



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN RESONADORES NUCLEARES
MAGNÉTICOS Y SUS EFECTOS EN LA CONTINUIDAD DE SERVICIO EN
RECINTOS HOSPITALARIOS**

Profesor guía:

Jonathan Agüero Ferrera

Eladio Ignacio Rojas Robles

José Jedeón González Pallero

Copiapó, Chile 2025



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN RESONADORES NUCLEARES
MAGNÉTICOS Y SUS EFECTOS EN LA CONTINUIDAD DE SERVICIO EN
RECINTOS HOSPITALARIOS**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniero de Ejecución en Electricidad

Profesor guía:

Jonathan Agüero Ferrera

Eladio Ignacio Rojas Robles

José Jedeón González Pallero

Copiapó, Chile 2025

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a mis profesores, quienes, con su paciencia y vastos conocimientos, encendieron la chispa de la curiosidad y la excelencia en el complejo campo de la Electricidad y la Calidad de Energía. Vuestra dedicación es el cimiento de nuestra formación.

Y muy especialmente, a las futuras generaciones de estudiantes de ingeniería eléctrica, con quienes comparto la fascinación por las ondas, los armónicos y la optimización de los sistemas de potencia.

Que esta tesis no sea un punto final, sino un punto de partida. Que nos recuerde la obligación constante de superarnos, de cuestionar el statu quo y de investigar sin tregua las fronteras de lo desconocido.

Que el impulso por aprender cosas nuevas e innovar sea siempre nuestra fuente de energía más fiable.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis profesores guía, Jonathan Agüero Ferrera y Juan Astorga Gómez, por su orientación, dedicación y rigurosidad académica durante el desarrollo de esta tesis. Su experiencia profesional y su constante disposición para compartir conocimientos fueron fundamentales para la correcta ejecución de este trabajo.

Agradezco también a mi familia quienes, con su apoyo incondicional, comprensión y paciencia me acompañaron durante todo este proceso académico. Su confianza en mí ha sido una motivación permanente y un pilar esencial para alcanzar esta etapa.

Finalmente, extendiendo mi reconocimiento a todas las personas que, de manera directa o indirecta, colaboraron en la realización de esta investigación.

Eexpresóo mi agradecimiento primeramente a Dios por su apoyo y fuerzas para completar este proceso académico y a mis profesores guía, Jonathan Agüero Ferrera y Juan Astorga Gómez, por guiarnos en esta investigación y apoyarnos con su experiencia.

Agradezco también a mis padres los cuales con mucho esfuerzo me han apoyado en mis estudios incondicionalmente, doy gracias por las enseñanzas y valores dados las cuales son un pilar en mi formación personal y académica.

INDICE

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
INDICE	V
INDICE DE TABLAS DE DATOS	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Planteamiento del problema	2
1.4 Alcances.....	3
1.4 Antecedentes	4
1.5 Justificación.....	4
1.6 Metodología	5
CAPITULO II	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1 Calidad de energía eléctrica.....	6
2.1.1 Calidad de Servicio.....	7
2.1.2 Calidad de Producto.....	7
2.1.3 Calidad Comercial	7
2.2 Variables eléctricas	8
2.2.1 Voltaje (V).....	8
2.2.2 Corriente (I)	8
2.3.1 Ruido eléctrico.....	10
2.4 Los armónicos.....	11

2.4.1 Definición Formal de Armónicos	11
2.4.2 Análisis Matemático: Descomposición de la Señal	11
2.4.3 Tipos de Armónicos y Clasificación.....	12
2.4.4 Clasificación por Orden (Pares, Impares).....	13
2.4.5 Clasificación por Secuencia de Fase (positiva, negativa, cero o triplen) ...	14
2.4.6 Interarmónicos	15
2.4.7 Subarmónicos.....	15
2.5 Fuente generadora de armónicos.....	15
2.6 Filtro armónico.....	16
2.6.1 Filtros pasivos.....	16
2.6.2 Filtros activos.....	17
2.6.3 Filtros Híbridos.....	18
2.7 Normativa y estándares.....	19
2.7.1 Normas Internacionales (IEEE Std 519, Serie IEC 61000)	20
2.7.2 Normativas Nacionales (NTCSD)	21
2.7.3 Regulación de frecuencia.....	21
2.7.4 Distorsión armónica de corriente para usuarios de baja tensión.....	22
2.8 Sistemas eléctricos en recintos hospitalarios	23
2.9 Componentes de un resonando magnético nuclear.....	24
CAPÍTULO III.....	29
ANÁLISIS ARMÓNICOS.....	29
3.1 Análisis y evaluación de los datos obtenidos.....	29
3.2 Análisis comparativos de la distorsión armónica presente en un sistema hospitalario público con los límites exigidos por la N.T.C.S.D	32
3.3 Análisis comparativos de la distorsión armónica presente en un sistema de una clínica privada con los límites exigidos por la N.T.C.S.D	34
3.4 Reflexiones iniciales del análisis	36
3.5 Evaluación de los armónicos del sistema eléctrico del recinto hospitalario....	36
3.6 Evaluación de los armónicos del sistema eléctrico de la clínica privada.	40
3.7 Correlación entre la Distorsión Armónica y la Fiabilidad Operacional del RMN46	

3.7.1 Distorsión Armónica y su Relación con la Operación del RMN.....	46
3.7.2 Impacto en la Calidad de Imagen y la Precisión Diagnóstica.....	47
3.7.3 Riesgo de Interrupciones y Fallos de Servicio.....	47
CAPÍTULO IV	48
MITIGACIÓN PARA LAS ARMÓNICAS EN LA RED ELÉCTRICA	48
4.2 Dimensionamiento del filtro activo de potencia.	52
4.3 Dimensionamientos de filtros activo de potencia para recinto hospitalario y clínico.	53
4.4 Resultados de la mitigación del filtro activo luego de la simulación en MULTISIM.14.	54
4.4.1 Resultado de simulación en recinto hospitalario:	54
4.4.1 Resultado de simulación en recinto clínico	56
CAPÍTULO V	59
CONCLUSIONES.....	59
5.1 Conclusiones Fundamentales y Juicio Técnico	59
5.2 Proyecciones e Implicaciones	60
BIBLIOGRAFÍA.....	62

ÍNDICE DE FIGURA

Figura N° 2.1 Forma de onda sinusoidal.....	9
Figura N° 2.2 Tipos de onda de frecuencias	10
Figura N° 2.3 Tipos de filtros pasivos.	17
Figura N° 2.4 Conexión de filtro activo.....	18
Figura N° 2.5 Filtro hibrido.	19
Figura N° 2.6 sección transversal del dipolo del criostato.....	25
Figura N° 2.7 corte transversal que muestra las capas internas de un electroimán superconductor	26
Figura N° 2.8 núcleo del magneto donde se encuentra las bobinas gradientes y de transmisión de señal RF	26
Figura N° 2.9 partes de un resonador magnético	27
Figura N° 3.1 Gráfico espectro de Fourier en hospital	31
Figura N° 3.2 Gráfico espectro de Fourier en clínica	31
Figura N°3.3 Placa de datos del equipo RNM.....	36
Figura N° 3.4 Onda sinusoidal pura.....	39
Figura N°3.5 Forma de onda distorsionada por presencia de armónicas	40
Figura N°3.6 Placa de datos del equipo RMN.....	41
Figura N°3.7 Forma de onda de la componente fundamental.....	44
Figura N°3.8 Forma de onda distorsionada por todos los armónicos generados	44
Figura N° 3.9 Formas de ondas generadas por cada frecuencia armónica de forma individual. .	45
Figura N°4.1 imagen de la señal con un THDi del 103%.....	54
Figura N°4.2 imagen de la señal con una distorsión menor a 20%.....	55
Figura N°4.3 Figura mitigando los armónicos más presentes.....	56
Figura N°4.4 imagen de la señal con distorsión del 76,24%	57
Figura N°4.5 imagen de la señal con una distorsión menor a 20%.....	57

INDICE DE TABLAS DE DATOS

Tabla. N°2.1 Orden y Secuencia de Armónico.....	12
Tabla N° 2.2 Intervalos para registrar las variaciones de frecuencia.....	22
Tabla N° 2.3 Limites Distorsión Armónica de corriente en el PCC de los Usuarios en Baja Tensión.....	23
Tabla 3.1 valor máximo permitidos de la distorsión armónica.....	30
Tabla N° 3.2 tabla comparativa de los armónicos múltiplos de 3 con la normativa.....	32
Tabla N° 3.3 tabla comparativa de los armónicos impares con la normativa.....	33
Tabla 3.4 tabla comparativa de armónicos múltiplos de 3 con la normativa.....	34
Tabla N° 3.5 Tabla comparativa de armónicos impares con la normativa.....	35
Tabla N° 3.6 características de los armónicos medidos en el hospital.....	37
Tabla N°3.7 indica el nivel de corriente de los armónicos	41
Tabla N°4.1 Comparación entre filtro activo y filtro pasivo.....	50

RESUMEN

El proyecto abordó la necesidad de gestionar la Distorsión Armónica de Corriente (THD-I) como un factor de riesgo operativo en la infraestructura crítica de salud. El Objetivo General fue evaluar, cuantificar y mitigar el impacto generado por los Resonadores Magnéticos Nucleares (RMN), estos equipos se caracterizan por ser una carga no lineal, lo que afecta directamente la calidad del suministro eléctrico y compromete seriamente la confiabilidad de su función diagnóstica.

El desarrollo metodológico siguió una secuencia lógica y progresiva. En el Capítulo I se establece la necesidad de abordar la Distorsión Armónica de Corriente (THD-I) como un riesgo crítico, las deficiencias en la calidad de energía causan interrupciones del servicio y comprometen la precisión de las imágenes generadas por el Resonador Magnético Nuclear (RMN), el Capítulo II Se consolidan los fundamentos de la Calidad de Energía Eléctrica también se aborda la Serie de Fourier para el análisis y análisis de las formas de onda distorsionadas, y se revisa la norma aplicable, la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (NTCS). Capítulo III: Análisis Armónico, el procesamiento espectral confirma la existencia de una condición crítica revelando niveles de distorsión armónica exagerados, demostrando un incumplimiento normativo significativo y la distorsión elevada se relacionó con fallas por sobrecalentamiento e inestabilidad de tensión, afectando la confiabilidad del RMN. El Capítulo IV: Se identificó y diseñó el Filtro Activo de potencia como la alternativa más adecuada esto por su capacidad de compensación dinámica y efectividad para evitar fenómenos de resonancia Las simulaciones demostraron la robustez de la solución, logrando reducir la contaminación armónica a niveles aceptables, finalmente, el Capítulo V se demuestra el cumplimiento pleno de los objetivos planteados y la implementación del FAP es una medida indispensable para una correcta continuidad del servicio, y no solo una mejora marginal.

**CALIDAD DE ENERGÍA - ARMÓNICOS - RESONADOR MAGNÉTICO
NUCLEAR - THD-I - FILTRO ACTIVO PARALELO - CONTINUIDAD DE
SERVICIO.**

ABSTRACT

The project addressed the need to manage Total Harmonic Distortion (THD-I) as an operational risk factor in critical healthcare infrastructure. The overall objective was to assess, quantify, and mitigate the impact generated by Nuclear Magnetic Resonance (NMR) equipment, which is characterized by being a non-linear load, directly affecting the quality of the power supply and seriously compromising the reliability of its diagnostic function.

The methodological development followed a logical and progressive sequence. Chapter I establishes the need to address Total Harmonic Distortion (THD-I) as a critical risk, as deficiencies in power quality cause service interruptions and compromise the accuracy of the images generated by the Nuclear Magnetic Resonance (NMR) device. Chapter II consolidates the fundamentals of Power Quality and also addresses the Fourier Series for the analysis and analysis of distorted waveforms, and reviews the applicable standard, the Technical Standard for Service Quality for Distribution Systems (NTCSD).

Chapter III: Harmonic Analysis, spectral processing confirms the existence of a critical condition revealing exaggerated harmonic distortion levels, demonstrating significant regulatory non-compliance, and the high distortion was related to overheating and voltage instability failures, affecting the reliability of the NMR. Chapter IV: The Active Power Filter was identified and designed as the most suitable alternative due to its dynamic compensation capacity and effectiveness in preventing resonance phenomena. Simulations demonstrated the robustness of the solution, reducing harmonic contamination to acceptable levels. Finally, Chapter V demonstrates full compliance with the objectives set and that the implementation of the APF is an indispensable measure for the proper continuity of service, and not just a marginal improvement

**POWER QUALITY - HARMONICS - NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE -
THD-I - PARALLEL ACTIVE FILTER - SERVICE CONTINUITY.**

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Este estudio se enfocará en examinar la distorsión armónica generada en los recintos hospitalarios y cómo una calidad energética fuera de estándar puede producir perturbaciones eléctricas que afectan directamente la continuidad del servicio en las salas del área diagnóstica, tales como radiología, imagenología y resonancia magnética nuclear (RMN). Estas dependencias concentran equipos médicos de alta precisión que requieren un suministro eléctrico estable, continuo y libre de distorsiones para asegurar la fidelidad de los diagnósticos y la seguridad de los pacientes.

En el marco de esta investigación, se cuenta con dos muestreos experimentales obtenidos a partir de mediciones de distorsión armónica en instalaciones hospitalarias reales, cuyos resultados fueron procesados y analizados mediante sus espectros de Fourier, lo que permite identificar, cuantificar y comparar los distintos órdenes armónicos presentes en la red eléctrica. Estos análisis buscan establecer una correlación entre los niveles de distorsión observados y los eventos de inestabilidad eléctrica o fallas operativas en equipos de imagenología, fenómeno que se ha detectado de forma repetitiva en múltiples centros hospitalarios.

El resonador nuclear magnético (RMN) constituye una de las cargas más críticas y sensibles a la calidad de la energía, ya que su funcionamiento depende de la estabilidad del campo magnético principal (B_0) y de la precisión de los gradientes magnéticos. Las fluctuaciones generadas por distorsión armónica pueden alterar estos campos, generando artefactos en las imágenes, errores en la resolución espacial y, en casos severos, interrupciones del ciclo de adquisición que obligan a repetir exámenes, afectando la disponibilidad del equipo y los tiempos de atención.

El análisis de la calidad de energía se apoyará en las normativas internacionales vigentes, entre ellas la IEEE 519, que establece los límites máximos de distorsión armónica admisible en sistemas de distribución eléctrica, Además, se considerarán las disposiciones de seguridad y desempeño definidas en la IEC 60601-1 para equipos electro médicos, y

las recomendaciones de la NFPA 99 sobre sistemas eléctricos esenciales en instalaciones de salud.

1.1 Objetivo general

Evaluar la presencia y magnitud de distorsión armónica de corriente en resonadores nucleares magnéticos y contrastarla con normativas de calidad de energía, identificando riesgos en la operación y proponer medidas de mitigación.

1.2 Objetivos específicos

- Revisar estudios y literatura científica sobre la influencia de los armónicos en equipos médicos de alta precisión, para sustentar la relación entre distorsión armónica y fallos operativos o de generación de imagen.
- Analizar la distorsión armónica de corriente en resonadores nucleares magnéticos, identificando los armónicos predominantes y sus magnitudes
- Comparar los valores de distorsión armónica obtenidos con los límites establecidos en normativas internacionales (IEEE 519, IEC 61000) y nacionales, evaluando su cumplimiento.
- Proponer recomendaciones técnicas de mitigación, incluyendo la aplicación de filtros armónicos y la adopción de criterios normativos adaptados al contexto hospitalario.

1.3 Planteamiento del problema

La necesidad de este estudio está dada, de una problemática de los hospitales modernos ya que en estos se concentran equipos altamente sensibles a la calidad de suministro eléctrico, entre ellos los resonadores nucleares magnéticos, cuya calidad de imagen depende críticamente de la estabilidad de la red y la ausencia de armónicos. La presencia

de distorsión armónica puede generar artefactos, ruido y errores en la captura de imágenes, afectando la confiabilidad diagnóstica y obligando a repetir estudios, lo que repercute directamente en los costos operativos, tiempos de atención y seguridad del paciente.

Actualmente, en Chile y Latinoamérica existe escasa investigación comparativa sobre los efectos de los armónicos en sistemas hospitalarios públicos y privados. Este vacío limita la generación de lineamientos técnicos para garantizar la continuidad operativa y la calidad de los diagnósticos en distintos contextos de infraestructura. Por ello, el presente estudio resulta necesario y pertinente, ya que permitirá vincular la teoría normativa y clínica con escenarios reales de operación hospitalaria, aportando una base técnica para la toma de decisiones en el diseño y operación de instalaciones eléctricas críticas en el sector salud.

