido por la fuente conmutada.

4.3.3. Capacitancia de entrada en la fuente conmutada (C_{in})

Para calcular la capacitancia en la entrada de la fuente conmutada (o en la entrada del filtro EMI) debemos considerar la capacitancia total en C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 y C6 mostrada en el circuito mostrado en la figura.

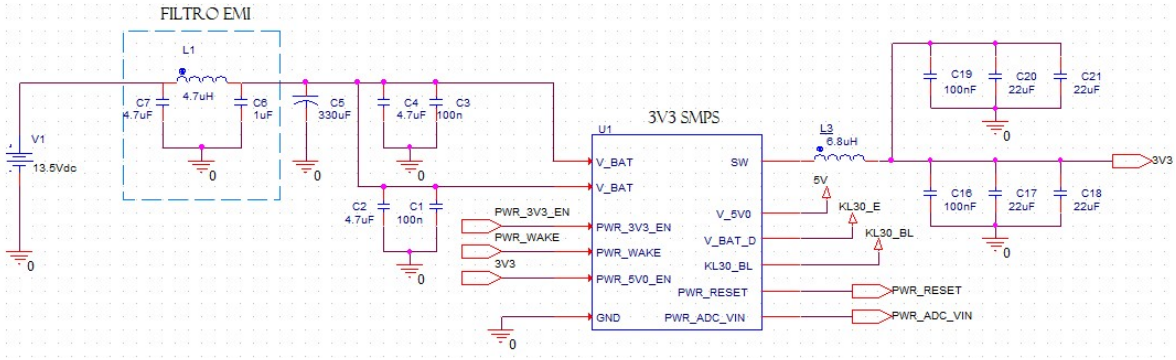

Figura 10 Capacitancia en la Entrada del Filtro

Sumando las capacitancias que se encuentran a la entrada del filtro se obtiene lo siguiente:

C_{In}: (1µF+330µF+4.7µF+4.7µF+0.1µF+0.1µF) = 340.6 µF

Adicional a esto tenemos los siguientes datos:

F_s = 430 KHz >> Frecuencia de operación de la fuente de 3V3
I_{pk} = 3 A >> Máxima corriente en el inductor L_f
Considerando el voltaje de entrada mínimo y la salida de la fuente conmutada podemos calcular el ciclo de trabajo.

V_{inmin} = 6 V
V_{out} = 3.3 V

$$Dmax = \frac{Vout}{Vinmin}$$

Formula 2 Duty Cycle

$$Dmax = \frac{3.3\ V}{6\ V} = 0.55$$

Atenuación requerida del filtro

Para hacer el cálculo sustituimos estos valores en la formula.

$$|Att|dB = 20\log\left(\frac{\frac{3A}{\pi^2(430\ Khz)(340.6\ \mu F)}\sin\pi(0.55)}{1\ \mu V}\right) - 50dB\mu V$$

$$|Att|dB = 14.1\ dB$$

Entonces debemos diseñar un filtro que nos proporcione por lo menos **14.1 dBs** de atenuación.

4.3.4. Selección de capacitancia Cf

Para el determinar el capacitor C_f aplicaremos las siguientes dos fórmulas, la primera C_{fa} asegura que la frecuencia de resonancia del filtro EMI esta al menos una década por debajo de la frecuencia de conmutación de la fuente; y la segunda C_{fb} asegura una adecuada atenuación del filtro EMI, el valor de C_f tomará el valor mayor entre C_{fa} y C_{fb} ya que con esto se asegura que se cumplan ambas condiciones:

$$Cfa = \frac{Cin}{CinLf\left(\frac{2\pi fs}{10}\right)^2 - 1}$$

Formula 3 Selección de Capacitancia Cf

$$Cfb = \frac{1}{Lf}\left(\frac{10^{|Att|dB/40}}{2\pi Fs}\right)^2$$

$$Cfa = \frac{340.6\mu F}{(340.6\ \mu F)(4.7\ \mu H)\left(\frac{2\pi * 430\ KHz}{10}\right)^2 - 1}$$

$Cfa = 2.9\ \mu F \approx 4.7\ \mu F$

$$Cf = \frac{1}{4.7\ \mu H}\left(\frac{10^{|Att|dB/40}}{2\pi 430\ KHz}\right)^2$$

$Cf = 0.147\ \mu F \approx 1\ \mu F$

Siguiendo la recomendación de diseño el valor de capacitancia a utilizar será de 4.7µF para el capacitor C_f.

