

**PROPUESTA TÉCNICA QUE INCORPORA LOS PARÁMETROS DE
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN LA ETAPA DE DISEÑO, PARA
LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES,
MOTORES DE INDUCCIÓN Y ALGUNOS EQUIPOS ASOCIADOS.**

RAFAEL ENRIQUE FRAGOZO DIAZ



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

2012

**PROPUESTA TÉCNICA QUE INCORPORA LOS PARÁMETROS DE
COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN LA ETAPA DE DISEÑO, PARA
LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES,
MOTORES DE INDUCCIÓN Y ALGUNOS EQUIPOS ASOCIADOS.**

RAFAEL ENRIQUE FRAGOZO DIAZ

Trabajo de investigación para optar por el título de Ingeniero Electricista

DIRECTOR

M. Sc. (c) GABRIEL ALEXIS MALAGÓN CARVAJAL

CODIRECTORES

Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

MPE. WILSON GIRALDO PICÓN



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2012

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso

A los gestores de mi existencia Josefa Cristina Diaz

Y Álvaro Guillermo Fragozo Gámez

A mi abuela Olga Parodi

A mis hermanas Olga Sofía y María Marcela Fragozo Diaz

Y a todos los que han influido en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus constantes bendiciones.

Al cuerpo docente de la E3T quienes con su sapiencia y experiencia me formaron como profesional, especialmente a los ingenieros Gabriel Malagón, Wilson Giraldo y al Dr. Gabriel Ordoñez con quienes logré desarrollar esta investigación.

A mi familia, a Camila Diaz, y a todos los que fueron mis compañeros de clase por apoyarme incondicionalmente durante la materialización de este sueño.

A Chevron Petroleum Company por creer en mí brindándome su patrocinio.

A los compañeros de XM S.A. E.S.P. por motivarme y brindarme la oportunidad de comenzar mi vida profesional.

A todos Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. CRITERIOS LEGALES NORMATIVOS Y TÉCNICOS	19
1.1 REGLAMENTACIÓN Y NORMAS RELACIONADAS CON CEM	19
1.2 NORMAS RELACIONADAS CON CEM EN TRANSFORMADORES, MOTORES Y EQUIPOS ASOCIADOS	22
2. ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN TRANSFORMADORES.....	23
2.1 DISTORSIÓN ARMÓNICA Y SU INCIDENCIA EN LA OPERACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES	24
2.2 PROCEDIMIENTOS RECOMENDADOS PARA EVALUAR LA CAPACIDAD DE CARGA DE UN TRANSFORMADOR SEGÚN EL ESTÁNDAR IEEE STD C57.110™-2008	28
2.2.1 <i>Cálculos típicos para transformadores tipo seco [4].....</i>	<i>28</i>
2.2.2 <i>Ejemplo</i>	<i>29</i>
2.2.3 <i>Ejemplo</i>	<i>31</i>
2.2.4 <i>Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido [4].....</i>	<i>34</i>
2.2.5 <i>Ejemplo</i>	<i>36</i>
2.3 CÁLCULO DE LA CAPACIDAD EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR UTILIZANDO LOS DATOS DE LAS PRUEBAS DE RUTINA	40
2.3.1 <i>Cálculos típicos para transformadores tipo seco[4].....</i>	<i>44</i>
2.3.2 <i>Ejemplo</i>	<i>44</i>
2.3.3 <i>Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido [4].....</i>	<i>47</i>
2.3.4 <i>Ejemplo</i>	<i>47</i>
2.4 COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA “K-FACTOR” Y EL FACTOR ARMÓNICO DE PÉRDIDAS DEL ESTÁNDAR IEEE C57.110.....	52
2.4.1 <i>Definición del K-factor (Underwriter Laboratories)</i>	<i>52</i>
2.4.2 <i>Relación entre el K- Factor y el factor armónico de pérdidas.....</i>	<i>53</i>
2.4.3 <i>Ejemplo</i>	<i>55</i>

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

2.5	OTRAS METODOLOGÍAS DE DESCLASIFICACIÓN DE TRASFORMADORES [9].....	56
2.5.1	<i>Método europeo</i>	56
2.5.2	<i>El Factor de pérdidas adicionales</i>	57
3.	ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN.....	59
3.1	LA DISTORSIÓN ARMÓNICA Y SU INCIDENCIA EN LA OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	60
3.2	EL DESBALANCE DE TENSIÓN Y SU INCIDENCIA EN LA OPERACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	63
3.3	PROCEDIMIENTOS RECOMENDADOS PARA REDUCIR LA POTENCIA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN SEGÚN LA NORMA NEMA MG1 [7]	63
3.3.1	<i>Factor de desclasificación aplicado en presencia de armónicos</i>	63
3.3.2	<i>Ejemplo</i>	64
3.3.3	<i>Factor de desclasificación aplicado en presencia de tensiones desbalanceadas</i>	65
3.3.4	<i>Ejemplo</i>	66
3.3.5	<i>Ejemplo</i>	67
3.4	FACTOR DE REDUCCIÓN DEL MOTOR PARA EVITAR EL SOBRECALENTAMIENTO SEGÚN IEC 60034-26 [8]	67
3.4.1	<i>Ejemplo</i>	69
3.5	OTRAS RECOMENDACIONES PRÁCTICAS [15].....	69
4.	ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EQUIPOS ASOCIADOS	73
4.1	ANÁLISIS DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.....	73
4.1.1	<i>Variadores de velocidad como cargas afectadas por las perturbaciones en la red</i>	74
4.1.2	<i>Variadores de velocidad como cargas causantes de perturbaciones en la red</i>	74

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

4.2	PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA MITIGAR LOS ARMÓNICOS GENERADOS POR LOS VARIADORES	76
4.2.1	<i>Filtrado de armónicos</i>	76
4.2.2	<i>Transformadores de conversión</i>	79
4.2.3	<i>Convertidor de 12 pulsos</i>	79
4.2.4	<i>Corrección activa del factor de potencia</i>	79
5.	CONCLUSIONES	81
6.	RECOMENDACIONES	83
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
8.	ANEXOS	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 2.2.2.....	29
Tabla 2-2 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 2.2.2.	30
Tabla 2-3 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 2.2.3.....	32
Tabla 2-4 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 2.2.3.	33
Tabla 2-5 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 2.2.5.....	36
Tabla 2-6 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 2.2.5.	37
Tabla 2-7 Corrección de las pérdidas.	39
Tabla 2-8 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo 2.3.2.....	44
Tabla 2-9 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo 2.3.2.	46
Tabla 2-10 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 2.3.4.....	49
Tabla 2-11 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 2.3.4. ...	50
Tabla 2-12 Corrección de las pérdidas.	51
Tabla 2-13 Ejemplo de cálculo del K- Factor	55
Tabla 2-14 Comparación del K- Factor y el factor armónico de carga para diferentes cargas	56
Tabla 3-1 Convertidor armónico de seis pulsos.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Campo electromagnético producido por la corriente de carga en el transformador.....	24
Figura 2. Campo electromagnético en los devanados producido por la corriente de carga.....	27
Figura 3. Curva de reducción de potencia.	64
Figura 4. Curva de reducción de potencia.	65
Figura 5. Valores típicos de reducción de potencia de motores diseño N.	68
Figura 6. Conexión de un filtro pasivo en paralelo con la carga.	77
Figura 7. Conexión de un filtro activo en paralelo con la carga.	78
Figura 8. Conexión de un filtro híbrido.	78
Figura 9. Conductor continuamente transpuesto.	90
Figura 10. Potencias de entrada, pérdidas y potencia de salida en un motor de inducción.....	108
Figura 11. Aumento de la temperatura adicional contra la función del factor armónico.	116
Figura 12. Pérdida de vida útil del motor de 100 hp.....	117
Figura 13. Pérdida útil de varios motores.	118
Figura 14. Clasificación de las fuentes de ruido en motores eléctricos.....	119
Figura 15. Factor de potencia en función de la distorsión armónica de tensión. .	120
Figura 16. Eficiencia en función de la distorsión armónica.	121
Figura 17. Componentes simétricas: Secuencias.	123
Figura 18. Sistema simétrico con carga desbalanceada.....	123

LISTA DE ANEXOS

A. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR.....	87
PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR	87
EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS SOBRE LAS PÉRDIDAS I^2R	88
EFFECTO ARMÓNICO SOBRE LAS PÉRDIDAS POR CORRIENTES EDDY EN LOS DEVANADOS (P_{EC}).....	89
EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS SOBRE LAS PÉRDIDAS POR DISPERSIÓN (POSL).....	90
EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS SOBRE LA TEMPERATURA DE LA CAPA SUPERIOR DEL ACEITE.....	91
COMPONENTES DC DE LA CORRIENTE DE CARGA	91
CAPACIDAD EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR	92
PÉRDIDAS EN POR UNIDAD DEL TRANSFORMADOR	92
PÉRDIDAS EN EL TRANSFORMADOR CON CORRIENTES DIFERENTES A LA NOMINAL.	93
FACTOR ARMÓNICO DE PÉRDIDAS PARA LAS PÉRDIDAS POR CORRIENTES EDDY EN LOS DEVANADOS'	95
<i>Ejemplo A1</i>	96
<i>Ejemplo A2</i>	98
FACTOR ARMÓNICO PARA LAS PÉRDIDAS POR DISPERSIÓN.....	99
<i>Ejemplo A3</i>	101
CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA ESPECIFICAR UN NUEVO TRANSFORMADOR.....	101
<i>Filtrado de armónicos de corriente</i>	101
<i>Impacto en el neutro</i>	102
<i>Equipos de compensación</i>	102
<i>Pantalla electrostática con conexión a tierra</i>	102
<i>Consideración de diseño para el exterior de los devanados</i>	103
<i>Análisis del espectro armónico</i>	103
<i>Consideraciones de diseño de los devanados</i>	104

B. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL CÁLCULO DE LA REDUCCIÓN DE POTENCIA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	106
RENDIMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	106
PÉRDIDAS EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN	107
DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	108
<i>Niveles de armónicos permitidos por las normas.....</i>	<i>111</i>
EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LAS PÉRDIDAS EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	114
EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS EN EL AUMENTO DE LA TEMPERATURA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	115
EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS EN LA PÉRDIDA DE VIDA ÚTIL DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	116
EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS EN EL RUIDO ACÚSTICO Y TORQUES PULSANTES EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	118
EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS EN EL FACTOR DE POTENCIA Y EFICIENCIA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	119
DESBALANCE DE TENSIONES EN MOTORES DE INDUCCIÓN	122
EFFECTOS DEL DESBALANCE DE TENSIÓN SOBRE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	124
<i>Efectos en el rendimiento del motor.....</i>	<i>124</i>
<i>Efectos en el par del motor.....</i>	<i>124</i>
<i>Efectos de la tensión desbalanceada en la velocidad del motor a plena carga ...</i>	<i>124</i>
<i>Efectos de la tensión desbalanceada en las corrientes del motor</i>	<i>124</i>
<i>Límites permitidos por norma para el desbalance de tensión en la red.....</i>	<i>125</i>
MEDICIÓN DE DESBALANCE DE TENSIÓN	126

RESUMEN

TÍTULO:

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados¹

AUTOR:

Rafael Enrique Fragozo Díaz²

PALABRAS CLAVES:

Compatibilidad electromagnética, transformadores, motores de inducción, desclasificación, distorsión armónica de tensión, desbalances de tensión, armónicos.

DESCRIPCIÓN:

En la actualidad, la compatibilidad electromagnética (CEM) de los dispositivos y equipos en general se ha convertido en una de las principales exigencias de calidad, buscando garantizar que la máquina funcione en su entorno electromagnético de forma satisfactoria, confiable, y segura, sin producir perturbaciones electromagnéticas intolerables para cualquier otro dispositivo situado en el mismo entorno. Por esta razón, el análisis de los fenómenos relacionados con la interferencia electromagnética (IEM) y la solución a los problemas que ocasiona, han adquirido en los últimos años una notable relevancia en el desarrollo y desempeño de los dispositivos modernos, equipos, máquinas y sistemas eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones.

En este documento se presenta una propuesta técnica que incorpora parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados, basada en recomendaciones prácticas identificadas en el ámbito internacional, y que puede ser aplicadas y/o adoptadas por la normatividad colombiana. Inicialmente se revisan los criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos, luego se identifican los parámetros de compatibilidad electromagnética que afectan la adecuada operación y/o dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados en las instalaciones de uso final y por último se documentan algunas prácticas recomendadas para mitigar los efectos producidos por las perturbaciones identificadas.

¹ Proyecto de grado

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: M. Sc. (c) Gabriel Alexis Malagón. Codirectores: Dr, Gabriel Ordóñez, MPE. Wilson Giraldo Picón

ABSTRACT

TITLE:

Technical proposal incorporating electromagnetic compatibility (EMC) parameters in the design stage for the selection and sizing of transformers, induction motors and some associated equipment³

AUTHOR:

Rafael Enrique Fragozo Diaz⁴

KEYWORD:

Electromagnetic compatibility, transformers, induction motors, derating, harmonic voltage distortion, voltage unbalance, harmonics.

DESCRIPTION:

Today, electromagnetic compatibility (EMC) of devices and equipment in general has become a major quality requirement, seeking to ensure that the machine operates in its electromagnetic environment satisfactorily, reliable, and safe, without producing intolerable electromagnetic disturbances to any other device in the same environment. For this reason, the analysis of the phenomena related to electromagnetic interference (EMI) and the solution to the problems it causes have become in recent years a significant role in the development and performance of modern devices, equipment, machines and systems electrical, electronics and telecommunications.

This document presents a technical proposal that incorporates electromagnetic compatibility parameters in the design stage for the selection and sizing of transformers, induction motors and some associated equipment based on practical recommendations identified at the international level, and can be applied and / or adopted by Colombian law. Initially we review the legal criteria, regulatory, policy and technical parameters, then are identify the parameters that affect electromagnetic compatibility proper operation and/or sizing of transformers, induction motors and some associated equipment in end-use facilities, and finally documents some practices to mitigate the effects of identified perturbations.

³ Degree project: Research Work.

⁴Faculty of Physics Mechanics Engineering. School of Electrics Engineering, Electronics Engineering and Telecommunications. Director: M. Sc. (c) Gabriel Alexis Malagón. Codirectors: Dr, Gabriel Ordóñez, MPE. Wilson Giraldo Picón

INTRODUCCIÓN

El análisis de los fenómenos relacionados con la interferencia electromagnética (IEM) y la solución a los problemas ocasionados por ésta, han adquirido en los últimos años una notable relevancia en el desarrollo y desempeño de los dispositivos modernos, equipos, máquinas y sistemas eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones.

En el ámbito mundial, el entorno en el que interactúan los equipos y máquinas es cada vez más complejo debido básicamente a dos factores principales: a) la creciente vulnerabilidad de los dispositivos y equipos (nivel de inmunidad); y b) la capacidad que estos tienen de interferir el funcionamiento de otro equipo e incluso la afectación a los diversos sistemas (nivel de emisión) [1].

La interferencia electromagnética se manifiesta en el deterioro de la operación, el mal funcionamiento o la falla de una máquina, dispositivo, equipo o sistema eléctrico, electrónico o de telecomunicaciones, y se puede evidenciar en fenómenos como rayos, descargas electrostáticas, ruido, fluctuaciones de tensión, transitorios electromagnéticos y distorsiones de la onda de tensión y de corriente o armónicos.

En los transformadores por ejemplo, la presencia de armónicos hace que se genere más calor en los devanados y a su vez, que la temperatura de funcionamiento aumente, provocando así el deterioro del aislamiento y una potencial reducción de su vida útil. Algo similar ocurre en los motores de inducción, en los cuales la presencia de armónicos genera pérdidas adicionales que pueden producir desgastes prematuros y roturas en acoplamientos y cojinetes [2].

Debido a este tipo de incidencias hoy a nivel mundial, la compatibilidad electromagnética (CEM) de los dispositivos y equipos en general se ha convertido en una de las principales exigencias de calidad, buscando garantizar que el funcionamiento de las máquinas sea lo más confiable, flexible y seguro posible, teniendo en cuenta que este debe operar adecuadamente en un entorno electromagnético específico.

Es por esto, que en este documento se presenta una propuesta técnica que incorpora parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados, basada en buenas prácticas de ingenierías identificadas en el ámbito internacional, y que puede ser aplicada y/o adoptada por la normatividad colombiana.

En el primer capítulo se revisan y documentan los criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos asociados con los parámetros de compatibilidad electromagnética, que tienen implicaciones directas sobre la selección y/o dimensionamiento de transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados, tanto en Colombia como a nivel internacional.

En el segundo capítulo se identifican los parámetros de compatibilidad electromagnética que afectan la adecuada operación y/o dimensionamiento de los transformadores en las instalaciones de uso final, y se documentan algunas prácticas recomendadas para mitigar los efectos producidos por perturbaciones electromagnéticas sobre los mismos.

Por su parte, en el tercer capítulo se identifican los parámetros de compatibilidad electromagnética que afectan la adecuada operación y/o dimensionamiento de los motores de inducción en las instalaciones de uso final, y se documentan algunas prácticas recomendadas para disminuir los efectos ocasionados por interferencia electromagnética en los motores.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan los fenómenos de compatibilidad electromagnética relacionados con los equipos asociados a los motores de inducción, así como las estrategias para su mitigación, haciendo especial énfasis en los variadores de velocidad. En último lugar, el quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación realizada en este trabajo de grado.

1. CRITERIOS LEGALES NORMATIVOS Y TÉCNICOS

Con los criterios legales, normativos y técnicos es posible establecer los fundamentos, las directrices y los requisitos mínimos necesarios para cumplir con el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de cualquier proyecto de ingeniería eléctrica. Estos criterios igualmente, hacen referencia a los requerimientos legales, técnicos y regulatorios que son de obligatorio cumplimiento, y que tienen como propósito establecer las condiciones legales mínimas que se deben cumplir.

En este capítulo se identifican los aspectos reglamentarios y normativos, existentes tanto a nivel nacional como internacional, que se relacionan con la compatibilidad electromagnética y que inciden en el diseño, selección, operación y mantenimiento de los transformadores, los motores de inducción y los equipos asociados con ellos.

1.1 *Reglamentación y normas relacionadas con CEM*⁵

La Compatibilidad Electromagnética - CEM de los dispositivos y equipos eléctricos, electrónicos y de telecomunicaciones es hoy en día, una de las principales exigencias de calidad. La Unión Europea por ejemplo, ha establecido la denominada directiva de CEM de obligatorio cumplimiento, que cubre un gran conjunto de sistemas y equipos eléctricos y electrónicos comercializados en su territorio. Por otra parte, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, impone restricciones a las emisiones radiadas y conducidas de los dispositivos digitales que sean comercializados en dicho país [1].

En Colombia, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas⁶ [3] establece las condiciones técnicas que garanticen la seguridad en los procesos de generación,

⁵ Compatibilidad Electromagnética. "Electromagnetic Compatibility"-EMC, en idioma inglés.

transmisión, transformación, distribución y utilización de la energía eléctrica en todo el territorio nacional. Este reglamento es de obligatorio cumplimiento y está sustentada en la norma NTC 2050 “Código eléctrico colombiano”.

La más reciente actualización del RETIE corresponde a la Resolución No. 18 1294 de agosto 06 del 2008, en la cual se especifican las diferentes condiciones y parámetros de diseño que se deben cumplir en una instalación eléctrica de uso final, con el objetivo de garantizar el adecuado funcionamiento de las instalaciones y la seguridad de quienes las operan, como textualmente se especifica en el artículo 1º: *“El objeto fundamental de este reglamento es establecer las medidas tendientes a garantizar la seguridad de las personas, de la vida animal y vegetal y la preservación del medio ambiente; previniendo, minimizando o eliminando los riesgos de origen eléctrico”*.

En el artículo 6º *“Análisis de compatibilidad electromagnética”* de este mismo reglamento, se recomienda que las técnicas de la compatibilidad electromagnética (CEM) deben ser aplicadas cuando los niveles de operación de los equipos, dispositivos o sistemas sean más rigurosos que las exigencias para cumplir con la seguridad de las personas, y explica algunos conceptos básicos relacionados con la CEM. Por otro lado, en el artículo 14º *“Campos electromagnéticos”*, se definen las exigencias para la intensidad de campo eléctrico y densidad de flujo magnético para las zonas de permanencia de personas sin importar el tiempo, tomando como base los criterios de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la institución internacional ICNIRP⁷ para la protección de las personas y el medio ambiente frente a las radiaciones no-ionizantes. También en este artículo se suministran guías y recomendaciones para evitar la exposición a dichas radiaciones.

⁶ Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas- RETIE

⁷ Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes.”International Commission On. Non-Ionizing Radiation Protection”, en idioma inglés.

Por su parte, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC⁸ ha realizado algunos trabajos de revisión y adaptación de normas internacionales IEC⁹, relacionadas con compatibilidad electromagnética y calidad de la energía, donde se presentan definiciones y términos fundamentales relacionados con la compatibilidad electromagnética (CEM), así como los límites y la metodología de evaluación de la calidad de la potencia eléctrica en un punto de conexión común, como se relaciona a continuación:

- NTC 5000 Calidad de la potencia eléctrica CPE. Definiciones y términos fundamentales. ICONTEC. 2002.(En proceso de actualización)
- NTC 5001 Calidad de la potencia eléctrica, límites y metodología de evaluación en punto de conexión común. ICONTEC. 2008. (En proceso de actualización)
- NTC-IEC 61000-1-1 Compatibilidad electromagnética CEM parte I Generalidades. Sección 1. Aplicación y presentación de definiciones y términos fundamentales. ICONTEC. 2000.

Como aporte complementario al desarrollo normativo colombiano y teniendo en cuenta los numerosos estudios que han sido realizados en el ámbito internacional relacionados con la identificación, medición y estructuración de lineamientos de mitigación, frente a los parámetros de compatibilidad electromagnética que generan problemas en una instalación eléctrica, se presenta a lo largo de este documento la revisión y documentación de algunas buenas prácticas de ingeniería tendientes a reducir los efectos producidos por la interferencia electromagnética en transformadores, motores de inducción y equipos asociados, tomando como referencia las normativas internacionales descritas en el numeral 1.2.

⁸ Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

⁹ Comisión Electrotécnica Internacional, "International Electrotechnical Commission", en idioma inglés.

1.2 Normas relacionadas con CEM en transformadores, motores y equipos asociados

La Norma IEEE std C57.110™-2008[4] “*Recomendaciones prácticas de la IEEE para el establecimiento de la capacidad de transformadores de distribución, cuando la alimentación de corrientes de cargas no es sinusoidal*”, permite definir el factor de carga adecuado para un transformador sometido a corrientes no sinusoidales con solo disponer de los resultados de las pruebas de rutina, disminuyendo así los efectos causados por la circulación de corrientes con alto contenido armónico, pues estas provocan calentamientos debido al aumento de las pérdidas con la variación de la frecuencia y que pueden controlarse al aplicar la recomendación de la norma en la selección del transformador, pues el valor de la corriente nominal estimado será uno por debajo del valor de la corriente nominal, para no sobrepasar las temperaturas máximas permitidas.

En Estados Unidos, con los estándares UL 1561-1994[5] y UL 1562-1994[6] se introduce el concepto de factor K, que indica el contenido armónico que puede soportar un transformador a corriente nominal y representa el aumento de pérdidas adicionales en los conductores asumiendo, al igual que en la referencia [4], la dependencia con el cuadrado de la frecuencia de cada armónico.

Por otra parte, las normas NEMA MG1-2006 “*Motores y Generadores*” [7], e IEC 60034-26 “*Efectos de tensiones desbalanceadas en el rendimiento de motores de inducción trifásicos tipo jaula*” [8], proponen metodologías de desclasificación de la potencia nominal del motor, recomendadas para evitar el calentamiento excesivo causado por las pérdidas adicionales producto de la distorsión armónica de la red y el desequilibrio de tensiones.