1.4 Alcances

El presente estudio se desarrollará en el contexto de los recintos hospitalarios, específicamente enfocado en los sistemas eléctricos que alimentan equipos de alta sensibilidad como los resonadores nucleares magnéticos (RNM). El alcance del trabajo se centra en analizar la distorsión armónica y su efecto en la continuidad de servicio y el desempeño electromagnético del resonador, considerando tanto los aspectos normativos como técnicos que determinan la calidad de la energía en este tipo de instalaciones críticas.

El análisis comprenderá la evaluación teórica y el procesamiento de datos eléctricos medidos en puntos representativos del sistema de alimentación del resonador nuclear magnético, tomando como referencia las normativas IEC 61000-4-30, IEC 61000-3-13, IEEE 519 y las normas técnicas chilenas asociadas a la calidad y continuidad del suministro eléctrico. Los parámetros eléctricos analizados incluirán el contenido armónico de corriente, la distorsión total (THD), y las variaciones que puedan comprometer la operación estable del equipo médico.

En caso de detectarse niveles de distorsión armónica fuera de los límites establecidos, se desarrollarán propuestas de mitigación, sustentadas en fundamentos técnicos y normativos, que incluirán:

- Diseño conceptual de filtros armónicos sintonizados, considerando las características de la carga y las frecuencias predominantes.
- Revisión y alineamiento con las recomendaciones del fabricante del resonador y las especificaciones de calidad de energía requeridas por la tecnología de imagen médica.

1.4 Antecedentes

Este proyecto consiste en un estudio teórico orientado a analizar la distorsión armónica de corriente (THDi) generada por resonadores nucleares magnéticos (MRI) en entornos hospitalarios. Los resultados se compararán con los límites establecidos por IEEE 519 e IEC 61000 y normativa técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución. Evaluando su impacto esperado en la operación hospitalaria y en la calidad de las imágenes diagnósticas, con base en estudios clínicos. El estudio establecerá escenarios representativos de un hospital público y una clínica privada, permitiendo un análisis comparativo que nos permita comprender y estudiar el estado de distorsión armónica presente en estos recintos, debido a la fuerte tendencia así la electromedicina y el uso de tecnología en aplicaciones médicas.

1.5 Justificación

El estudio se debe a la escasa información sobre los armónicos y los efectos que generan en los equipos de resonancia magnética nuclear, como en los recintos hospitalarios donde existen equipos que controlan y ayudan a generar diagnóstico a las personas para chequear su estado de salud. con esta información es necesario realizar un estudio armónico con el fin de evaluar el daño a la red por las perturbaciones armónicas que se pueden generar, para lograr con esto medidas de mitigación para el correcto funcionamiento de los equipos de imagenología.

1.6 Metodología

Para llevar a cabo un estudio se realizará el análisis de los datos obtenidos en conjunto de la ficha técnica del equipo de resonancia magnética, además se realizará simulación con el software NI MULTISIM 14.1.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán los fundamentos teóricos y conceptos clave relacionados con los parámetros eléctricos, enfatizando la relevancia de la calidad de energía dentro del contexto del estudio. Se analizarán los principales factores que inciden en su deterioro, como la presencia de armónicos de corriente y las posibles técnicas de mitigación, entre ellas el uso de filtros armónicos. Asimismo, se presentará una revisión de las normativas internacionales y nacionales que establecen los límites permisibles de distorsión armónica, junto con el propósito técnico y operativo que cada una de ellas persigue para garantizar un suministro eléctrico confiable, eficiente y compatible con los requerimientos de equipos de alta precisión, como los utilizados en el ámbito de la investigación.

2.1 Calidad de energía eléctrica.

El término de calidad de energía es utilizado para describir una combinación de características a través de las cuales el producto y el servicio del suministro eléctrico corresponden a las expectativas del cliente.

Se refiere a la capacidad del suministro eléctrico para mantener características estables y dentro de los estándares aceptables, tales como tensión, frecuencia y forma de onda, mientras se minimizan perturbaciones y distorsiones. La calidad de energía es crucial porque influye directamente en el funcionamiento y la durabilidad de los equipos eléctricos y electrónicos. Pero su definición y gestión son complejas debido a la variedad de parámetros involucrados y las múltiples variables que pueden influir en ella y las expectativas de calidad pueden variar ampliamente según el tipo de equipo o aplicación, lo que complica la estandarización.

Las principales causas que afectan a la calidad de la energía eléctrica son:

- Armónicos, Inter armónicos y Sub-armónicos.

- Un mal factor de potencia.
- Fluctuaciones de voltaje y frecuencia.

La norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS) define en el artículo 1-7 algunas definiciones de Calidad de Servicio, del producto y de suministro. (Comisión nacional de energía. 2024)

2.1.1 Calidad de Servicio

De acuerdo a la NTSyCS (2025) la calidad de servicio es el “atributo de un sistema eléctrico determinado conjuntamente por la Calidad del Producto, la Calidad del Suministro y la Calidad del Servicio Comercial, entregado a sus distintos usuarios y clientes”.

2.1.2 Calidad de Producto

La calidad de producto se refiere al componente de la Calidad de Servicio que permite calificar el producto entregado por los distintos agentes del Sistema Interconectado (SI) y que se caracteriza, entre otros, por la magnitud, la frecuencia fundamental y la contaminación de la onda de tensión instantánea (NTSyCS, 2024).

2.1.3 Calidad Comercial

De acuerdo a la NTCS (2024) la Calidad Comercial es “un componente de la Calidad de Servicio que permite calificar el Servicio Comercial y la Calidad de Atención prestada por la Empresa Distribuidora a sus Clientes o Usuarios, y que se caracteriza, entre otros, por el plazo de restablecimiento del servicio, la información proporcionada al Cliente o Usuario, la adecuada medición de los consumos y su facturación, la puntualidad en el envío de boletas o facturas y la atención y conexión de nuevos suministros de Clientes o Usuarios”.

2.2 Variables eléctricas

Las variables eléctricas son magnitudes físicas fundamentales que describen y permiten el análisis, diseño y control de los sistemas y redes eléctricas para evaluar su funcionamiento

2.2.1 Voltaje (V)

El voltaje, también llamado diferencia de potencial, representa la energía por unidad de carga. Esta magnitud es esencial porque actúa como la fuerza que impulsa el movimiento de la corriente en los circuitos eléctricos, y recibe su nombre en honor al científico italiano Alessandro Volta (Floyd, 2007).

Existen dos categorías que clasifican el voltaje:

- El voltaje continuo: su valor permanece constante y la corriente fluye en una sola dirección y esta se mantiene constante en el tiempo
- El voltaje alterno: su valor varía con el tiempo, cambiando su dirección de manera periódica, lo que da a entender que la corriente gira en una dirección y luego en sentido contrario, y se va repitiendo este ciclo periódicamente, y con una frecuencia de 50 Hz en Chile.

El voltaje que utilizamos en nuestra red eléctrica generalmente en su mayoría es voltaje alterno y se encuentra en sistema monofásico como trifásico según la necesidad y su eficiencia para el trabajo a realizar.

2.2.2 Corriente (I)

El voltaje suministra la energía necesaria para mover los electrones a través de un circuito. Este flujo de electrones es la corriente eléctrica, la cual es responsable de producir trabajo en el circuito (Floyd, 2007, p. 23). La corriente se mide en amperios (símbolo A), una

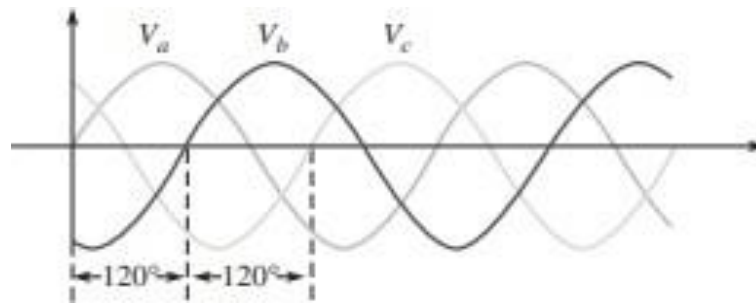
unidad nombrada en honor al físico y matemático francés André Marie Ampere (1775-1836).

Al igual que el voltaje la corriente se clasifica en una parte continua y una alterna.

- La corriente continua al igual que el su componente de tensión esta no varía invirtiendo su polaridad y se mantiene constante en el tiempo
- La corriente alterna varia su flujo periódicamente al igual que la tensión alterna ya que no es constante en el tiempo y la variación de su flujo es de 50 ciclos por segundo (50 Hz).

La variación de la tensión y corriente alterna periódicamente son representadas por ondas sinusoidales las cuales cada ciclo corresponde a 0,02 segundos y en un segundo hay 50 ciclos periódicamente.

Figura N° 2.1 Forma de onda sinusoidal

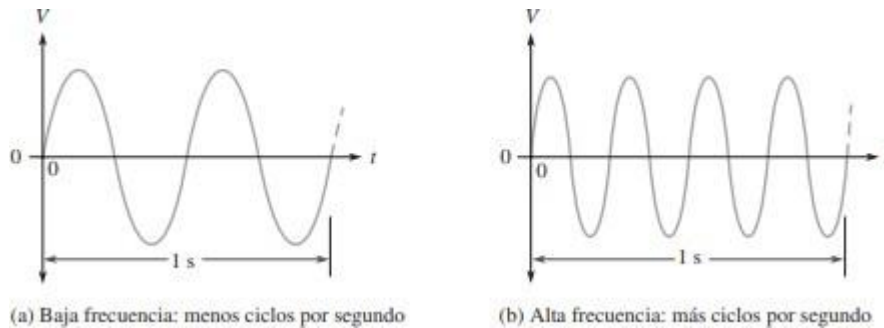


Fuente: Floyd (2007).

La frecuencia (f) es un concepto fundamental que define el número de ciclos completos que una onda sinusoidal realiza en un segundo. A mayor cantidad de ciclos por segundo, mayor será la frecuencia. La frecuencia se mide en Hertz (Hz), donde un Hertz es

equivalente a un ciclo por segundo (Floyd, 2007). Por ejemplo, 50 Hz significa 50 ciclos por segundo. Eso según la frecuencia establecida en Chile.

Figura N° 2.2 Tipos de onda de frecuencias



Fuente: Floyd (2007).

Parte de estas variables también existen otras las cuales hoy en día están presente en la mayoría de los sistemas eléctricos debido al crecimiento de las nuevas tecnologías y las cargas no lineales.

2.3.1 Ruido eléctrico

El ruido eléctrico es una perturbación de tensión o corriente en un sistema eléctrico, caracterizada por la superposición de señales aleatorias e indeseadas de alta frecuencia sobre la onda fundamental de la red. Su principal efecto es la degradación de la señal, afectando la integridad de los datos, las comunicaciones y el funcionamiento de la electrónica sensible (como los PLC y los sistemas informáticos). Se clasifica como un tipo de interferencia electromagnética (EMI) o de radiofrecuencia (RFI).

2.4 Los armónicos

Estos fundamentos son los que proporcionan la validez, la estructura y el poder analítico para interpretar las señales eléctricas. (Pérez et al. 2004)

2.4.1 Definición Formal de Armónicos

Según la normativa de calidad y servicio: *“Es la distorsión de la onda senoidal de corriente o de tensión eléctrica de frecuencia nominal, ocasionada por la presencia de señales eléctricas senoidales de frecuencias diferentes y múltiplos de dicha frecuencia nominal”*. (Comisión nacional de energía. 2024)

Este fenómeno produce distorsión armónica de corriente, que puede afectar negativamente a los sistemas de potencia, en particular con la implementación de numerosos convertidores de potencia estáticos basados en electrónica de potencia.

Hoy en la actualidad se pueden identificar y descomponer la señal de onda utilizando los equipos llamados analizadores de red con el fin de descomponer las señales complejas en sus componentes de frecuencia constituyentes. Esto permite analizar la señal en el dominio de la frecuencia, revelando características que no son evidentes en el dominio del tiempo, como los armónicos presentes en una señal. Y esto se realiza utilizando el principio de la serie de Fourier a través de la transformada rápida de Fourier (FFT)

2.4.2 Análisis Matemático: Descomposición de la Señal

El fundamento matemático esencial para el análisis armónico reside en la Serie de Fourier. El matemático Joseph Fourier demostró que cualquier señal eléctrica periódica que se repite a lo largo del tiempo, aun cuando no es perfectamente senoidal, puede descomponerse como una suma infinita de funciones perfectamente senoidales y cosenoidales.

La serie de Fourier demuestra que la suma de la onda fundamental y sus armónicos reproduce exactamente la onda distorsionada original. Cada armónica eléctrica posee amplitud y fase específicas, cuya combinación genera la forma no sinusoidal característica. (Alexander, CK y Sadiku, MNO. 2013).

La serie de Fourier es imprescindible para la evaluación de los armónicos y poder analizar el comportamiento eléctrico del equipo de resonancia magnética nuclear.

2.4.3 Tipos de Armónicos y Clasificación

En un sistema de energía eléctrica, la frecuencia fundamental es la frecuencia de la red (50 Hz) en Chile, que es la principal responsable de transferir la energía útil. El concepto de "múltiplo entero" es lo que clasifica a cada armónico y le da su nombre. Este múltiplo se conoce como el orden o rango armónico.

Orden del armónico

Los armónicos se clasifican por su orden, frecuencia y secuencia.

Tabla. Nº2.1 Orden y Secuencia de Armónico

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Frecuencia	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-

Fuente: la amenaza de los armónicos y sus soluciones (2004)

El orden del armónico es el número entero de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la de la componente fundamental. Por ejemplo, el armónico de orden 7 es aquel cuya frecuencia es 7 veces superior a la de la componente fundamental, o lo que es lo mismo, si la fundamental es de 50 Hz el armónico de orden 7 tendría una frecuencia de 350 Hz. En una situación ideal donde sólo existiera señal de frecuencia 50 Hz, sólo existiría el armónico de orden 1 o armónico fundamental. (Alexander, CK y Sadiku, MNO. 2013).

Los armónicos en los que se puede descomponer una señal, como hemos visto anteriormente, son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Aparte de la distinción entre Impares (simétricos) y Pares (asimétricos), se pueden clasificar según su rotación de fase con la frecuencia fundamental.

2.4.4 Clasificación por Orden (Pares, Impares)

Armónicos pares: son frecuencias que son múltiplos pares de la frecuencia principal, como el 2.º (100 Hz), el 4.º (200 Hz) y el 6.º (300 Hz) armónicos cuando la frecuencia principal es de 50 Hz en Chile. En los sistemas eléctricos, los armónicos pares suelen ser pequeños, ya que la mayoría de las cargas no lineales producen principalmente armónicos impares. Sin embargo, la presencia de armónicos pares puede indicar problemas específicos en el sistema eléctrico.

Los armónicos pares suelen indicar una desviación de CC en el sistema. Esta desviación ocurre cuando un componente de corriente continua (CC) se mezcla con la forma de onda de la corriente alterna (CA). Esto puede deberse a una rectificación de media onda, que se produce debido a un rectificador averiado. Un rectificador es un dispositivo que convierte la CA en CC y, al averiarse, puede producir una forma de onda incompleta, lo que provoca una desviación de CC. La desviación de CC introducida por los armónicos pares puede causar diversos problemas en los sistemas eléctricos. (Pérez et al. 2004)

Armónicos impares: son múltiplos impares de la frecuencia principal, como el 3.er, 5.º y 7.º armónicos. Estos armónicos pueden causar grandes problemas en los sistemas de energía, ya que pueden dañar los equipos eléctricos y hacer que funcionen mal. Cuando hay armónicos impares, aumentan las pérdidas por resistencia y las pérdidas por corrientes parásitas en los transformadores. Las pérdidas por resistencia, también llamadas pérdidas I^2R , ocurren porque las corrientes armónicas hacen que los conductores se calienten más. Este calentamiento adicional se debe a la potencia perdida en forma de calor debido a la resistencia en los conductores. Las pérdidas por corrientes parásitas ocurren cuando las corrientes inducidas fluyen dentro del núcleo del transformador, generando también calor. La presencia de armónicos empeora estos efectos porque el núcleo del transformador se enfrenta a campos magnéticos de mayor frecuencia, que crean más corrientes parásitas y más calor. (Pérez et al. 2004)

2.4.5 Clasificación por Secuencia de Fase (positiva, negativa, cero o triplen)

Los armónicos de secuencia positiva incluyen frecuencias como el 1.er, 4.º y 7.º ... armónicos. Estos armónicos se mueven en la misma dirección que la onda principal. Aumentan la corriente en el sistema y generan calor adicional en los componentes. Este calor adicional puede dañar el aislamiento, reducir la eficiencia del sistema y provocar averías en los componentes antes de lo previsto. En los motores, estos armónicos alteran el campo magnético, lo que reduce la eficiencia del motor y acorta su vida útil. Para solucionar estos problemas, es útil utilizar filtros u otros dispositivos para monitorizar y reducir los armónicos de secuencia positiva. (Pérez et al. 2004).