4.3.5. Capacitor de amortiguamiento Cd

El capacitor de amortiguamiento C_d (damping) nos permite minimizar la impedancia en la frecuencia de resonancia del filtro cuando es muy alta debido a los componentes parásitos LC y al mismo tiempo este capacitor bloquea la componente DC del voltaje de entrada. Se debe considerar utilizar un capacitor electrolítico con bajo ESR (equivalente series resistor). El propósito del ESR_d es reducir el pico de impedancia del filtro en la frecuencia de corte y para calcular su valor se utilizará la siguiente formula:

$$ESRd \approx \sqrt{Lf}/Cin$$

Formula 4 ESRd Capacitor de amortiguamiento

$$ESRd \approx \sqrt{4.7\ \mu H}/304.6\ \mu F = 124\ m\Omega$$

Por lo tanto, tomando como referencia este resultado seleccionaremos un capacitor electrolítico con un valor de ESR menor a 124 mΩ, y como propuesta inicial utilizaremos un capacitor de 330 µF del fabricante Nippon Chemicon ya que este capacitor tiene un valor de 80 mΩ de ESR.

◆STANDARD RATINGS

WV(Vdc)	Cap(μF)	Case code	tanδ	Impedance (Ωmax/20℃, 100kHz)	Rated ripple current (mArms/105℃, 100kHz)	Part No.
35	4.7	D61	0.12	1.35	90	EMZA350ADA4R7MD61G
	10	D61	0.12	1.35	90	EMZA350ADA100MD61G
	10	E61	0.12	0.70	160	EMZA350ADA100ME61G
	22	E61	0.12	0.70	160	EMZA350ADA220ME61G
	33	F61	0.12	0.36	240	EMZA350ADA330MF61G
	47	F61	0.12	0.36	240	EMZA350ADA470MF61G
	100	F80	0.12	0.34	280	EMZA350ADA101MF80G
	100	HA0	0.12	0.16	600	EMZA350ADA101MHA0G
	220	HA0	0.12	0.16	600	EMZA350ADA221MHA0G
	330	JA0	0.12	0.08	850	EMZA350ADA331MJA0G

Tabla 3 Valores de Impedancia en Inductores

4.3.6. Frecuencia de corte del filtro

Para poder determinar la frecuencia de corte que tendrá el filtro utilizaremos la siguiente formula:

$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{(Lf * \text{Cin})}}$$

Formula 5 Frecuencia de Corte

Donde:

$L_f = 4.7\mu H$

$C_{in} = 340.6\ \mu F$

$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{(4.7\mu H * 340.6\mu F)}}$$

$$Fr = 3.977KHz$$

Con este resultado esperamos que la frecuencia de corte empiece a trabajar aproximadamente en los 4 KHz.

4.4. Simulación en ADS

El recurso de la simulación en ADS, tiene como objetivo los siguientes dos puntos:

a) Hay que confirmar que los resultados obtenidos a través del método analítico concuerden con la simulación del modelo del circuito bajo análisis.

b) Optimizar este resultado mediante la herramienta **Tune Parameters** que el programa tiene disponible para este fin.

Una vez capturado el circuito procedemos a realizar un análisis en el dominio de la frecuencia para determinar cómo se atenúa la señal a la entrada del filtro con los valores actuales.

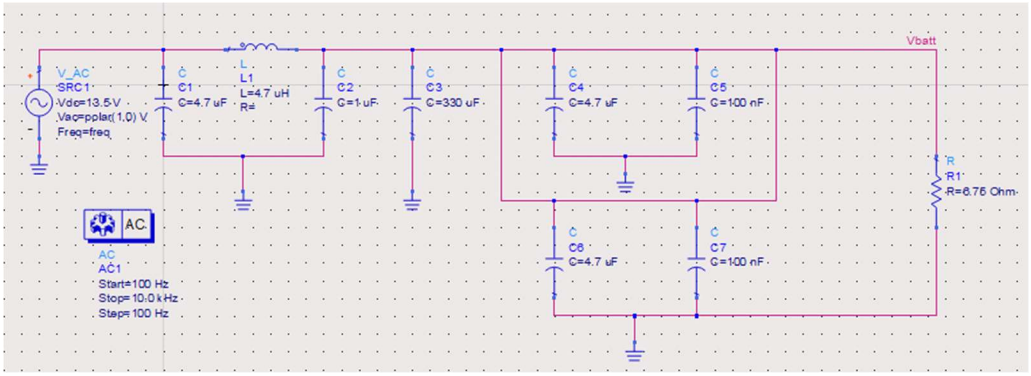

Figura 11 Circuito Filtro EMI batería-Fuente Conmutada

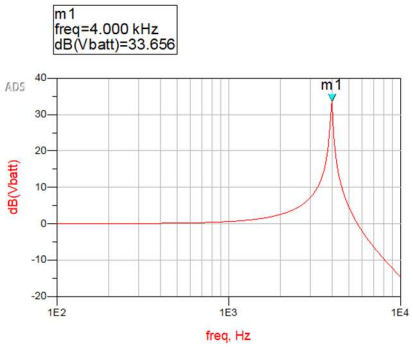

Figura 12 Respuesta Filtro EMI sin Amortiguamiento

En la simulación podemos observar que la frecuencia de corte se encuentra muy próxima a la frecuencia calculada a través del método analítico, sin embargo, podemos observar que en esa frecuencia no existe un amortiguamiento en el filtro. Para aproximarnos más a la respuesta esperada es importante considerar el ERS (Equivalent resistor series) de las capacitancias que forman parte del filtro, principalmente la del capacitor C_d, el cual se utiliza principalmente para este propósito. De acuerdo con los datos de la hoja especificaciones eléctricas del capacitor electrolítico, tiene una impedancia aproximada de 80 mΩ (ver pág. 28).