Los procedimientos recomendados para evaluar la capacidad de carga de un transformador según la referencia [4] y los procedimientos recomendados para reducir la potencia de los motores de inducción según la norma referenciada en [7], son documentados en 2.2 y 3.3 respectivamente.

2. ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN TRANSFORMADORES

Actualmente el número de cargas que generan corrientes no sinusoidales, aún cuando están alimentadas con una tensión sinusoidal, es elevado y sigue en aumento. En los transformadores de potencia, la principal consecuencia de las corrientes armónicas es un aumento de las pérdidas en los devanados debido a la deformación de los campos de dispersión. El aumento de las pérdidas, hace que se genere más calor en el transformador de modo que la temperatura de funcionamiento aumenta, lo que provoca el deterioro del aislamiento y una potencial reducción del ciclo de vida útil del equipo [9].

En este sentido, una de las alternativas para controlar el aumento excesivo de la temperatura y sus consecuencias, es reducir la capacidad del transformador, procedimiento que se conoce como desclasificación.

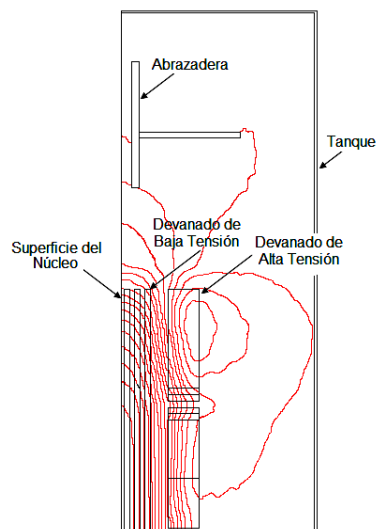
En el numeral 2.2 de este capítulo, se documenta la metodología de desclasificación especificada en la Norma IEEE std C57.110™-2008 [4], aplicable para transformadores bidevanados inmersos en líquido y de tipo seco, incluyendo los de devanado impregnado y encapsulado en resina. Se debe resaltar que esta norma es aplicable para transformadores normales con un cierto estado de carga no lineal, pero no para transformadores que alimentan rectificadores.

Al final del capítulo, en el numeral 2.4 se realiza una comparación entre la desclasificación propuesta en la referencia [4] y el factor K especificado por Underwriter Laboratories, en los estándares UL 1561-1994[5] y UL 1562-1994 [6].

2.1 *Distorsión armónica y su incidencia en la operación de los transformadores*

Si "I" es una corriente continua (DC) que pasa a través de los conductores del devanado de un transformador de potencia, por el efecto Joule se producen pérdidas I^2R ; donde R es la resistencia de corriente continua del devanado. Sin embargo, si una corriente alterna (AC) con valor eficaz igual a la "I" de corriente continua se hace pasar a través de los conductores del devanado, además de las pérdidas I^2R se producen unas pérdidas adicionales. Esto se debe a que cuando los devanados del transformador transportan la corriente alterna, cada conductor está rodeado por un campo electromagnético alterno cuya fuerza es directamente proporcional a la magnitud de la corriente. Una imagen del campo producido por la corriente de carga nominal que fluye a través de todos los conductores del devanado se muestra en la Figura 1, la cual es una vista de la sección transversal del núcleo, devanados, abrazaderas, y el tanque.

Figura 1. Campo electromagnético producido por la corriente de carga en el transformador.



Fuente [4]

“Cada conductor metálico unido por el campo electromagnético experimenta una tensión inducida interna, que provoca el flujo de corrientes eddy¹⁰ en ese conductor. Las corrientes eddy o corrientes de Foucault, producen pérdidas que se disipan en forma de calor, ocasionando un aumento de temperatura adicional en el conductor sobre su entorno. Este tipo de pérdidas adicionales (diferentes a las pérdidas I^2R), se conocen como **“pérdidas por dispersión”**. Aunque todas las pérdidas adicionales son ocasionadas por corrientes eddy, las que ocurren en los devanados se suelen llamar **“Pérdidas por corrientes eddy en los devanados”** (P_{CE}) y las que ocurren en otras partes estructurales externas a los devanados tales como fijaciones depósitos, etc, se llaman **“otras pérdidas por dispersión”** (P_{OSL}).”¹¹

Las pérdidas por corrientes eddy en los devanados son proporcionales al cuadrado de la intensidad del campo electromagnético (o el cuadrado de la corriente de carga que produce el campo), y al cuadrado de la frecuencia de corriente alterna.

Es decir:

$$P_{CE} \propto I_C^2 \quad (2-1)$$

$$P_{CE} \propto f^2 \quad (2-2)$$

Las otras pérdidas por dispersión son generalmente proporcionales a la corriente elevada a una potencia ligeramente inferior a 1, porque la profundidad de penetración del campo electromagnético en las otras partes metálicas (por lo general de acero) varía con la intensidad de campo. Para corrientes armónicas de muy alta frecuencia, el campo electromagnético no puede penetrar totalmente los conductores del devanado, pero es conservador suponer que las pérdidas por corrientes eddy en los devanados P_{CE} son proporcionales al cuadrado de la frecuencia de la corriente armónica [4].

¹⁰ Son las pérdidas provocadas por las corrientes de Foucault, también conocidas como corrientes de eddy o "Corrientes torbellino" en inglés.

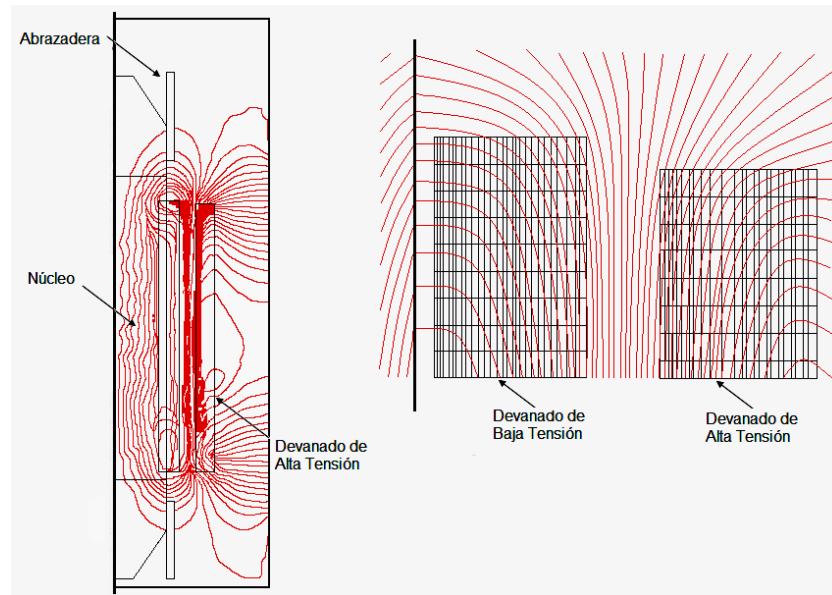
¹¹ Traducción del Anexo D, IEEE Std C.57.110-2008. Se toma conceptualmente como lo plantea el autor.

Cuando un transformador se somete a una corriente de carga que tiene un contenido armónico significativo, las pérdidas adicionales de corriente inducida en los conductores de los devanados y en las estructuras metálicas, elevará la temperatura de esas partes por encima de su temperatura normal de funcionamiento en condiciones nominales. La experiencia ha demostrado que los conductores de los devanados son las partes más críticas cuando se quiere determinar una temperatura de funcionamiento aceptable, por lo tanto el objetivo debe ser evitar que las pérdidas en los conductores de los devanados bajo condiciones de cargas con contenido armónico, sean superiores a las pérdidas en condiciones nominales de operación.

Los devanados internos (normalmente de baja tensión) de un transformador tienen típicamente mayores pérdidas por corrientes eddy que los devanados externos, debido a que las líneas del campo electromagnético tienden a cerrarse por una trayectoria de la columna de baja reluctancia próxima a los yugos y elementos de sujeción, donde se tiene un alto contenido radial de densidad de flujo. Además, las mayores pérdidas por corrientes eddy ocurren generalmente en los conductores de los extremos del devanado interior. Esto es resultado del hecho que esta es la región de mayor densidad de campo electromagnético radial (ver Figura 2) y el campo radial pasa a través del ancho del conductor rectangular del devanado. Dado que el ancho de un conductor es típicamente tres a cinco veces su grosor y las pérdidas por corrientes eddy son proporcionales al cuadrado de la dimensión, las pérdidas más altas se producen en los conductores de los extremos [4].

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

Figura 2. Campo electromagnético en los devanados producido por la corriente de carga.



Fuente [4]

Las recomendaciones para la determinación de las condiciones óptimas de operación descritas en el estándar IEEE std C57.110™-2008, se basan entonces en el cálculo de una **"capacidad equivalente del transformador"** que establece un factor de reducción de la corriente de carga que contiene una composición armónica dada. La Ecuación (2-3) proporciona un cálculo del máximo valor eficaz de una carga no sinusoidal de corriente (en por unidad de corriente de carga nominal), que asegurará que las pérdidas en la región del devanado con la densidad de pérdidas más alta, no superen el valor de las pérdidas para las cuales el transformador fue diseñado (condiciones nominales de operación).

Aunque las corrientes armónicas también pueden producir distorsiones en la onda de tensión y a su vez causar pérdidas adicionales en el núcleo del transformador, la experiencia operativa no ha indicado que el aumento excesivo de la temperatura en el núcleo sea el parámetro determinante para determinar la magnitud de las corrientes de cargas no sinusoidales seguras.

En el Anexo A, se ilustra de manera más detallada los efectos de los armónicos sobre cada una de las pérdidas presentes en los transformadores, así como las consideraciones generales para el cálculo de la capacidad equivalente del transformador, cuyo procedimiento se desarrolla a continuación en el numeral 2.2

2.2 Procedimientos recomendados para evaluar la capacidad de carga de un transformador según el estándar IEEE std C57.110™-2008

2.2.1 Cálculos típicos para transformadores tipo seco [4]

El valor en por unidad de la corriente de carga no sinusoidal que hará que las pérdidas de carga sean iguales al valor de la mayor densidad de pérdidas posibles en condiciones nominales, es decir, el valor de las pérdidas máximo permitido para las cuales el transformador fue diseñado, está dado por la Ecuación (2-3):

$$I_{m\acute{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}} [pu] \quad (2-3)$$

En donde:

- $I_{m\acute{a}x}(pu)$ Es el valor eficaz de la corriente de carga máxima permitida bajo condiciones nominales.
- $P_{LL-R}(pu)$ Son las pérdidas bajo carga en por unidad para condiciones nominales.
- F_{HL} Es el factor armónico de pérdidas para las corrientes eddy en los devanados.
- $P_{EC-R}(pu)$ Son las pérdidas por corrientes eddy en los devanados en por unidad a la corriente y frecuencia nominal.

El uso de la Ecuación (2-3) se aclara en los ejemplos 2.2.2 y 2.2.3.

2.2.2 Ejemplo¹²

Dada una corriente de carga no sinusoidal con la distribución armónica mostrada en la Tabla 2-1, determinar la máxima corriente de carga no sinusoidal admitida para un transformador IEEE estándar¹³, con una corriente a plena carga de 1200 A y cuyas pérdidas por corrientes eddy en los devanados bajo condiciones nominales (P_{EC-R}) en el punto de mayor densidad de pérdidas es el 15% de las pérdidas I^2R .

Tabla 2-1 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 2.2.2.

h	1	5	7	11	13	17	19
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,23	0,11	0,042	0,027	0,013	0,008

Donde:

h Es el orden del armónico, 1,2,3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Las pérdidas de carga en por unidad $P_{LL-R}(pu)$ para las condiciones de corriente y frecuencia nominal se calculan utilizando la Ecuación (A-6), como se muestra a continuación:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad [pu]$$

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + 0,15 = 1,15 \quad [pu]$$

El factor armónico de pérdidas para las corrientes eddy en los devanados (F_{HL}) viene dado por la Ecuación (A-15), y requiere los valores de $I_h(pu)^2, h^2$, y $I_h(pu)^2 h^2$, los cuales se calculan y se tabulan en la

¹² Ejemplo traducido de la norma IEEE Std C.57.110-2008.

¹³ Se considera un transformador IEEE estándar si cumple con las normas IEEE Std C57.12.00 y IEEE Std C57.12.01.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

F_{HL} será igual a la sumatoria de la quinta columna dividida por el resultado de la sumatoria de la tercera columna, así:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{3,324}{1,068} = 3,11$$

Tabla 2-2.

F_{HL} será igual a la sumatoria de la quinta columna dividida por el resultado de la sumatoria de la tercera columna, así:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{3,324}{1,068} = 3,11$$

Tabla 2-2 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 2.2.2.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2$
1	1,00	1,00	1	1,00
5	0,23	0,053	25	1,32
7	0,11	0,012	49	0,59
11	0,042	0,0018	121	0,21
13	0,027	0,00073	169	0,12
17	0,013	0,00017	289	0,049
19	0,008	0,000064	361	0,023
Σ		1,068		3,324

Una vez calculado el factor armónico de pérdidas para las corrientes eddy en los devanados, se verifica que las pérdidas de carga en por unidad para la corriente de carga no sinusoidal $P_{LL} (pu)$ (Ecuación (A-19)) sean menores que las pérdidas

de carga en por unidad $P_{LL-R}(pu)$ para las condiciones de corriente y frecuencia nominal:

$$P_{LL}(pu) = I(pu)^2 \times (1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))$$

$$P_{LL}(pu) = 1,07 \times (1 + 3,11 \times 0,15) = 1,57 [pu]$$

Al realizar la comparación se encuentra que las pérdidas $P_{LL}(pu)$ son mayores que las pérdidas $P_{LL-R}(pu)$, esto indica que se debe calcular la máxima corriente de carga, para la cual considerando la composición armónica dada, las pérdidas $P_{LL}(pu)$ no superen las pérdidas $P_{LL-R}(pu)$.

La Ecuación (2-3) permite calcular la corriente máxima deseada, así:

$$I_{m\acute{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}} = \sqrt{\frac{1,15}{1 + (3,11 \times 0,15)}} = 0,89[pu]$$

La corriente máxima de carga no sinusoidal admitida para la composición armónica dada es entonces:

$$I_{m\acute{a}x} = 0,89 \times 1200 = 1068 [A]$$

Por lo tanto, la capacidad de carga del transformador resulta un 89% de su capacidad de corriente sin contenido armónico, o simplemente 1068 A.

2.2.3 Ejemplo¹⁴

La Tabla 2-3 muestra la distribución armónica de una corriente de carga con un fuerte contenido en el tercer armónico.

¹⁴ Ejemplo traducido de la norma IEEE Std C.57.110-2008.

Tabla 2-3 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 2.2.3.

h	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\frac{I_h}{I_1}$	0,97	0,37	0,35	0,10	0,028	0,11	0,071	0,026	0,057	0,047

Donde:

h Es el orden del armónico, 1,2,3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Determinar la corriente de carga máxima admitida por un transformador de 225 kVA, con una corriente de carga nominal en el secundario de 624,5 A y cuyo promedio de pérdidas por corrientes eddy en los devanados bajo condiciones nominales (P_{EC-R}) en el punto de mayor densidad de pérdidas es el 12% de las pérdidas locales I^2R .

Las pérdidas de carga en por unidad $P_{LL-R}(pu)$ para las condiciones de corriente y frecuencia nominal se calculan utilizando la Ecuación (A-6), como se muestra a continuación:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad [pu]$$

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + 0,12 = 1,12 \quad [pu]$$

El factor armónico de pérdidas para las corrientes eddy en los devanados (F_{HL}) viene dado por la Ecuación (A-15), y requiere los valores de $I_h(pu)^2, h^2$, y $I_1(pu)^2, h^2$, estos valores pueden ser calculados y se tabularon en la Tabla 2-4.

F_{HL} será igual a la sumatoria de la quinta columna dividida por el resultado de la sumatoria de la tercera columna, así:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{10,0}{1,23} = 8,13$$

Tabla 2-4 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 2.2.3.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$
1	0,97	0,94	1	0,94
3	0,37	0,14	9	1,3
5	0,35	0,12	25	3,0
7	0,10	0,010	49	0,49
9	0,028	0,00078	81	0,063
11	0,11	0,012	121	1,5
13	0,071	0,0050	169	0,85
15	0,026	0,00068	225	0,15
17	0,057	0,0032	289	0,92
19	0,047	0,0022	361	0,79
Σ		1,23		10,0

La densidad de pérdidas para la corriente de carga no sinusoidal según la Ecuación (A-19) es como sigue

$$P_{LL}(pu) = I(pu)^2 \times (1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu)))$$

$$P_{LL}(pu) = 1,23 \times (1 + (8,13 \times 0,12)) = 2,43 \text{ [pu]}$$

$$P_{LL}(pu) = 1,07 \times (1 + (3,11 \times 0,15)) = 1,57 \text{ [pu]}$$

Dado que las pérdidas $P_{LL}(pu)$ son mayores que las pérdidas $P_{LL-R}(pu)$, se debe calcular la máxima corriente de carga en por unidad admitida, con la composición armónica dada, a partir de la Ecuación (2-3):

$$I_{m\acute{a}x}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}} = \sqrt{\frac{1,12}{1 + (8,13 \times 0,12)}} = 0,75 \text{ [pu]}$$

Por lo tanto la máxima corriente de carga admitida para la composición armónica dada, se puede calcular:

$$I_{m\acute{a}x} = 0,75 \times 624 = 468 [A]$$

La capacidad de carga del transformador resulta un 75% de su capacidad de corriente sin contenido armónico, o simplemente 468 A.

2.2.4 Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido [4]

Los cálculos para los transformadores inmersos en líquido son similares a los de transformadores tipo seco, excepto que se debe considerar el efecto de las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc. Como lo establece el estándar IEEE Std C57.91, para un transformador autorefrigerado tipo ONAN¹⁵, la elevación de temperatura de la capa superior del aceite respecto al ambiente es proporcional a las pérdidas armónicas elevadas a la 0,8 potencia y se puede estimar para pérdidas armónicas, tomando como base la carga nominal y las pérdidas nominales, como se muestra en las ecuaciones (2-4) y (2-5):

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \times \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0,8} [^{\circ}C] \quad (2-4)$$

En donde:

θ_{TO} Es la elevación de temperatura de la capa superior del aceite.

θ_{TO-R} Es la elevación de temperatura de la capa superior del aceite para las condiciones nominales.

P_{NL} Son las pérdidas en vacío o ajenas a la carga..

P_{LL} Las pérdidas bajo carga.

P_{LL-R} Son las pérdidas bajo carga para las condiciones nominales.

¹⁵ ONAN: Refrigeración de aceite natural (ON)-Refrigeración de aire natural, Radiadores (AN)

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$P_{LL} = I^2R + (F_{HL} \times P_{EC}) + (F_{HL-STR} \times P_{OSL}) [W] \quad (2-5)$$

Que corresponde a:

- I^2R Las pérdidas debidas a la corriente de carga y a la resistencia en c.c de los devanados.
- F_{HL} El Factor armónico de pérdidas para las corrientes eddy en los devanados.
- P_{EC} Las pérdidas por corrientes eddy en los devanados.
- F_{HL-STR} El factor armónico para las pérdidas por dispersión .
- P_{OSL} Las otras pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc.

La elevación de temperatura del punto caliente de los devanados también es proporcional a las pérdidas de carga elevadas a la 0,8 potencia y puede ser calculada como en la Ecuación(2-6):

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \left(\frac{P_{LL}(pu)}{P_{LL-R}(pu)} \right)^{0,8} [^{\circ}C] \quad (2-6)$$

Para variables:

- θ_g Es la máxima elevación de temperatura del punto caliente respecto a la capa superior del aceite.
- θ_{g-R} Es la máxima elevación de temperatura del punto caliente respecto a la capa superior del aceite para las condiciones nominales.

Esto puede ser escrito entonces como lo muestra la Ecuación (2-7):

$$\theta_g = \theta_{g-R} \times \left(\frac{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0,8} [^{\circ}C] \quad (2-7)$$

En 2.2.5 se realiza el cálculo de la elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor respecto al ambiente, ilustrando el uso de las ecuaciones (2-4) a (2-7).

2.2.5 Ejemplo¹⁶

Se tiene un transformador en aceite diseñado para un contenido armónico específico de corriente, para el cual la elevación media de temperatura de los devanados es 65°C y 80°C en el punto caliente de los devanados. Después de la instalación se midieron las corrientes armónicas reales y estos valores se suministraron al fabricante con el objeto de verificar las elevaciones de temperatura. En condiciones de carga nominal y 60 Hz, las pérdidas medidas fueron las siguientes:

- Sin carga 4 072 [W]
- I^2R 27 821[W]
- Pérdidas por corrientes eddy y por dispersión 4 060 [W]
- Pérdidas totales 35 953[W]

Las elevaciones de temperatura respecto a la temperatura ambiente fueron las siguientes:

- Elevación media en el lado de alta 48,1 [°C]
- Elevación media en el lado de baja 47,6 [°C]
- Elevación en la capa superior del aceite 47,2 [°C]
- Elevación de la zona caliente de los arrollamientos 55,3 [°C]

La distribución armónica de la carga fue aproximadamente el 100% de la magnitud de la corriente fundamental. La distribución armónica, normalizada a la fundamental, se suministra en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 2.2.5.

h	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	23	25
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,35	0,17	0,12	0,092	0,071	0,051	0,043	0,040	0,039	0,032	0,029

¹⁶ Ejemplo traducido de la norma IEEE Std C.57.110-2008.

Donde:

h Es el orden del armónico, 1,2,3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Los cálculos para determinar el factor armónico de pérdidas para las corrientes eddy en los devanados y para las pérdidas por dispersión se muestran en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 2.2.5.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$	$h^{0,8}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^{0,8}$
1	1	1,00	1	1,00	1,00	1,00
3	0,35	0,12	9	1,08	2,41	0,29
5	0,17	0,029	25	0,73	3,62	0,11
7	0,12	0,014	49	0,69	4,74	0,066
9	0,092	0,0085	81	0,69	5,80	0,049
11	0,071	0,0050	121	0,61	6,81	0,034
13	0,051	0,0026	169	0,44	7,78	0,020
15	0,043	0,0018	225	0,41	8,73	0,016
17	0,04	0,0016	289	0,46	9,65	0,015
19	0,039	0,0015	361	0,54	10,54	0,016
23	0,032	0,0010	529	0,53	12,29	0,012
25	0,029	0,00084	625	0,53	13,13	0,011
Σ		1,19		7,71		1,64

La sumatoria de la tercera columna es 1,19. La raíz cuadrada de este número es el valor eficaz de la corriente en por unidad igual a 1,09 (Ecuación (A-11)). El factor armónico de pérdidas por corrientes eddy en los devanados, según la Ecuación (A-15) , está dado por la división de la sumatoria de la quinta columna entre la sumatoria de la tercera columna, dando como resultado 6,48.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{7,71}{1,19} = 6,48$$

Y la división de la sumatoria de la séptima columna entre la sumatoria de la tercera columna, por la Ecuación (A-18), es el factor armónico para las pérdidas por dispersión igual a 1,38.

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{1,64}{1,19} = 1,38$$

Una buena aproximación consiste en asumir que las pérdidas por dispersión son aproximadamente el 92% y las pérdidas por corrientes eddy alrededor del 8%, así:

- Pérdidas eddy en los devanados 316 [W]
- Pérdidas por dispersión 3 744 [W]
- Total pérdidas eddy y por dispersión 4 060 [W]

Para determinar la elevación de temperatura de la capa superior del aceite, las pérdidas totales se deben corregir teniendo en cuenta el valor eficaz más alto de la corriente por encima de la corriente nominal, y también los efectos del contenido armónico.

$$P_{LL}(pu) = P_{LL-R}(pu) \times (1,09)^2$$

El cálculo de las pérdidas totales corregidas debido a la carga armónica utilizando la Ecuación (2-5), se muestra a continuación en la Tabla 2-7.