Los armónicos de secuencia negativa incluyen frecuencias como el 2.º, 5.º y 8.º armónicos. Estos armónicos se mueven en dirección opuesta a la onda principal. Reducen la potencia mecánica de los motores y generan calor adicional, lo que puede dañar el aislamiento, causar vibraciones mecánicas y acortar la vida útil de los motores y otros componentes. Los transformadores también pueden experimentar mayores pérdidas y sobrecalentamiento debido a estos armónicos. Monitorear e instalar los filtros adecuados puede ayudar a controlar los armónicos de secuencia negativa y sus efectos adversos. (Pérez et al. 2004).

Armónicos de secuencia cero(triplen): incluyen frecuencia como 3º, 6º, 9º, ... también conocidos como armónicos Triplen: estos armónicos están en fase con la frecuencia fundamental y circulan entre fases y neutro, se suman directamente en el conductor neutro. Por ese motivo, en presencia de componentes importantes de dichos armónicos en una instalación trifásica, será necesario sobredimensionar el conductor neutro (en comparación con los conductores de fase) para poder transportar esa corriente adicional. Por ejemplo, en presencia de aproximadamente 10 A rms, el 3er armónico en cada fase, supondrá una corriente adicional de unos 30 A rms en el conductor neutro (a 150 Hz en una instalación de 50 Hz) Si no hubiese armónicos Triplen, la corriente neutra no transportaría corriente. (Pérez et al. 2004).

2.4.6 Interarmónicos

Un Inter armónico es una tensión (o corriente) sinusoidal con una frecuencia que no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema. En términos más sencillos, su frecuencia se encuentra intercalada o en el espacio entre las frecuencias de los armónicos tradicionales (Bien, A, & Hanzelka, Z, 2004).

2.4.7 Subarmónicos

Los subarmónicos son una categoría específica de interarmónico cuya característica distintiva es tener una frecuencia inferior a la frecuencia fundamental del sistema (es decir, menor a 50 Hz).

2.5 Fuente generadora de armónicos

(Ramírez Castaño & Cano Plata, 2006) resumen las principales fuentes de armónicos así:

1. Dispositivos que involucran de alguna manera la conmutación electrónica: convertidores electrónicos de energía, y equipamiento que utiliza fuentes conmutadas. Los procesos de conmutación no necesariamente están sincronizados con la tensión de línea (pudiéndose generar interarmónicos o armónicos no enteros).
2. Dispositivos con una relación tensión corriente no lineal: reactores con núcleo de hierro (saturables) y cargas que producen arco eléctrico son ejemplos típicos de tal equipamiento. Excitadas por una entrada periódica de tensión, las características v-i serán generadoras de armónicos de corriente.

Un listado de algunos los equipos que generan armónicos son:

Transformadores, Reactores saturables, Máquinas rotantes, Hornos de arco y equipos de arco y Elementos de electrónica de potencia: Controladores de tensión, Rectificadores, Inversores, Variadores de frecuencia, Compensación estática, Fuentes de poder, UPS, Lámparas fluorescentes. (Piedrahita Agudelo, 1993).

Conectadas a las redes existe una gran variedad de equipos que usan este tipo de elementos, por lo que puede existir un notable deterioro de la calidad del servicio.

2.6 Filtro armónico

Los filtros armónicos son dispositivos esenciales en ingeniería eléctrica, diseñados para mitigar y corregir las distorsiones presentes en las ondas de tensión y corriente. Su mecanismo de acción consiste en desviar o neutralizar las frecuencias armónicas no deseadas (múltiplos de la frecuencia fundamental) que son específicamente generadas por cargas no lineales.

Los filtros armónicos se clasifican en tres tipos:

- Filtros pasivos.
- Filtros activos.
- Filtros híbridos.

2.6.1 Filtros pasivos

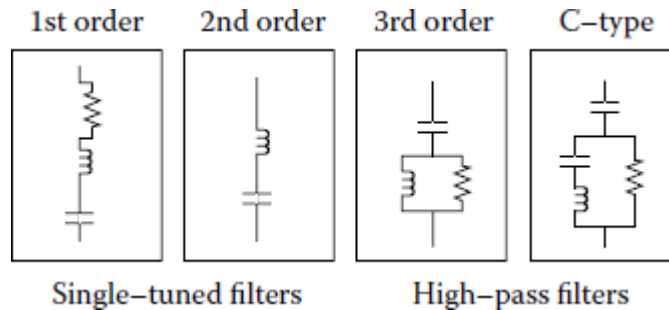
Los filtros pasivos se emplean para reducir los componentes armónicos no deseados de un sistema, permitiendo la eliminación selectiva de frecuencias específicas. Están contruidos por elementos básicos como inductancias (L), condensadores (C), y resistencias (R).

Estos filtros se configuran de dos maneras principales según su objetivo:

1. Filtro Pasivo en Serie: Se instala en línea entre la fuente de energía y la carga. Su propósito es bloquear o atenuar ciertas frecuencias armónicas, mientras deja pasar el resto de la señal.
2. Filtro Pasivo en Paralelo (o en Derivación): Se conectan en paralelo con la carga, actuando para desviar o absorber las frecuencias armónicas no deseadas. Esta configuración se considera ventajosa respecto al filtro en serie, ya que solo debe conducir la corriente armónica para la frecuencia a la que ha sido diseñada o "sintonizada".

En la figura N° 2.3, se muestran los filtros pasivos más utilizados en la industria.

Figura N° 2.3 Tipos de filtros pasivos.



Fuente: De la Rosa (2006).

Los filtros pasivos se construyen a partir de un circuito compuesto por elementos fundamentales: inductores (L), capacitores (C) y resistencias (R). El objetivo principal de estas combinaciones es eliminar o atenuar eficazmente las frecuencias armónicas no deseadas dentro de un sistema de potencia. La eficacia de un filtro pasivo es directamente proporcional a su diseño, ya que la correcta selección y disposición de los componentes L, C y R es crucial para sintonizar el filtro y asegurar que logre la respuesta de mitigación deseada.

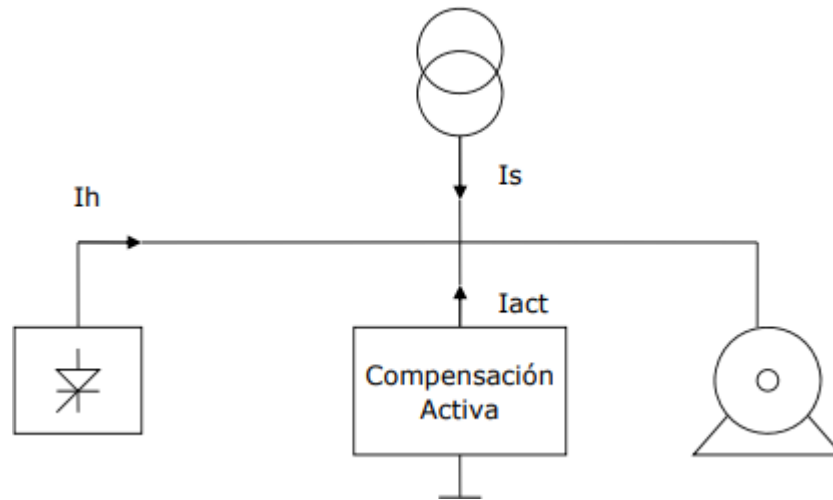
2.6.2 Filtros activos

Los filtros activos constituyen sistemas de compensación automática y dinámica que gestionan tanto los armónicos como la energía reactiva, ajustándose continuamente a las variaciones del suministro eléctrico. Estos sistemas se basan en convertidores estáticos de energía que se conectan a la carga que produce la distorsión, generalmente en serie o en paralelo. Operan como fuentes controladas de tensión o corriente que, mediante algoritmos de control, son capaces de anular instantáneamente los armónicos presentes en la red (Martínez D, 2012).

A través de este tipo de filtro existen diferentes tipos de conexiones tales como:

- Filtro activo en paralelo con fuente de corriente.
- Filtro activo en paralelo con fuente de tensión.
- Filtro activo en serie.
- Filtro activo en serie-paralelo.

Figura N° 2.4 Conexión de filtro activo



Fuente: Martínez D (2012).

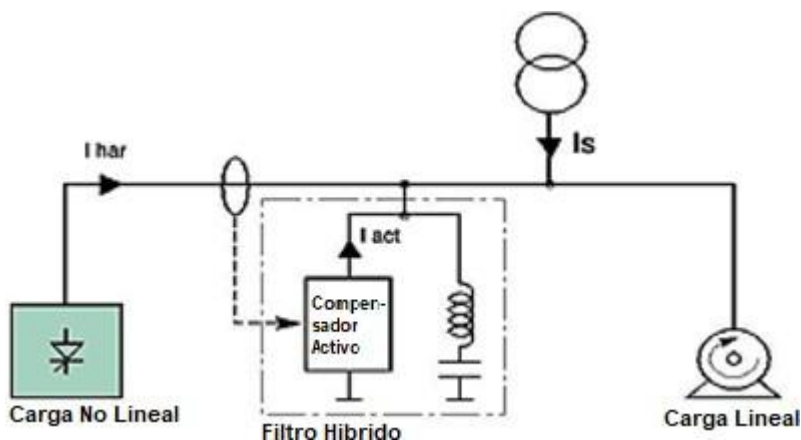
2.6.3 Filtros Híbridos

Los filtros híbridos representan una solución avanzada que combina la tecnología de los filtros pasivos y los filtros activos para explotar las fortalezas de cada uno. Se emplean para lograr una eficiencia superior y un control más preciso sobre las características de la señal, ofreciendo una mayor flexibilidad en el diseño y ajuste del sistema. Según Vázquez (2003), esta tecnología constituye una nueva solución que capitaliza los beneficios de ambas técnicas, permitiendo altas funcionalidades de filtrado en un amplio rango de potencia de manera más económica o accesible que una implementación puramente activa.

Los filtros híbridos se pueden implementar de diversas formas, siendo las más comunes:

- Filtro Activo en Serie con el Filtro Pasivo.
- Filtro Activo en paralelo con el Filtro Pasivo.
- Filtro Activo en Serie con la Fuente de Alimentación.

Figura N° 2.5 Filtro híbrido.



Fuente: Vásquez (2003).

2.7 Normativa y estándares

Las normativas eléctricas parten de buscar y garantizar la seguridad de las personas y los bienes estableciendo exigencias mínimas en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas de consumo. Esto incluye asegurar un correcto estado de las instalaciones, su operación segura y el cumplimiento de los estándares de calidad y eficiencia energética vigentes. Debido a las nuevas tecnología y aparatos electrónicos el surgimiento de los armónicos se disparó ya que anteriormente existían armónicos, pero eran de mucha menor medida e impacto ya que provenían de la saturación de los núcleos y por motores y generadores antiguos.

Viendo esta problemática surgió la necesidad de crear nuevas normativas eléctricas las cuales fueran orientada en la regulación y cuantificación de estos armónicos, con el fin de mitigarlos y poder proteger las instalaciones eléctricas, los equipo y cumpliendo con los estándares de calidad y eficiencia de la energía.

2.7.1 Normas Internacionales (IEEE Std 519, Serie IEC 61000)

IEC 6100: esta normativa se centra en la compatibilidad electromagnética, como objetivo asegurar que los equipos eléctricos puedan funcionar sin problemas en su entorno, mitigando las emisiones de estos mismos. La IEC 61000 se divide en por partes.

- IEC 61000-3-2: establece los límites para la emisión de corriente armónica de equipos con una corriente de entrada menor o igual a 16A por fase, esta norma también clasifica los equipos por categoría (clase A, B, C, D) y asigna límites específicos para cada una.
- IEC 61000-3-12: cubre los límites para las corrientes armónicas conectada a redes públicas de baja tensión con una corriente mayor a 16A y menor o igual a 75A por fase. Es una extensión de la 61000-3-2 para cargas más grandes.
- IEC 61000-4-7: define los métodos de medición para armónicos e Inter armónicos, sirviendo como un estándar de referencia para la evaluación de la calidad de energía

Y como resumen la IEC 61000 no solo utiliza le THD para limitar los armónicos, sino que también los combina con límites individuales para cada armónico.

IEEE 519: en su versión más reciente (IEEE 519-2022), se titula “prácticas y requisitos recomendados para el control de armónicos en sistema de energía eléctrica”. A diferencia de la IEC que se centra en los equipos individuales, la IEEE 519 se enfoca en el punto común de conexión entre consumidor y la red eléctrica (llamado punto de acoplamiento común o PCC), su propósito es dividir la responsabilidad del control armónico.

- Límites para el consumidor: el usuario final es responsable de limitar las corrientes armónicas que inyecta a la red. La norma establece tablas de límites de distorsión de corriente (I-THD) según el nivel de la tensión y la relación entre corriente cortocircuito y corriente de carga.
- Límites para la compañía eléctrica: la empresa distribuidora de energía es responsable de mantener la distorsión del voltaje armónico (V-THD) dentro de límites aceptables en el PCC

En resumen, la IEC 61000 se enfoca en la emisión de armónicos de los equipos, mientras que la IEEE 519 se enfoca en el impacto total de los armónicos en el punto de conexión. Ambas son complementarias y cruciales para mantener la calidad de la energía en los sistemas eléctricos.

2.7.2 Normativas Nacionales (NTCSD)

Con un enfoque particular en la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución, (NTCSD). Este análisis establece un marco regulatorio que respalda la investigación, garantizando que el desarrollo del proyecto cumpla con las exigencias y mejores prácticas del sector eléctrico chileno.

La Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución o en su forma abreviada (NTCSD), establece las obligaciones y estándares que deben cumplir las empresas concesionarias de servicio de distribución de electricidad. La norma tiene como objetivo mejorar la calidad del servicio eléctrico para los usuarios. Define los estándares y requisitos en áreas como fluctuaciones de tensión, distorsión armónica, interrupciones de suministro y calidad de atención al cliente.

2.7.3 Regulación de frecuencia.

Un control efectivo de la frecuencia es fundamental para garantizar la eficiencia y la seguridad de la operación de toda la infraestructura eléctrica. Del estado de la frecuencia se debe hacer cargo la empresa distribuidora, deberá registrar y medir mensualmente el en punto de conexión entre el alimentador y la fuente de alimentación principal, promediada en intervalos de 10 minutos, permitiendo identificar en que intervalo de la tabla N° 3.2 se encuentra la frecuencia.

Tabla N° 2.2 Intervalos para registrar las variaciones de frecuencia.

Estado de la frecuencia	Intervalo de frecuencia [Hz]
Sub-frecuencia extrema	$f < 47,0$
Sub-frecuencia	$47,0 \leq f < 49,5 \text{ Hz}$
Normal	$49,5 \leq f < 50,5 \text{ Hz}$
Sobre frecuencia	$50,5 \leq f < 52,0$
Sobre frecuencia extrema	$52,0 \leq f$

Fuente: CNE Comisión nacional de energía (2024).

2.7.4 Distorsión armónica de corriente para usuarios de baja tensión

La distorsión armónica de corriente representa un problema significativo en los sistemas eléctricos de baja tensión (BT), especialmente en entornos con una alta proliferación de equipos electrónicos. Para abordar este fenómeno, la Norma Técnica "NTCSD" establece los criterios bajo el Artículo 3-8 (Distorsión Armónica de Corriente para Usuarios de Baja Tensión).

Esta norma exige una medición rigurosa en el Estado Normal del sistema. Los registros deben capturar los valores eficaces (RMS) de la corriente consumida o inyectada en el Punto Común de Conexión (PCC) del usuario. Periodo de Promedio: Los datos deben ser promediados en intervalos de 10 minutos. Umbral de Cumplimiento: Es fundamental que los límites de distorsión armónica establecidos por la norma se cumplan durante el 95% del tiempo total de registro. Este período debe abarcar una semana completa (siete días) de medición continua.