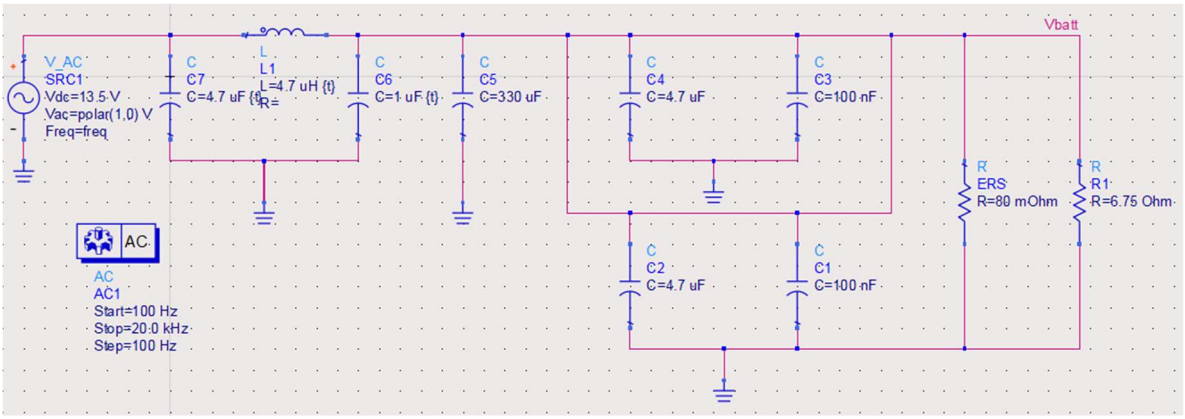

Figura 13 Circuito Filtro EMI batería-Fuente Conmutada-ERS

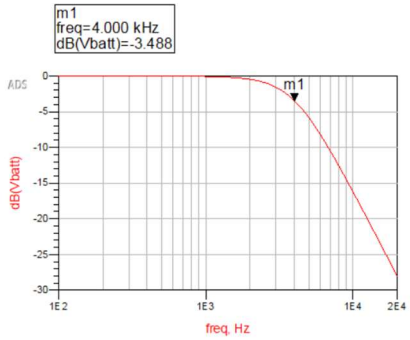

Figura 14 Respuesta Filtro EMI con Amortiguamiento

Considerando estas condiciones se puede observar que la respuesta del filtro tiene un comportamiento amortiguado en la frecuencia de corte y se aproxima a la respuesta esperada del filtro, sin embargo, podemos observar que con estas condiciones en la frecuencia de 3.977 KHz, existe una caída de 3.488 dBs y no los 3 dBs que se deben considerar. Por lo tanto, buscando la frecuencia en la que existe este valor está ahora en 3.8 KHz, lo cual también es una frecuencia de corte aceptable para realizar de manera correcta su función.