La elevación de temperatura de la capa superior del aceite para las condiciones de carga especificadas se puede calcular mediante la Ecuación (2-4):

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$\theta_{TO} = \theta_{TO-R} \times \left(\frac{P_{LL} + P_{NL}}{P_{LL-R} + P_{NL}} \right)^{0,8} = 47,2 \times \left(\frac{45\ 671}{35\ 953} \right)^{0,8} = 57,2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Tabla 2-7 Corrección de las pérdidas.

Tipo de Pérdida	Pérdidas nominales [W]	Pérdidas de carga [W]	Factor armónico	Pérdidas corregidas
P_{NL}	4 072	4 072		4 072
I^2R	27 821	33 034		33 034
P_{EC}	316	375	6,48	2 430
P_{OSL}	3 744	4 446	1,38	6 135
P_T	35 953	41 927		45 671

Las pérdidas máximas en por unidad en los devanados ocurrieron en el devanado de alta tensión y se estiman en un promedio del 2% de las pérdidas óhmicas.

Suponiendo que las máximas pérdidas por dispersión en los devanados en la zona correspondiente al punto más caliente son cuatro veces el promedio de las pérdidas por corrientes eddy en los devanados, estas resultan del 8%¹⁷. La elevación de temperatura del punto más caliente respecto al a la temperatura de la capa superior del aceite, puede ser calculada por la Ecuación (2-7):

$$\begin{aligned} \theta_g &= \theta_{g-R} \times \left(\frac{1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + P_{EC-R}(pu)} \right)^{0,8} \\ &= (55,3 - 47,2) \times \left(\frac{1 + (6,48 \times 0,08)}{1 + 0,08} \right)^{0,8} = 12,2 \text{ [}^\circ\text{C]} \end{aligned}$$

La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor respecto al ambiente es entonces:

$$57,2 + 12,2 = 69,4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

¹⁷ Ver literal f en 2.3

Finalmente se debe verificar que las temperaturas calculadas (θ_g y θ_{TO}), no excedan los límites térmicos para los cuales el transformador fue diseñado.

2.3 Cálculo de la capacidad equivalente del transformador utilizando los datos de las pruebas de rutina

Con el fin de realizar cálculos con datos limitados, es necesario hacer ciertas suposiciones que se consideran conservadoras. Estos supuestos pueden modificarse en función de la orientación proporcionada por el fabricante para un transformador en particular, de la siguiente manera:

- a) El certificado de pruebas incluye todos los datos exigidos por las normas IEEE C57.12.00 o IEEE C57.12.91.
- b) Una porción de las pérdidas por dispersión, determinada por los factores listados como 1) y 2) de este literal, y que se supone que son pérdidas por corrientes eddy en los devanados. Esta es una hipótesis conservadora y no se debe utilizar en caso de contar con mejores datos:
 - 1) El 67% de las pérdidas totales por dispersión se supone que son pérdidas por corrientes eddy en los devanados para los transformadores tipo seco.
 - 2) El 33% de las pérdidas totales por dispersión se supone que son pérdidas por corrientes eddy en los devanados para transformadores inmersos en líquido.
- c) Las pérdidas I^2R se supone que se distribuyen uniformemente en cada devanado.
- d) La división de las pérdidas por corrientes eddy entre los devanados se supone así¹⁸:

¹⁸ Un alto porcentaje del flujo magnético disperso que fluye axialmente en y entre las bobinas es atraído radialmente hacia dentro en los extremos de los devanados porque hay menor reluctancia a través de la pierna del núcleo que por fuera de los devanados. Como resultado, la mayor magnitud de la componente radial de la densidad de pérdida de flujo magnético (y las mayores pérdidas por corrientes eddy en los

- 1) 60% en el devanado interior y 40% en el devanado exterior para todos los transformadores auto-refrigerados con corriente nominal menor de 1000 A (independientemente de la relación de vueltas).
- 2) 60% en el devanado interior y 40% en el devanado exterior para todos los transformadores que tiene una relación de vueltas de 4:1 o menos.
- 3) 70% en el devanado interior y 30% en el devanado exterior para todos los transformadores que tiene una relación de vueltas mayor de 4:1 y auto-refrigerados con corriente nominal mayor a 1000 A.

e) La distribución de pérdidas por corrientes eddy en los devanados se supone que es no uniforme¹⁹.

f) Las máximas pérdidas por corrientes eddy en los devanados se supone que es en la región del punto más caliente del devanado y es igual al 400% de la densidad de pérdidas por corrientes eddy en los devanados. Análisis de elementos finitos y datos empíricos indican que pequeñas clasificaciones puede mostrar una distribución uniforme de pérdidas por corrientes eddy en los devanados [4].

Según lo establecido en las normas IEEE Std C57.12.90 y IEEE Std C57.12.91, el componente de pérdidas por dispersión de las pérdidas de carga se calcula restando las pérdidas I^2R del transformador de las pérdidas de carga medidas. Como se muestra en la Ecuación(2-8)²⁰:

$$P_{TSL-R} = P_{LL-R} - K \times [(I_{1-R}^2 \times R_1) + (I_{2-R}^2 \times R_2)] [W] \quad (2-8)$$

devanados) se produce en las regiones extremas del devanado interno. En ausencia de otra información, el devanado interno se puede suponer que es el devanado de baja tensión. Los supuestos de distribución de corrientes eddy en el inciso d) y e) son muy conservadores.

¹⁹ Ibídem pie de página No 18

²⁰ Muchos informes de pruebas de transformadores trifásicos muestran la resistencia de las tres fases en serie. En estos casos, los valores para R_1 y R_2 se pueden calcular como sigue:

Conexión Delta: R_1 o $R_2 = 2/9$ de la resistencia trifásica.

Conexión Estrella: R_1 o $R_2 = 2/3$ de la resistencia trifásica.

De donde:

P_{TSL-R} Son las pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales.

I_{1-R} Es el valor eficaz de la corriente en el lado de alta (HV) bajo condiciones nominales de carga y de frecuencia.

I_{2-R} Es el valor eficaz de la corriente en el lado de baja (LV) bajo condiciones nominales de carga y de frecuencia.

R_1 Es la resistencia dc medida entre los terminales de alta.

R_2 Es la resistencia dc medida entre los terminales de baja.

K Es una constante que depende del número de fases.

1,0 para transformadores monofásicos.

1,5 para transformadores trifásicos.

Teniendo en cuenta el literal b), una porción de las pérdidas por dispersión se toma como pérdidas por corrientes eddy en los devanados. Para transformadores tipo seco, las pérdidas por corrientes eddy en los devanados se asumen como se muestra en la Ecuación (2-9):

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0,67 [W] \quad (2-9)$$

Para transformadores inmersos en líquido, las pérdidas por corrientes eddy en los devanados se asumen como se muestra en la Ecuación (2-10):

$$P_{EC-R} = P_{TSL-R} \times 0,33 [W] \quad (2-10)$$

Las pérdidas por dispersión en las fijaciones, depósitos, etc. son calculadas como muestra la Ecuación (2-11):

$$P_{OSL-R} = P_{TSL-R} - P_{EC-R} [W] \quad (2-11)$$

Las pérdidas por dispersión en los devanados de baja tensión se pueden calcular a partir del valor de P_{EC-R} determinado a partir de la Ecuación (2-9) o la Ecuación (2-10), ya sea como $0,6 \times P_{EC-R} [W]$ o como $0,7 \times P_{EC-R} [W]$ dependiendo del transformador, la relación de vueltas y la corriente nominal. Teniendo en cuenta el

supuesto presentado en el literal c)²¹, las pérdidas I^2R se suponen que se distribuyen uniformemente dentro de la bobina, y con el inciso e)²², la máxima densidad de pérdidas por corrientes eddy se supone que es el 400% del valor medio. Las máximas pérdidas por corrientes eddy de los devanados en por unidad en términos de las pérdidas por corrientes eddy y las pérdidas I^2R se pueden obtener utilizando la Ecuación (2-12) o la Ecuación (2-13):

$$Máx P_{EC-R}(pu) = \frac{0,6 \times 4 \times P_{EC-R}}{K \times (I_{2-R})^2 \times R_2} [pu] \quad (2-12)$$

ó

$$Máx P_{EC-R}(pu) = \frac{0,7 \times 4 \times P_{EC-R}}{K \times (I_{2-R})^2 \times R_2} [pu] \quad (2-13)$$

Las pérdidas por dispersión en los devanados de alta tensión pueden ser calculadas de forma similar. Para los transformadores inmersos en líquido, la Ecuación (2-7) se aplica como se muestra en la ecuaciones (2-14) y (2-15):

$$\theta_{g1} = \theta_{g1-R} \times \left(\frac{1 + (2,4 \times F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + (2,4 \times P_{EC-R}(pu))} \right)^{0,8} [^{\circ}C] \quad (2-14)$$

ó

$$\theta_{g1} = \theta_{g1-R} \times \left(\frac{1 + (2,8 \times F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}{1 + (2,8 \times P_{EC-R}(pu))} \right)^{0,8} [^{\circ}C] \quad (2-15)$$

Siendo:

θ_{g1} La máxima elevación de temperatura del punto más caliente de los devanados de alta tensión respecto a la capa superior del aceite.

θ_{g1-R} La máxima elevación de temperatura del punto más caliente de los devanados de alta tensión respecto a la capa superior del aceite para condiciones nominales.

²¹ Ver página 42.

²² Ver página 43.

2.3.1 Cálculos típicos para transformadores tipo seco[4]

Los cálculos típicos para transformadores tipo seco se mostrarán a través del ejemplo relacionado a continuación.

2.3.2 Ejemplo²³

Para una corriente de carga no sinusoidal con una distribución armónica como la mostrada en la Tabla 2-8.

Tabla 2-8 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo 2.3.2.

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,044	0,092	0,022	0,41	0,018	0,20	0,010	0,018	0,015	0,046	0,010	0,048

Donde:

h Es el orden del armónico, 1,2,3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Determinar la corriente de carga máxima admitida por un transformador tipo seco (IEEE C57.12.01), con las siguientes características tomadas del informe de prueba:

- Devanado de alta tensión
13 800 [V] conexión: Δ
Resistencia = 2,0679 [Ω] a 100 [$^{\circ}\text{C}$]²⁴
- Devanado de baja tensión
480 [V] conexión: Y
Resistencia = 0,000589 [Ω] a 100 [$^{\circ}\text{C}$]²⁵

²³ Ejemplo traducido de la norma IEEE Std C.57.110-2008

²⁴ Estas resistencias son la suma de las tres fases en serie.

²⁵ Estas resistencias son la suma de las tres fases en serie.

- Capacidad nominal
2 500 [kVA] -Trifásico
80°C de elevación
Refrigeración Tipo AA
- Pérdidas en vacío a 100 [°C]
15 723 [W]
- Los valores de R_1 y R_2 se pueden determinar utilizando la nota 20 en 2.3:
 $R_1 = 0,4595 [\Omega]$
 $R_2 = 0,000393[\Omega]$
- Los valores para I_{1-R} e I_{2-R} son calculados a partir de la potencia en kVA y la tensión como sigue:
 $I_{1-R} = 104,6 [A]$
 $I_{2-R} = 3 007 [A]$
- Las pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales se pueden calcular de la Ecuación (2-8) así:
 $P_{TSL-R} = 15 723 - 1,5 \times [(104,6^2 \times 0,4595) + (3 007^2 \times 0,000393)]$
 $P_{TSL-R} = 15 723 - 1,5 \times [5 027 + 3 554]$
 $P_{TSL-R} = 15 723 - 12 872 = 2 851 [W]$
- Las pérdidas por corrientes eddy en los devanados se calculan teniendo en cuenta la suposición b) en 2.3 y la Ecuación (2-9):
 $P_{EC-R} = 2 851 \times 0,67 = 1 910 [W]$

Dado que la relación de transformación del transformador es mayor que 4:1 y la corriente secundaria es mayor de 1000 A, las pérdidas por corrientes eddy en el devanado de baja tensión es 0,7 veces las P_{EC-R} y las $Max P_{EC-R}$ pueden ser calculadas a partir de la Ecuación (2-13) como sigue:

$$Max P_{EC-R} (pu) = \frac{0,7 \times 4 \times 1910}{1,5 \times 3554} = 1,00 [pu]$$

Como en el ejemplo anterior, los valores para $I_h (pu)^2$, h^2 y $I_h (pu)^2 h^2$ son necesarios para el cálculo de $P_{LL} (pu)$. Estos valores se calculan y se tabulan en la Tabla 2-9:

Tabla 2-9 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo 2.3.2.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$
1	1,00	1,00	1	1,00
2	0,044	0,0019	4	0,0076
3	0,092	0,0085	9	0,077
4	0,022	0,00048	16	0,0077
5	0,41	0,17	25	4,25
6	0,018	0,00032	36	0,012
7	0,2	0,040	49	1,96
8	0,01	0,00010	64	0,0064
9	0,018	0,00032	81	0,026
10	0,015	0,00023	100	0,023
11	0,046	0,0021	121	0,25
12	0,01	0,00010	144	0,014
13	0,048	0,0023	169	0,39
Σ		1,23		8,02

La raíz cuadrada de la sumatoria de la tercera columna da como resultado un valor eficaz de corriente de carga igual a 1,11(p.u.). La sumatoria de la quinta columna dividida por la sumatoria de la tercera columna, da como resultado el factor armónico de pérdidas igual a 6,52. La densidad de pérdidas locales producidas por la corriente de carga no sinusoidal en la región de mayores pérdidas por corrientes eddy en los devanados es como sigue:

$$P_{LL} (pu) = I(pu)^2 \times (1 + (F_{HL} \times P_{EC-R} (pu)))$$

$$P_{LL} (pu) = 1,23 \times (1 + (6,52 \times 1,00)) = 9,25 [pu]$$

Así, el valor RMS de la corriente de carga no sinusoidal máxima admisible con la composición armónica dada, se calcula con la Ecuación (2-4), como sigue:

$$I_{max}(pu) = \sqrt{\frac{P_{LL-R}(pu)}{1+(F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))}} = \sqrt{\frac{2,00}{1+(6,52 \times 1,00)}} = 0,52[pu]$$

En este caso, la capacidad del transformador con la composición armónica de la corriente no sinusoidal dada, es aproximadamente el 52% de su capacidad corriente sinusoidal.

2.3.3 Cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido [4]

Los cálculos típicos para transformadores inmersos en líquido se mostrarán a través del ejemplo a continuación.

2.3.4 Ejemplo²⁶

El siguiente ejemplo ilustra los cálculos de la elevación de la temperatura para un transformador inmerso en líquido, estándar IEEE C57.12.00, con las siguientes características tomadas del informe de prueba:

- Devanado de alta tensión
34 500 [V] Conexión Delta
Resistencia = 18,207 [Ω] a 75 [$^{\circ}\text{C}$]²⁷
- Devanado de baja tensión
2 400 [V] Conexión Y
Resistencia = 0,02491 [Ω] a 75 [$^{\circ}\text{C}$]²⁸
- Capacidad nominal
2 500 [kVA]-Trifásico
55 [$^{\circ}\text{C}$] elevación promedio en los devanados

²⁶ Ejemplo traducido de la norma IEEE Std C.57.110-2008

²⁷ Estas resistencias son la suma de las tres fases en serie.

²⁸ Estas resistencias son la suma de las tres fases en serie.

65 [°C] elevación en el punto más caliente

Refrigeración tipo ONAN.

- Pérdidas en vacío

5 100 [W]

- Pérdidas en vacío a 75 [°C]

21 941 [W]

- Los valores de R_1 y R_2 se pueden determinar utilizando la nota 20 en 2.3:

$$R_1 = 4,046 [\Omega]$$

$$R_2 = 0,01661[\Omega]$$

- Los valores para I_{1-R} e I_{2-R} calculados a partir de la potencia en kVA y la tensión da como resultado:

$$I_{1-R} = 41,8 [A]$$

$$I_{2-R} = 601,4 [A]$$

- Las pérdidas totales por dispersión bajo condiciones nominales se puede calcular de la Ecuación (2-8) como sigue:

$$P_{TSL-R} = 21\ 941 - 1,5 \times [(41,8)^2 \times 4,046 + (601,4)^2 \times 0,01661]$$

$$P_{TSL-R} = 21\ 941 - 1,5 \times [7\ 069 + 6\ 008]$$

$$P_{TSL-R} = 21\ 941 - 19\ 615 = 2\ 326 [W]$$

- Las pérdidas por corrientes eddy en los devanados se calculan teniendo en cuenta la suposición b) en 2.3 y la Ecuación (2-10):

$$P_{EC-R} = 2\ 326 \times 0,33 = 767 [W]$$

- Por la Ecuación (2-11), las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc., son los siguientes:

$$P_{OSL-R} = 2\ 326 - 767 = 1\ 559 [W]$$

Los datos pueden ser tabulados como sigue:

Pérdidas sin carga	5 100 [W]
Pérdidas I^2R	19 615[W]
Pérdidas por corrientes eddy en los devanados	2 326 [W]
Pérdidas totales	27 041[W]

Las elevaciones de temperatura por encima de la temperatura ambiente son las siguientes:

Elevación promedio en AT y BT	55 [°C]
Elevación de la capa superior del aceite	55 [°C]
Elevación en el punto más caliente del conductor	65 [°C]

La distribución armónica se determinó para una carga que era aproximadamente el 75% de la magnitud de la corriente fundamental. La distribución, normalizada a la fundamental se muestra en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10 Distribución armónica para la corriente de carga máxima para el Ejemplo en 2.3.4.

h	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$\frac{I_h}{I_1}$	1,00	0,45	0,27	0,19	0,092	0,071	0,051	0,043	0,040	0,039

Donde:

h Es el orden del armónico, 1,2,3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Los cálculos para determinar el factor armónico de pérdidas y las pérdidas por dispersión se tabulan en la Tabla 2-11.

La suma de la tercera columna es 1,33. La raíz cuadrada de esto resulta un valor eficaz de corriente de carga igual a 1,15 (p.u.). La sumatoria de la quinta columna dividida por la sumatoria de la tercera columna, da como resultado un factor

armónico de pérdidas (para las pérdidas por corrientes eddy en los devanados) igual a 7,17. La sumatoria de la séptima columna dividida por la sumatoria de la tercera columna da como resultado un factor armónico de pérdidas por dispersión igual a 1,55.

La división de las pérdidas por corrientes eddy y las pérdidas por dispersión se tabula de la siguiente manera:

Pérdidas por corrientes eddy en los devanados	767 [W]
Pérdidas por dispersión	1 559 [W]
Pérdidas totales	2 326 [W]

Tabla 2-11 Cálculos del factor armónico de pérdidas para el Ejemplo en 2.3.4.

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$	$h^{0,8}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^{0,8}$
1	1,00	1,00	1	1,00	1,00	1,00
3	0,45	0,20	9	1,80	2,41	0,48
5	0,27	0,073	25	1,83	3,62	0,26
7	0,19	0,036	49	1,76	4,74	0,17
9	0,092	0,0085	81	0,69	5,80	0,049
11	0,071	0,0050	121	0,61	6,81	0,034
13	0,051	0,0026	169	0,44	7,78	0,020
15	0,043	0,0018	225	0,41	8,73	0,016
17	0,040	0,0016	289	0,46	9,65	0,015
19	0,039	0,0015	361	0,54	10,54	0,016
Σ		1,33		9,54		2,06

Con el fin de determinar la elevación de temperatura de la capa superior del aceite, las pérdidas totales se deben corregir para reflejar la menor corriente eficaz por debajo de la corriente nominal y también los efectos del contenido armónico. Se considera el 75% de la corriente de carga para determinar las pérdidas bajo las condiciones especificadas:

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$P_{LL} (pu) = 1,15^2 \times 0,75^2 = 0,74$$

La Ecuación (2-5) se tabula en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12 Corrección de las pérdidas.

Tipo de Pérdida	Pérdidas nominales [W]	Pérdidas de carga [W]	Factor armónico	Pérdidas corregidas
P_{NL}	5 100	5 100		5 100
I^2R	19 615	14 592		14 592
P_{EC}	767	571	7,17	4 094
P_{OSL}	15 59	1 160	1,55	1 798
P_T	27 041	21 423		25 584

El aumento de la parte superior de aceite ahora se puede calcular por la Ecuación (2-4), como sigue:

$$\theta_{TO} = 55 \times \left(\frac{25584}{27041} \right)^{0,8} = 52,6 [^{\circ}C]$$

Las pérdidas nominales en el interior o en el devanado de baja tensión, se pueden calcular de la siguiente manera:

$$I_{2-R}^2 R = 1,5 \times 601,4^2 \times 0,01661 = 9011 [W]$$

Las pérdidas bajo las condiciones de carga especificadas son las siguientes:

$$I_{2-R}^2 R = 9011 \times (1,15 \times 0,75)^2 = 6704 [W]$$

Por el supuesto propuesto en el literal d) en 2.3, debido a que las corrientes son menores de 1000 [A], se supone que el 60% de las pérdidas por corrientes eddy en los devanados ocurren en el devanado de baja tensión. Las pérdidas máximas por corrientes eddy en la región del punto más caliente son cuatro veces el promedio de pérdidas por corrientes eddy. La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor respecto a la temperatura de la capa superior del

aceite puede ser calculada con las ecuaciones (2-6) y (2-12), utilizando watts en lugar de valores en por unidad.

$$\theta_g = (65 - 55) \times \left(\frac{6704 + 4060 \times 2,4}{9011 + 767 \times 2,4} \right)^{0,8} = 10 \times \left(\frac{6704 + 9744}{9011 + 1841} \right)^{0,8} = 13,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

La elevación de temperatura en el punto más caliente del conductor por encima de la temperatura ambiente, es como sigue:

$$52,6 + 13,9 = 66,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Se debe tener en cuenta que esta elevación de temperatura calculada excede el límite nominal de 65 [°C].

2.4 Comparación de la metodología “K-Factor” y el factor armónico de pérdidas del estándar IEEE C57.110

2.4.1 Definición del K-factor (Underwriter Laboratories)

La definición de desclasificación del K- Factor para transformadores se especifica en el estándar UL 1561-1994 [5] y UL 1562-1994[6]. Por el párrafo 7B.1, añadido al estándar UL 1562 el 12 de mayo de 1992, UL define un factor K de la siguiente manera:

a) " El K-Factor es una calificación opcionalmente aplicada a un transformador que indica su idoneidad para ser usado con corrientes de carga no sinusoidales. "

b) El K-Factor es igual a

$$K = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(pu)^2 h^2$$

Para variables dadas:

$I_h(pu)$ Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico, en por unidad.

h Es el orden del armónico, 1,2,3,etc

c) " Los transformadores a los cuales se les asigna un factor K no deben ser considerados para su uso con cargas armónicas cuando el valor eficaz de cada armónica superior a la décima, es mayor que 1/h de la corriente eficaz de la fundamental".

De la definición del K-Factor se puede inferir que para una carga lineal pura se tendrá un K-Factor igual a la unidad. Un K-Factor mayor indica que las pérdidas por corrientes eddy en el transformador serán K veces mayor que el valor a la frecuencia fundamental. Los transformadores con clasificación de K-Factor están diseñados, por lo tanto, para tener unas pérdidas por corrientes eddy muy bajas a la frecuencia fundamental.

2.4.2 Relación entre el K- Factor y el factor armónico de pérdidas

La definición del Factor-K de UL²⁹ se basa en la utilización de la corriente nominal del transformador en el cálculo de la corriente en por unidad. La sustitución de la corriente nominal en la Ecuación para el K-Factor de UL produce la Ecuación (2-16):

$$K - Factor = \sum_{h=1}^{\infty} \left[\frac{I_h}{I_R} \right] h^2 = \frac{1}{I_R^2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 h^2 \quad (2-16)$$

Donde:

I_R Es el valor eficaz de la corriente para condiciones nominales de frecuencia y carga.