En esencia, la NTCSD obliga a los usuarios de BT a demostrar de manera sostenida que su operación no contamina la red con niveles excesivos de armónicos.

Tabla N° 2.3 Límites Distorsión Armónica de corriente en el PCC de los Usuarios en Baja Tensión

Orden de la armónica (n)	Usuarios de tarifa BT1	Usuarios de tarifas BT, excepto BT1
	Corriente armónica máxima, en (A)	Corriente armónica máxima, en (%) de la corriente fundamental
Armónicos Impares No Múltiplos de 3		
5	2,28	12,0
7	1,54	8,5
11	0,66	4,3
13	0,42	3,0
17	0,26	2,7
19	0,24	1,9
23	0,20	1,6
25	0,18	1,6
>25	4,5/n	0,2+0,8*25/n
Armónicos Impares Múltiplos de 3		
3	4,60	16,6
9	0,80	2,2
15	0,30	0,6
21	0,21	0,4
>21	4,5/n	0,3
THD _I	No Aplica	20

Fuente: CNE Comisión nacional de energía (2024).

2.8 Sistemas eléctricos en recintos hospitalarios

En esta sección se profundizará en la problemática que se generan en las instalaciones eléctricas de los hospitales y clínicas, como también se dará contexto a que se entiende por instalación hospitalaria como también los equipos médicos modernos y como la evolución de la medicina y la aplicación de nuevas tecnologías traen con ello desafíos para áreas de soporte como la ingeniería eléctrica.

Instalación hospitalaria: se entenderá por instalación hospitalaria cualquier establecimiento de salud, ya sean; hospitales, clínicas, consultorios, centros de diagnósticos, de especialidad o de referencia del área de la salud. Dentro de sus instalaciones encontraremos diferentes áreas de servicio que estarán destinadas a diversas especialidades las cuales definiremos a continuación;

- Áreas médicas: como anestesiología, cuidados intensivos, hematología, nefrología, oncología, neumología, rehabilitación, cardiología, pediatría, medicina interna, y áreas quirúrgicas.
- Áreas de apoyo: como laboratorios, salas de rayos X, radiología y otras instalaciones de diagnóstico por imágenes.
- Áreas de hospitalización: donde los pacientes permanecen bajo observación y tratamiento continuo.
- Áreas de rehabilitación: para sesiones de fisioterapia y otras terapias necesarias para la recuperación del paciente.

Cada área contribuye al funcionamiento general del hospital y asegura que los pacientes reciban el mejor cuidado posible desde el momento en que ingresan hasta la alta médica.

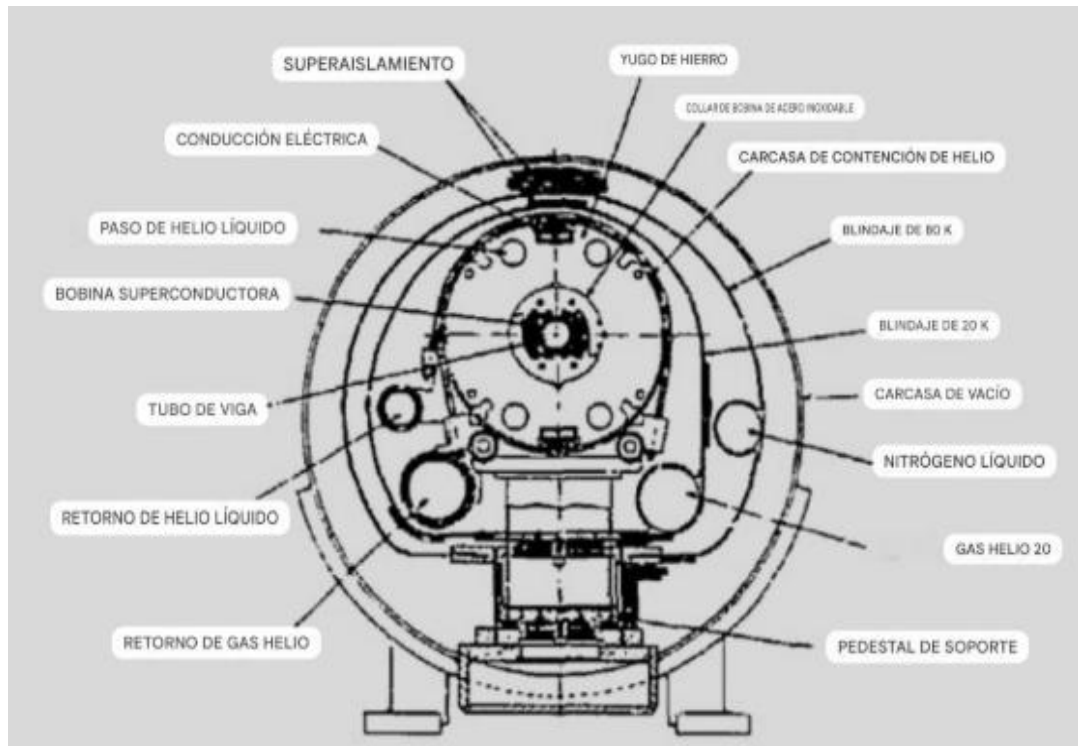
2.9 Componentes de un resonando magnético nuclear

un resonador magnético se compone principalmente de tres grupos de componentes principales que trabajan de forma coordinada en el proceso de obtención de imágenes, además de los sistemas de soporte y la sala de operación

Las partes principales del equipo de resonancia magnética mencionadas por (Boerr, sf), en el esquema básico de un resonador superconductor son:

- **Imán Principal o Bobina Principal del Magneto (Imán Superconductor):** Es el componente encargado de generar el campo magnético principal (B_0). En los imanes superconductores, la bobina principal, fabricada de un material superconductor (habitualmente una aleación de Niobio - Titanio), mantiene un flujo constante de corriente eléctrica sin aporte externo, gracias a que su resistencia eléctrica desaparece a temperaturas cercanas al cero absoluto (0 Kelvin), requiriendo de un elemento criogénico como el helio líquido para mantener la superconducción. Las partes mencionadas se pueden observar en la figura N° 2.6.

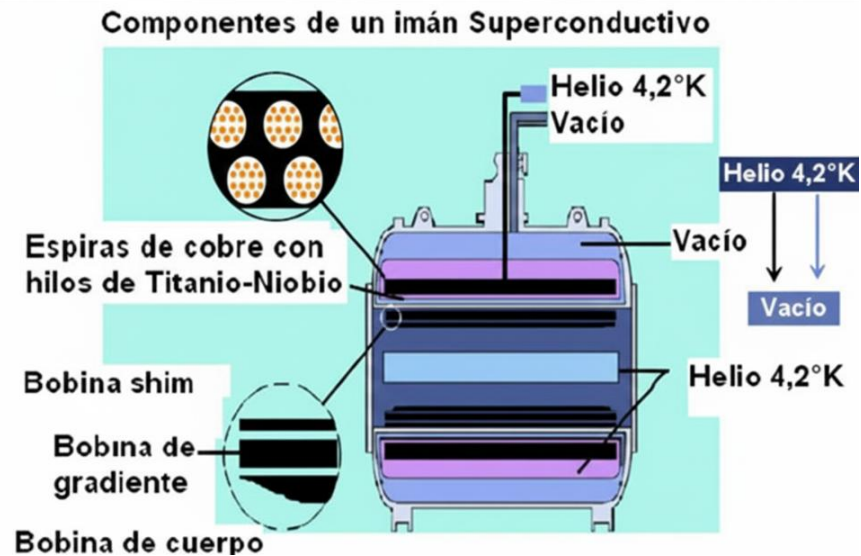
Figura N° 2.6 sección transversal del dipolo del criostato



Fuente: Wilver Rodolfo Domínguez Solares (2013)

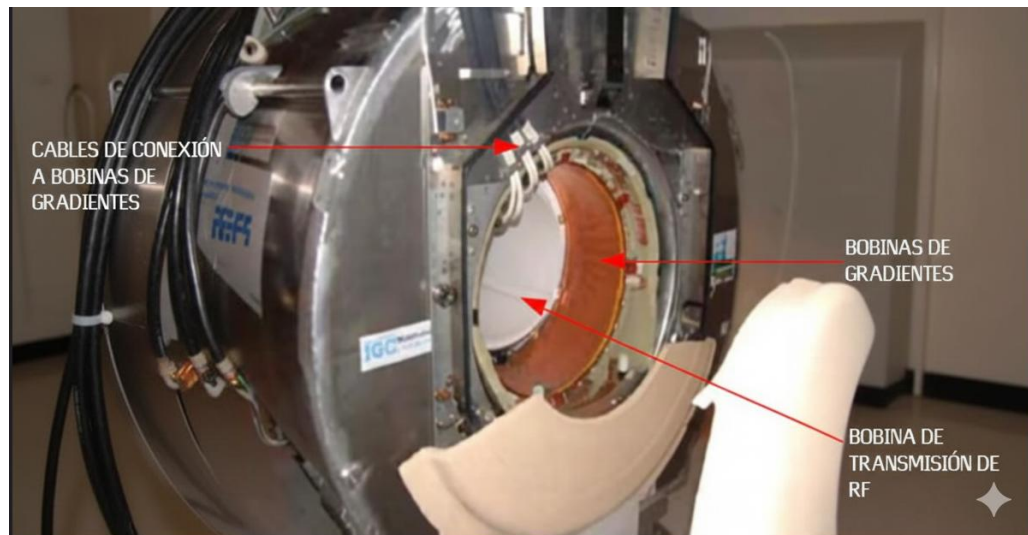
- **Bobinas de Gradientes:** Como se muestra en la figura N° 2.7, se ubican más internamente que la bobina del magneto principal. Producen distorsiones calibradas del campo magnético principal en los ejes x, y, z, creando un campo magnético secundario.

Figura N° 2.7 corte transversal que muestra las capas internas de un electroimán superconductor



Fuente: Domínguez Solares, WR (2013).

Figura N° 2.8 núcleo del magneto donde se encuentra las bobinas gradientes y de transmisión de señal RF

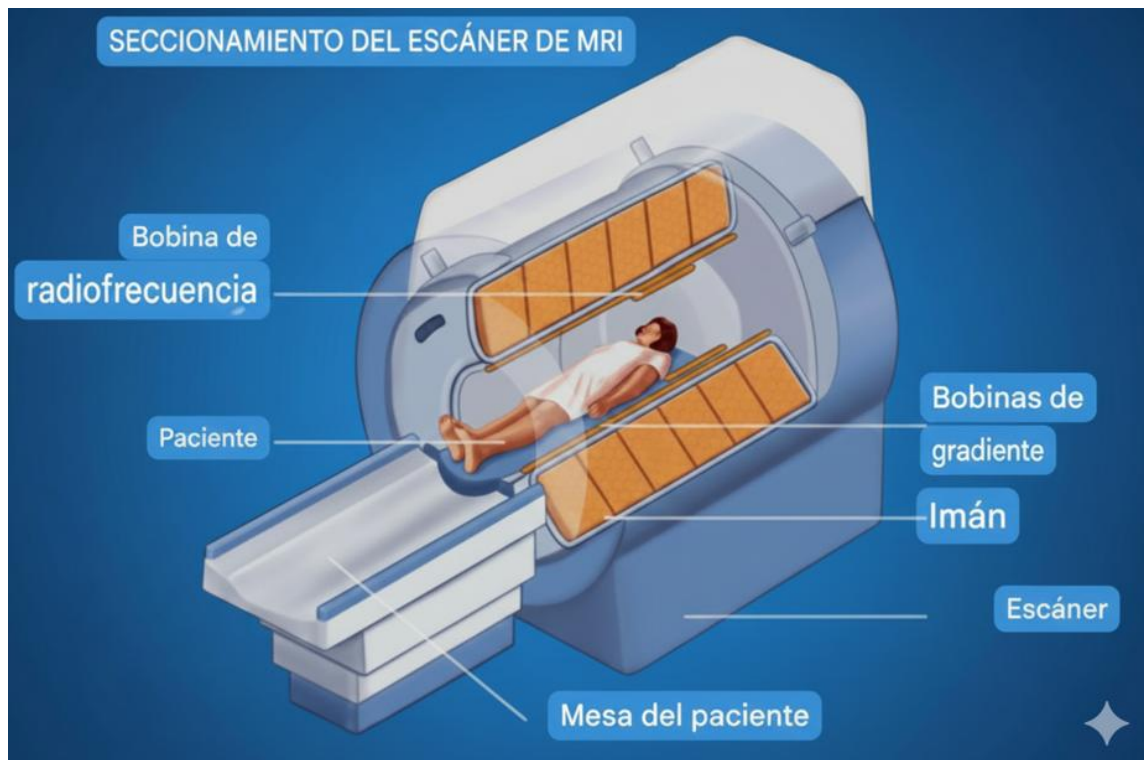


Fuente: Domínguez Solares, WR (2013).

- **Bobinas de Radiofrecuencias (RF):** Son las encargadas de producir los pulsos de radiofrecuencias (función de transmisión) y de captar la señal de resonancia magnética proveniente del paciente (función de recepción). La bobina principal de

RF (Body Coil) se encuentra en la parte más interna, pero existen otras bobinas (transmisoras, receptoras o ambas) que se ubican fuera de la estructura principal, encima del paciente, estas bobinas se pueden observar en las figuras N° 2.8 y N° 2.9.

Figura N° 2.9 partes de un resonador magnético



Fuente: Cursos de RMN (TM. Esteban Boerr G.)

El resonador magnético funciona mediante la interacción de sus componentes para manipular y detectar la señal de los protones del paciente:

- El Imán Principal establece un fuerte campo magnético principal (B_0)
- Las Bobinas de Radiofrecuencias (RF), en su función transmisora, generan pulsos de RF que, al coincidir con la frecuencia de precesión de los spins (protones) del cuerpo, provocan su excitación y un cambio en su orientación.
- Las Bobinas de Gradientes generan un campo magnético secundario que distorsiona ligeramente el campo magnético principal, causando diferencias de

frecuencias en los protones a lo largo de un eje. Estos campos de gradientes son fundamentales porque permiten la codificación espacial de la señal de RM.

- Cuando los giros se relajan, el flujo magnético proveniente de esta relajación es capturado por las Bobinas de RF receptores, lo que genera una corriente eléctrica inducida.
- Finalmente, esta corriente se amplifica, digitaliza y se filtra para extraer la información de fase y frecuencia, con el objetivo de formar la imagen de RM.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS ARMÓNICOS

El Capítulo II estableció las bases teóricas y normativas de la Calidad de Energía, definiendo los armónicos como un fenómeno de distorsión de la forma de onda fundamental. El propósito de este capítulo es transitar desde el marco teórico hacia la validación experimental de la problemática.

El Resonador Nuclear Magnético (RMN) fue identificado como una carga no lineal esencial en los recintos hospitalarios. Por tanto, el enfoque de este capítulo se centrará en cuantificar el impacto real de esta carga sobre la red, contrastando la evidencia experimental con los límites de cumplimiento legal.

3.1 Análisis y evaluación de los datos obtenidos

En el presente capítulo se abordará el análisis de la distorsión armónica generada por los equipos resonadores nucleares magnéticos y como el funcionamiento de estos genera una gran cantidad de contaminación armónica en el sistema, también se evaluará la distorsión armónica ligándolo a la normativa nacional vigente la cual podemos observar en la tabla N°3.1, tratándose de la “NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DE SERVICIO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN”. Este análisis nos proporcionara una base sólida para la interpretación de los resultados y tomas de decisiones acertadas.