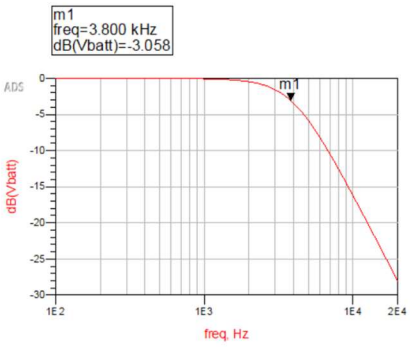

Figura 15 Frecuencia de Corte -3dB

4.4.1. Función Tune Parameters (Optimización)

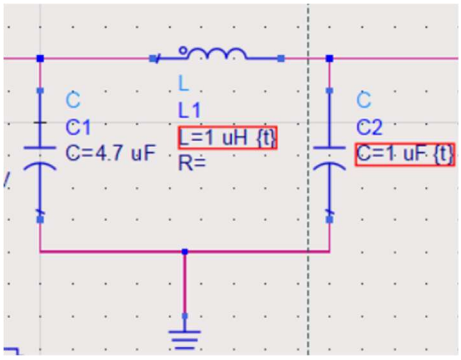

Figura 16 Selección de Componentes

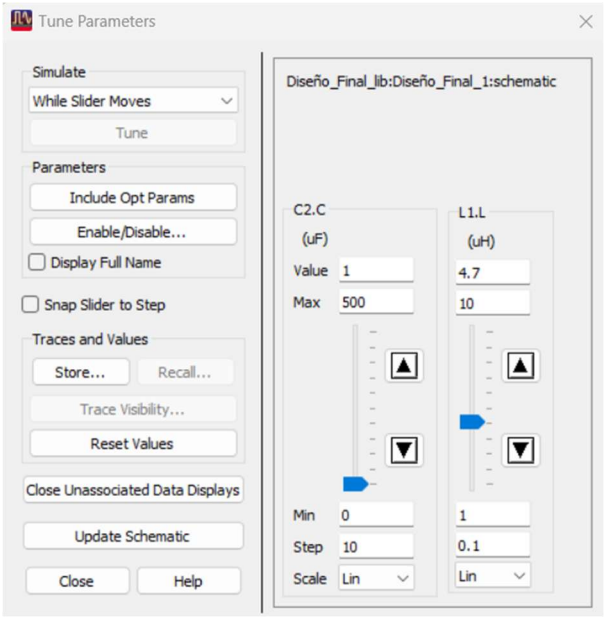

Figura 17 Ajuste de Valor de Componente

El software de simulación cuenta con una herramienta denominada “Tune Parameters” la cual nos permite realizar el modelado del circuito y al mismo realizar ajustes en componentes que se consideran críticos o son principalmente “aportadores” para obtener un cambio en la respuesta del circuito, y de este modo ir observando su comportamiento en tiempo real, por ejemplo, la siguientes imágenes corresponden a la evaluación y análisis del Inductor Lf (L1), uno de los principales elementos del filtro EMI, el cual será sustituido por los valores comerciales disponibles en el mercado o que son de uso más común en este tipo de circuitos, el análisis será llevado desde el valor 1µH hasta 10 µH, y de esta manera podremos ir observando si el desempeño del circuito cumple con las expectativas o es congruente con los resultados obtenidos a través del método analítico.