El factor armónico de pérdidas, según lo definido por la norma IEEE. C57.110, está expresado por la Ecuación de la siguiente manera:

²⁹ Underwriter Laboratories.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2}$$

I_1 es una constante y puede ser movida fuera de la sumatoria, de esta forma se cancela como se muestra en la Ecuación(2-17):

$$F_{HL} = \frac{\frac{1}{I_1^2} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\frac{1}{I_1^2} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad (2-17)$$

Reorganizando la Ecuación (2-17), resulta la Ecuación(2-18).

$$\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2 = F_{HL} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 \quad (2-18)$$

Sustituyendo la Ecuación (2-18) en la Ecuación (2-16) se obtiene la Ecuación(2-19):

$$K - Factor = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL} \quad (2-19)$$

La Ecuación (2-19) muestra la relación del factor armónico de pérdidas con el K-Factor de UL. El factor armónico de pérdidas es una función de la distribución de la corriente armónica y es independiente de la magnitud relativa. El K-Factor depende tanto de la magnitud como de la distribución armónica de la corriente. Para la medición de corrientes armónicas en instalaciones existentes, el valor numérico del K-Factor es diferente del valor numérico del factor armónico de pérdidas. Para un conjunto de mediciones de carga de corriente armónica, el cálculo del K-Factor de UL depende de la corriente nominal en el secundario del transformador. Para un transformador nuevo con corrientes armónicas especificadas en por unidad de la corriente nominal del secundario del

transformador, el K- Factor y el factor armónico de pérdidas presentan los mismos valores numéricos. El valor numérico del K- Factor es igual al valor numérico del factor armónico de pérdidas sólo cuando la raíz cuadrada de la suma de las corrientes armónicas al cuadrado es igual a la corriente nominal del secundario del transformador.

En 2.4.3 se muestra la forma de calcular el K-Factor y se realiza una comparación de los resultados contra el factor armónico de pérdidas F_{HL} .

2.4.3 Ejemplo

Suponer un transformador existente con una potencia de 2500 kVA, 480 V trifásico, tipo seco. La corriente de carga nominal I_R es igual a 3007 A. La distribución armónica y los cálculos del K-Factor se muestran en la Tabla 2-13 y cuya corriente nominal $I_R = 3007.1$ A.

Tabla 2-13 Ejemplo de cálculo del K- Factor

h	h^2	I_h	$\frac{I_h}{I_R}$	$\left[\frac{I_h}{I_R}\right]^2$	$\left[\frac{I_h}{I_R}\right]^2 h^2$	$\left(\frac{1}{h}\right) I_1$
1	1	1 764	0,587	0,345	0,345	-
5	25	309	0,10	0,010	0,25	-
7	49	195	0,065	0,0042	0,21	-
11	121	79,4	0,026	0,00068	0,082	160,36
13	169	50,5	0,017	0,00029	0,049	135,69
17	289	27,1	0,0090	0,000081	0,023	103,76
19	361	17,7	0,0059	0,000035	0,013	92,84
Σ					0,97	

Donde:

h Es el orden del armónico, 1,2,3, etc.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$\sum \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 = K\text{-Factor} = 0,97$$

En la Tabla 2-13 se observa que para los armónicos de rangos superiores a 10, el valor eficaz de las corrientes es menor que el que se obtiene multiplicando la inversa del armónico por el valor eficaz de la corriente fundamental. En consecuencia es aplicable el K- Factor.

Realizando los mismos cálculos para transformadores con otra potencia y aplicando la misma carga de corrientes armónicas, se concluye que para transformadores cuya potencia es menor de 1500 kVA, el valor eficaz de la corriente armónica excede el valor de la corriente nominal. En la Tabla 2-14 se muestran los resultados del cálculo del K- Factor y el factor armónico de pérdidas para diferentes capacidades.

Tabla 2-14 Comparación del K- Factor y el factor armónico de carga para diferentes cargas

kVA	I _R	K	F _{HL}
1 500	1 804	2,73	2,73
2 000	2 406	1,53	2,73
2 500	3 007	0,97	2,73

2.5 Otras metodologías de desclasificación de transformadores [9]

2.5.1 Método europeo

Un tercer método utilizado en Europa, consiste en estimar cuánto debe desclasificarse un transformador estándar, de modo que las pérdidas totales en la carga armónica no superen las pérdidas a frecuencia fundamental para la cual se han diseñado el transformador. Esta magnitud es lo que se conoce como “Factor k” y se calcula por la Ecuación (2-20) , así:

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$k = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h_{max}} \left(h^q \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-20)$$

Siendo:

- e El cociente de las pérdidas por corrientes eddy divididas por las pérdidas óhmicas, ambas a la temperatura de referencia.
- h El orden del armónico.
- I El valor eficaz de la corriente sinusoidal conteniendo a todos los armónicos.
- I_h El valor de la corriente del h-ésimo armónico.
- I_1 El valor de la corriente fundamental.
- q La constante exponencial que depende del tipo de arrollamiento y de la frecuencia.

Los valores típicos son 1,7 para transformadores con conductores de sección circular o rectangular en ambos devanados y 1,5 para transformadores con devanados de conductores de lámina en baja tensión.

2.5.2 El Factor de pérdidas adicionales

Un cuarto método es el denominado **factor de pérdidas adicionales**. Un factor de resistencia se define como se indica a continuación:

$$K_{\Delta R} = \frac{R_{AC}(f) - R_{DC}}{R_{AC}(f_1) - R_{DC}} \quad (2-21)$$

Para variables identificadas como:

- $K_{\Delta R}$ Es el factor de resistencia.
- R_{DC} Es la resistencia en serie equivalente en corriente continua.
- R_{AC} Es la resistencia en corriente alterna.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

R_{AC} depende de la frecuencia, debido en parte a la redistribución de la corriente en el arrollamiento, y está determinada para cada frecuencia armónica. El tipo de construcción y la disposición de los devanados tienen un importante efecto sobre la forma de la relación entre R_{AC} y la frecuencia.

Finalmente, el factor de pérdidas adicionales " $K_{\Delta P}$ " se determina como la suma de las pérdidas dependientes de la frecuencia para cada frecuencia originada en R_{AC} . Esto requiere conocer el espectro de corrientes armónicas de la carga.

$$K_{\Delta P} = \sum_{f > f_1} K_{\Delta R}(f) \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \quad (2-22)$$

En donde:

$K_{\Delta P}$ Es el factor de pérdidas adicionales.

$K_{\Delta R}$ Es el factor de resistencia.

I_h Es el valor de la corriente del h-ésimo armónico.

I_R Es el valor de la corriente nominal.

Para determinar este factor para un transformador dado, un prototipo o un modelo de cálculo, deberán determinarse las resistencias en serie o de corto circuito, bien sea por mediciones o por simulación.

3. ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN MOTORES DE INDUCCIÓN

Las máquinas eléctricas son responsables del 50% de la energía eléctrica consumida en todo el mundo y del 65% de la energía consumida en las industrias. Cerca del 90% de los motores instalados son motores de inducción [11]. Debido a su extenso uso se debe garantizar su correcto funcionamiento, que puede ser afectado por la presencia de perturbaciones en la red de suministro como los armónicos en la señal de tensión y de corrientes, y el desequilibrio de tensiones. Tanto los armónicos como el desequilibrio de tensiones, producen un incremento en las pérdidas y una disminución considerable de la eficiencia del motor de inducción [12]. Este incremento en las pérdidas puede conducir a sobrecalentamientos de los devanados y a una reducción en su vida útil.

Para neutralizar la elevación de pérdidas es común analizar cada una de las perturbaciones por separado. La norma NEMA MG1 [7] establece en el apartado 12.45 los factores de desclasificación de la potencia de la placa del motor de inducción en función del nivel de desbalance de tensión, mientras que en el apartado 30.1.2 se pueden observar los factores de reducción para los diferentes contenidos armónicos. Estos factores de desclasificación en la norma tienen en cuenta solo una de las perturbaciones en el suministro y deben ser aplicados a todos los motores de inducción de todas las potencias, independientemente de su forma constructiva.

En el numeral 3.3 se documentan los procedimientos recomendados para reducir la potencia de los motores de inducción, teniendo en cuenta los lineamientos de la referencia [7], buscando mitigar los efectos producidos por la distorsión armónica y los desbalances de tensión, descritos en los numerales 3.1 y 3.2.

3.1 *La distorsión armónica y su incidencia en la operación de los motores de inducción*

El aumento de las tensiones y corrientes armónicas en los motores de inducción incrementa el calentamiento debido a las pérdidas en el cobre y en el hierro a frecuencias armónicas. Estas componentes armónicas afectan la eficiencia de la máquina y pueden reducir el par desarrollado por el motor y en consecuencia afectan el rendimiento.

La presencia de corrientes armónicas en un motor producen el aumento de la emisión de ruido audible, además de producir una distribución de flujo resultante en el entrehierro, el cual puede causar o incrementar en los motores de inducción el fenómeno llamado muesca, que se puede interpretar como la resistencia del motor a arrancar fácilmente, o el fenómeno de arrastre que produce un deslizamiento muy alto.

Las corrientes armónicas impares, tal como el quinto y el séptimo armónico, tienen el potencial para crear oscilaciones mecánicas en una combinación turbina-generador o en un sistema motor-carga. Las oscilaciones mecánicas resultan cuando el par del motor oscilante, causado por la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético de frecuencia fundamental, excita una frecuencia de resonancia mecánica. Por ejemplo, el quinto y el séptimo armónico pueden combinarse para producir una estimulación de torsión sobre un rotor generador en la frecuencia armónica sexta. Si la frecuencia de una resonancia mecánica existe cerca de la frecuencia de excitación eléctrica, pueden desarrollarse grandes esfuerzos mecánicos [13].

En la Tabla 3-1 se puede visualizar la característica del orden armónico derivado de un convertidor de seis pulsos y el efecto que produce cuando se aplica a los terminales de un motor de inducción. Cada armónico de tensión, el quinto, séptimo, onceavo, etc., inducirá una corriente armónica correspondiente en el estator de la máquina. Cada uno de estos armónicos estará a una secuencia

negativa o positiva de la componente simétrica de corriente total. Estas corrientes producirán un calentamiento adicional en el devanado del estator, aumentando la temperatura causada por la corriente fundamental.

Tabla 3-1 Convertidor armónico de seis pulsos.

Orden del armónico de tensión	Frecuencia (Hz)	Red de secuencia	Armónico de corriente en el estator	Rotación del armónico	Armónico del rotor
1	60	Positiva	1	Hacia delante	-
5	300	Negativa	5	Hacia atrás	6
7	420	Positiva	7	Hacia delante	6
11	660	Negativa	11	Hacia atrás	12
13	780	Positiva	13	Hacia delante	12
17	1020	Negativa	17	Hacia atrás	18
19	1140	Positiva	19	Hacia delante	18
23	1380	Negativa	23	Hacia atrás	24
25	1500	Positiva	25	Hacia delante	24

Fuente [13]

Otro aspecto importante que se debe considerar, es el flujo de corrientes armónicas en el rotor. El flujo de cada corriente producirá una fuerza magnetomotriz en el entrehierro, que inducirá flujos de corriente en el rotor de la máquina. Dado que cada armónico característico puede ser definido con una secuencia positiva o negativa, la rotación de este armónico será hacia delante o hacia atrás con respecto a la rotación del rotor.

De esta forma el quinto armónico rotará en dirección hacia atrás (secuencia negativa). Así, un armónico de corriente inducirá en el rotor una frecuencia correspondiente a la diferencia rotacional de la red entre la frecuencia del entrehierro fundamental y el quinto, por ejemplo el quinto más uno o el sexto armónico. Puesto que el séptimo armónico rotará en una dirección adelantada (secuencia positiva), una corriente armónica será inducida en el rotor con una correspondiente frecuencia a la diferencia rotacional de la red entre el séptimo y la

frecuencia fundamental del entrehierro, por ejemplo el séptimo menos uno o sea el sexto armónico.

Así, desde el punto de vista del calentamiento del rotor el quinto y el séptimo armónico en el estator, se combinan para producir una corriente de sexto armónico en el rotor. El undécimo y el decimotercero armónico actúan de la misma manera para producir la decimosegunda corriente armónica en el rotor, y así sucesivamente.

Los dos puntos más críticos relacionados con los armónicos del rotor son el calentamiento resultante del rotor y las pulsaciones o reducciones en el par del motor. Los motores de rotor bobinado se ven mucho más afectados que los motores tipo jaula de ardilla, y a su vez los rotores tipo jaula de ardilla con barra profunda son más afectados que los tipo jaula de ardilla ordinarios.

Las pérdidas en el devanado corresponden a las pérdidas en el hierro. El efecto sumado de los armónicos reduce la eficiencia y la vida útil de la máquina. El calentamiento armónico típicamente reduce el funcionamiento entre 90 y 95% del que puede ser experimentado por la onda sinusoidal fundamental pura aplicada [13].

Para evitar el calentamiento excesivo del motor, en la referencia [7] se recomienda disminuir la potencia nominal del motor de acuerdo a una curva en función del contenido de armónicos como se desarrolla en el numeral 3.3.1. En el Anexo B, se realiza una descripción detallada de los efectos de los armónicos en el rendimiento, las pérdidas, el aumento de la temperatura, ruido acústico y torques pulsantes, factor de potencia y eficiencia en los motores de inducción. Además de esto se documentan los niveles de armónicos permitidos por las normas y las consideraciones generales para el cálculo de la reducción de potencia de los motores de inducción.

3.2 *El desbalance de tensión y su incidencia en la operación de los motores de inducción*

La aplicación de tensiones desbalanceadas a un motor de inducción, produce corrientes desbalanceadas en los devanados del estator de la máquina. Un pequeño porcentaje de desbalance en las tensiones se traduce en altos porcentajes en el desbalance de las corrientes. En consecuencia, el aumento de temperatura del motor que funciona a una determinada carga, con tensiones desbalanceadas será mayor que para el funcionamiento del motor en las mismas condiciones de carga con tensiones balanceadas.

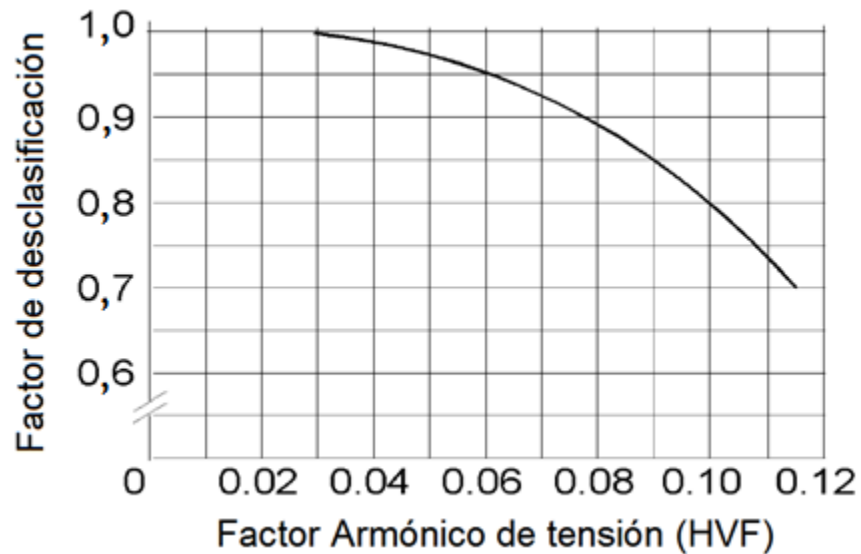
Por lo tanto para evitar fallas por calentamiento, las normas recomiendan operar el motor con una potencia menor a la potencia nominal, como se ilustrará en 3.3.3. El análisis detallado de los efectos del desbalance de tensiones en los motores de inducción puede consultarse en el Anexo B.

3.3 *Procedimientos recomendados para reducir la potencia de los motores de inducción según la norma NEMA MG1 [7]*

3.3.1 Factor de desclasificación aplicado en presencia de armónicos

Cuando un motor es operado en condiciones nominales y la tensión aplicada contiene componentes de frecuencia distintas a la nominal, la potencia nominal del motor debe ser multiplicada por el factor de reducción mostrado en la Figura 3, para reducir la posibilidad de daño de motor. Esta curva se define bajo el supuesto de que sólo los armónicos igual a múltiplos impares (excepto aquellos divisibles por tres, que son homopolares y solo circulan por el neutro) de la frecuencia fundamental están presentes. Se supone que cualquier desbalance de tensión o cualquier armónico par, o ambos, presentes en la tensión son insignificantes. Esta curva de reducción de potencia no es aplicable cuando el motor se hace funcionar a una frecuencia diferente a la nominal, ni cuando se opera a partir de un variador de tensión, variador de frecuencia o ambos.

Figura 3. Curva de reducción de potencia.



Fuente [7]

Para la aplicación del factor de desclasificación en la Figura 3, es necesario definir el factor de tensión armónica (*HVF*), definido en [7] de la siguiente manera:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{V_n^2}{h}} \quad (3-1)$$

Siendo:

h El orden del armónico impar, sin incluir los divisibles por tres.

V_n La magnitud por unidad de la tensión del n -ésimo armónico.

3.3.2 Ejemplo

En este ejemplo, se calculará la reducción de potencia de un motor que opera con tensiones por unidad de 0,10 , 0,7 , 0,045 y 0,036 que ocurren en el 5, 7, 11 y 13 armónico respectivamente.

El valor del factor de tensión armónico utilizando la Ecuación (3-1) es:

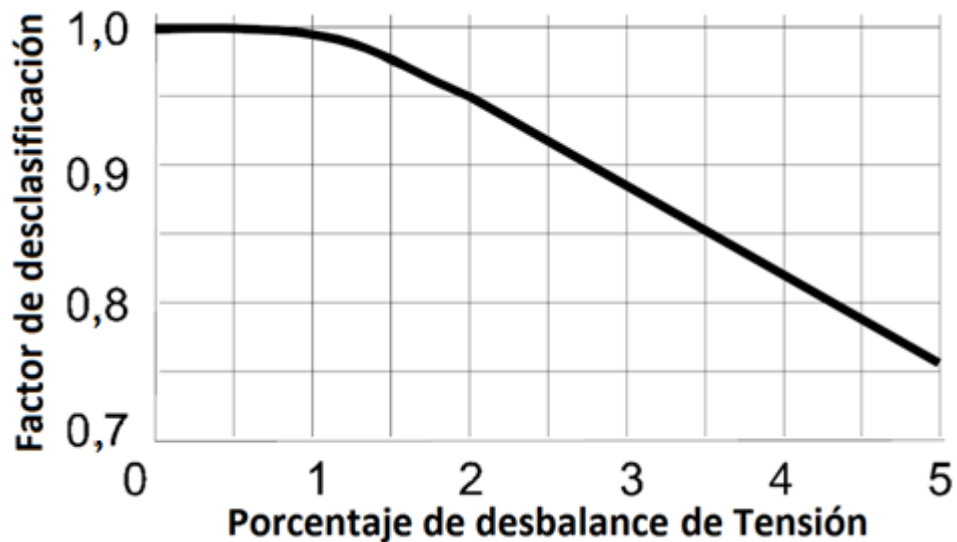
$$HVF = \sqrt{\frac{0,10^2}{5} + \frac{0,7^2}{7} + \frac{0,045^2}{11} + \frac{0,036^2}{13}} = 0,0546$$

De esta forma, según la Figura 3 la potencia nominal del motor deberá ser multiplicada por un factor igual a 0,96.

3.3.3 Factor de desclasificación aplicado en presencia de tensiones desbalanceadas.

La norma NEMA MG1 establece que en caso de tensiones desbalanceadas, la potencia nominal del motor se debe multiplicar por el factor de desclasificación de la Figura 4, para reducir la posibilidad de daños en el motor. Advierte además, que no es recomendable el funcionamiento de motores con desbalances de tensión superiores al 5%.

Figura 4. Curva de reducción de potencia.



Fuente [7]

Cabe resaltar que cuando la curva de reducción de potencia de la Figura 4 es aplicada para la operación con tensiones desbalanceadas, el ajuste y selección de la protección contra sobrecarga debe tener en cuenta la combinación del factor de reducción de potencia aplicada al motor y el aumento en la corriente resultante de las tensiones desbalanceadas. Este es un problema complejo que implica la variación en la corriente del motor como una función del desbalance de carga y tensión, además de las características de los dispositivos de sobrecarga en relación con la corriente máxima ($I_{m\acute{a}xima}$) o la corriente promedio ($I_{average}$).

Cuando no se tenga información específica, se recomienda que los dispositivos de sobrecarga sean seleccionados y/o ajustados al valor mínimo, para que no dé lugar a disparos de la protección para el factor de desclasificación aplicado. Cuando se prevén tensiones desbalanceadas, se recomienda que los dispositivos de sobrecarga se seleccionen de modo que estos sean sensibles a la corriente máxima ($I_{m\acute{a}xima}$), en lugar de dispositivos de sobrecarga que respondan a la corriente promedio ($I_{average}$).

3.3.4 Ejemplo

En este ejemplo se mostrará el cálculo de la reducción de la potencia de un motor de inducción polifásico, alimentado con tensiones de 460, 467 y 450 [V].

El porcentaje de desbalance de tensión en [7] es calculado como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Desbalance de tensión (\%)} \\ &= 100 \\ &\times \frac{\text{m\acute{a}xima desviaci\acute{o}n de la tensi\acute{o}n respecto a la tensi\acute{o}n promedio}}{\text{Tensi\acute{o}n Promedio}} \end{aligned}$$

Aplicando esta expresi3n para el ejercicio, se tiene que:

$$\text{Tensi\acute{o}n Promedio} = \frac{460 + 467 + 450}{3} = \frac{1377}{3} = 459[V]$$

Y la máxima desviación de la tensión respecto a la tensión promedio está dada por:

$$\text{máx}[|460 - 459|, |467 - 459|, |450 - 459|] = 9$$

Entonces:

$$\text{Desbalance de tensión (\%)} = 100 \times \frac{9}{459} = 1,96 \%$$

Por lo tanto y teniendo en cuenta el factor de la Figura 4 , la potencia nominal del motor debe ser multiplicada por 0,95, de esta forma se logra el objetivo de reducir la posibilidad de daño al motor.

3.3.5 Ejemplo

En este ejemplo se calculara la reducción de la potencia de un motor tipo jaula de ardilla, alimentado con tensiones de 2 300, 2 220 y 2 185 [V].

$$\text{Tensión Promedio} = \frac{2\,300 + 2\,220 + 2\,185}{3} = \frac{6\,705}{3} = 2\,235[V]$$

La máxima desviación de la tensión respecto a la tensión promedio está dada por:

$$\text{máx}[|2\,300 - 2\,235|, |2\,220 - 2\,235|, |2\,220 - 2\,235|] = 65$$

Entonces:

$$\text{Desbalance de tensión (\%)} = 100 \times \frac{65}{2\,235} = 2,9 \%$$

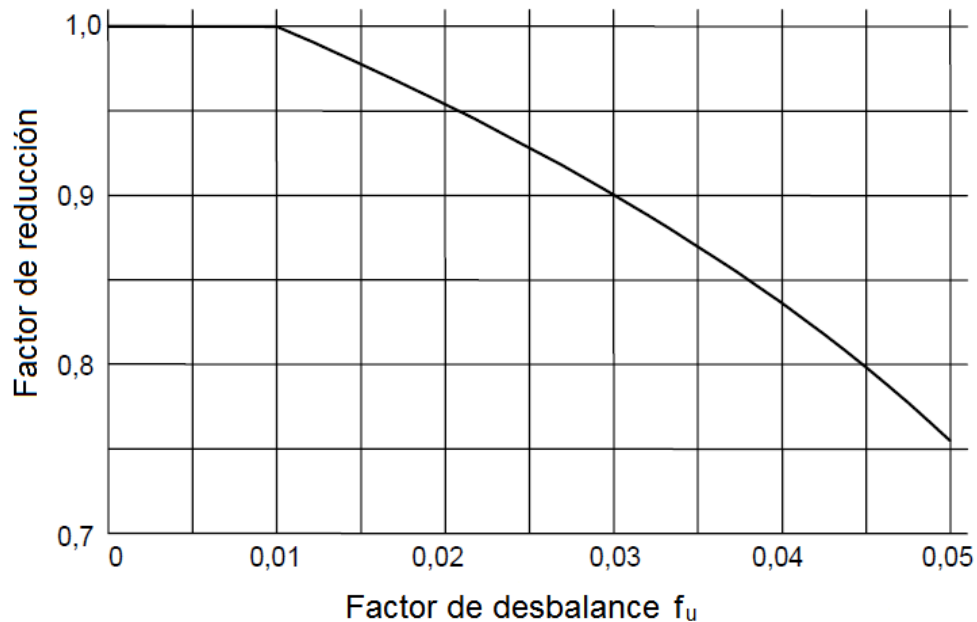
Por lo tanto la potencia nominal del motor debe ser multiplicada por 0,88 teniendo en cuenta el factor de la Figura 4, se logra entonces reducir la potencia de la máquina y con esto la posibilidad de daño al motor.