Tabla 3.1 valor máximo permitidos de la distorsión armónica

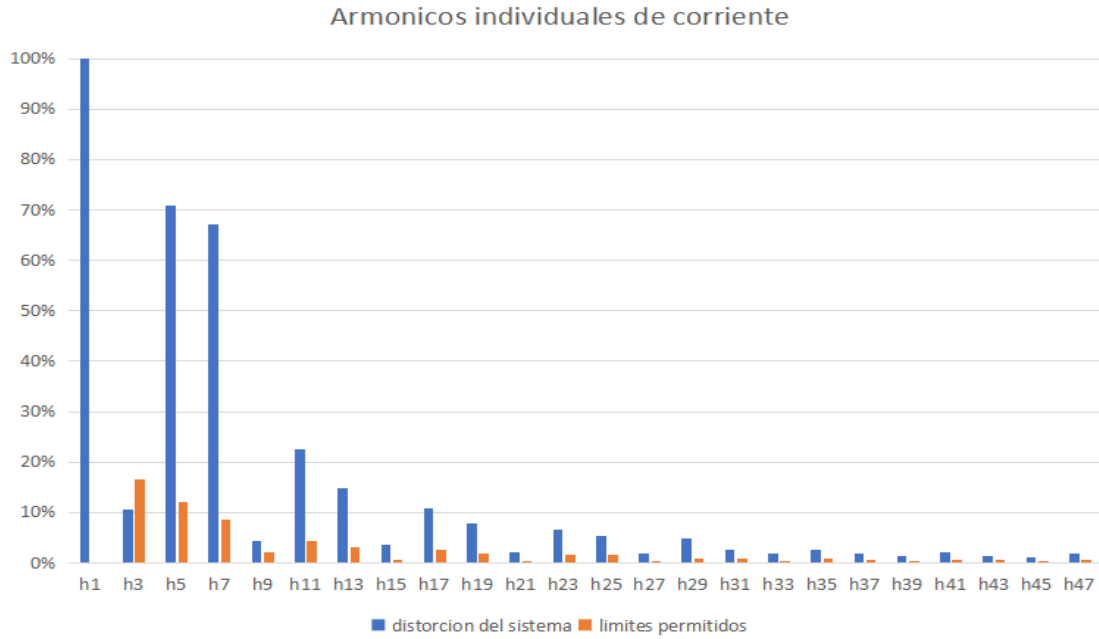
Orden de la armónica (n)	Usuarios de tarifa BT1	Usuarios de tarifas BT, excepto BT1
	Corriente armónica máxima, en (A)	Corriente armónica máxima, en (%) de la corriente fundamental
Armónicos Impares No Múltiplos de 3		
5	2,28	12,0
7	1,54	8,5
11	0,66	4,3
13	0,42	3,0
17	0,26	2,7
19	0,24	1,9
23	0,20	1,6
25	0,18	1,6
>25	4,5/n	0,2+0,8*25/n
Armónicos Impares Múltiplos de 3		
3	4,60	16,6
9	0,80	2,2
15	0,30	0,6
21	0,21	0,4
>21	4,5/n	0,3

Fuente: CNE Comisión nacional de energía (2024).

En la anterior tabla se detallan los valores máximos de corriente armónica, expresados tanto en Amperes (A) como en porcentaje de la corriente fundamental, que los usuarios de Baja Tensión tienen permitido inyectar en la red, sirviendo como el marco regulatorio para la evaluación presentada en este capítulo.

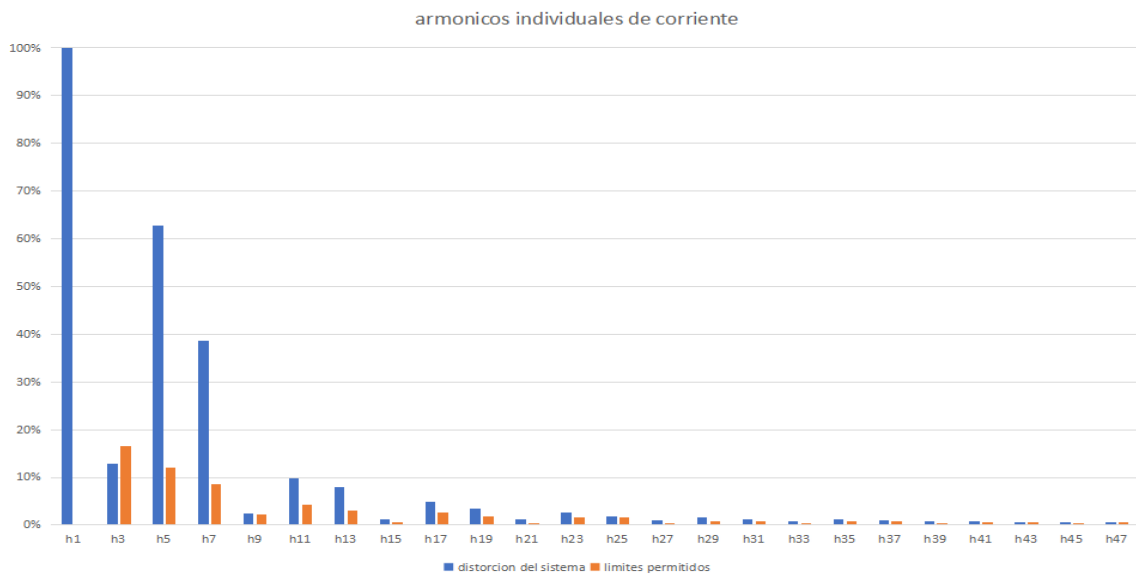
Para poder comenzar con el análisis de armónicos en el sistema comenzaremos evaluando los espectros de Fourier de dos equipos resonadores nucleares magnéticos, los cuales fueron tomados en diferentes recintos hospitalarios con el fin de observar la contaminación durante su funcionamiento. La figura de la imagen N°3.1 es el gráfico espectro de Fourier de una clínica privada, mientras que la figura de la imagen N°3.2. es el gráfico espectro de Fourier en un hospital público.

Figura N° 3.1 Gráfico espectro de Fourier en hospital



En esta ilustración se puede apreciar el espectro de Fourier de un hospital público, donde se puede observar la cantidad de armónicos de forma porcentual como también su límite permitido por la norma NTCS.

Figura 3.2 Gráfico espectro de Fourier en clínica



En esta imagen se puede apreciar el espectro de Fourier de la clínica privada, donde se puede observar la cantidad de armónicos de forma porcentual como también su límite permitido por la norma NTCS.D.

Como se logra observar dentro de la Figuras N°3.1 y N°3.2 en los cuales se analiza la distorsión generada por los resonadores, se visibiliza que estos generan componentes de armónicos de todas las secuencias, tanto negativas, positivas y cero.

3.2 Análisis comparativos de la distorsión armónica presente en un sistema hospitalario público con los límites exigidos por la N.T.C.S.D

Las siguientes tablas, muestran el cumplimiento o no cumplimiento de los registros de armónicas de corrientes individuales en comparación con los valores límite permitidos por la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución. Aplicadas a Un resonador nuclear magnético de un recinto hospitalario público. Estas tablas están asociadas al análisis del espectro de Fourier de la Figura N°3.1.

Tabla N° 3.2 tabla comparativa de los armónicos múltiplos de 3 con la normativa

Orden de la armónica	% límite según norma	% valor medido	% no cumplimiento
Armónicos múltiplos de 3 impares			
3	16.6	10.5	No aplica
9	2.2	4.4	2.2
15	0.6	3.6	3
21	0.4	2.2	1.8
27	0.3	1.8	1.5
33	0.3	1.9	1.6
39	0.3	1.5	1.2
45	0.3	1.2	0.9

En esta tabla N° 3.2 se observan los armónicos impares múltiplos de 3 que se presentan en el sistema y compararlos con los valores normativos, también se describe el porcentaje de no cumplimiento respecto a la normativa NTCSD.

Tabla N° 3.3 tabla comparativa de los armónicos impares con la normativa

Orden de la armónica	% límite según norma	% valor medido	% no cumplimiento
	Armónicos impares	No múltiplos de 3	
5	12	70.8	58.8
7	8.5	67.2	58.7
11	4.3	22.6	18.3
13	3	14.9	11.9
17	2.7	10.8	8.1
19	1.9	7.9	6
23	1.6	6.5	4.9
25	1.6	5.4	3.8
29	0.88	4.8	3.92
31	0.84	2.6	1.76
35	0.77	2.7	1.93
37	0.74	1.8	1.06
41	0.68	2.1	1.42
43	0.66	1.5	0.84
47	0.62	1.8	1.18

En la tabla N° 3.3 logra observar los armónicos impares no múltiplos de 3 que se presentan en el sistema y compararlos con los valores normativos, también se describe el porcentaje de no cumplimiento respecto a la normativa NTCSD.

De las Tablas N°3.2 y N°3.3 logramos desprender la siguiente observación, la distorsión armónica individual de corrientes supera los límites exigidos por la normativa en todas las armónicas exceptuando la tercera armónica de secuencia cero.

3.3 Análisis comparativos de la distorsión armónica presente en un sistema de una clínica privada con los límites exigidos por la N.T.C.S.D

En las próximas tablas a analizar se verá la distorsión armónica generada por un resonador nuclear magnético en una clínica privada y se evaluará si los valores medidos cumplen con los límites permitidos de la Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución. Estas tablas están asociadas al análisis del espectro de Fourier de la Figura N°3.2.

Tabla 3.4 tabla comparativa de armónicos múltiplos de 3 con la normativa

Orden de la armónica	% límite según norma	% valor medido	% no cumplimiento
Armónicos múltiplos de 3 impares			
3	16.6	12.9	No aplica
9	2.2	2.4	0.2
15	0.6	1.2	0.6
21	0.4	1.3	0.9
27	0.3	1.1	0.8
33	0.3	0.84	0.54
39	0.3	0.77	0.47
45	0.3	0.56	0.26

En la tabla N°3.4 de pueden observar los armónicos impares múltiplos de 3 que se presentan en el sistema y compararlos con los valores normativos, también se describe el porcentaje de no cumplimiento respecto a la normativa NTCS.D.

Tabla N° 3.5 Tabla comparativa de armónicos impares con la normativa

Orden de la armónica	% límite según norma	% valor medido	% no cumplimiento
	Armónicos impares	No múltiplos de 3	
5	12	62.7	50.7
7	8.5	38.6	30.1
11	4.3	9.8	5.5
13	3	7.9	4.9
17	2.7	4.8	2.1
19	1.9	3.5	1.6
23	1.6	2.7	1.1
25	1.6	1.9	0.3
29	0.88	1.7	0.82
31	0.84	1.3	0.46
35	0.77	1.2	0.43
37	0.74	0.95	0.21
41	0.68	0.88	0.2
43	0.66	0.63	No aplica
47	0.62	0.59	No aplica

En la tabla N° 3.5 de pueden observar los armónicos impares no múltiplos de 3 que se presentan en el sistema y compararlos con los valores normativos, también se describe el porcentaje de no cumplimiento respecto a la normativa NTCSD.

Gracias al análisis de las Tabla N°3.4 y N°3.5 logramos visualizar de manera más eficaz la distorsión armónica generada por el resonador nuclear magnético en el recinto de una

clínica particular, concluyendo que la contaminación armónica de corriente individual supera los límites establecidos por la normativa en la mayor parte de los armónicos siendo la excepción los siguientes armónicos; H3, H43 y el H47. De igual forma se logra observar la existencia de los armónicos de diferentes tipos de secuencias existiendo secuencias; positivas, negativas y cero.

3.4 Reflexiones iniciales del análisis

Gracias a la evaluación antes realizada se logró inferir que el comportamiento eléctrico de los resonadores nucleares magnéticos tiene la tendencia a generar una gran contaminación armónica al momento de su funcionamiento lo cual origina grandes niveles de corriente lo que se puede traducir en pérdidas, sobrecarga del sistema y baja confiabilidad del equipo, para poder profundizar un poco más de este fenómeno realizaremos simulaciones de las ondas de corrientes pasando desde la fundamental hasta la de distorsión total introducida por la componente armónica, también evaluaremos la corriente total que consume cada armónico del sistema.

3.5 Evaluación de los armónicos del sistema eléctrico del recinto hospitalario.

A continuación, comenzaremos evaluando la siguiente tabla la cual entrega la información de la corriente consumida por cada armónico entregado por la carga RNM.

Figura N°3.3 Placa de datos del equipo RNM

Electrical Installation

Power requirements	
Mains: TN-S	3/N/PE AC 50/60 Hz \pm 1 Hz
Line voltage:	400 V \pm 10 %
Line to line unbalanced:	max. 2 %
Line impedance: On site circuit breaker: Only copper cables are allowed.	\leq 95 m Ω 160 A
The size of the terminals in the EPC are designed for 70 mm ² .	Measurement sequences < 3 s.
Cable cross section is to be determined by national regulation and calculation.	

Fuente: ficha técnica del equipo. 2010

Aplicamos la siguiente ecuación obtenida del libro de Reiner Geick (2016).

$$I_{rms} = \frac{S}{\sqrt{3} * VLL}$$

De los datos de la ficha técnica obtenemos las potencias aparentes de los sistemas necesarios para que entre en funcionamiento el resonador nuclear magnético y esto nos da una corriente nominal de 228 A la cual se evaluara en la siguiente tabla. Donde se observará como los porcentajes dados por espectro de Fourier representan la corriente aportada por cada armónico.

Tabla N° 3.6 características de los armónicos medidos en el hospital

Orden armónico total	% de la red	valor absoluto	Unidad de medida	Frecuencia Hz
h1	100%	228	A	50
h3	10,50%	23,94	A	150
h5	70,8%	161,42	A	250
h7	67,2%	153,22	A	350
h9	4,4%	10,032	A	450
h11	22,6%	51,528	A	550
h13	14,9%	33,972	A	650
h15	3,6%	8,21	A	750
h17	10,8%	24,62	A	850
h19	7,9%	18,01	A	950
h21	2,2%	5,016	A	1050
h23	6,5%	14,820	A	1150
h25	5,4%	12,312	A	1250
h27	1,8%	4,10	A	1350
h29	4,8%	10,94	A	1450
h31	2,6%	5,93	A	1550
h33	1,90%	4,332	A	1650
h35	2,7%	6,156	A	1750
h37	1,80%	4,104	A	1850
h39	1,50%	3,42	A	1950

h41	2,10%	4,79	A	2050
h43	1,50%	3,42	A	2150
h45	1,20%	2,736	A	2250
h47	1,80%	4,104	A	2350

En la tabla 3.6 se puede observar la corriente evaluada que aporta cada armónico al sistema en el hospital público la evaluación de los armónicos se realiza en base a la corriente fundamental genera por resonador,

Para poder obtener el valor real de la corriente aplicamos la fórmula de suma cuadrática que está relacionada a la siguiente ecuación de Geick (2016), con esto se puede obtener la corriente total que afecta al sistema.

$$I_{total} = I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

Al utilizar la formula antes vista logramos obtener una corriente total de 328,14 A rms una vez obtenido este valor podemos evaluar con la fórmula de THD-I la cual es la siguiente ecuación dada por CNE Comisión nacional de energía (2024), y esta nos permite ver cuánto de la corriente está siendo aprovechada de manera eficaz por el sistema y cuanto es generado por los armónicos.

$$THD - I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_L} * 100$$

Una vez aplicada la fórmula matemática de THD-I nos encontramos con un valor de 103.5% de distorsión total lo que se traduce en que la magnitud efectiva de las corrientes armónicas es superior a la de la corriente fundamental. Esto se podrá evidenciar más adelante cuando se realice la simulación de la onda donde esta debiese presentar una alta deformación en comparación a una onda senoidal pura de igual manera en el desarrollo matemático a

continuación se demostrará el valor de la corriente aportada por la distorsión armónica presente.

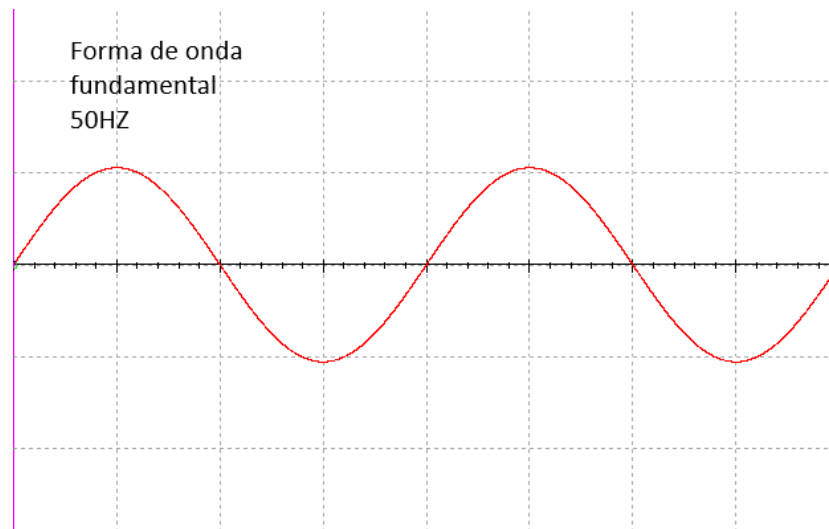
De acuerdo a Geick (2016), para obtener la corriente equivalente aportada por los armónicos al sistema, se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{Ht} = I_1 * \frac{THD}{100}$$

De la ecuación anterior se desprende la siguiente información una vez resuelta la ecuación, entendiéndose que $I_{H1} = 228 \text{ A} * \frac{103.5}{100} = 235.98 \text{ A}$ lo cual simboliza que la corriente armónica representa una contribución de aproximadamente 236 A rms es decir la componente armónica supera a la componente fundamental respaldando el valor entregado anteriormente por el THD-I.