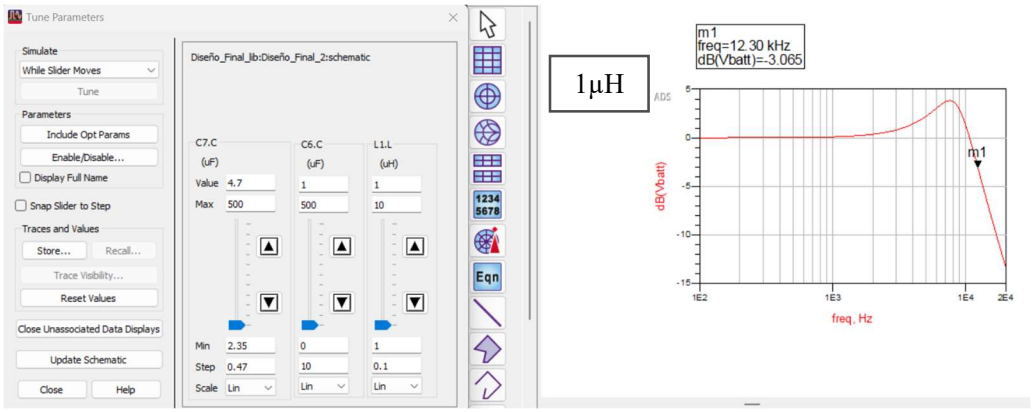

Figura 18 Respuesta Inductor 1 µH

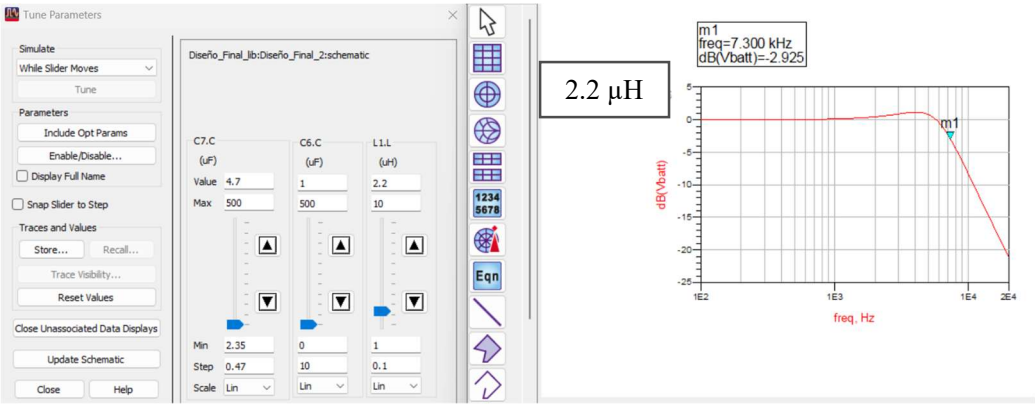

Figura 19 Respuesta Inductor 2.2 µH

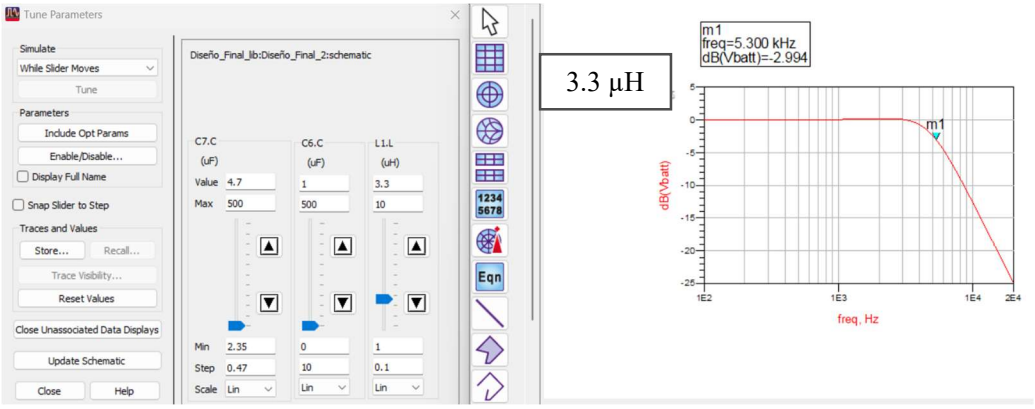

Figura 20 Respuesta Inductor 3.3 µH

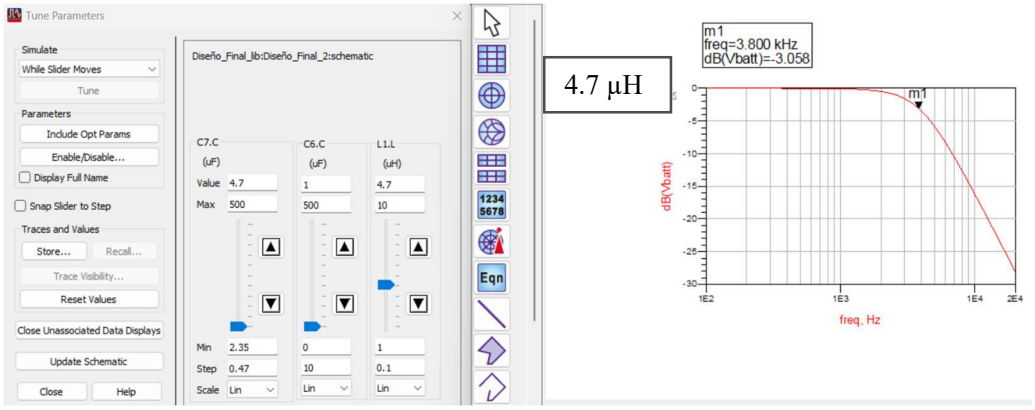

Figura 21 Respuesta Inductor 4.7 µH

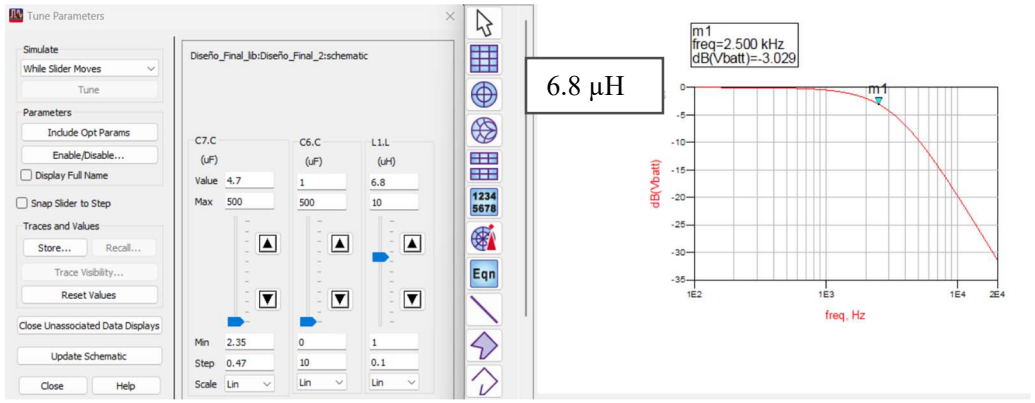

Figura 22 Respuesta Inductor 6.8 µH

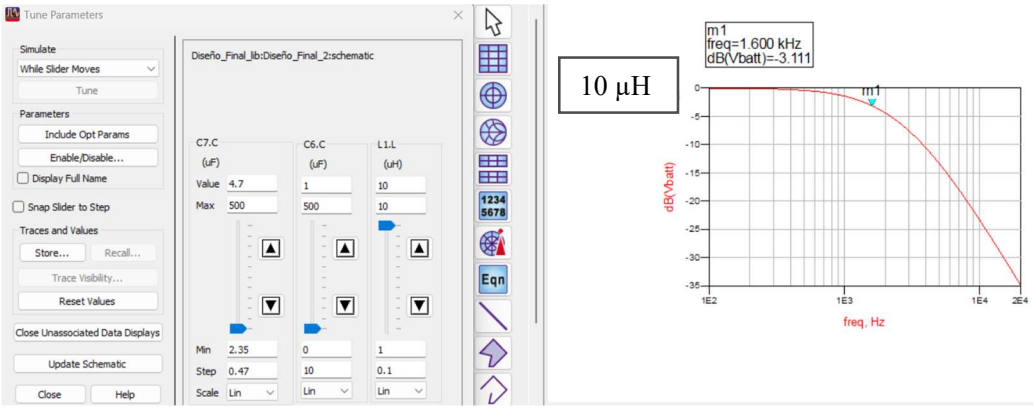

Figura 23 Respuesta Inductor 10 µH

Desde la figura 18 hasta la figura 23, se puede observar la variación de la respuesta del filtro EMI, solo modificando el valor del inductor Lf, sin embargo, es posible realizar el mismo análisis con 2 o más componentes simultáneamente. Una vez que se determina cual es el valor del componente o los componentes que tienen mejor desempeño en el circuito se procede a cerrar la función Tune Parameters y el esquemático se actualiza con los valores seleccionados (en caso de que se seleccione la actualización de los valores).