3.4 **Factor de reducción del motor para evitar el sobrecalentamiento según IEC 60034-26 [8]**

Cuando un motor de corriente alterna, usado con una fuente de potencia a frecuencia nominal, está conectado a un sistema de tensión trifásica con una componente de secuencia de fase negativa superior al 1% del componente de

secuencia positiva de tensiones durante un largo período (por lo menos la constante de tiempo térmica de la máquina), la potencia admisible del motor debe ser menor que la potencia nominal para reducir la posibilidad de daños en el motor.

Figura 5. Valores típicos de reducción de potencia de motores diseño N.



Fuente [8]

El factor de reducción típico para los motores de diseño N³⁰ dentro del ámbito del IEC 60034-12[14] está indicado en la Figura 5, suponiendo que la componente de secuencia de fase positiva de la tensión de alimentación es cercana a la tensión nominal. No se recomienda el funcionamiento del motor por encima de una condición de desequilibrio de tensión del 5%.

El factor de desequilibrio f_u en la Figura 5 se define como:

$$f_u = U_n / U_p \quad (3-2)$$

³⁰ Motores diseño N: Son motores de par de arranque normal, corriente en el arranque normal y de bajo deslizamiento. Constituyen la mayoría de los motores encontrados en el mercado y son aptos para ser utilizados para el accionamiento de cargas normales como por ejemplo bombas, máquinas rotatorias y ventiladores, entre otros.

De donde

U_n Es el valor eficaz de la componente de secuencia negativa de la tensión de alimentación.

U_p Es el valor eficaz de la componente de secuencia positiva de la tensión de alimentación.

3.4.1 Ejemplo

Se tiene un motor con las siguientes tensiones línea-neutro:

$$V_a = 110\langle 0^\circ, V_b = 112,7\langle 240^\circ \text{ y } V_c = 125\langle 120^\circ$$

En este caso la tensión nominal es 220 V.

El valor eficaz de la componente de secuencia negativa y de la componente de la secuencia positiva puede ser calculado de la siguiente forma:

$$U_n = \frac{V_{ab} + aV_{bc} + a^2V_{ca}}{3} = \frac{192,9\langle 30,4^\circ + a \cdot 205,9\langle -88,3^\circ + a^2 \cdot 203,7\langle 147,9^\circ}{3} = 200,75\langle 30^\circ$$
$$U_p = \frac{V_{ab} + a^2V_{bc} + aV_{ca}}{3} = \frac{192,9\langle 30,4^\circ + a^2 \cdot 205,9\langle -88,3^\circ + a \cdot 203,7\langle 147,9^\circ}{3} = 7,98\langle 200,3^\circ$$

Donde $a = -0,5 + j0,866$ y $a^2 = -0,5 - j0,866$

Se toma la amplitud de las componentes de tensión de secuencia positiva U_p y de secuencia negativa U_n y aplicando la ecuación (3-2) se obtiene:

$$f_u = U_n/U_p = 7,98/200,75 = 0,04$$

Por lo tanto la potencia nominal del motor debe ser multiplicada por 0,84 teniendo en cuenta el factor de la Figura 5.

3.5 Otras recomendaciones prácticas [15]

Considerando que en la industria cerca de un 73% de la energía consumida se debe a la operación de motores eléctricos; se incluyen a continuación algunas recomendaciones prácticas para la eficiente operación de los motores.

Selección del motor

Seleccionar el motor de acuerdo con su ciclo de trabajo. Operar un motor para servicio continuo, en accionamientos de operación intermitente, con frecuentes arranques y paradas, ocasiona una depreciación de sus características de operación y eficiencia. Además de que se puede dañar el aislamiento de los devanados por la elevación de la temperatura.

Seleccionar correctamente la potencia del motor. El rendimiento máximo se obtiene cuando éste opera entre el 75% y el 95% de su potencia nominal.

Regulación de tensión

Corregir la regulación de tensión en los alimentadores, Una tensión reducida en los terminales del motor, genera un incremento de la corriente, sobrecalentamiento y disminución de su eficiencia. Las normas permiten una caída de tensión del 5%. Para ello debe utilizarse conductores correctamente dimensionados.

Desbalance de tensión

Equilibrar la tensión de alimentación en los motores trifásicos de corriente alterna. El desequilibrio entre fases no debe exceder en ningún caso el 5%, pero mientras menor sea el desequilibrio, los motores operarán con mayor eficiencia.

Arranque de los motores

Evitar el arranque simultáneo de los motores, sobre todo los de mediana y gran capacidad para disminuir el valor máximo de la demanda y posibles perturbaciones como huecos de tensión en la instalación eléctrica.

Utilizar arrancadores a tensión reducida en aquellos motores que realicen un número elevado de arranques. Con esto se evita un calentamiento excesivo en los conductores y se logra disminuir las pérdidas durante la aceleración.

Corregir la caída de tensión en los alimentadores. Mantener bien ajustado y en óptimas condiciones el interruptor de arranque de los motores monofásicos de fase partida. El mal funcionamiento de este accesorio que se emplea para desconectar el devanado de arranque (y el condensador en los motores de arranque por condensador) provoca un sobrecalentamiento en los conductores ocasionando significativas pérdidas de energía y en caso extremo la falla del motor.

Operación de los motores

Evitar la operación en vacío de los motores, de forma que no se vea afectado el factor de potencia de la instalación. Se debe verificar periódicamente la alineación del motor con la carga impulsada. Una alineación defectuosa puede incrementar las pérdidas por rozamiento y en caso extremo ocasionar daños mayores en el motor y en la carga.

Sustituir en los motores de rotor devanado, los reguladores con resistencias para el control de la velocidad, por reguladores electrónicos más eficientes, porque las resistencias llegan a consumir hasta un 20% de la potencia que el motor toma de la red.

Instalar equipos de control de la temperatura del aceite de lubricación de cojinetes de motores de gran capacidad a fin de minimizar las pérdidas por fricción y elevar la eficiencia.

No se recomienda rebobinar los motores más de 2 veces, porque puede variar las características de diseño del motor, lo cual incrementaría las pérdidas de energía.

No opere los motores a frecuencias nominales distintas a las indicadas en la placa del fabricante.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

Determine si el equipo está generando vibraciones o ruidos excesivos; busque suciedad en el motor que pueda causar un mal funcionamiento, aumentar la fricción o dañar el motor.

4. ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN EQUIPOS ASOCIADOS

4.1 *Análisis de los variadores de velocidad*

Los procesos industriales requieren el control rápido y preciso de las variables del proceso, como temperatura, presión, nivel, fuerza, par, velocidad y caudal. La regulación de estas variables depende de distintos tipos de dispositivos y mecanismos que a su vez, son actuados por un motor eléctrico. Las variables del proceso deben ser entonces reguladas a través del ajuste del par y la velocidad de los motores eléctricos alimentándolos mediante el uso de variadores de velocidad.

Los variadores de velocidad ofrecen diferentes beneficios, por ejemplo ofrecen capacidades de arrancador suave incorporado, esto significa que no habrá corriente de arranque alguna ni ningún efecto de caída de tensión en el resto del sistema. Si el variador es de tipo de modulación por ancho de pulso (PWM), con un terminal de entrada de convertidor basado en diodos, el factor de potencia de desplazamiento es alto (normalmente $> 95\%$ de carga nominal) y más o menos constante en todo el intervalo. Esto significa que los variadores pueden reducir el uso de energía y corregir el factor de potencia de desplazamiento al mismo tiempo. Esto es una ventaja, ya que los variadores y los condensadores de corrección del factor de potencia no se mezclan. Los condensadores son vulnerables a las corrientes armónicas de frecuencias más altas generadas por los variadores, pues la impedancia de este disminuye cuando la frecuencia aumenta [16].

Durante la operación, los variadores de velocidad pueden ser tanto una fuente de problemas asociados a una calidad eléctrica deficiente, como un elemento que sufra sus consecuencias, como se describe a continuación en los numerales 4.1.1 y 4.1.2.

4.1.1 Variadores de velocidad como cargas afectadas por las perturbaciones en la red

No siempre los variadores de velocidad son culpables de generar perturbaciones y afectar la calidad de la energía, en ocasiones pueden verse convertidos en cargas afectadas, como se presenta a continuación.

Transitorios de conmutación de condensadores

Los transitorios de alta energía y baja frecuencia propios de la conmutación de los condensadores en el sistema de distribución, pueden afectar el transformador de servicio, los alimentadores y terminales de entrada del convertidor del variador directamente a la conexión de corriente continua, donde se puede provocar un disparo por sobretensión de enlace de corriente continua. Los diodos de entradas también pueden afectarse por estos transitorios.

Distorsión de tensión

Si la onda de tensión esta distorsionada y presenta un recorte de picos excesivo, impedirá que los condensadores de enlace de corriente continua se carguen completamente y se disminuirá la autonomía del variador. Por tanto, una caída de tensión que normalmente no afectaría a un variador, causará el disparo por sobretensión de éste.

Conexión a tierra

Una conexión a tierra inadecuada afectará a los circuitos de control internos del variador con resultados poco favorables.

4.1.2 Variadores de velocidad como cargas causantes de perturbaciones en la red

Los variadores de velocidad pueden tener un gran impacto en la calidad de la energía. Los impactos causados dependen del diseño del convertidor, siendo el convertidor o rectificador el componente del variador encargado de convertir la

corriente alterna en corriente continua y que constituye la primera etapa del variador.

Convertidor SCR con inversor de fuente de tensión/inversor de tensión variable

Son denominados comúnmente como variadores de seis pulsos y utilizan rectificadores controlados de silicio (SCR) en los terminales de entrada de los convertidores. Los convertidores SCR controlan la tensión de enlace de corriente continua, activando o controlando por compuerta el flujo de corriente en una parte de la onda sinusoidal aplicada y desactivándolo en los puntos de cruce cero. A diferencia de los convertidores basados en diodos, los SCR requieren circuitos de control para la activación del control por compuerta.

Los convertidores SCR pueden afectar la calidad eléctrica en tres aspectos principales:

- Muestras asociadas a las conmutaciones. En la conmutación SCR hay breves momentos en los que dos fases están activadas. Esto provoca un cortocircuito momentáneo que tiende a colapsar la tensión de la línea. Esto se refleja en forma de muescas en la onda de tensión. Estas muescas originan una distorsión armónica total de alta tensión y transitorios. La solución consiste en colocar una bobina reactiva o un transformador de aislamiento en serie con el terminal de entrada del variador de forma que elimine ambos problemas [16].
- El factor de potencia de desplazamiento disminuye conforme se reduce la velocidad del variador. Esto no es un problema grave pues los requisitos de alimentación de la carga del motor del variador disminuyen más aún.
- Los variadores con inversor de tensión variable de seis pulsos generan normalmente corrientes armónicas de orden 5º y 7º.

Convertidor basado en diodos con variadores de modulación del ancho de pulso

El otro diseño de convertidor más común, utiliza diodos y se usa en el variador del tipo PWM. Los diodos no requieren circuitos de control de conmutación. Una de las principales tendencias del sector es la proliferación de variadores del tipo PWM, principalmente debido al desarrollo continuado de IGBT (transistores bipolares de puerta aislada) de conmutación rápida y eficaces utilizados en la sección del inversor del variador (los inversores convierten la corriente continua en corriente alterna). Con independencia de los fines prácticos, los variadores del tipo PWM son el estándar del sector.

En el caso de los convertidores basados en diodos, los armónicos representan el principal problema de calidad eléctrica. El orden de armónicos real que se genera depende del número de diodos en el terminal de entrada. Para la conversión trifásica, se requiere un conjunto mínimo de seis diodos. Este convertidor de 'seis pulsos' generará armónicos del orden 5º y 7º. Si se utilizase un convertidor de 12 pulsos, se generarían armónicos del orden 11º y 13º, en lugar del 5º y el 7º y lo que también es muy importante, para la misma carga la amplitud de los armónicos 11º y 13º serían considerablemente menor que la de los armónicos 5º y 7º. Por lo tanto, la THD_I sería menor. Sin embargo, la gran mayoría de los variadores son del tipo PWM de seis pulsos, lo que explica que se aprecie tanto el 5º armónico en el sistema [16].

4.2 Prácticas recomendadas para mitigar los armónicos generados por los variadores

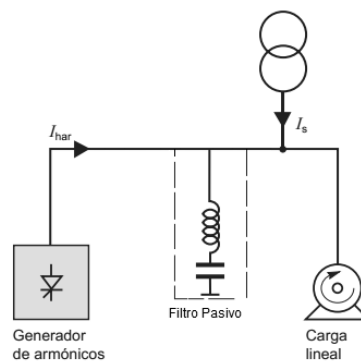
4.2.1 Filtrado de armónicos

Filtros pasivos

Los filtros pasivos están constituidos por elementos reactivos (bobinas y condensadores) conectados en paralelo con la carga. Su gran ventaja es la

simplicidad, fiabilidad y robustez de su diseño al estar compuesto de elementos pasivos. Pero también poseen numerosas desventajas, como son el gran tamaño de la bobina y el condensador, la pobre respuesta dinámica ante cambios en la carga, la gran influencia de la impedancia de red en el filtrado, la posibilidad de que aparezcan resonancias y la imposibilidad de eliminar más de un número limitado de armónicos.

Figura 6. Conexión de un filtro pasivo en paralelo con la carga.



Fuente: Autor.

Filtros activos

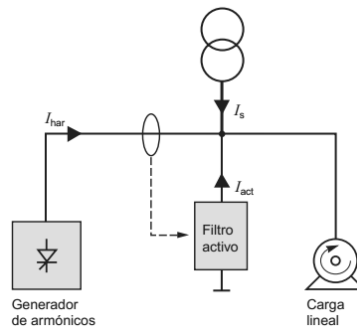
Los filtros activos se componen de elementos pasivos y transistores gobernados por circuitos de control. Se tratan de convertidores que filtran la corriente de entrada. Estos tipos de filtros son capaces de filtrar prácticamente la totalidad de los armónicos de baja frecuencia y no tienen los inconvenientes de los filtros pasivos.

Según la posición en donde vaya colocado, existen dos tipos de filtros: activo serie y activo paralelo. Los filtros activos serie actúan como fuentes de tensión conectados en serie antes de la carga proporcionando una muy alta impedancia a los armónicos y casi nula a la frecuencia de la red. Por otro lado, los filtros activos paralelo actúan como una fuente de corriente en paralelo con la carga inyectando o absorbiendo corriente según se precise. La ventaja de los filtros serie es que manejan menor potencia aunque producen ligeras distorsiones en la tensión. Pero

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

por otro lado los filtros paralelos tienen la enorme ventaja de tener una gran modularidad ya que pueden conectarse sin necesidad de cortar la línea y además se pueden colocar varios módulos en paralelo para poder corregir los armónicos de cargas de mayor potencia.

Figura 7. Conexión de un filtro activo en paralelo con la carga.

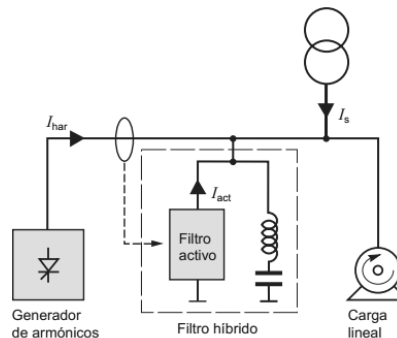


Fuente: Autor.

Filtros híbridos

Los filtros híbridos son una combinación de los filtros activo y pasivo. En este tipo de filtro se coloca el filtro pasivo para filtrar los armónicos más importantes y lograr así que el filtro activo maneje menor potencia y para filtrar las componentes de alta frecuencia que el filtro activo no puede eliminar.

Figura 8. Conexión de un filtro híbrido.



Fuente: Autor.

4.2.2 Transformadores de conversión

La función de estos transformadores es aislar el sistema de la red y que el convertidor produzca menos armónicos cambiando el número de fases en demanda. Estos transformadores pueden ser producidos para sistemas de 6,12,18,24 y 48 pulsos.

Puede ser implementado como un transformador del tipo delta-estrella que suministre alimentación a un variador y otro del tipo delta-delta que lo haga a otro variador. Hay un efecto de desplazamiento de fase de 30 grados entre estas dos configuraciones, el cual produce la cancelación de los armónicos en el punto de acometida ascendente más cercano. El efecto de cancelación es óptimo cuando ambas cargas son más o menos iguales.

4.2.3 Convertidor de 12 pulsos

Si los transformadores del tipo delta-estrella/delta-delta se usan conjuntamente (los dos primarios en delta y los secundarios uno en delta y el otro estrella) y cada secundario suministra alimentación a uno de los dos convertidores de seis pulsos en paralelo, se crea un terminal de entrada de 12 pulsos con todas las ventajas mencionadas en 4.2.2 . También hay disponibles diseños de 18 pulsos. Debido al costo adicional, este tipo de solución tiende a utilizarse sólo en cargas de alto nivel de potencia armónica.

4.2.4 Corrección activa del factor de potencia

Otra de las soluciones es la utilización de terminales de entrada de convertidor que utilicen tecnología de conmutación rápida que genere una cantidad mínima de armónicos y disponga de un factor de potencia cercado a la unidad.

La elección de la solución más efectiva y económica para una situación determinada puede ser discutible. Sin embargo, debe ser claro que el usuario final debe incluir en el costo total de un sistema de variador tanto el costo del propio

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

variador como el de la mitigación de armónicos, tanto si forma parte del variador como si se instala por separado.

5. CONCLUSIONES

La investigación realizada a través de este trabajo de grado puede ser considerada como punto de partida para el desarrollo de futuros proyectos, en torno al tema de la Compatibilidad Electromagnética en Colombia, ya que teniendo en cuenta que en este informe se abordaron componentes normativos, reglamentarios y técnicos, basados en estudios internacionalmente aceptados que pueden ser adoptados en el país, mediante la implementación de estrategias o prácticas orientadas a la mitigación de los fenómenos ocasionados por perturbaciones electromagnéticas en transformadores y motores.

Así mismo se pudo identificar que los principales problemas de compatibilidad electromagnética que se presentan en transformadores se producen principalmente cuando son sometidos a corrientes de carga con contenido armónico significativo, para ello algunos organismos como el IEEE y Underwriter Laboratories han propuesto estrategias o recomendaciones prácticas para la minimización de estos efectos. El IEEE a través del estándar C57.110™-2008 plantea un factor de corrección para la capacidad de transformadores de distribución tipo seco y sumergidos en líquido cuando la alimentación de corrientes de cargas no es sinusoidal, como una función de la distribución de la corriente armónica, independiente de su magnitud relativa, que permite proteger al transformador de los efectos debidos a la presencia de corrientes con contenido armónico.

Por otro lado para el caso de los motores de inducción se pudo identificar como problemas de compatibilidad electromagnética, tanto las tensiones distorsionadas como las tensiones desequilibradas, pues estas producen efectos negativos durante la operación del motor. Para mitigar estos inconvenientes se presentó la metodología de la norma NEMA MG1-2006 “Motores y Generadores”, la cual

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

propone como solución para contrarrestar la elevación de pérdidas, la utilización de factores de desclasificación de la potencia de la placa del motor de inducción en función o del nivel de desbalance de tensión o del contenido armónico.

Finalmente además del registro de los procedimientos recomendados, en este documento se añadió toda la información técnica y teórica necesaria para comprender las metodologías, como estrategia para facilitar la comprensión de la propuesta para que puedan ser expeditamente divulgada al público objetivo.

6. RECOMENDACIONES

Considerando los sobrecostos y demás impactos negativos causados por problemas de compatibilidad electromagnética de las maquinas eléctricas y sus equipos asociados, es necesario fomentar en el país el desarrollo de trabajos de investigación en los que se estudien los diferentes fenómenos relacionados con la compatibilidad electromagnética, la forma como afectan los equipos y las prácticas que podrían aplicarse para lograr su mitigación. Así mismo, implementar estrategias de divulgación masiva que permitan la aplicación de estos conocimientos en el sector eléctrico productivo.

Se propone como ejercicio práctico para futuros proyectos de grado la puesta en marcha de casos de estudio y/o la implementación de las estrategias de corrección o desclasificación mencionadas a lo largo de este documento de forma que se pueda corroborar los desarrollos teóricos citados con un estudio de una instalación eléctrica tipo.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Torres y L. Barreto, «Las perturbaciones electromagnéticas,» *Revista Innovación y Ciencia*, vol. Volumen V, nº No. 2, pp. 30-37, 1996.
- [2] H. d. Keulenaer, «Guía para una Autovaloración de la Calidad de la Energía,» *European Copper Institute*, Mayo 2002.
- [3] Ministerio de Minas y Energía, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), Resolución No. 18 1294 Agosto 06 de 2008.
- [4] IEEE std C57.110™, «Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry- Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents,» *IEEE*, 2008.
- [5] UL 1561, «Dry-Type General Purpose and Power Transformers,» 1994.
- [6] UL 1562, «Transformers, Distribution, Dry-Type-Over 600 Volts,» 1994.
- [7] NEMA MG1, «Motores y Generadores,» *www.nema.org*, 2006.
- [8] IEC 60034-26, «Rotating electrical machines –Part 26:Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors,» 2006-07.
- [9] J. Desmet, «Armónicos - Selección y Clasificación de los Transformadores,» *Hogeschool West-Vlaanderen &Gregory Delaere*, 2005.
- [10] W. Deprez, «Energy efficiency of the induction machines: a critical assessment,» December 2008.
- [11] P. Donolo, G. Bossio, y C. de Angelo, «Demérito en motores de inducción por armónicos y desequilibrio de tensión,» *XIV Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (XIV ERIAC)*, Ciudad del Este, Paraguay. Mayo 2011.
- [12] IEEE Std 519, «Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia,» 1992.

- [13] IEC 60034-12, «Rotating Electrical Machines-Starting Performance of Single-Speed Three-Phase Cage Induction Motors-2002,» 2002.
- [14] Centro de Ahorro y Eficiencia Energética de Madrid, «Capítulo 6. Motores de Alta Eficiencia,» *Guía de Ahorro Energético en Instalaciones Industriales*.
- [15] FLUKE, «Cómo afectan los variadores de velocidad a la distribución de alimentación eléctrica,» <http://www.fluke.com>.
- [16] J. F. Ravo, J. Kreuzer, «Losses un rectifier transformesrs: Factory test losses in comparison with actual operating losses,» *Proc. CIGRE*, pp. paper 12-06, 1988.
- [17] L. F. Blume, A. Boyajian, G. Camilli, T. C. Lennox, S. Minneci and V. M. Montsinger, «Transformer Engineering,» New York: Wiley, 2nd edition, 1951, pp. 55-65..
- [18] E. Téllez, «Distorsión armónica,» *Programa de ahorro de energía, AP&C*, pp. 3-6.
- [19] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut, «Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 3, nº 5, pp. 429-430, December, 2005.
- [20] Cummings, P. G., «Estimating the effect of systems harmonics on losses and temperature rise of squirrel-cage motors,» *IEEE, 32nd Petroleum and Chemical Ind. Conf. Houston, TX*, Sept, 1985.
- [21] Fuchs, E.F. et al, «Aging of electrical appliances due to harmonics of the power systems voltage,» *IEEE Trans. On Power Delivery*, nº 3, pp. 301-307, July,1986.
- [22] Emmanuel, A. E., «Estimating the effects of harmonic voltage fluctuations on the temperature rise of aquirrel-cage motors,» *IEEE Trans. On Energy Covernion*, vol. 6 No, nº 1, March, 1991.
- [23] J. Grajales, J. Ramirez, D. Cadavid, «Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión,» *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de*

Antioquia, nº 031, pp. 116-123, junio,2004.