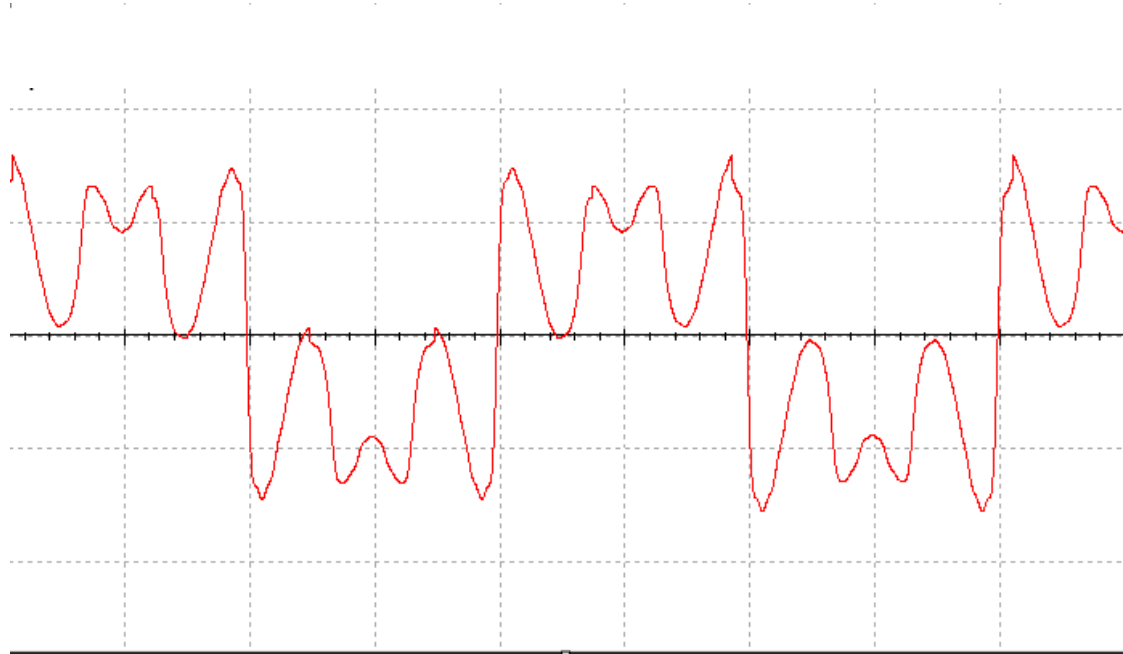
Ahora procederemos a realizar la simulación con la aplicación Multisim donde se realizará la simulación de la onda fundamental contra la onda distorsionada y así poder verificar la distorsión armónica generada en el hospital público donde funciona el resonador nuclear magnético.

Figura N° 3.4 Onda sinusoidal pura



En esta figura se puede observar la forma de onda del sistema sin estar sometida a la carga del resonador por lo tanto no hay presencia de otras frecuencias ínter actuando con la onda fundamental.

Figura N°3.5 Forma de onda distorsionada por presencia de armónicas



En la figura 3.5 se puede observar la forma de onda sometida a la carga y como está produce grandes alteraciones en su composición debido a la gran cantidad de armónicos generados por el resonador.

Del análisis de comparativo entre la onda fundamental y la distorsionada podemos obtener la siguiente conclusión del análisis.

La severidad de la distorsión observada en la forma de onda es una manifestación directa del Teorema de Fourier. La carga no lineal introducida no solo generó armónicos, sino que estos se superpusieron a la señal fundamental. Específicamente, la predominancia de armónicos de orden impar de alta magnitud resultó en la significativa variación de la pendiente y la aparición de los múltiples picos y valles, alejando completamente la señal de su estado ideal senoidal y confirmando un elevado Nivel de Distorsión Armónica Total de corriente THDI.

3.6 Evaluación de los armónicos del sistema eléctrico de la clínica privada.

Figura N°3.6 Placa de datos del equipo RMN

Electrical Installation

Power requirements		
Mains: TN-S	3/N/PE AC 50/60 Hz ± 1 Hz	Connection value:
Line voltage:	400 V ± 10 %	System XQ: 84 kVA
Line to line unbalanced:	max. 2 %	Chiller (optional): 48 kVA
System XQ Line impedance:	≤ 110 mΩ	Power consumption for time up to < 3 s: 91 kVA
Only copper cables are allowed.		
The size of the terminals in the EPC are designed for 70 mm².		Measurement sequences < 3 s.
Cable cross section is to be determined by national regulation and calculation.		

Fuente: información obtenida desde la ficha técnica del equipo.

Al igual que para el procesamiento de los datos de las corrientes en el hospital público evaluaremos las potencias aparentes de la clínica privada con la formula anterior de Reiner Geick y con esto lograremos obtener la corriente fundamental para así poder obtener la corriente porcentual que consume cada armónico como muestra la siguiente tabla:

$$I_{rms} = \frac{S}{\sqrt{3} * VLL}$$

Tabla N°3.7 indica el nivel de corriente de los armónicos

Orden armónico total	% de la red	valor absolute		Frecuencias Hz
h1	100%	190,5	A	50
h3	12,9%	24,57	A	150
h5	62,7%	119,44	A	250
h7	38,6%	73,53	A	350
h9	2,4%	4,572	A	450
h11	9,8%	18,669	A	550

h13	7,9%	15,050	A	650
h15	1,2%	2,29	A	750
h17	4,8%	9,14	A	850
h19	3,5%	6,67	A	950
h21	1,3%	2,477	A	1050
h23	2,7%	5,144	A	1150
h25	1,9%	3,620	A	1250
h27	1,1%	2,10	A	1350
h29	1,7%	3,24	A	1450
h31	1,3%	2,48	A	1550
h33	0,84%	1,600	A	1650
h35	1,2%	2,286	A	1750
h37	0,95%	1,810	A	1850
h39	0,77%	1,47	A	1950
h41	0,88%	1,68	A	2050
h43	0,63%	1,20	A	2150
h45	0,56%	1,067	A	2250
h47	0,59%	1,124	A	2350

En la tabla N° 3.7 anterior se puede observar la corriente evaluada que aporta cada armónico al sistema en una clínica privada la evaluación de los armónicos se realiza en base a la corriente fundamental generada por el resonador.

Para poder obtener el valor real de la corriente aplicamos la fórmula de suma cuadrática obtenida del libro de Reiner Geick (2016).

$$I_{total} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

Al utilizar la formula antes vista logramos obtener una corriente total de 292.58 A rms, como ya tenemos el valor de la corriente total podemos aplicar la fórmula para ver el THD-I obteniendo un THD-I de 76.24% de distorsión total lo que se traduce en que la magnitud efectiva de las corrientes armónicas se aproxima peligrosamente a la de la corriente fundamental. Esto quedara en evidencia más adelante cuando se realice la simulación de la onda donde se observará una alteración notable respecto a la onda fundamental, esta distorsión igual se puede observar en el desarrollo matemático que se realizara continuación donde se demostrara el valor de la corriente aportada por la distorsión armónica generada por el equipo.

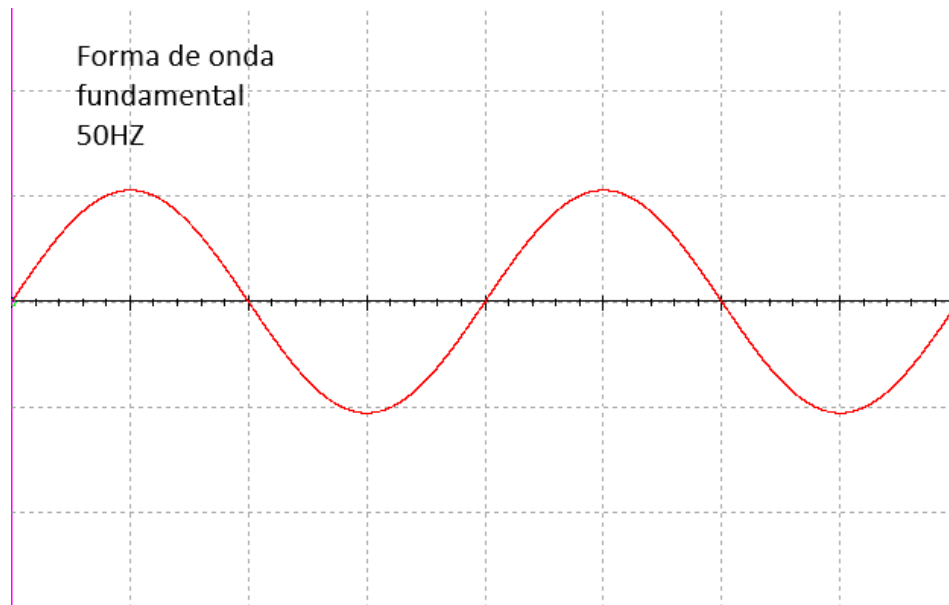
Para obtener la corriente equivalente aportada por los armónicos al sistema, se ocupo la formula de libro de Reiner Geick (2016).

$$I_{Ht} = I_1 * \frac{THD}{100}$$

Para poder visualizar la corriente armónica aplicaremos la anterior formula mostrada que se utiliza para obtener la corriente equivalente armónica del sistema. Una vez aplicada la siguiente ecuación $I_{H1} = 190.5 \text{ A} * \frac{76.24}{100} = 145.237 \text{ A}_{RMS}$, este valor de muestra que la corriente armónica presente en el sistema es igual a 3/4 partes de la corriente nominal del equipo lo que verifica que el THD-I es un valor crítico para las posibles mejoras que se postularan en los próximos capítulos de la tesis.

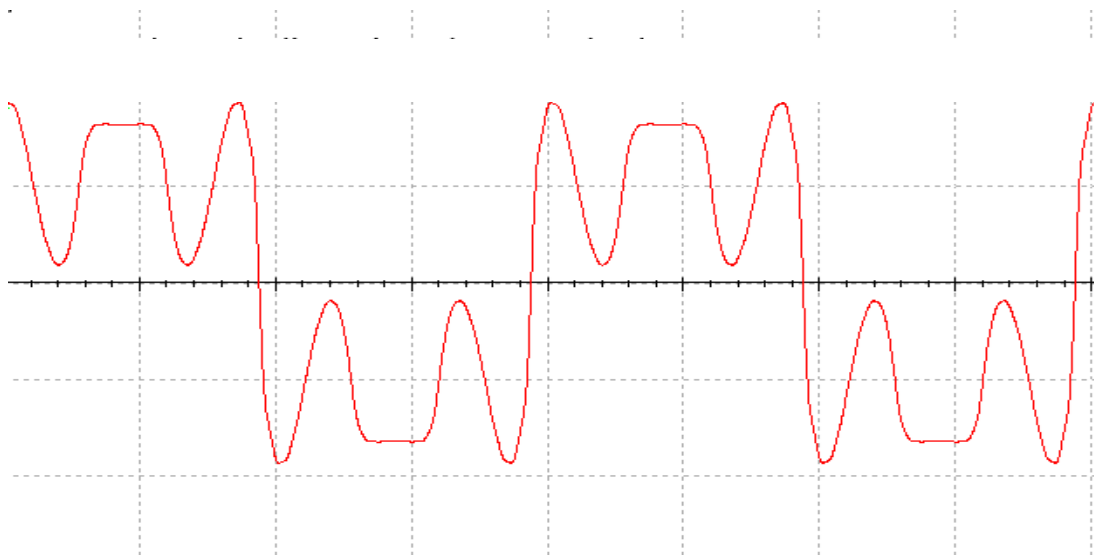
A continuación, se procederá a simular con la aplicación Multisim la onda de la frecuencia fundamental, para luego poder compararla con la onda del sistema sometida a la contaminación armónica

Figura N°3.7 Forma de onda de la componente fundamental



En la figura N° 3.7 se puede observar la forma de onda del sistema sin estar sometida al funcionamiento del resonador nuclear magnético por lo que no tiene presente deformaciones por contaminación armónica.

Figura N°3.8 Forma de onda distorsionada por todos los armónicos generados

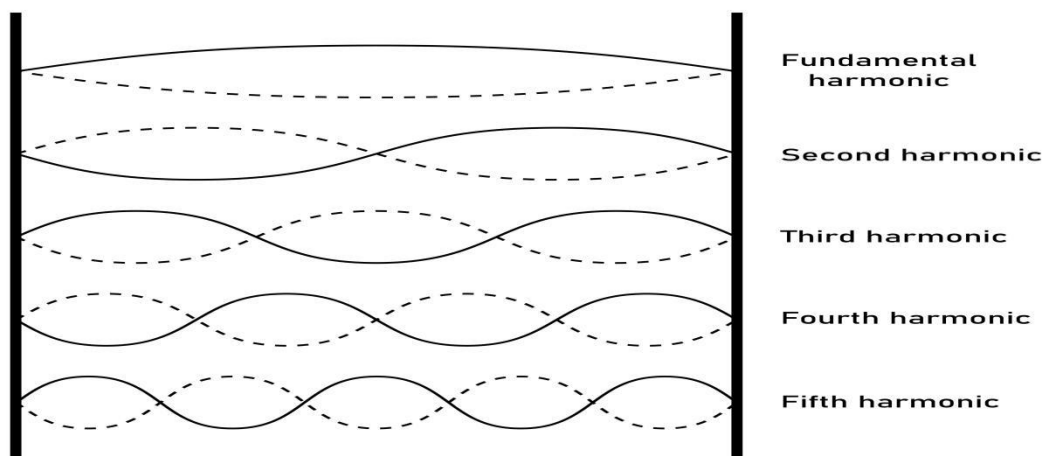


En la figura N° 3.8 se puede observar la forma de onda sometida a la carga y como está produce grandes alteraciones en su constitución debido a la gran cantidad de armónicos generados por la carga.

Tal como se evidenció al contrastar la forma de onda fundamental limpia, de 50 Hz con la forma de onda sometida a la carga, la presencia de los armónicos generados a provocado una distorsión extrema y significativa de la señal. La onda pasó de ser una sinusoidal pura a una forma de onda más rectangular y trapezoidal, confirmando el impacto directo de la contaminación armónica en la calidad de la señal del sistema.

Para cuantificar y comprender la naturaleza de esta distorsión, fue indispensable la simulación mediante el ajuste de los parámetros de amplitud y fase de cada armónico. Esta aproximación permitió aislar y reproducir de manera controlada el impacto de cada componente armónico específico y observar su influencia directa en la señal total resultante.

Figura 3.9 Formas de ondas generadas por cada frecuencia armónica de forma individual.



Fuente: Domínguez Solares, WR (2013).

En la Figura N° 3.9 se puede observar la onda genera por diferentes frecuencias de manera individual para así lograr entender la composición de la onda afectada por la carga la cual es sometida a diferentes frecuencias.

El análisis de los resultados se realizó rigurosamente en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. La comparación de las distintas formas de onda en el dominio del tiempo como se observa en la figura de la onda distorsionada facilitó la identificación de los picos y las perturbaciones inducidas. Complementaria mente el uso del espectro de frecuencias fue una herramienta clave, permitiendo visualizar y cuantificar la magnitud de los componentes armónicos en contraste con la señal fundamental. Logrando así La interpretación precisa de estos espectros y formas de onda estableciendo la relación directa entre la contaminación armónica y la degradación de la calidad de la energía.

3.7 Correlación entre la Distorsión Armónica y la Fiabilidad Operacional del RMN

La presencia de niveles de distorsión armónica de corriente tan elevados como 103.54% en el hospital público y 76.24% en la clínica privada no solo constituye un incumplimiento normativo; representa un riesgo directo para la continuidad operativa y para la calidad eléctrica suministrada a uno de los equipos más sensibles e indispensables del entorno hospitalario: el Resonador Magnético Nuclear (RMN).