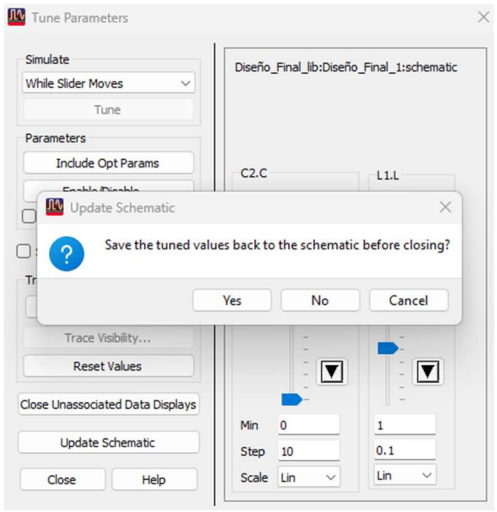

Figura 24 Confirmación de Cambios

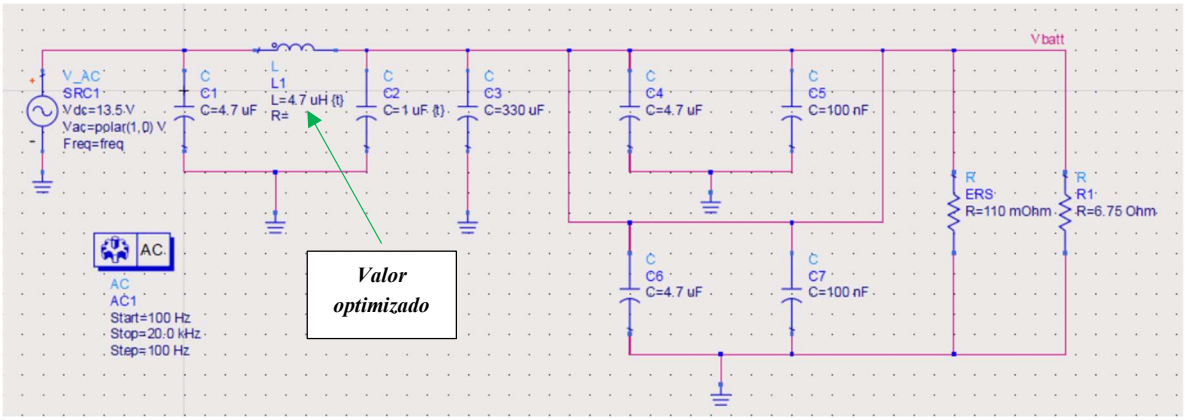

Figura 25 Circuito Optimizado

La figura 25 muestra el circuito con el valor del Lf que ha sido seleccionado como la mejor opción en su desempeño.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Resultados

Primeramente, se presentan los resultados obtenidos del método analítico para los valores iniciales a considerar del filtro EMI.

Parámetro	Valor obtenido
Selección de Inductancia Lf	4.7 µH
Atenuación Requerida del Filtro	19.1 dB
Selección de Capacitancia Cf	4.7 µF
Capacitor de Amortiguamiento Cd	330 µF
Frecuencia de Corte	3.977 KHz

Tabla 4 Valores Iniciales del filtro EMI

La tabla 5 nos muestra el resultado del desempeño de cada una de las propuestas de diseño a través del análisis en el dominio de la frecuencia.