- [24] Sen, P.K y H. Landa, «Derating of induction motors due to wave form distortion,» *IEEE Trans. Ind. Applicat*, vol. 26, nº 6, Dec.,1990.
- [25] C.-Y. a. W.-J. L. Lee, «Effects of nonsinusoidal voltage on the operation performance of a three-phase induction motor,» *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 14, nº 2, June, 1999.
- [26] Abreu, J.P: y A.E. Emanuel, «Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: Loss of useful life and estimated cost,» *IEEE trans. on Industry Applications*, vol. 38, nº 1, January/February 2002.
- [27] Abreu, J.P: y A.E. Emanuel, « Induction motor loss of life due to voltage imbalance and harmonics: A preliminary study,» *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference*, vol. 1, 2000.
- [28] Vijayraghavan, P. y R. Kroshanan, «Noise in electric machines: A review,» *IEEE trans. On Energy Conversion*, vol. 14, nº 2, june,1999.
- [29] ECAMEC Tecnología, «Desbalance de Tensiones en sistemas trifásicos,» Septiembre 2009.
- [30] IEC 61000-2-5, « Compatibilidad electromagnética (CEM).Parte 2, Entorno, Sección 5, Clasificación de los entornos electromagnéticos».
- [31] EN50160, «Normativa de obligatorio cumplimiento que regula la calidad de suministro eléctrico en todo el territorio europeo».
- [32] Arrillaga, J.; Watson, N.: Chen, S, «Power Quality Assessment,» *John Wiley & Sons*, 2000.
- [33] Joint Working Group Cigré c4.07/ Cired, «Power Quality Indices and Objectives,» *Final WG Report*, January 2004.

8. ANEXOS

A continuación se incluyen las consideraciones generales necesarias para el cálculo de la capacidad equivalente del transformador y para el cálculo de la reducción de potencia de los motores de inducción.

A. Consideraciones generales para el cálculo de la capacidad equivalente del transformador

Pérdidas en un transformador

Los estándares IEEE Std C57.12.90 y IEEE Std C57.12.91 clasifican las pérdidas que se producen en un transformador como pérdidas en vacío (o pérdidas del núcleo) y las pérdidas bajo carga. Esto puede expresarse por la siguiente Ecuación:

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} [W] \quad (A-1)$$

En donde:

P_{NL} Son las pérdidas en vacío o ajenas a la carga.

P_{LL} Son las pérdidas bajo carga.

P_T Son las pérdidas totales.

Las pérdidas en el vacío, se deben a la excitación de la tensión del núcleo. Aunque la corriente magnetizante contiene armónicos, éstos son extremadamente pequeños comparados con la corriente de carga, y el efecto sobre las pérdidas es mínimo.

En consecuencia, en normas como la ANSI/IEEE c57.110 se acepta que la presencia de armónicos no incrementa las pérdidas del núcleo. Las pérdidas con carga están constituidas por las pérdidas I^2R (pérdidas Joule), las pérdidas por

corrientes eddy en los devanados (P_{EC}) y las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc. (P_{OSL}), lo que se expresa en forma de Ecuación como:

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} + P_{OSL} [W] \quad (A-2)$$

De donde:

I^2R Son las pérdidas debidas a la corriente de carga y a la resistencia en c.c de los devanados.

P_{EC} Son las pérdidas por corrientes eddy en los devanados.

P_{OSL} Son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc.

No existen métodos de ensayo adecuados para determinar las pérdidas por corrientes eddy de un arrollamiento individual, ni para separar las pérdidas por dispersión de las pérdidas por corrientes eddy en un transformador. En lugar de ello, se evalúa la magnitud total de las pérdidas por dispersión y por corrientes eddy, determinando las pérdidas con carga totales y restando las pérdidas óhmicas calculadas, es decir:

$$P_{EC} + P_{OSL} = P_{LL} - I^2R [W] \quad (A-3)$$

Efecto de los armónicos sobre las pérdidas I^2R

Las pérdidas I^2R son generadas por la corriente que pasa por la resistencia de los devanados. También se conocen como pérdidas óhmicas[17] o pérdidas óhmicas de corto circuito [18]. Las pérdidas óhmicas son proporcionales al cuadrado de la magnitud de la corriente de carga, incluyendo los componentes armónicos, pero son independientes de la frecuencia. Se determinan midiendo la resistencia en corto circuito y calculando las pérdidas resultantes usando las corrientes de los devanados a plena carga.

Efecto armónico sobre las pérdidas por corrientes eddy en los devanados (P_{EC})

Las pérdidas por corrientes eddy varían con el cuadrado de la corriente eficaz y el cuadrado de la frecuencia (orden de armónico h), de esta forma una vez conocidas las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados para condiciones nominales (P_{EC-R}), se pueden realizar los cálculos para cualquier carga con corrientes no sinusoidales, como se define en la Ecuación (A-4).

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 [W] \quad (A-4)$$

En donde:

h Es el orden del armónico, 1,2,3, etc.

$h_{m\acute{a}x}$ Es el mayor orden de armónico a considerar.

I_h Es el valor eficaz de la corriente del h -ésimo armónico, en amperios.

I_R Es el valor eficaz de la corriente nominal, en amperios.

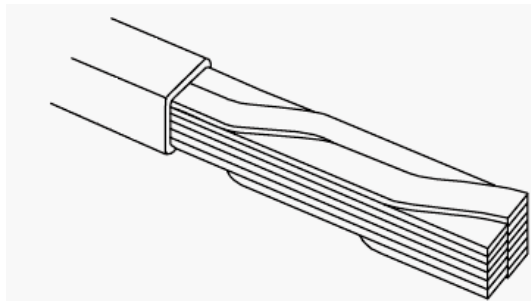
P_{EC-R} Son las pérdidas por corrientes eddy en los devanados a la corriente y frecuencia nominal.

Las pérdidas por corrientes eddy dependen del cuadrado de la dimensión del conductor perpendicular al campo del flujo de pérdida. En los extremos del arrollamiento el campo de flujo se curva y la dimensión mayor del conductor rectangular es perpendicular a un vector componente del campo de flujo de pérdida.

Igualando la altura de los devanados primario y secundario, que se puede conseguir con cualquier diseño de arrollamiento, se reducen las pérdidas por corrientes de eddy concentradas en los extremos del arrollamiento. Sin embargo, la magnitud todavía sigue siendo mayor que en la mitad del arrollamiento, debido a esa curvatura del campo de flujo de pérdida. Por otra parte, reduciendo el tamaño del conductor se reduce el porcentaje de pérdidas por corrientes eddy,

pero las pérdidas óhmicas aumentan. La utilización de varios hilos por arrollamiento reduce tanto las pérdidas por corrientes eddy, como las pérdidas óhmicas, pero al ser los conductores de longitudes desiguales se generan corrientes de circulación que producen pérdidas adicionales. Esto puede evitarse mediante el uso de conductores continuamente transpuestos (ver la Figura 9), para el arrollamiento de corriente de alta intensidad. Los transformadores pequeños presentan tamaños reducidos de los conductores debido a la baja intensidad de las corrientes involucradas.

Figura 9. Conductor continuamente transpuesto.



Fuente [9]

Efecto de los armónicos sobre las pérdidas por dispersión (POSL)

Las pérdidas por dispersión se presentan debido al flujo disperso que origina pérdidas en el núcleo, soportes, tanque y otras partes de hierro. Estas pérdidas por dispersión elevan la temperatura de las partes estructurales del transformador. Para los transformadores tipo seco, los aumentos de temperatura de esas regiones no contribuyen a aumentar la temperatura de los devanados. Para los transformadores inmersos en líquido, las pérdidas por dispersión aumentan la temperatura del aceite y por lo tanto la temperatura de los devanados. Las pérdidas por dispersión son difíciles de evaluar por lo que se supone que las pérdidas varían con el cuadrado de la corriente multiplicado por la frecuencia (orden del armónico), como se indica:

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 [W] \quad (A-5)$$

De donde:

P_{OSL-R} Son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc. a la corriente y frecuencia nominal.

Estudios realizados por fabricantes e investigadores han demostrado que las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos y piezas estructurales, aumentan con el cuadrado de la corriente multiplicado por el orden del armónico elevado a un exponente igual a 0,8 o menor [4]. Por lo tanto, como una estimación conservadora, se utilizará en cálculos posteriores un exponente de 0,8 como lo sugiere el estándar ANSI/IEEE c57.110.

Efectos de los armónicos sobre la temperatura de la capa superior del aceite.

Para transformadores inmersos en líquido, la temperatura del aceite (θ_{TO}) aumentará a medida que las pérdidas de carga aumenten debido a la carga armónica. A diferencia de los transformadores tipo seco, las pérdidas por dispersión (P_{OSL}) deben ser consideradas, ya que estas pérdidas también afectan el incremento de temperatura del aceite.

Componentes DC de la corriente de carga

Las corrientes de carga de tipo armónico suele ir acompañada por un componente de corriente continua. La componente de corriente continua incrementará ligeramente las pérdidas en el núcleo del transformador, esto aumentará la corriente magnetizante y el nivel de ruido de manera sustancial. Para componentes de corriente continua relativamente pequeños (hasta la magnitud eficaz de la corriente de excitación del transformador a tensión nominal), se espera que no tengan ningún efecto sobre la capacidad de carga del transformador determinada por las prácticas recomendadas en este documento, si

existen componentes de corriente continua mayores pueden afectar adversamente la capacidad del transformador por lo tanto deben ser tenidos en cuenta.

Capacidad equivalente del transformador

Los métodos para determinar la capacidad equivalente del transformador contenidos en las prácticas recomendadas de este documento se basan en las siguientes premisas:

a) El transformador, exceptuando la distribución armónica de la corriente de carga, se presume que opera de acuerdo con las condiciones normales de servicio establecidas en el estándar IEEE C57.12.00 o IEEE C57.12.01.

b) Se presume que el transformador es capaz de alimentar cargas con corrientes no sinusoidales de cualquier contenido armónico, siempre y cuando las pérdidas totales, las pérdidas con carga en cada devanado y en la zona donde se tiene la más alta densidad de pérdidas, no exceda los límites a plena carga, la frecuencia nominal y las condiciones sinusoidales de diseño. También se presume, que la condición límite se encuentra en la zona donde se tiene la más alta densidad de pérdidas, por lo que esta es la base utilizada para establecer capacidad equivalente.³¹

Pérdidas en por unidad del transformador

Dado que la mayor preocupación sobre el funcionamiento de un transformador en condiciones de cargas armónicas es el aumento de temperatura en los devanados, es conveniente considerar la densidad de pérdidas en los devanados en por unidad (la corriente base es la nominal y la densidad de pérdidas base es la densidad de pérdidas I^2R a la corriente nominal). Por lo tanto, la Ecuación (A-2) aplicada a las condiciones nominales de carga, puede ser reescrita en por unidad de la siguiente manera:

³¹ Los métodos para calcular la capacidad equivalente del transformador en este documento no tienen en cuenta el efecto piel, que se hace más notorio a frecuencias superiores a las frecuencias consideradas.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad [pu] \quad (A-6)$$

En donde:

$P_{LL-R}(pu)$ Son las pérdidas bajo carga en por unidad para condiciones nominales.

P_{EC-R} Son las pérdidas por corrientes eddy en los devanados a la corriente y frecuencia nominal.

P_{OSL-R} Son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc. a la corriente y frecuencia nominal.

Por definición de la Ecuación (A-6) las pérdidas I^2R con carga nominal son iguales a uno en por unidad, por lo tanto para cargas con corrientes no sinusoidales, el valor eficaz de la corriente en por unidad (la corriente base es la corriente nominal), será el siguiente:

$$I(pu) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2} \quad [pu] \quad (A-7)$$

De donde:

$I(pu)$ Es el valor eficaz de la corriente de carga en por unidad.

$I_h(pu)$ Es el valor eficaz de la corriente del h-ésimo armónico en por unidad.

La Ecuación (A-4) también se puede escribir en por unidad (la corriente base es la corriente nominal y la densidad de pérdidas base es la densidad de pérdidas I^2R a corriente nominal) como sigue en la Ecuación (A-8)

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h(pu)^2 h^2 [pu] \quad (A-8)$$

Pérdidas en el transformador con corrientes diferentes a la nominal.

Para las ecuaciones de la (A-6) a la (A-8) se ha asumido que las corrientes corresponden a las nominales del transformador. Dado que esto rara vez sucede,

es necesario introducir un nuevo término (P_{EC-0}) para describir las pérdidas por corrientes eddy en los devanados, cuando circula una corriente diferente a la nominal a la frecuencia nominal. Para aclarar el uso de estas expresiones, además de las premisas básicas para determinar la capacidad equivalente, es necesario establecer las siguientes suposiciones:

a) Las pérdidas por corrientes eddy en los devanados son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Esta suposición causará que cualquier ecuación subsecuente sea exacta para conductores pequeños y armónicos bajos, proporcionando un cálculo conservador para una combinación de conductores más grandes y armónicos altos.

b) Las pérdidas por corrientes eddy en los devanados son producidas por la corriente que circula en los conductores, sin embargo se pueden expresar en función del valor eficaz de la corriente de la carga I .

c) Se aplicará el principio de superposición para determinar las pérdidas por corrientes de eddy en los devanados, lo que permitirá realizar la sumatoria directa de las pérdidas por corrientes eddy debidas a cada armónico.

Las ecuaciones (A-4) y (A-8) pueden reescribirse en forma más general, como en la Ecuación (A-9):

$$P_{EC} = P_{EC-0} \sum_{h=1}^{h=h_{\text{máx}}} \left(\frac{I_h}{I}\right)^2 h^2 [W] \quad (\text{A-9})$$

Donde

P_{EC-0} Son las pérdidas por corrientes eddy en los devanados para una corriente diferente a la nominal y frecuencia nominal.

I Es el valor eficaz de la corriente de carga.

Al extraer el término I de la sumatoria, se obtiene la Ecuación (A-10):

$$P_{EC} = P_{EC-O} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{I^2} [W] \quad (A-10)$$

El valor eficaz de la corriente de carga no sinusoidal I está dado por la Ecuación (A-11):

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} \quad (A-11)$$

La corriente eficaz I puede ser expresada en términos de los componentes de frecuencia, como se indica en la Ecuación (A-12):

$$P_{EC} = P_{EC-O} \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} [W] \quad (A-12)$$

Factor armónico de pérdidas para las pérdidas por corrientes eddy en los devanados³².

Es conveniente definir un factor que se pueda utilizar para determinar la capacidad de un transformador para funcionar normalmente en determinadas condiciones de carga. F_{HL} es un factor de proporcionalidad aplicable a las pérdidas por corrientes eddy en los devanados que permite evaluar el calentamiento producido por las corrientes armónicas de la carga, y está dado por la relación entre las pérdidas por corrientes de eddy totales debidas a los armónicos (P_{EC}) y las pérdidas por corrientes de eddy a frecuencia nominal, cuando no existen corrientes armónicas (P_{EC-O}). Esta definición se puede expresar en forma de ecuación, así:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} \quad (A-13)$$

³² El factor armónico de pérdidas es similar pero no idéntico al K-factor.

De donde:

F_{HL} Es el factor armónico de pérdidas para las corrientes eddy en los devanados.

La Ecuación (A-13) permite que el factor F_{HL} sea calculado en términos del valor eficaz de las corrientes armónicas. Equipos analizadores de armónicos permiten hacer los cálculos en términos de armónicos normalizados de la corriente eficaz total o la componente fundamental. La Ecuación (A-13) puede ser adaptada, dividiendo el numerador y el denominador, ya sea por el valor eficaz de la corriente de carga (I), o por el valor eficaz de la corriente armónica fundamental (I_1). Los términos I e I_1 se pueden aplicar a la Ecuación (A-13) término a término, lo que resulta en la Ecuación (A-14) y la Ecuación (A-15):

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (A-14)$$

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (A-15)$$

Para las ecuaciones (A-14) y (A-15) el factor F_{HL} es igual, debido a que es una función de la distribución armónica de la corriente y es independiente de la magnitud de referencia (que la hace relativa).

Para aclarar las definiciones se ilustrarán dos ejemplos. En ambos ejemplos se tiene una corriente de carga no sinusoidal de 1804 A RMS y será usada como la corriente nominal.

Ejemplo A1

Calculo del factor armónico de pérdidas para una carga con una distribución armónica como la mostrada en la Tabla A-1, normalizada a la corriente de carga de 1804 A RMS.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

Tabla A-1 Ejemplo de distribución armónica normalizada al valor eficaz de la corriente de carga.

h	I_h	$\frac{I_h}{I}$
1	1764	0,978
5	309	0,17
7	195	0,11
11	79,4	0,044
13	50,5	0,028
17	27,1	0,015
19	17,7	0,0098

Los cálculos son tabulados en la Tabla A-2

Tabla A-2 Cálculos para la distribución armónica de la Tabla A-1

h	$\frac{I_h}{I}$	$\left[\frac{I_h}{I}\right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I}\right]^2 h^2$
1	0,978	0,956	1	0,956
5	0,17	0,029	25	0,725
7	0,11	0,012	49	0,588
11	0,044	0,0019	121	0,230
13	0,028	0,00078	169	0,132
17	0,015	0,00023	289	0,066
19	0,0098	0,000096	361	0,035
Σ		1,00		2,73

La suma de la tercera columna es igual a 1,00 y representa el valor eficaz de la corriente nominal en por unidad. El factor armónico de pérdidas para esta distribución armónica utilizando la Ecuación (A-14) es como sigue:

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} = \frac{2,73}{1,00} = 2,73$$

Ejemplo A2

La distribución de carga de la Tabla A-1, también puede ser descrita en términos del valor eficaz de la componente fundamental, como se muestra en la Tabla A-3:

Tabla A-3 Ejemplo de una distribución armónica normalizada al valor eficaz de la corriente armónica fundamental.

h	I_h	$\frac{I_h}{I_1}$
1	1764	1
5	309	0,18
7	195	0,11
11	79,4	0,045
13	50,5	0,029
17	27,1	0,015
19	17,7	0,010

Nótese que los valores de la corriente armónica I_h son los mismos tanto para el Ejemplo A1 como para el Ejemplo A2, pero los valores normalizados son diferentes, ya que en este ejercicio se normalizaron a la corriente armónica fundamental. El cálculo se tabula en la Tabla A-4.

Tabla A-4 Cálculos para la distribución armónica de la Tabla A-3

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2$
1	1,00	1,00	1	1,00
5	0,18	0,032	25	0,80
7	0,11	0,012	49	0,59
11	0,045	0,0020	121	0,24
13	0,029	0,00084	169	0,14
17	0,015	0,00023	289	0,066
19	0,010	0,0001	361	0,036
Σ		1,05		2,87

La suma de la tercera columna es igual a 1,05 y representa el valor eficaz de la componente fundamental en por unidad. El factor armónico de pérdidas para esta distribución armónica utilizando la Ecuación (A-15) es como sigue:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2} = \frac{2,87}{1,05} = 2,73$$

Tanto para las corrientes armónicas individuales normalizadas a la corriente de carga I RMS o a la corriente fundamental I_1 RMS, el factor armónico de pérdidas es el mismo:

$$F_{HL} = \frac{2,73}{1,00} = \frac{2,87}{1,05} = 2,73$$

Factor armónico para las pérdidas por dispersión

El calentamiento debido a las pérdidas por dispersión (en fijaciones, depósitos, etc.) generalmente no es considerado para transformadores tipo seco, ya que el calor es disipado por el aire refrigerante. Sin embargo, estas pérdidas pueden

tener un efecto importante en los transformadores inmersos en líquido, al causar el calentamiento adicional del líquido refrigerante.

Una relación similar al factor armónico para las pérdidas por corrientes eddy en los devanados existe para las pérdidas por dispersión en un transformador, y se desarrolla de manera análoga al factor F_{HL} . Sin embargo, las pérdidas debidas a las conexiones, piezas estructurales, el tanque, etc., según [4] son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y a la frecuencia armónica elevada a la 0,8. Esto puede ser expresado en una forma similar a la Ecuación (A-4), como se muestra en la Ecuación (A-16):

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^{0,8} [W] \quad (A-16)$$

Las ecuaciones correspondientes al factor armónico de pérdidas, normalizado a la corriente eficaz de carga y a la corriente armónica fundamental respectivamente, son las ecuaciones (A-17) y (A-18):

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (A-17)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (A-18)$$

Donde

F_{HL-STR} Es el factor armónico para las pérdidas por dispersión.

A continuación se muestra un ejemplo ilustrativo donde se calcula el factor armónico para las pérdidas por dispersión, utilizando la distribución armónica de carga mostrada en la Tabla A-1 del Ejemplo A1.

Ejemplo A3

Utilizando la distribución armónica de la Tabla A-1, se tabulan los cálculos realizados tomando como base el valor eficaz de la componente fundamental.

Tabla A-5 Cálculo del Factor armónico para las pérdidas por dispersión

h	$\frac{I_h}{I_1}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2$	$h^{0,8}$	$\left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^{0,8}$
1	1,00	1,00	1	1,00
5	0,18	0,031	3,62	0,11
7	0,11	0,012	4,74	0,058
11	0,045	0,0020	6,81	0,014
13	0,029	0,00082	7,78	0,0064
17	0,015	0,00024	9,65	0,0023
19	0,010	0,00010	10,54	0,0011
Σ		1,05		1,19

$$F_{HL} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^{0,8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2} = \frac{1,19}{1,05} = 1,14$$

Se destaca que para un transformador de columnas el arrollamiento interno (normalmente de baja tensión), se presentan pérdidas adicionales más altas en los extremos debido a que el flujo disperso tiende a cerrarse por una trayectoria de la columna de baja reluctancia próxima a los yugos y elementos de sujeción, donde se tiene un alto contenido radial de densidad de flujo.

Consideraciones de diseño para especificar un nuevo transformador.

Filtrado de armónicos de corriente

Cuando sea práctico, el usuario puede instalar filtros en la línea secundaria para reducir algunas de las corrientes armónicas. Sin embargo, se debe tener cuidado,

ya que puede ocurrir amplificación de corrientes a esta frecuencia, si una de las frecuencias armónicas está cerca de la frecuencia de resonancia resultante del circuito de filtrado.

Impacto en el neutro

Cuando las frecuencias armónicas de corriente incluyen órdenes de armónicos múltiplos de tres (3, 6, 9, etc.), las corrientes de secuencia cero fluyen en el neutro. Según [4] es necesario entonces sobredimensionar el neutro. En estas circunstancias, una práctica común para los transformadores de baja tensión y de uso general, es duplicar la capacidad de corriente por el neutro.

Equipos de compensación

Equipos de compensación son instalados frecuentemente para mejorar el factor de potencia y reducir los costos por consumo de energía. Se debe tener cuidado cuando se hace esto, ya que la amplificación de corriente a ciertas frecuencias debido a la resonancia en el circuito puede ser bastante alta. Además, la inductancia que se reduce en el circuito generalmente permite la aparición de corrientes armónicas más altas. Los efectos de calentamiento debido a los armónicos en estas condiciones pueden ser perjudiciales para los transformadores y equipos asociados. Las pérdidas adicionales producidas también pueden aumentar los costos de utilidad debido al aumento de los requisitos de potencia, aunque el factor de potencia se ha mejorado.