Este capítulo busca establecer, de manera clara y fundamentada, cómo la contaminación armónica afecta de forma tangible la fiabilidad del servicio, conectando los hallazgos experimentales con el funcionamiento real del equipamiento médico crítico.

3.7.1 Distorsión Armónica y su Relación con la Operación del RMN

Los valores extremos de THD-I detectados en ambos recintos provocan una deformación significativa en la tensión del Punto de Acoplamiento. Este fenómeno es consecuencia directa de la interacción entre las corrientes armónicas y la impedancia propia del sistema, produciendo componentes de tensión que distorsionan la onda original. En términos eléctricos, la relación se expresa mediante la ley de Ohm aplicada al dominio armónico.

Dado que las corrientes armónicas medidas son considerablemente altas, el resultado es una distorsión de tensión igualmente relevante, afectando directamente el desempeño del RMN.

3.7.2 Impacto en la Calidad de Imagen y la Precisión Diagnóstica

El RMN depende de un suministro eléctrico estable para generar los gradientes magnéticos y las señales de radiofrecuencia que forman la imagen. Una tensión distorsionada altera el funcionamiento de la electrónica de potencia interna, afectando la estabilidad del campo magnético base (B_0), la precisión de los pulsos de RF y la linealidad y temporización de los gradientes.

Estas perturbaciones se traducen en artefactos visibles en las imágenes, tales como ruido, duplicación de estructuras (ghosting), zonas borrosas o inconsistencias en la señal. En la práctica clínica, esto implica estudios inválidos, necesidad de repetir escaneos, aumento del tiempo de exploración y disminución de la confiabilidad diagnóstica.

3.7.3 Riesgo de Interrupciones y Fallos de Servicio

La distorsión armónica también afecta los componentes pasivos de la instalación eléctrica hospitalaria. El incremento de la corriente RMS eleva de manera significativa las pérdidas térmicas en transformadores, conductores y dispositivos de protección. Esto puede desencadenar sobrecalentamientos severos, disparos intempestivos de protecciones termo magnéticas y paros inesperados del RMN.

Una interrupción durante una adquisición de imágenes no solo destruye el estudio en curso, sino que puede generar tiempos muertos prolongados, afectar la programación del recinto y poner en riesgo procedimientos clínicos dependientes del diagnóstico oportuno.

CAPÍTULO IV

MITIGACIÓN PARA LAS ARMÓNICAS EN LA RED ELÉCTRICA

Según el análisis realizado y lo concluido entendemos que la red en el sistema hospitalario y clínico se comportan diferentes, el recinto clínico con un THD-I de 76,24% en la red y en el hospitalario tiene un THD-I 103,54%, y en ambos predominan armónicas similares, pero varía su magnitud. Se propondrá en ambos casos bajar el THD-I menor al 20 % como lo indica la “norma técnica de calidad de servicio para sistemas de distribución” y se mitigaran las armónicas con mayores magnitudes y más cercanas a la fundamental.

Como visto anteriormente existen 2 tipos de filtros (activos y pasivos).

Los filtros pasivos se dividen en 4 tipos:

- Filtros pasa bajas: Este filtro deja pasar las armónicas de baja frecuencias y corta las armónicas de alta frecuencia de orden de la h20 a la h50
- Filtros pasa altas: atenúan un amplio rango de armónicos de orden superior puede rechazar armónicas de orden h13 a h25 o más.
- Filtros pasa banda: deja pasar las frecuencias dentro del intervalo y las que se encuentran fuera de este intervalo las atenúan.
- Filtro pasa-banda resonante: estos absorben la atenuación individual de alta energía y son ideales para armónicas cercanas a la fundamental y de grandes magnitudes en un rango de armónica 2 a la 17.
- Filtros rechaza banda: bloquean fuertes bandas de frecuencias, pero su uso es idealmente en sistema de control bloqueando armónicas como h3 o la h7.

Filtros activos de potencia.

- Filtro activo paralelo (shunt APF): este es conectado en paralelo a la carga y es el tipo de filtro más eficaz y generalmente ocupado para problema de distorsión armónicas de corriente, si principio de funcionamiento no se basa en la resonancia sino en inyectar una corriente de la misma magnitud, pero en una fase opuesta,

esto lo logra gracias a un sistema de control que censa la red y puede identificar los armónicos gracias al algoritmo de cálculo del equipo con toda esta información pasa a un convertidor electrónico de potencia el cual inyecta a la red.

- Filtro activo en serie: este es ocupado principalmente para la THD-V y no es idóneo para la mitigación de corrientes armónicos
- Filtro híbrido: éste combina las cualidades de un filtro pasivo y las de un filtro activo, funcionando con sus respectivas cualidades mencionadas anteriormente de cada uno de ellos filtros.

Teniendo en cuenta La naturaleza del funcionamiento de los equipos de Imagen por Resonancia Magnética (MRI) compromete la Calidad de Energía debido a que su carga no es constante, sino altamente variable y no lineal. El uso de convertidores de potencia para alimentar las bobinas de gradiente y los sistemas de modulación de pulso genera un espectro armónico que es intrínsecamente dinámico, lo que significa que las órdenes armónicas presentes (h5, h7, etc.) y sus magnitudes cambian continuamente en función de la secuencia de imágenes y la fase del ciclo de funcionamiento del equipo. Esta variabilidad dificulta la mitigación armónica tradicional y puede provocar un incumplimiento constante de las normativas de distorsión (IEEE 519), afectando la confiabilidad de la red y la precisión de otros equipos sensible

Comportamiento en la distorsión armónica en las instalaciones.

- **Recinto hospitalario.** Tiene una distorsión total armónica de corriente de 103%, con 6 armónicas las cuales tienen la mayor magnitud en el sistema siendo h5, h7, h9, h11, h13 y h17, al mitigar estas podremos bajar al 17,96% del THD-I.
- **Recinto Clínico.** Tiene una distorsión total armónica de corriente de 76,24 % y se compone de h5, h7, h11, y h13, Como las armónicas con mayor magnitud y mitigando esas armónicas el THD-I baja a un 15,26 %.

Analizamos ambos sistemas de armónicos y los más presentes y se muestra unas cualidades similares por diferencia de 2 armónicos de menor magnitud comparado a los principales lo que no afecta a la evaluación en conjunto para decidir porque tipo de filtro a utilizar, pasivo o activo.

La evaluación se realiza bajo 4 ejes importante presentes en el sistema cuando se encuentra en operando el equipo de resonancia magnética estos son: Múltiples Armónicas, Riesgo de Resonancia, Adaptabilidad a la Carga y Funcionalidad Integrada.

Tabla N°4.1 Comparación entre filtro activo y filtro pasivo

Características	Filtro pasivo	Filtro activo
Múltiples armónicas	Para poder mitigar las armónicas mencionadas se necesita un filtro pasivo sintonizado independiente para cada una, lo que lleva a una complejidad del diseño y el espacio requerido en la instalación.	Tienen la capacidad de mitigar múltiples armónicas al mismo tiempo sin necesidad de enfocarse en frecuencias únicas. Esto los hace más eficientes y requiere un espacio menor de instalación
Riesgo de resonancia	Su principal característica es la resonancia con la cual puede desviar las armónicas, pero al tener una desviación o variación en la frecuencia puede afectar a la red, en vez de mitigar la armónica y puede amplificarla además provocar resonancia en el sistema también afectando los	Al no funcionar a base de resonancia, se evita el riesgo de amplificar armónicas y de entrar en resonancia con otros equipos, como bancos condensadores. Su principio no se basa en la resonancia, sino en inyectar una corriente de la misma

	filtros en paralelo o bancos condensadores	magnitud, pero en fase opuesta
Adaptabilidad a la carga	Es fijado para una sola frecuencia y es ineficaz si el espectro armónico cambia. Ante una carga variable (MRI), si la armónica disminuye, puede producir un efecto capacitivo y elevar la tensión.	Posee una gran eficacia en la adaptabilidad ya que trabaja con un controlador que censa la red en tiempo real, se evalúa y se ajusta al requerimiento exacto de compensación.
Funcionalidad integrada (valor integrado)	En los filtros sintonizados este contiene bancos de condensadores, y estos pueden mejorar el factor de potencia, pero es un valor estático y no modulable	Ofrece varias funcionalidades: Corrección dinámica del factor de potencia, balanceo de cargas trifásicas, amortiguamiento de resonancias, y compensación de inter armónicos

Concluyendo con la evaluación y comparación, y considerando la naturaleza dinámica y variable del espectro armónico generado por los equipos MRI, se determina que el Filtro Activo Paralelo (Shunt) es la solución ideal para ambos sistemas.

Justificación de Ingeniería:

- Manejo Dinámico: El Filtro Activo de Paralelo es el único capaz de gestionar y mitigar de manera eficiente el espectro armónico dinámico que cambia continuamente, ajustándose al requerimiento en tiempo real.
- Seguridad de la Red: La adopción de la solución pasiva implicaría múltiples bancos sintonizados, incrementando crítica y exponencialmente el riesgo de resonancia paralela y amplificación armónica. El Filtro Activo de Paralelo mitiga este riesgo al no depender de la resonancia para su operación.

- **Funcionalidad Integrada:** El Filtro Activo de Paralelo no solo resuelve el problema armónico, sino que añade un valor crítico al sistema, proporcionando corrección dinámica del factor de potencia y balanceo de cargas trifásicas, esenciales para la operación estable y eficiente de un sistema hospitalario.

Se justifica la implementación del Filtro Activo Paralelo (Shunt) para alcanzar los objetivos de mitigación (THD-I menor al 20%) y asegurar la Calidad de Energía en los recintos hospitalario y clínico.

4.2 Dimensionamiento del filtro activo de potencia.

Este se centra en calcular la corriente RMS máxima que el convertidor debe inyectar para limpiar la corriente de carga hasta el nivel de cumplimiento normativo o en nuestro caso que sea inferior a 20% del THD-I.

Los datos principales para su dimensionamiento son:

- voltaje nominal: la tensión de línea y su frecuencia.
- Corriente Armónica total de carga: Es el valor RMS de la corriente que el filtro debe compensar. Se calcula a partir del THD-I de la carga y la corriente fundamental de la carga
- espectro armónico dominante: La lista de armónicos más significativos (h5, h7, h11, h13, etc.) y sus magnitudes. Esto confirma que las armónicas a compensar se encuentran dentro del ancho de banda operativo del Filtro Activo de Potencia (típicamente hasta h50).
- objetivo de mitigación (normativo): El nivel de THD-I deseado (ej. reducir el THD-I al <5% de la corriente de cortocircuito o al <20% en nuestro caso), especificando la norma de cumplimiento (ej. IEEE 519)
- requerimientos adicionales (valor agregado): Si el Filtro Activo de Potencia también debe compensar potencia reactiva para la corrección del Factor de Potencia (FP) y/o balancear cargas trifásicas. Si se requieren estas funciones, la capacidad nominal del FAP (Filtro Activo Potencia nominal) debe incrementarse.

4.3 Dimensionamientos de filtros activo de potencia para recinto hospitalario y clínico.

- **Recinto hospitalario.**

Voltaje nominal: 400v, 50 Hz

Corriente armónica total de la carga: este valor es obtenido a partir de las armónicas que se mitigaran para llegar al objetivo de mitigación. Debe tener una capacidad de inyección de corriente de 289,058 A.

Espectro armónico dominante: los armónicos más significativos son: h5 con un 70,8% y h7 con un 67,2%, son la más presente en el sistema, aunque las demás armónicas a mitigar cada una son menor al 23% y con un rango de frecuencia de h5 a la h17.

Objetivo de mitigación: el THD-I a mitigar hasta reducir a un 17,96 %, sabiendo que tenemos un 103,54% del THD-I, en el sistema el objetivo es mitigar los armónicos para lograr que baje menor a un 20% del THD-I.

Requerimientos adicionales (valor agregado): no requerimos mejorar el factor de potencia ni balacear las cargas trifásicas, porque el enfoque del estudio esta orientado a los armónicos.

- **Recinto clínico:**

Voltaje nominal: 400v, 50 Hz

Corriente armónica total de la carga: este valor es obtenido a partir de las armónicas que se mitigaran para llegar al objetivo de mitigación. Debe tener una capacidad de inyección de corriente de 177,965 A.

Espectro armónico dominante: los armónicos más significativos son: h5 con un 62,7% y h7 con un 38,6%, son la más presente en el sistema, aunque las demás armónicas a mitigar cada una son menor y cercana al 10% y con un rango de frecuencia de h5 a la h13.

objetivo de mitigación: el THD-I a mitigar es de 15,07%, sabiendo que tenemos un 76,24% del THD-I, en el sistema el objetivo es mitigar los armónicos para lograr que baje menor a un 20% del THD-I.

Requerimientos adicionales (valor agregado): no requerimos mejorar el factor de potencia ni balancear las cargas trifásicas, porque el enfoque del estudio está orientado a los armónicos.

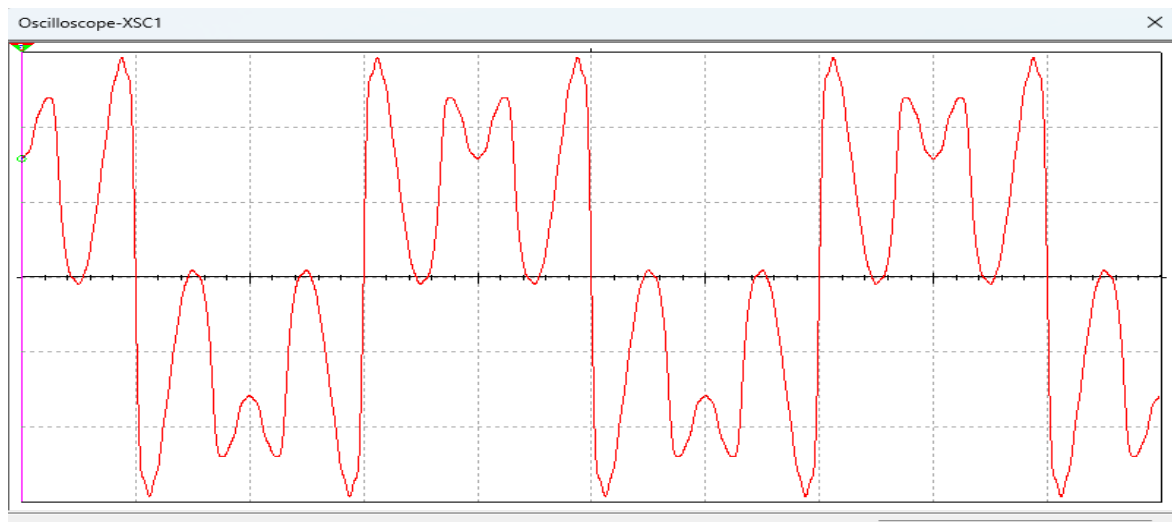
4.4 Resultados de la mitigación del filtro activo luego de la simulación en MULTISIM.14.

Los resultados se evaluarán en las señales y en su forma de onda y serán comparados con las señales de los sistemas antes de la mitigación de las armónicas.

4.4.1 Resultado de simulación en recinto hospitalario:

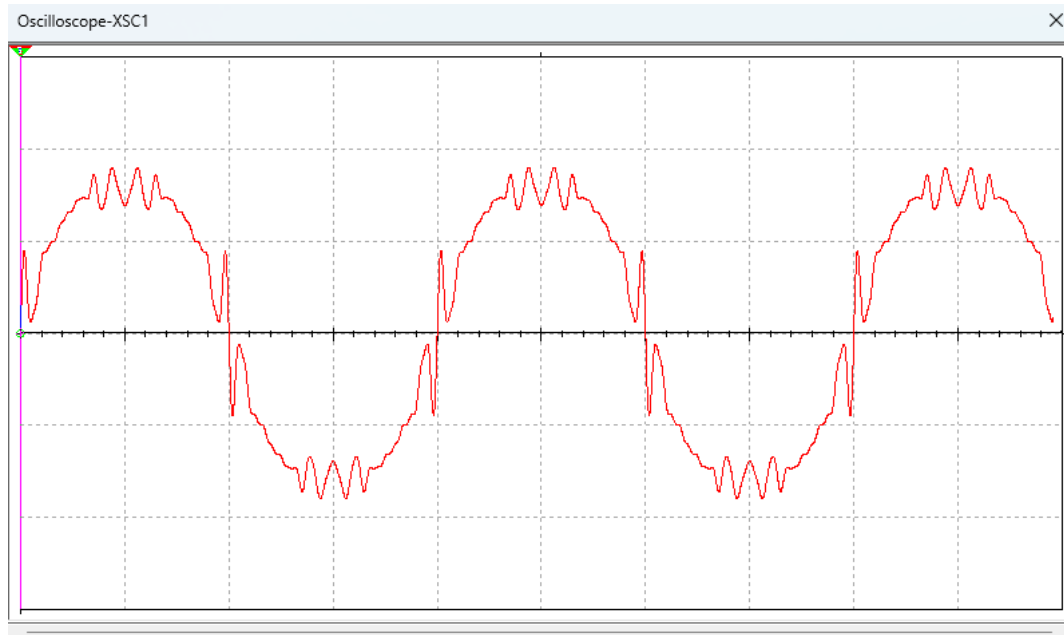
La señal del sistema se encuentra contaminada y con una gran distorsión antes de la simulación del filtro activo,

Figura N°4.1 imagen de la señal con un THDi del 103%



Pero al simular el filtro activo en el sistema y mitigando las armónicas más presentes, reduciendo el THD-I a menos de 20% en el sistema. Se puede observar una gran mejora en la señal, pero todavía se observa una distorsión la cual tiene varios picos y caídas que afectan a la señal.