Valor	Frecuencia de Corte	Amortiguamiento	Corriente Máxima	Comportamiento
1 µF	12.3 KHz	Poco amortiguado	8.8 A	No Aceptable (1)
2.2 µF	7.3 KHz	Amortiguado	5.8 A	Aceptable
3.3 µF	5.3 KHz	Amortiguado	5.0 A	Aceptable
4.7 µF	3.8 KHz	Amortiguado	4.2 A	Aceptable
6.8 µF	2.5 KHz	Sobreamortiguado	3.4 A	No Aceptable (2)
10 µF	1.6 KHz	Sobreamortiguado	2.5 A	No Aceptable (2)

Tabla 5 Análisis de Inductores de Valores Comerciales

(1) Esta condición no es aceptable debido a que el filtro causa un efecto de atenuación muy bajo entre las frecuencias de 1 KHz y 10 KHz.
(2) Esta condición no es aceptable debido a que la atenuación del filtro empieza a actuar a por debajo de los 4KHz, por otra parte, la corriente máxima que puede soportar el inductor es menor a la requerida por la fuente conmutada en operación.

Tanto en el método analítico como en las simulaciones podemos observar que los componentes que conforman el filtro tendrán una respuesta similar a la esperada.

De la tabla 5 podemos identificar que hay tres componentes que tendrán buen desempeño en el circuito para esta aplicación. Sin embargo, considerando la corriente máxima que puede soportar cada una de las opciones del inductor, podemos observar que el inductor de 4.7 µH es la mejor opción para este diseño ya que el componente puede soportar la corriente máxima que estará circulando a través de él [12]. La siguiente imagen presenta una parte de la hoja de especificaciones de una parte que puede ser completamente funcional con referencia a los resultados deseados.

Spec No. J(E)TE243B-9102K-01 Reference Only 2/16

MDH7045C Type 電気的個別性能 Electrical Specifications

部品番号 Customer's Part No.	番号 Part No.	インダクタンス Inductance 公称値 Nominal Value (μH)	許容差 Tolerance (%)	直流抵抗 DC Resistance 代表値 Typical Value (mΩ)	許容差 Tolerance (%)	定格電流 (インダクタンス変化に基づく場合) Rated Current Based on Inductance Change (A) Max.	(A) Typ.	定格電流 (温度上昇に基づく場合) Rated Current Based on Temperature rise (A) Max.	(A) Typ.
	MDH7045C-1R0NB=P3	1.0	±30	9.0	±30	8.8	11.0	4.7	5.9
	MDH7045C-1R5NB=P3	1.5	±30	10	±30	7.1	8.9	4.3	5.4
	MDH7045C-2R2NB=P3	2.2	±30	13	±30	5.8	7.3	4.1	5.1
	MDH7045C-3R3NB=P3	3.3	±30	16	±30	5.0	6.2	3.4	4.3
	MDH7045C-4R7NB=P3	4.7	±30	18	±30	4.2	5.2	3.0	3.8
	MDH7045C-6R8NB=P3	6.8	±30	22	±30	3.4	4.3	2.8	3.5
	MDH7045C-100MA=P3	10	±20	33	±30	2.5	3.1	2.6	3.2

Figura 26 Hoja de Datos del Inductor Seleccionado

5.2. Discusión

A través del desarrollo de la metodología utilizada en esta investigación se confirma la similitud entre los resultados del método analítico y la utilización de modelos matemáticos para observar el comportamiento de los filtros EMI, en ambos casos podemos observar las características del filtro EMI en operación bajo diferentes propuestas de diseño y determinar así cual es la mejor opción o cual tendrá el mejor desempeño en operación de acuerdo con la aplicación que se encuentra en desarrollo, y al mismo tiempo identificar y descartar las opciones que están fuera del comportamiento deseado.

En cierta forma, la metodología puede garantizar que los resultados obtenidos serán similares a los resultados obtenidos en un prototipo físico durante la etapa de validación de diseño, sin embargo, es importante que todo el proceso de validación del diseño sea llevado a cabo en su totalidad para asegurar la armonía del circuito EMI con su entorno funcional o cuando algún cambio en el diseño del producto sea requerido.

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones

En conclusión, se considera actualmente que un correcto diseño y desarrollo de un filtro EMI dentro de cualquier sistema electrónico es de vital importancia para su construcción, función y comercialización. Es por esta razón que el presente caso de estudio permitió desarrollar una metodología que proporciona una propuesta aceptable de diseño de filtros EMI en relación con los requerimientos del cliente, estándares de diseño e ingeniería del producto. Al mismo tiempo, se verificó la relación del método analítico con la simulación de circuitos eléctricos y la similitud en los resultados obtenidos.