Pantalla electrostática con conexión a tierra

En los transformadores, existe cierto acoplamiento entre los devanados, este acoplamiento permite que las perturbaciones armónicas puedan llegar al devanado secundario. Sin embargo, cuando se utiliza una pantalla electrostática conectada a tierra, el acoplamiento entre los mismos queda reducido de forma significativa, reduciendo las perturbaciones en el lado secundario, pero no se eliminan en el lado primario del transformador.

En la pantalla electrostática se producen pérdidas por corrientes eddy que se incrementan con las corrientes armónicas así como las pérdidas por corrientes eddy en los devanados se incrementan por las corrientes armónicas. Es importante que la pantalla esté diseñada de manera que las pérdidas por corrientes eddy producidas por la presencia de las corrientes armónicas no den lugar a un aumento excesivo de la temperatura en la pantalla. [4]

Consideración de diseño para el exterior de los devanados

Las corrientes armónicas pueden aumentar considerablemente las pérdidas por corrientes de eddy en las partes estructurales externas de los devanados. Espaciamientos adicionales, el uso de materiales no magnéticos, la ruptura de las trayectorias de circulación de corriente y el uso de materiales de apantallamiento, son algunas formas de reducir los efectos de calentamiento por corrientes armónicas en las partes estructurales. Así mismo, las pérdidas por dispersión (P_{OSL}) deben ser incluidas en las pérdidas utilizadas para determinar la elevación de la temperatura del aceite ($\Delta\theta_{TO}$) bajo condiciones de cargas armónicas.

Análisis del espectro armónico

Es recomendable que el espectro de armónicos a los que se someterá el transformador sea comunicado al fabricante en el momento de la especificación. Un análisis preciso del tamaño adecuado del transformador sólo puede hacerse mediante la evaluación del espectro armónico específico. El espectro armónico suministrado se debe identificar si es medido en el lado primario o secundario del transformador. Si el espectro de armónicos se proporciona en por unidad, entonces la fundamental, debe ser definida a la frecuencia nominal del transformador especificado. Si el espectro no se puede suministrar, se debe especificar el cálculo del usuario o la estimación del factor armónico de pérdidas F_{HL} .

Consideraciones de diseño de los devanados

Dado que las corrientes armónicas pueden aumentar considerablemente las pérdidas por corrientes eddy en los devanados, cuando se especifica un transformador nuevo se debe tener en cuenta este efecto en el aumento excesivo de la temperatura. Para cada uno de los devanados, las pérdidas por corrientes eddy en por unidad en la zona donde se tiene la más alta densidad de pérdidas se puede determinar para la frecuencia y corriente nominal en términos de la Ecuación (A-6) , sin considerar las pérdidas $P_{OSL-R} (pu)$, que por definición son las pérdidas por dispersión en fijaciones, depósitos, etc, en por unidad para condiciones nominales.

La densidad de pérdidas en la región de mayores pérdidas puede ser calculada mediante la combinación de la Ecuación (A-6), la Ecuación (A-8), la Ecuación (A-11), y la Ecuación (A-14), como se muestra en la Ecuación (A-19):

$$P_{LL} (pu) = I(pu)^2 \times [1 + (F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))] [pu] \quad (A-19)$$

Siendo:

$P_{LL} (pu)$ Las pérdidas bajo carga en por unidad.

Para ajustar en por unidad la densidad de pérdidas en cada devanado, se debe conocer el efecto de F_{HL} para cada devanado.

Es importante resaltar que el devanado de baja tensión tiene un conductor de mayor sección transversal que el devanado de alta tensión, por lo cual, el devanado de baja tensión puede comenzar con una pequeña densidad de pérdidas y una baja elevación de temperatura, pero puede aumentar más que en el devanado de alta tensión y exhibir el punto más caliente en el transformador. Es decir, existe un solo valor de F_{HL} para la carga, pero los efectos pueden resultar distintos en diferentes transformadores y diferentes devanados debido a su forma constructiva. Para transformadores inmersos en líquido, el calentamiento del

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

aceite por las pérdidas por dispersión diferentes a las pérdidas por corrientes eddy en los devanados también afecta la elevación de temperatura de los devanados.

Para la región más caliente de los devanados, teniendo en cuenta la densidad de pérdidas en por unidad obtenido de la Ecuación (A-19) con un valor eficaz de corriente igual a 1,0 (pu), los límites de temperatura y elevación de temperatura dados en los estándares IEEE C57.12.00 y IEEE C57. 12.01 se deben cumplir.

B. Consideraciones generales para el cálculo de la reducción de potencia de los motores de inducción

Rendimiento de un motor de inducción

La eficiencia de un motor se define como la relación que existe entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica). Esta puede ser medida de manera directa o indirecta.

La medición directa implica el cálculo de la potencia eléctrica de entrada en función de la tensión y de las corrientes suministradas, y de la potencia mecánica de salida en función de la velocidad rotacional y el par disponible en el eje.

$$\eta(\%) = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{abs}}} \times 100 \quad (\text{B-1})$$

Siendo:

$\eta(\%)$ La eficiencia del motor de inducción en porcentaje.

$P_{\text{útil}}$ La potencia mecánica de salida.

P_{abs} La potencia eléctrica de entrada.

La medición indirecta consiste en medir la potencia de entrada y calcular la potencia mecánica de salida considerando todas las pérdidas en el motor, como en la Ecuación (B-11):

$$\eta(\%) = \frac{P_1 - P_T}{P_1} \times 100 \quad (\text{B-2})$$

Donde:

$\eta(\%)$ Es la eficiencia del motor de inducción en porcentaje.

P_1 Es la potencia de entrada.

P_T Es la sumatoria de todas las pérdidas en el motor de inducción.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$P_T = P_{fe} + P_{fw} + P_{s,\theta} + P_{r,\theta} + P_{LL} \quad (B-3)$$

Siendo:

P_{fe} Las pérdidas en el hierro.

P_{fw} Las pérdidas por rozamiento y ventilación.

$P_{s,\theta}$ Las pérdidas en el estator.

$P_{r,\theta}$ Las pérdidas en el rotor.

P_{LL} Las pérdidas adicionales.

Pérdidas en el motor de inducción

Pérdidas en el núcleo del estator (P_{fe}): Se deben a las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas que dependen de la tensión y la frecuencia. Por ello, durante el funcionamiento son más o menos constantes. En el rotor, las pérdidas son insignificantes debido a la baja frecuencia de la corriente del rotor durante el funcionamiento

Pérdidas por rozamiento y ventilación (P_{fw}): Son las pérdidas provocadas por el rozamiento y todas aquellas pérdidas debidas al rozamiento aerodinámico en todas las piezas de la máquina, incluyendo la energía absorbida por los ventiladores acoplados al eje y en las máquinas auxiliares que forman una parte de la máquina.

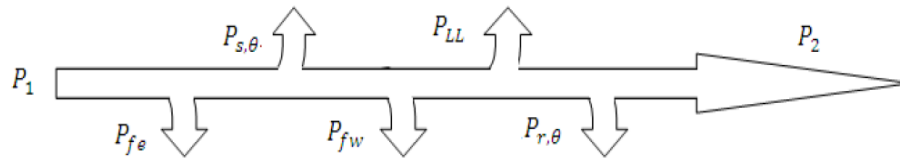
Pérdidas en los devanados (P_s, P_r): En un motor de inducción son las pérdidas óhmicas en las bobinas del rotor y del estator, ambas son una función cuadrada de la carga.

Pérdidas por dispersión (P_{LL}): Son las pérdidas producidas por la carga de corriente en el hierro activo y otras piezas de metal con excepción de las bobinas conductoras: estas pérdidas son producidas por las corrientes de Foucault en las bobinas conductoras.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

En la Figura 10, P_1 es la potencia eléctrica de entrada y P_2 la potencia mecánica de salida.

Figura 10. Potencias de entrada, pérdidas y potencia de salida en un motor de inducción.



Fuente: Autor.

La norma IEC 60034-2-1³³ es una guía para determinar tanto las pérdidas como el rendimiento en máquinas eléctricas rotativas, exceptuando aquellas máquinas destinadas a la tracción de vehículos tal y como su título explica. El objetivo de esta norma es establecer métodos para determinar el rendimiento y las pérdidas en máquinas de corriente continua, máquinas síncronas y máquinas de inducción.

Distorsión armónica

Cuando la tensión o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda sinusoidal, se dice que la señal está distorsionada. La distorsión puede deberse a:

Fenómenos transitorios: Tales como arranque de los motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras.

Condiciones permanentes: Están relacionadas con armónicos de estado estable. En los sistemas eléctricos es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de equipos y dispositivos[23].

³³ Máquinas eléctricas rotativas. Parte 2-1: Métodos normalizados para la determinación de las pérdidas y del rendimiento a partir de ensayos (excepto las máquinas para vehículos de tracción).

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente debería existir, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

A continuación se detallan los índices utilizados para cuantificar los niveles de distorsión armónica.

Índice de distorsión armónica total: Uno de los índices más utilizados es la denominada distorsión armónica total, citado en la literatura como THD³⁴, y aplicable tanto para corriente como para tensión. Este índice se define como la relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental. Este valor es usualmente expresado como un porcentaje de la onda fundamental. Así para la onda de corriente será:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (\text{B-4})$$

Donde:

h Es el orden del armónico.

I_1 Es el valor eficaz de la onda fundamental de corriente.

I_h Es el valor eficaz de corriente de orden h .

El THD_I puede variar desde pocas unidades porcentuales hasta superar el 100%. Aunque los armónicos de corriente de frecuencia más elevada pueden tener valores pequeños, al ser las reactancias de la línea y de los transformadores proporcionales a la frecuencia, los armónicos de tensión pueden tomar valores significativos [24].

³⁴ THD: Total Harmonic Distortion, en idioma inglés.

De porcentaje, de orden h , con respecto a la fundamental. La distorsión armónica individual de tensión y corriente se calculan como en la Ecuación (B-6) y (B-7) respectivamente: forma similar al THD_I se expresa la distorsión en la tensión:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (B-5)$$

Donde:

h Es el orden del armónico.

V_1 Es el valor eficaz de la onda fundamental de tensión.

V_h Es el valor eficaz de tensión de orden h .

Índice de distorsión armónica individual: La distorsión armónica individual o distorsión armónica de orden h , se define como el nivel de distorsión, en

$$THD_v = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (B-6)$$

Siendo:

V_h El valor eficaz de la tensión de orden h .

V_1 El valor eficaz de la onda fundamental de tensión.

$$THD_I = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (B-7)$$

Siendo:

I_h El valor eficaz de la corriente de orden h .

I_1 El valor eficaz de la onda fundamental de tensión.

Distorsión de demanda total: Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga. Cuando se efectúan medidas relacionadas con armónicos es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja[23]. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el índice de demanda total (THD)

que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519 [13].

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (\text{B-8})$$

Donde:

h Es el orden del armónico.

I_L Es la demanda máxima de corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los últimos 12 meses o puede estimarse.

I_h Es el valor eficaz de corriente de orden h .

Niveles de armónicos permitidos por las normas

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto para usuarios como para las empresas distribuidoras de la energía.

En Estados Unidos de América la norma IEEE 519 "*Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia*" define entre sus puntos los valores máximos de distorsión permisibles.

En Colombia la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), emitió en 1998 el reglamento de distribución de energía eléctrica, como parte del reglamento de operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN), en el cual describe las características de calidad del servicio de los sistemas de transmisión regional y/o distribución local. En dicho reglamento se especifica que en cuanto al contenido armónico de tensión y corriente de las redes de distribución se debe cumplir los requisitos exigidos por el estándar IEEE 519 de 1992.

La normatividad consignada en el estándar IEEE 519 está diseñada para limitar las corrientes armónicas de cada usuario en lo individual de forma que los niveles

armónicos en la tensión en la totalidad del sistema sean aceptables, siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre la empresa distribuidora y los usuarios.

Límites de distorsión en tensión:

Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza en la Tabla B-1 es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función de la tensión nominal que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación. La expresión utilizada para calcular el THD_{V_n} se muestra en la Ecuación (B-11).

Tabla B-1 Límites de distorsión armónica de tensión en % de la tensión nominal, std. IEEE 519.

Nivel de tensión en la acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total (THD_{V_n})
$V_n \leq 69 \text{ kV}$	3.0%	5.0%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1.5%	2.5%
$V_n > 161 \text{ kV}$	1.0%	1.5%

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\% \quad (\text{B-9})$$

Donde:

h Es el orden del armónico.

V_n Es la tensión nominal fundamental del sistema.

V_h Es el valor eficaz de tensión de orden h .

Límites de distorsión en corriente:

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites establecen en base a la relación entre corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

Tabla B-2 Límites de distorsión armónica de corriente en % de la corriente nominal, Std. IEEE 519

I_{cc}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
<20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
>1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
<20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
>1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
≥ 50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%

*** Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de corriente, sin importar la relación I_{cc}/I_L .**

-Para los armónicos pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla.

-No se permite la existencia de componentes de corriente directa.

-Si las cargas que producen los armónicos utilizan convertidores con número de pulsos q mayor a 6, los límites indicados en la tabla se incrementan por un factor $\sqrt{q/6}$

Efectos de los armónicos en las pérdidas en el motor de inducción

La presencia de armónicos, incrementa las pérdidas en el motor. Las pérdidas adicionales debido a los armónicos ($P_{armónica}$) puede ser calculadas aproximadamente con la expresión de P. G. Cummings [25]:

$$P_{armónica} \approx P_{nominal} \cdot \Delta W \quad (B-10)$$

$$\Delta W \approx 35 \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h^2} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^2 \quad (B-11)$$

Donde:

$P_{armónica}$ Son las pérdidas adicionales debido a los armónicos

$P_{nominal}$ Son las pérdidas con carga nominal

ΔW Es el incremento de las pérdidas en el motor

V_1 Es la tensión fundamental

V_h Es la tensión armónica de orden h .

h Es el orden del armónico

E. F. Funchs [26] publicó otra expresión que tiene en cuenta los armónicos de orden menor al quinto:

$$\Delta W = K_2 \sum_{h=2}^{\infty} \frac{1}{h^k} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^l \quad (B-12)$$

Donde:

ΔW Es el incremento de las pérdidas en el motor

V_1 Es la tensión fundamental

V_h Es la tensión armónica de orden h .

h Es el orden del armónico

l Exponente que toma valores entre 1,2 y 2

k Exponente que toma valores entre 0,7 y 1,2

K_2 Es un factor que depende de los parámetros del motor dados en [27].

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

Por otra parte [27] presenta los resultados de la verificación de la Ecuación (B-10), la cual se presenta en la Tabla B-3

Tabla B-3 Medida y cálculo de pérdidas armónicas.

Motor de 3,8 HP, 220 [V] y 60 [Hz]							
Prueba sinusoidal $P_{nominal} = 1.303$ [W]							
Pérdidas totales= 1.957 [W]							
Pérdida armónica: $P_{armónica} = 654$ [W]							
Tensión de prueba (% de fundamental)							
$h=5$	7	11	13	17	19	23	25
V_h/V_1	14,3	9,1	7,7	5,9	5,3	4,4	4,0
$h=29$	31	35	37	41	43	47	49
V_h/V_1	3,2	1,9	2,7	2,4	2,3	2,1	2,0
Cómputo de (B-10) $P_{armónica} = 575$ [W] Error= -12%							

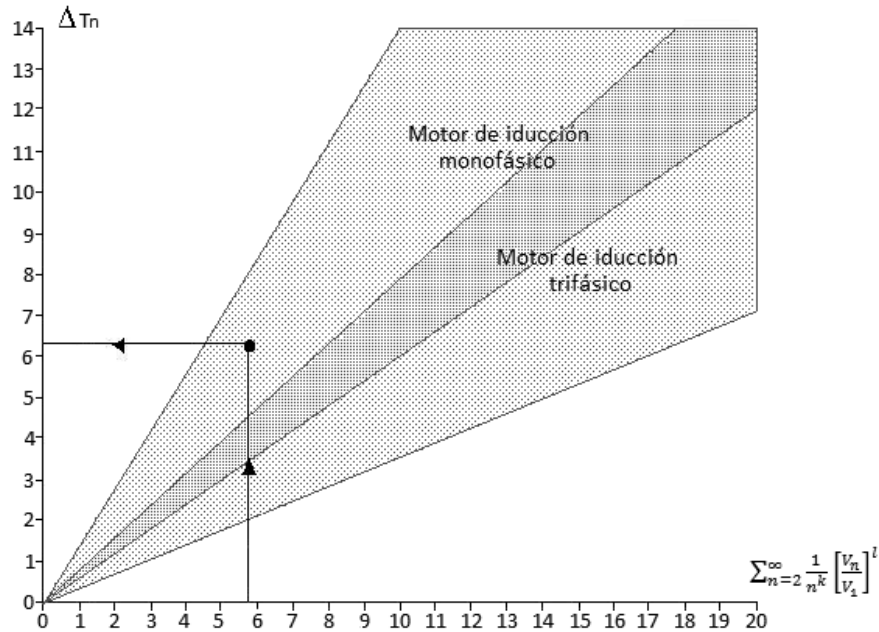
Fuente[27]

Efecto de los armónicos en el aumento de la temperatura de los motores de inducción

La presencia de armónicos en la señal de suministro incrementa la temperatura en el motor. En la Figura 11 se muestra el incremento de temperatura en el motor de inducción monofásico y en el trifásico en función del factor armónico[26]. De la figura se observa que los motores monofásicos son más sensibles que los trifásicos.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

Figura 11. Aumento de la temperatura adicional contra la función del factor armónico.



Fuente [28]

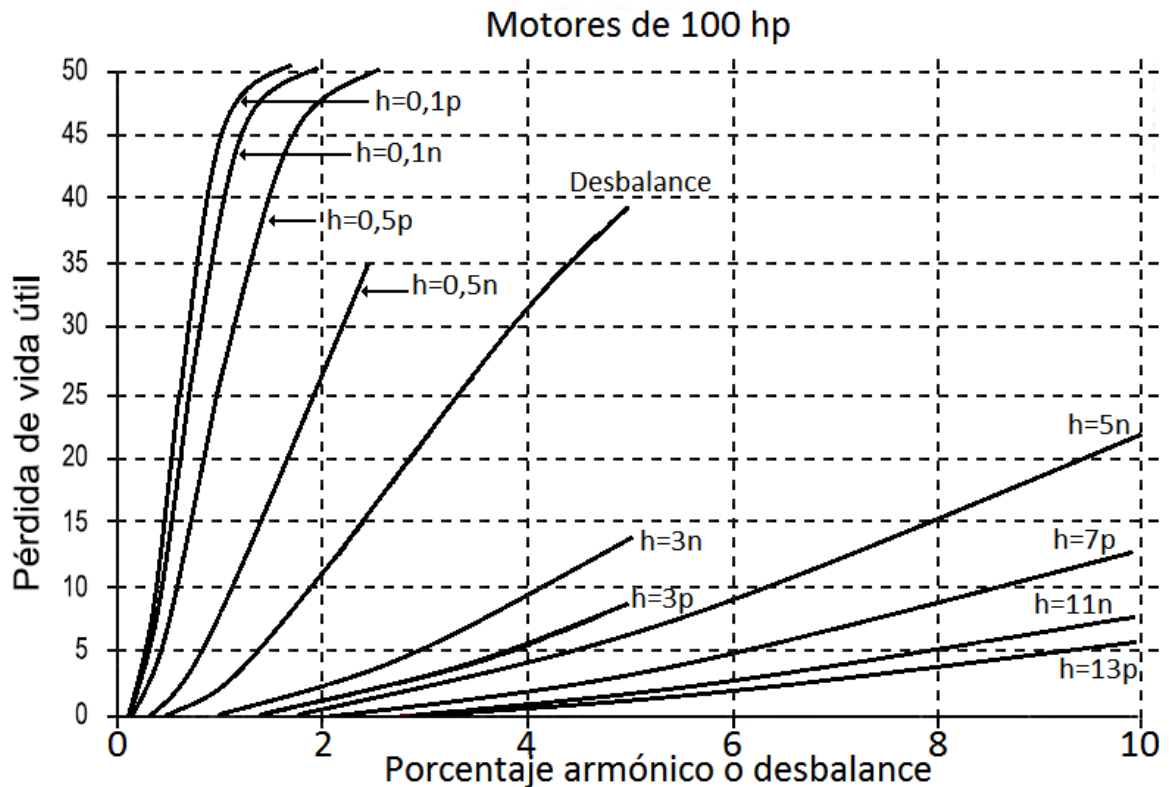
Según [26] los armónicos de menor orden tienen efecto mayor que los de alto orden. En [29] se indica que para una distorsión de 5% de tensión, el segundo armónico tiene efecto mayor en el incremento de temperatura, que el quinto armónico con este mismo valor. Para una distorsión de 10% de tensión, los armónicos de secuencia negativa tienen efecto mayor que los armónicos de secuencia positiva [30]. Además, los armónicos menores al quinto tienen efecto mayor en el incremento de la temperatura para una misma distorsión.

Efecto de los armónicos en la pérdida de vida útil de los motores de inducción

En [31], [32] se expone que la susceptibilidad de los motores a la distorsión depende del tamaño y diseño del motor. La Figura 12 muestra cómo los sub-armónicos afectan considerablemente en el envejecimiento térmico de un motor de 100 HP. La pérdida de capacidad para los motores no se puede modelar con

una curva universal, ya que el tamaño y el diseño afectan su pérdida de capacidad ante la distorsión armónica y desbalance. A medida que aumenta la distorsión, se incrementa la pérdida de vida útil en el motor.

Figura 12. Pérdida de vida útil del motor de 100 hp.



Fuente [31]

La Figura 12 muestra que con $n=0,1$ p (donde n significa de secuencia negativa y p de secuencia positiva) de magnitud 25%, se causa en el mismo envejecimiento térmico que un 6% del quinto armónico (Figura 13). Ambos causan 18% de pérdida de vida útil.

El porcentaje de vida útil (% ΔL), menor a 40% de la vida nominal, puede calcularse aproximadamente por [32]:

$$\% \Delta L \approx a_u (\% D_{desbalance}) + \sum_n a_h (\% THD_{v_indi})^2 \quad (B-13)$$

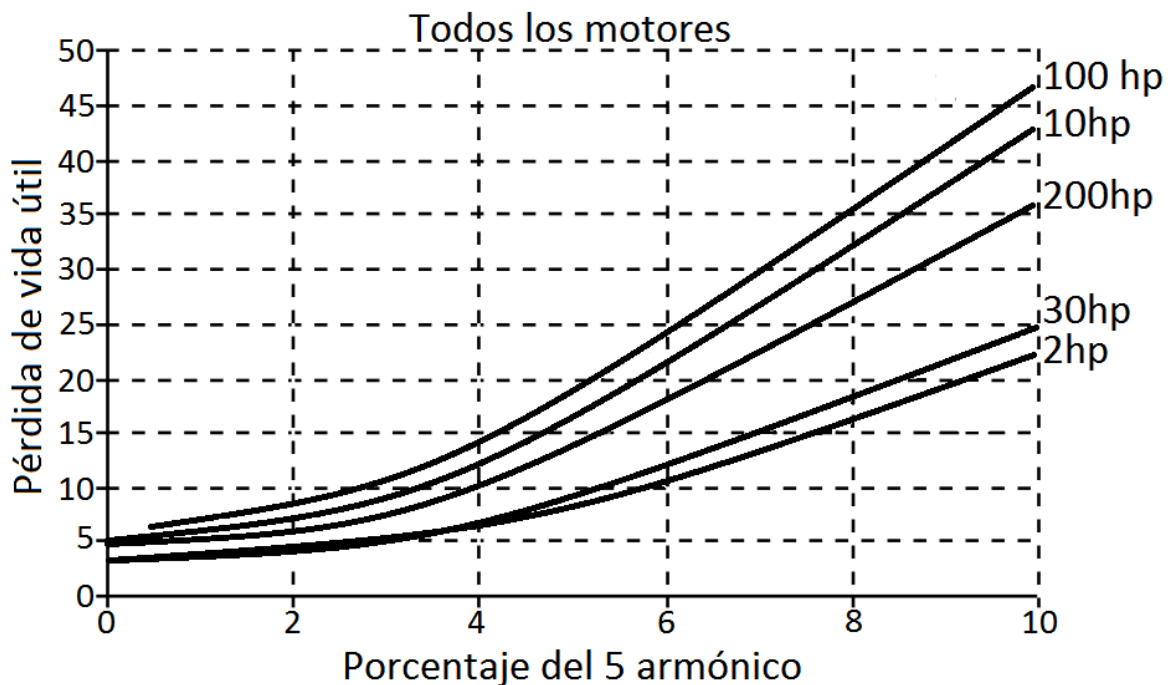
Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

Donde:

- $\% \Delta L$ Es el porcentaje de vida útil
- a_u Es el coeficiente de desbalance
- a_h Es la tensión armónica de orden h
- THD_{v_indi} Es la distorsión armónica individual de tensión
- $\% D_{desbalance}$ Es el porcentaje de desbalance

a_u y a_h varían dependiendo del tamaño del motor. Los valores están dados en la referencia [31].