Figura N°4.2 imagen de la señal con una distorsión menor a 20%



Por lo que mitigaran más armónicas para corregir la distorsión de la señal. Las armónicas nuevas a mitigar serán las h3, h 15, h 23 y h 25.

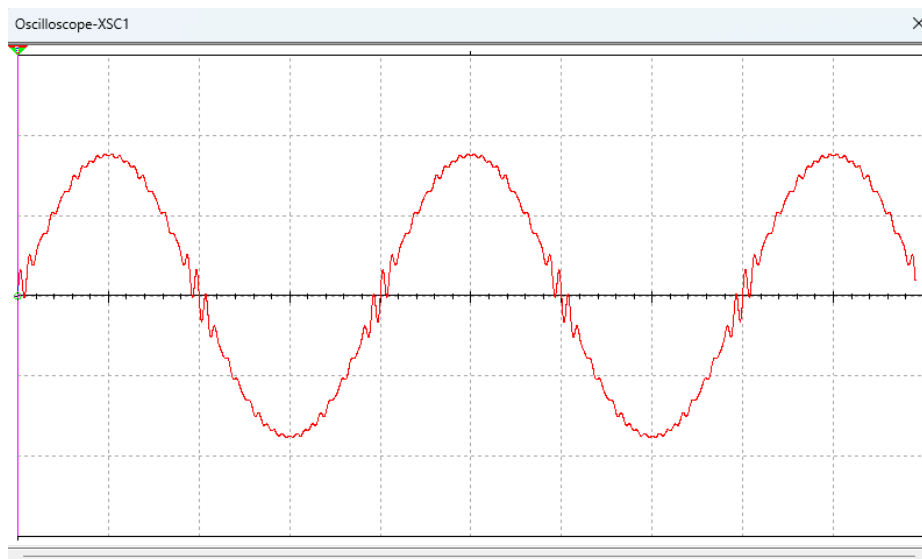
Esto nos indica que tendremos que aumentar nuestra capacidad del filtro, tanto en potencia como en la frecuencia, quedando con este nuevo diseño:

- Voltaje nominal: 400v, 50 Hz
- Corriente armónica total de la carga: este valor es obtenido a partir de las armónicas que se mitigaran para llegar al objetivo de mitigación. Debe tener una capacidad de inyección de corriente de 292,71 A.
- Espectro armónico dominante: los armónicos más significativos son: h5 con un 70,8% y h7 con un 67,2%, son la más presente en el sistema, aunque las demás armónicas a mitigar cada una son menor al 3% y con un rango de frecuencia de h3 al h25.
- objetivo de mitigación: el THD-I a mitigar hasta dejar un 7,8 % de distorsión sabiendo que tenemos un 103,54% del THD-I, en el sistema el objetivo es mitigar los armónicos para lograr que baje menor a un 20% del THD-I y/o las que perjudican a la señal.

- Requerimientos adicionales (valor agregado): no requerimos mejorar el factor de potencia ni balancear las cargas trifásicas, porque el enfoque del estudio está orientado a los armónicos.

Simulando la mitigación que realizaría este nuevo filtro, en la Figura N°4.3 se puede observar que existe una mejora considerable.

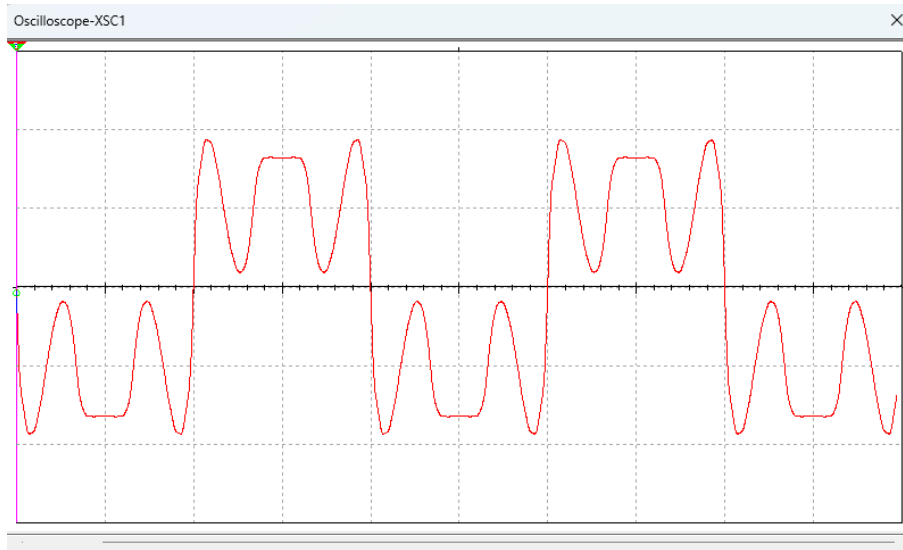
Figura N°4.3 Figura mitigando los armónicos más presentes



4.4.1 Resultado de simulación en recinto clínico.

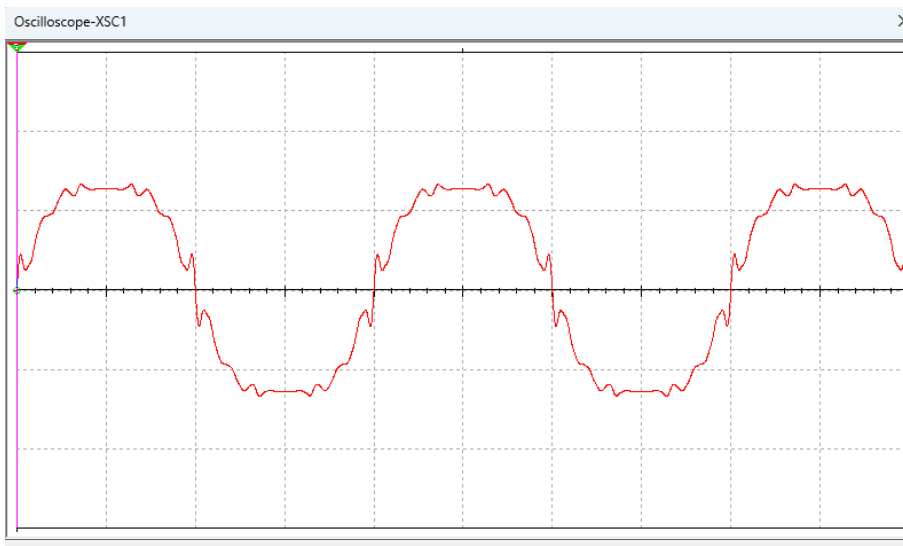
Tal como se muestra en el osciloscopio de la Figura4.4, es de contaminación armónica severa, incompatible con los estándares de calidad de energía para un recinto clínico y la operación confiable de equipos de diagnóstico de alta precisión como la Resonancia Magnética. La distorsión es tan alta que la corrección es imperativa no solo por eficiencia, sino por la protección de activos y el cumplimiento normativo.

Figura N°4.4 imagen de la señal con distorsión del 76,24%



Al incluir en la simulación la mitigación que realizaría el filtro activo en el sistema y cancelando las armónicas más presentes, reduciendo el THD-I a menos de 20% en el sistema. Se puede observar una gran mejora en la señal, volviendo a una señal no 100% pura, pero con una menor distorsión y sin picos pronunciado.

Figura N°4.5 imagen de la señal con una distorsión menor a 20%



La simulación ha demostrado la eficacia superior del Filtro Activo de Potencia (FAP) para corregir la grave contaminación armónica de un sistema, logrando una reducción del THD-I de 76% a un valor menor al 20%. Este resultado no solo valida la tecnología del FAP, sino que, de manera crítica, asegura el cumplimiento directo con el límite de Distorsión Armónica de Corriente (THD-I) establecido por la normativa chilena para la calidad de servicio y distribución en la red.

La elección de un FAP, frente a un filtro pasivo, fue la decisión técnica de selección correcta, ya que un THD-I inicial del 76% en un recinto clínico con equipos ultrasensibles como la Resonancia Magnética (RM) habría provocado un alto riesgo de resonancia catastrófica y un pobre rendimiento con una solución pasiva. Al asegurar un THD-I menor al 20%, la clínica logra:

- **Confiabilidad Operacional:** Se elimina la fuente principal de ruido en la red, protegiendo la sensible electrónica de la RM y el equipo de soporte vital, lo que garantiza la continuidad del servicio de salud.
- **Cumplimiento Normativo:** Se satisface el requisito legal chileno, evitando posibles sanciones y asegurando la compatibilidad con la red de distribución.
- **Eficiencia de Inversión:** Se optimiza la vida útil de los activos y se reducen las pérdidas por calentamiento excesivo en transformadores y conductores, convirtiendo la inversión en el FAP en una medida de seguridad y eficiencia esencial.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El presente capítulo finaliza el Trabajo de investigación de proyecto de titulación, sintetizando los hallazgos críticos de la investigación y formalizando la validación de la solución propuesta. Este capítulo está estructurado para presentar las Conclusiones Fundamentales derivadas del análisis cuantitativo, demostrar el Cumplimiento de los Objetivos generales y específicos planteados, y establecer las Consideraciones y Proyecciones para futuros proyectos de ingeniería en infraestructura crítica de salud. Se ratifica el Juicio Técnico de que la implementación de un Filtro Activo Paralelo no es una mejora opcional, sino una necesidad operacional indispensable para asegurar la precisión diagnóstica del RMN.

5.1 Conclusiones Fundamentales y Juicio Técnico

La investigación ha establecido que los Resonadores Nucleares Magnéticos (RMN), al ser cargas no lineales, generan un riesgo eléctrico severo.

- Validación del Riesgo Diagnóstico y Operacional: Se demostró que la distorsión armónica de corriente alcanza niveles críticos de 103.54% y 76.24%. Esta severa contaminación se traduce en una Distorsión Armónica de Tensión en el punto de acoplamiento, la cual introduce inestabilidad en la electrónica de control del RMN. Esta inestabilidad impacta directamente a los gradientes magnéticos y a los pulsos de radiofrecuencia (RF), resultando en un mal procesamiento de imágenes traduciéndose en los siguientes efectos ruido o ghosting, comprometiendo la fiabilidad del diagnóstico y la función esencial del equipo.
- Repercusión Normativa: Se concluye que el nivel de contaminación armónica medido en ambos recintos constituye un incumplimiento normativo flagrante respecto a la NTCSA, lo que conlleva un riesgo de fallas por sobrecalentamiento y la operación intempestiva de protecciones, interrumpiendo la adquisición de imágenes.
- Éxito de la Mitigación y Logro de Mejoras: La propuesta del Filtro Activo Paralelo (FAP) fue validada, demostrando una reducción del THD-I al 7.8% en el caso más

crítico. Esta mejora no solo recupera el cumplimiento normativo, sino que elimina la causa raíz de la inestabilidad en la alimentación del RMN, asegurando la precisión de los gradientes magnéticos y, por ende, la calidad y continuidad del procesamiento de imágenes.

5.2 Proyecciones e Implicaciones

Los resultados de esta investigación aportan evidencia de alto valor para la gestión de la calidad de energía en el sector salud, demostrando que el tratamiento de la distorsión armónica no puede considerarse un aspecto secundario o meramente correctivo, sino un elemento crítico dentro del diseño, operación y mantenimiento de instalaciones hospitalarias modernas.

En este contexto, se establece que la inversión en soluciones de mitigación activa como el Filtro Activo Paralelo (FAP) no constituye un gasto adicional, sino un requerimiento operativo esencial para garantizar niveles adecuados de desempeño eléctrico y clínico. Su implementación permite asegurar:

- **Fiabilidad Diagnóstica:** Al mantener la estabilidad eléctrica del sistema, se reduce el riesgo de interferencias que podrían afectar el funcionamiento del RMN y, por tanto, la calidad de las imágenes diagnósticas.
- **Cumplimiento Normativo:** Se evita la vulneración de la NTCSD y de estándares internacionales, disminuyendo la exposición a sanciones regulatorias, fallas por sobrecarga y daños en transformadores, conductores y equipos sensibles.
- **Eficiencia Energética:** La mitigación de armónicos contribuye a reducir las pérdidas por efecto Joule, lo que mejora el rendimiento general del sistema eléctrico y extiende la vida útil de los componentes.

Como proyección a futuro, se recomienda que los proyectos de ingeniería en recintos hospitalarios incorporen el análisis armónico como una etapa obligatoria dentro del diseño eléctrico, especialmente en áreas que albergan cargas de alta sensibilidad o equipos no lineales. Asimismo, se sugiere considerar la implementación de FAP no sólo para los RMN, sino también para otras cargas críticas tales como sistemas de climatización de

velocidad variable, UPS, aceleradores lineales y equipamiento médico de potencia, cuyo comportamiento podría comprometer la estabilidad de la red interna.

En conjunto, estas proyecciones refuerzan la necesidad de que el sector salud adopte una visión preventiva e integral de la calidad de energía, reconociéndola como un factor determinante para la continuidad operativa, la seguridad eléctrica y la calidad del servicio clínico.

BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, CK y Sadiku, MNO (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos (5.ª ed.)*. McGraw-Hill Interamericana.
- Bien, A, & Hanzelka, Z (2004). *Guía de la Calidad de la Energía Eléctrica: Armónicos e Interarmónicos*. (2004). AGH University of Science and Technology. Recuperado de <https://impic.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/05/311-armonicos-interarmonicos.pdf>
- Boerr G., E. (sf). *Componentes y equipamiento de un resonador magnético (Tema 4)*.
- Domínguez Solares, WR (2013). *Diseño e implementación de técnicas de mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo para equipos de imágenes médicas obtenidas por resonancia magnética* [Trabajo de Graduación para optar al título de Ingeniero Eléctrico], Universidad de San Carlos de Guatemala
- De La Rosa, F.C. (2006). *Harmonics and Power Systems* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420004519>
- Comisión Nacional de Energía. (2024). *Norma Técnica de Calidad de Servicio para Sistemas de Distribución (Resolución Exenta CNE N° 210)*. Santiago, Chile: Autor.
- Favián Ruiz, E. (1993). *Armónicas: causas, efectos y medidas correctivas en sistemas eléctricos de distribución* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM.
- Floyd, T. (2007). *Principios de circuitos eléctricos*. (8° Ed). Pearson Educación.
- Grajales, J., Ramírez, J. y Cadavid, D. (2004). *Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (31), 116-123.

Martínez, D. (2012). *Estudio de armónicos y propuesta de soluciones en el taller de chapistería de SEAT MARTORELL* [Trabajo de final de grado]. UPC, Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona, Departament d'Enginyeria Elèctrica. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2099.1/15767>

Pérez Miguel A., Bravo de Medina N. y Llorente Antón M. (2004). *La amenaza de los armónicos y sus soluciones*. Paraninfo

Piedrahita Agudelo, Ancizar. *Calidad del servicio de Energía Eléctrica*. Tesis de Maestría 621.319. Universidad de los Andes. Santafé de Bogotá. 1993.

Tejada, Alexis & Llamas Terrés, Armando. (2010). *Efectos de las Armónicas en los Sistemas Eléctricos*.

Vázquez, R. (2003). Filtrado de Armónicos: *¿Cómo decidir entre la opción de filtro activo, compensador activo o filtro híbrido?* Recuperado de <https://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=121>