Por una parte, el método analítico, permite desarrollar una propuesta particular en el diseño de acuerdo a características iniciales y por el otro, las simulaciones, brindan una comprobación y optimización de este, reafirmando así la practicidad de la metodología, aunque el presente caso de estudio no aborda el análisis de todos los tipos de filtros que en la actualidad se utilizan para mitigar y solucionar este problema, la propuesta presentada satisface y confirma que el uso de filtros diseñados con componentes pasivos como lo son los inductores y los capacitores aún siguen siendo una opción recomendada debido a su baja complejidad de diseño, costo y efectiva respuesta para reducir emisiones radiadas y conducidas.

La puesta en marcha de esta metodología permitirá reducir el tiempo y los costos del diseño de filtros EMI y al mismo tiempo determinar un concepto inicial de diseño que aportará mayor certeza de éxito durante la etapa de validación del producto final en conjunto con su entorno eléctrico y electromagnético.

6.2. Trabajo Futuro

Aunque la metodología abordada en este caso de estudio no se puede considerar como una única herramienta para el diseño de filtros EMI, puede sustentar las bases para continuar con el análisis y desarrollo de filtros de orden mayor o considerar la utilización de nuevas tecnologías, ya que durante esta investigación solo fueron analizados filtros de tercer orden [13].

Como propuesta de futuras aportaciones a este caso de estudio se pueden integrar a la metodología análisis de circuito de filtros activos para aplicaciones que requieren de un desempeño de mayor precisión, por ejemplo, puede ser utilizada la metodología para desarrollo de circuitos de aplicaciones que requieren mayor cuidado como dispositivos de seguridad pasiva y activa en los vehículos tales como sistemas de frenado automática, sistemas de bolsas de aire, sistemas de monitoreo de presión de neumáticos, entre otros. Otra propuesta sería incluir en el análisis mayor número de elementos del circuito o de un mayor orden, así como también crear un modelo de las cargas que son aplicadas directamente a las líneas de transmisión del filtro EMI a fin de analizar el comportamiento durante los diversos comportamientos que pueden tener estas durante su operación.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] «History of Filter Theory,» Quadrivium, [En línea]. Available: https://www.quadrivium.nl/history/history.html#pupin1. [Último acceso: 18 May 2022].

[2] 38West, «The Beginning of the EMI Field,» EMI SOLUTIONS INC, 29 October 2016. [En línea]. Available: https://4emi.com/the-history-of-emi/beginning-emi-field/. [Último acceso: 02 May 2022].

[3] T. Corporation, «How does an input EMI filter work?,» TDK-Lambda UK, [En línea]. Available: https://www.emea.lambda.tdk.com/uk/faq/question/99#:~:text=Most%20electronics%20contains%20an%20EMI,cause%20interference%20with%20other%20devices.. [Último acceso: 25 January 2023].

[4] QueSignificados.org, «Qué es un filtro PI?,» QueSignificados.org, [En línea]. Available: https://quesignificado.org/que-es-un-filtro-pi/. [Último acceso: 14 Junio 2022].

[5] L. Sevgi, «A practical guide to EMC engineering. : , 2017.,» Boston, Artech House, 2017, pp. 2-4.

[6] R. J. J. Kenneth Wyatt, de *Electromagnetic Compatibility Pocket Guide Key EMC Facts, Equations, and Data*, Raleigh, NC, SciTech Publishing, 2013, pp. 4-5.

[7] A. E. a. B. B. F. A. Kharanaq, «Modeling of Conducted Emissions for EMI Analysis of Power Converters: State-of-the-Art Review,» *IEEE Access,* vol. 8, nº October 28, 2020, p. 2, 2020.

[8] EcuRed, «Reactancia Eléctrica,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Reactancia_el%C3%A9ctrica. [Último acceso: 02 Febrero 2023].

[9] V. Lu, «Understanding the Impact of ESR on Ceramic Capacitor Selection,» 04 September 2024. [En línea]. Available: https://blog.knowlescapacitors.com/blog/understanding-the-impact-of-esr-on-ceramic-capacitor-selection. [Último acceso: 04 October 2024].

[10] B. A. a. B. Spence, «SMPS Input Filter Design: Negative Resistance Approach,» 30 April 2018. [En línea]. Available: https://incompliancemag.com/article/smps-input-filter-design-negative-resistance-approach/. [Último acceso: 06 February 2023].

[11] Y. Z. G. P. Alan Martin, "Simple Success With Conducted EMI From DC-DC Converters," Texas Instruments Incorporated, Dallas, Texas, 2012.

[12] Murata MFG.CO., LTD, «Chip Coil (Chip Inductor) for Automotive powertrain/safety equipment,» Murata.co.jp.

[13] Interference Technology, "Interference Technology," EMI Filtering 101: Understanding the Basics, 16 02 2023. [Online]. Available: https://interferencetechnology.com/emi-filtering-101-understanding-the-basics/. [Accessed 20 08 2024].