Figura 13. Pérdida útil de varios motores.

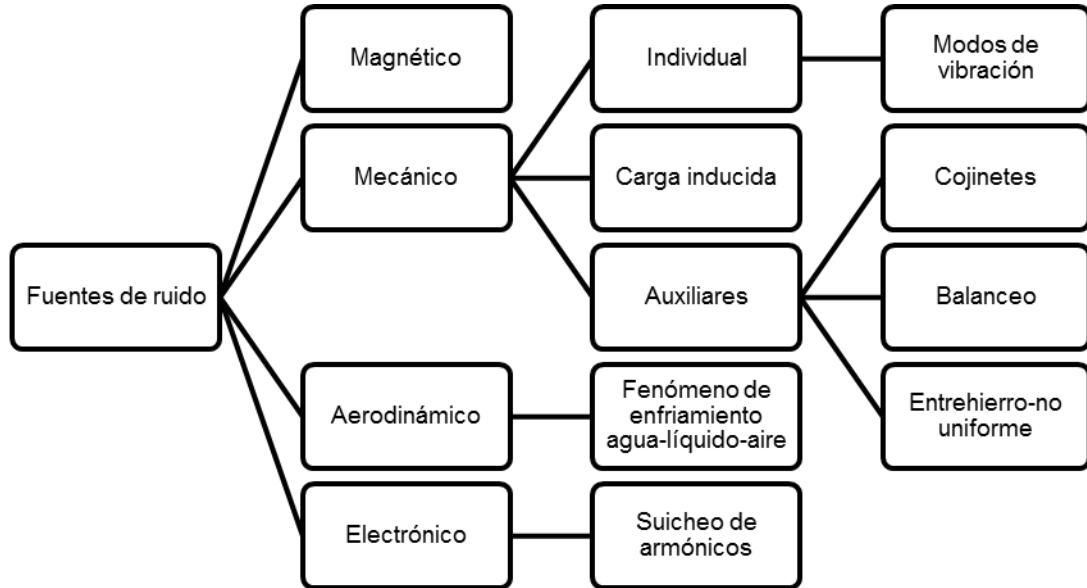


Fuente [31]

Efecto de los armónicos en el ruido acústico y torques pulsantes en los motores de inducción.

Las fuentes de ruido acústico pueden dividirse en cuatro categorías: magnético, mecánico, aerodinámico y electrónico, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Clasificación de las fuentes de ruido en motores eléctricos.



ente[33]

Fu

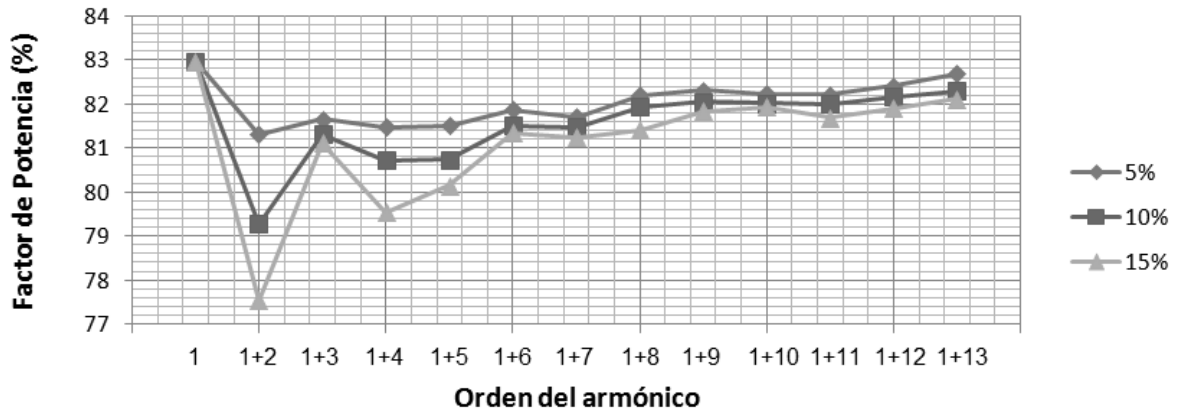
En general, la contribución de los armónicos al torque promedio es pequeña, aproximadamente 4% de reducción, siendo los armónicos más influyentes en la reducción el quinto, el séptimo y el undécimo. Generalmente, las fuerzas electromotrices de esos armónicos son suficientemente altas para provocar ruido considerable y aumento de los torques pulsantes, este incremento es significativo si el orden del armónico está cercano a las frecuencias naturales del estator [23].

Efecto de los armónicos en el factor de potencia y eficiencia de los motores de inducción

La variación del factor de potencia en función de la distorsión armónica individual se puede evidenciar en la Figura 15. Se observa que a mayor distorsión de tensión, más bajo es el factor de potencia, y que los armónicos de bajo orden tienen un mayor efecto que los de alto orden para un valor dado de distorsión armónica. Los armónicos de secuencia negativa de menor orden (menor al

quinto), tienen efecto mayor en el decrecimiento del factor de potencia que los de secuencia positiva y de secuencia cero.

Figura 15. Factor de potencia en función de la distorsión armónica de tensión.



Fuente [30]

Tabla B-4 Factor de potencia en función de la distorsión armónica de tensión

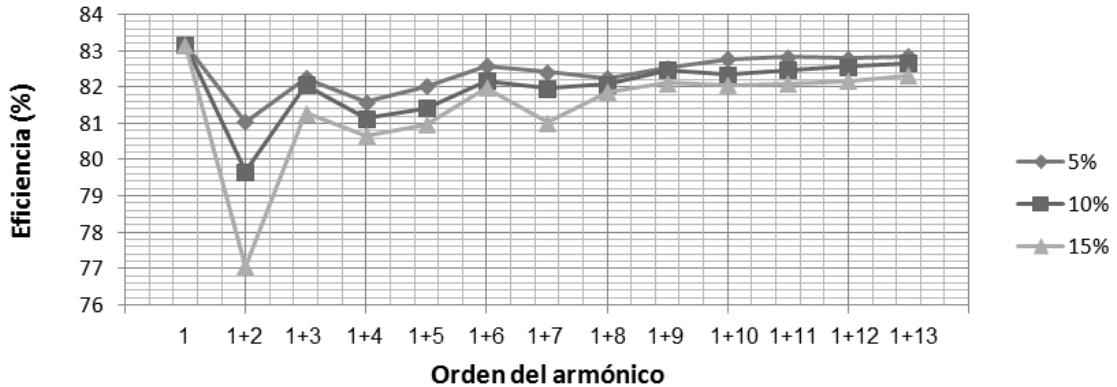
Orden del armónico	Secuencia	Factor de distorsión de tensión (%)		
		5%	10%	15%
1	-	82,97	82,97	82,97
1+2	Negativa	81,31	79,283	77,528
1+3	Cero	81,653	81,308	81,123
1+4	Positiva	81,465	80,709	79,542
1+5	Negativa	81,507	80,73	80,144
1+6	Cero	81,875	81,508	81,349
1+7	Positiva	81,701	81,48	81,241
1+8	Negativa	82,197	81,939	81,399
1+9	Cero	82,309	82,05	81,844
1+10	Positiva	82,236	82,019	81,938
1+11	Negativa	82,211	82,003	81,689
1+12	Cero	82,405	82,164	81,906
1+13	Positiva	82,699	82,305	82,112

Fuente[30]

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

La variación de la eficiencia en función de la distorsión armónica individual se muestra en la Figura 16; el comportamiento es similar al descrito para el factor de potencia.

Figura 16. Eficiencia en función de la distorsión armónica.



Fuente[30]

Tabla B-5 Eficiencia en función de la distorsión armónica

Orden del armónico	Secuencia	Factor de distorsión de tensión (%)		
		5%	10%	15%
1	-	83,152	83,152	83,152
1+2	Negativa	81,032	79,67	77,062
1+3	Cero	82,232	82,043	81,281
1+4	Positiva	81,578	81,136	80,663
1+5	Negativa	82,017	81,408	80,96
1+6	Cero	82,574	82,176	81,986
1+7	Positiva	82,406	81,957	81,013
1+8	Negativa	82,237	82,072	81,871
1+9	Cero	82,514	82,461	82,105
1+10	Positiva	82,774	82,331	82,055
1+11	Negativa	82,816	82,46	82,094
1+12	Cero	82,788	82,563	82,167
1+13	Positiva	82,83	82,642	82,31

Fuente [30]

Desbalance de tensiones en motores de inducción

El desbalance trifásico es el fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde las tensiones y/o ángulos entre fases consecutivas no son iguales. El balance perfecto de tensiones es técnicamente inalcanzable. El continuo cambio de cargas presentes en la red, causan una magnitud de desbalance en permanente variación.

La conexión de cargas residenciales de naturaleza monofásica, provocan un estado de carga en el sistema trifásico que no es equilibrado entre fases, de allí que las caídas de tensión del sistema tampoco serán equilibradas, dando por resultado niveles de tensión desiguales[36].

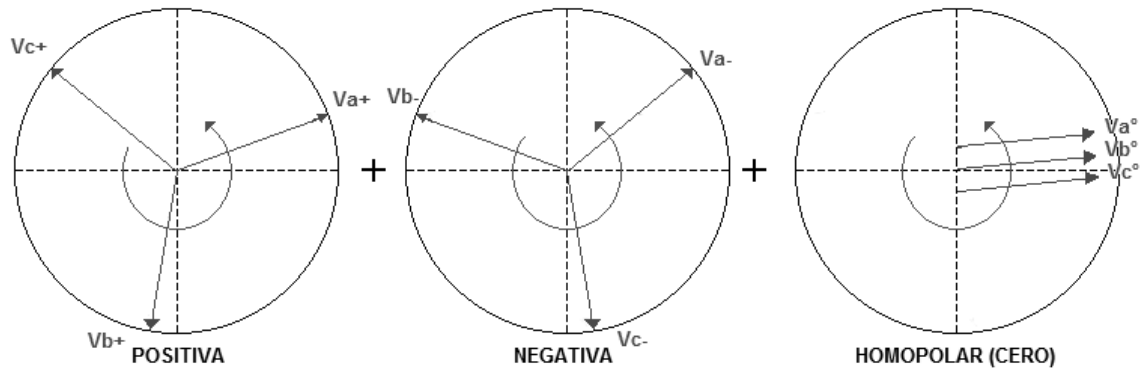
Los sistemas desbalanceados pueden analizarse a partir de la representación por medio de tres sistemas trifásicos equivalente de secuencia, tal como se observa en la Figura 17 y que corresponde a dos ternas (trifásicas) simétricas y una tercera compuesta por una terna de igual magnitud, pero de igual fase.

- La terna de secuencia positiva corresponde al flujo de potencia que proviene de la red hacia la carga, es decir, desde el generador hacia aguas abajo. La potencia suministrada o energía eléctrica generada tiene únicamente representación de secuencia positiva, o sea, no existe generación de secuencia negativa u homopolar, en los sistemas de generación simétricos.
- La terna de secuencia negativa(o componente negativa), es una indicación de la medida de desbalance existente en el sistema (trifásico), o sea, de la falta de simetría entre los fasores de tensión en el punto de conexión.
- La presencia de componentes de secuencia homopolar, se vincula a la conexión respecto de tierra. Las corrientes homopolares son aquellas que no cierran el circuito por las fases activas, sino que lo hacen por el neutro o por tierra, si existiera vinculación galvánica con el circuito. Las tensiones homopolares en un

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

sistema estrella se encuentran en el centro de estrella de cargas, cuya magnitud se mide respecto de tierra o del centro estrella de generación.

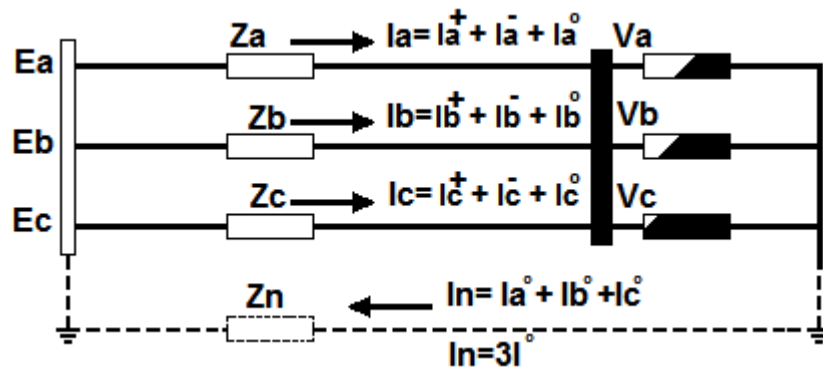
Figura 17. Componentes simétricas: Secuencias.



Fuente [36]

En la Figura 18, se observa un sistema simétrico con carga desbalanceada, en donde se generan corrientes y caídas de tensión desbalanceadas. Cada corriente de línea se descompone en sus tres componentes de secuencia. Las componentes positivas y negativas pertenecen solo a las fases activas en cambio, la componente homopolar cierra por el nodo común de las cargas a través del neutro o tierra. La corriente de neutro, sumatoria de corrientes de fase, es equivalente a tres veces la homopolar existente en cada una de las fases (tanto la tensión como la corriente homopolar son iguales en magnitud y fase).

Figura 18. Sistema simétrico con carga desbalanceada.



Fuente [36]

Efectos del desbalance de tensión sobre los motores de inducción

Efectos en el rendimiento del motor

El efecto del desbalance de tensiones en motores de inducción polifásicos equivale a la introducción de “tensión de secuencia negativa”, lo que significa una rotación opuesta a la producida con tensiones equilibradas. Esta tensión de secuencia negativa ocasiona un flujo opuesto a la rotación del rotor en el entre hierro, produciendo un incremento en las corrientes. Una pequeña tensión de secuencia negativa puede producir en los devanados corrientes considerablemente excesivas comparadas con las presentes en condiciones de tensión balanceada.

Efectos en el par del motor

El par de rotor bloqueado y el par máximo se reducen cuando la tensión aplicada es desbalanceada. Si el desbalance son extremadamente graves, los torques podrían no ser adecuados para la aplicación.

Efectos de la tensión desbalanceada en la velocidad del motor a plena carga

La velocidad del motor a plena carga se reduce ligeramente cuando el motor opera con tensiones desbalanceadas.

Efectos de la tensión desbalanceada en las corrientes del motor

La corriente de rotor bloqueado tendrá el mismo grado de desbalance presente en las tensiones, pero la potencia de rotor bloqueado tendrá un leve incremento.

Las corrientes a una velocidad normal de operación con tensiones desbalanceadas presentarán un alto grado de desbalance, de alrededor de 6 a 10 veces la tensión desbalanceada.

Los análisis de laboratorio indican que hasta un 2% de desbalance, los motores no se ven muy afectados. Por encima del 2%, la eficiencia se verá reducida, requiriéndose una desclasificación o reducción de la potencia de la máquina [36].

Límites permitidos por norma para el desbalance de tensión en la red.

Desde el lado de la normativa vigente, se identifican algunos límites permisibles para el desbalance en la red:

- **IEC 61000-2-5³⁵[37]**
Dos grados se definen: Grado 1: $u_n^{36} \leq 2\%$ y Grado 2: $u_n \leq 3\%$
- **IEC 61000-2-12³⁷**
 $u_n \leq 2\%$ y bajo especiales condiciones $u_n \leq 3\%$
- **EN50160³⁸ [38] u**
 $u_n \leq 2\%$ y bajo especiales condiciones $u_n \leq 3\%$, correspondiente al valor percentil 95% de un registro de 1 semana cada 10 minutos.

Desde el punto de vista de algunos países los límites permisibles para el desbalance en sistemas de distribución de baja tensión (BT) se recomienda que no exceda el 5% de desbalance, porque de lo contrario deberán tomarse medidas correctivas. Para el caso de media (MT) y alta tensión (AT), los desequilibrios de tensión deben ser aún más restrictivos, entre el 1% y el 3%.

En países como Bélgica, Brasil, Italia, Alemania, Ecuador y Guatemala, el desequilibrio se calcula en función del porcentaje de secuencia negativa tal como lo define la IEC en (B-14). Los límites son los siguientes[39], [40]:

- **Bélgica**
 $u_n < 2\%$ para MT
 $u_n < 1\%$ para AT
- **Brasil**
 $u_n < 2\%$

³⁵ IEC 61000-2-5 "Compatibilidad electromagnética (CEM).Parte 2, Entorno, Sección 5, Clasificación de los entornos electromagnéticos"

³⁶ u_n es el factor de desbalance de secuencia negativa

³⁷ IEC 61000-2-12-Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-12: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de distribución pública en media tensión.

³⁸ EN50160-Normativa de obligatorio cumplimiento que regula la calidad de suministro eléctrico en todo el territorio europeo.

- **Italia**

$$u_n < 2\% \text{ para MT}$$

$$u_n < 1\% \text{ para AT}$$

- **Alemania**

$$u_n < 2\%$$

- **Ecuador**

$$u_n < 1\% \text{ para tensiones mayores a 90 kVT}$$

- **Guatemala**

$$u_n < 3\%$$

En cuanto a la operación y especificación de motores (en BT), la Norma NEMA MG1 de motores y generadores establece que: *“Los motores polifásicos de corriente alterna deberán operar satisfactoriamente bajo condiciones de operación a carga nominal cuando el desequilibrio de tensión no exceda del 1%”*.

Medición de Desbalance de Tensión

El concepto de medición de desbalance, expresa la relación entre la tensión de secuencia negativa respecto de la positiva. En la práctica, esta relación puede encontrarse expresada de varios modos.

Existen diferentes normas donde se especifica el cálculo del desbalance de tensión, a continuación se presentan algunas de ellas.

- **IEC 61000-4-30³⁹ - IEEE P1159.1⁴⁰, Desbalance de Secuencia Negativa**

El desbalance de secuencia negativa es definido como el cociente de la componente de tensión de secuencia negativa con la secuencia positiva, como sigue en la Ecuación (B-14).

³⁹ IEC 61000-4-30 Pruebas y técnicas de medición- Métodos de medición de la calidad de la energía.

⁴⁰ IEEE P1159, Práctica Recomendada para la Supervisión de la Calidad de Energía Eléctrica, Grupo de Trabajo sobre Monitoreo de la Calidad de Energía Eléctrica de SCC22 - Calidad de la Energía, Proyecto 6, noviembre de 1994.

Propuesta técnica que incorpora los parámetros de compatibilidad electromagnética en la etapa de diseño, para la selección y dimensionamiento de los transformadores, motores de inducción y algunos equipos asociados.

$$u_n = \frac{|U^-|}{|U^+|} = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} 100\% \quad (B-14)$$

y

$$\beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2} \quad (B-15)$$

Para las cuales,

- u_n Es el factor de desbalance de secuencia negativa.
- U^- Es la componente de tensión de secuencia negativa.
- U^+ Es la componente de tensión de secuencia positiva.
- U_{AB} Es la diferencia de tensión entre las fases A y B.
- U_{BC} Es la diferencia de tensión entre las fases B y C.
- U_{CA} Es la diferencia de tensión entre las fases C y A.

Esta medición de desbalance considera únicamente las componentes de tensión de frecuencia fundamental. El error cometido si se considera el valor RMS total sería mínimo, pero se mezclarían las fases de la fundamental con magnitud RMS total. Debido a que el desbalance provoca la presencia de componentes de secuencia negativa y homopolar (además de la positiva, única que aporta potencia), se requiere también medir el factor de desbalance homopolar, así:

$$u_0 = \frac{|U^0|}{|U^+|} 100\% \quad (B-16)$$

Siendo:

- u_0 El factor de desbalance homopolar.
- U^0 La componente de tensión de secuencia cero.
- U^+ La componente de tensión de secuencia positiva.

El coeficiente de desbalance definido por la IEC 61000-4-30, representa también el grado de proporción de la potencia suministrada a la carga (sec. positiva), respecto de la potencia de falla en el punto de conexión. Haciendo una generalización para todos los casos de carga, se puede decir que el desbalance es aproximadamente igual a la relación entre la potencia de carga y la potencia de falla trifásica en el punto de conexión (potencia de cortocircuito).

- **IEC 61000-4-27⁴¹ – ANSI C84.1⁴²**

Se define el factor de desbalance de secuencia negativa como el cociente entre la máxima diferencia entre las tensiones de fase y la tensión promedio, con la tensión promedio.

$$u_n = \frac{\Delta U_{m\acute{a}x}}{\bar{U}} \quad (\text{B-17})$$

En donde:

u_n Es el factor de desbalance de secuencia negativa.

$\Delta U_{m\acute{a}x}$ Es la máxima diferencia entre las tensiones de fase.

\bar{U} Es la tensión promedio.

La máxima diferencia entre las tensiones de fase se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta U_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x(U_{AB} - \bar{U}, U_{BC} - \bar{U}, U_{CA} - \bar{U}) \quad (\text{B-18})$$

Siendo:

$\Delta U_{m\acute{a}x}$ La máxima diferencia entre las tensiones de fase.

\bar{U} La tensión promedio.

U_{AB} La diferencia de tensión entre las fases A y B.

U_{BC} La diferencia de tensión entre las fases B y C.

U_{CA} La diferencia de tensión entre las fases C y A.

⁴¹ IEC 61000-4-27-Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-27: Técnicas de ensayo y de medida. Ensayo de inmunidad a los desequilibrios para los equipos con corriente de entrada no superior a 16 A por fase.

⁴² ANSI C84.1, Sistemas eléctricos de potencia y equipos de medida de tensión (60 Hertz)

Y la tensión promedio está dada por la Ecuación (B-19)

$$\bar{U} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} \quad (\text{B-19})$$

Donde:

\bar{U} Es la tensión promedio.

U_{AB} Es la diferencia de tensión entre las fases A y B.

U_{BC} Es la diferencia de tensión entre las fases B y C.

U_{CA} Es la diferencia de tensión entre las fases C y A.

- **IEC 61000-2-12⁴³**

En la norma IEC 61000-2-12 el factor de desbalance de secuencia negativa está determinado por la siguiente ecuación:

$$u_n = \sqrt{\frac{6(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}} - 2 \quad (\text{B-20})$$

Variables que corresponde a:

u_n Factor de desbalance de secuencia negativa.

U_{AB} Es la diferencia de tensión entre las fases A y B.

U_{BC} Es la diferencia de tensión entre las fases B y C.

U_{CA} Es la diferencia de tensión entre las fases C y A.

⁴³ IEC 61000-2-12-Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-12: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de distribución pública en media tensión.