

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**WESLEY ROSSI PIMENTA
LUÍS FELIPE CARVALHO REIS TORTURELLO**

**EFEITO PELICULAR POR CONSEQUÊNCIA DAS DISTORÇÕES
HARMÔNICAS**

**VOLTA REDONDA
2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

EFEITO PELICULAR POR CONSEQUÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia elétrica do UNIFOA, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Alunos: Wesley Rossi Pimenta e Luís Felipe Carvalho Reis Torturello

Orientador: Prof. Msc. Cláudio Márcio de Freitas Silva.

VOLTA REDONDA

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Curso: Engenharia Elétrica

Acadêmico: Matrícula: Luís Felipe Carvalho Reis Torturello 201410542; Wesley Rossi Pimenta 201410570

Título do TCC: Efeito Pelicular por consequência das distorções harmônicas

Apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica

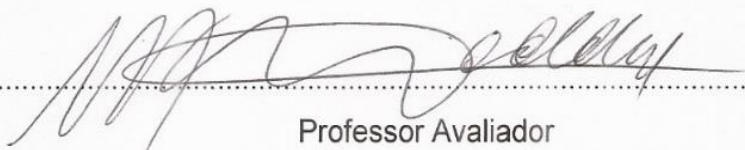
Aprovada em 10 de novembro de 2018

Banca Avaliadora:



.....
Professor Orientador

Cláudio Márcio de Freitas da Silva, Mestre, UniFOA



.....
Professor Avaliador

Maurício Ferreira Haddad, Mestre, UniFOA



.....
Professor Avaliador

Bruno Moreira da Silva, Especialista, UniFOA

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	28
3. OBJETIVO	29
3.1 Objetivos gerais	29
3.2 Objetivos Específicos	29
4. HIPÓTESE	30
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
5.1 Campos estacionários, variantes no tempo e equações de Maxwell	31
5.1.1 Lei de Gauss para carga	31
5.1.2 Lei de Gauss para o magnetismo	33
5.1.3 Lei de Faraday	35
5.1.4 Lei de Ampère.....	37
5.1.5 Equações de Maxwell	41
5.2 Resistividade e resistência elétrica	41
5.2.1 Resistividade Elétrica	41
5.2.2 Resistência elétrica e Lei de Ohm.....	44
5.3 Indutância.....	46
5.3.1 Auto-indução	46
5.3.1.1 Indutância interna em um condutor.....	47
5.4 Efeito Pelicular	49
5.4.1 Classificação do efeito pelicular	51
5.4.2 Modelagem do efeito pelicular	52
5.4.3 Considerações geométricas para um condutor cilíndrico	53
5.4.4 Modelamento da impedância dos condutores	56
5.4.4 Modelamento do efeito pelicular clássico	57
5.4.5 Modelamento para uma aproximação linear do efeito pelicular	57

5.5 Qualidade de energia elétrica.....	58
5.5.1 Perturbações na amplitude da tensão	58
5.5.2 Perturbações na frequência do sinal	60
5.5.3 Desequilíbrio de tensão ou corrente em sistemas trifásicos.....	60
5.5.4 Perturbações na forma de onda.....	60
5.6 Interações entre carga e fonte	60
5.7 Caracterização das distorções harmônicas	62
5.7.1 Ordem, sequência das harmônicas e frequência	64
5.7.2 Espectro Harmônico	64
5.7.3 Método de caracterização das distorções harmônicas pela teoria de Fourier	66
5.7.4 Série de Fourier.....	66
5.7.4 Série de Fourier para funções pares e ímpares	67
5.7.5 Transformada de Fourier	68
5.8 Indicadores de distorção harmônica	69
5.8.1 Distorção harmônica total (DHT).....	69
5.8.2 Distorção harmônica total de corrente (<i>DHT_i</i>).....	70
5.8.3 Distorção harmônica total de demanda (DTT)	70
5.8.4 Fator de distorção	70
5.8.5 Fator de desclassificação (K).....	71
5.9 Normas referentes às distorções harmônicas	71
5.9.1 Normas Nacionais	71
5.9.2 Normas internacionais.....	74
5.10 Conceitos de potência	78
5.10.1 Potência instantânea	78
5.10.2 Potência ativa	78
5.10.3 Potência reativa.....	79
5.10.4 Distorção Volt-Ampères	80
5.10.5 Potência complexa.....	80
5.10.6 Potência aparente	80
6. MATERIAIS E MÉTODOS	81
6.1 Simulação computacional	81
6.2 Comprovação do modelamento.....	89

6.3 Ensaaios e simulações	91
6.3.1 Caso 1 – Distribuição de energia elétrica para cargas residenciais.....	91
6.3.2 Caso 2 – Distribuição de energia elétrica para cargas comerciais.....	114
6.3.3 Caso 3 - Distorções harmônicas em sistemas industriais	136
7. RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	145
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	146
ANEXO	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Campo elétrico perpendicular à superfície A	31
Figura 2 - Superfície Gaussiana em um ímã; Superfície Gaussiana em uma carga elétrica puntiforme.....	34
Figura 3 - Define uma região no espaço, onde é aplicado um campo magnético a uma superfície.	35
Figura 4 - Quando o ímã é deslocado gerando um campo magnético variante o anel tende a se opor a variação do fluxo magnético.	36
Figura 5 - a) Bússolas posicionadas ao redor de um condutor, com corrente elétrica equivalente a zero; b) Bússolas interagindo com uma corrente elétrica i	37
Figura 6 - Condutor entre placas paralelas, onde aplicada uma corrente I para carregamento do capacitor.....	40
Figura 7 - Campo elétrico executando uma força elétrica na carga q	43
Figura 8 - Material resistivo, cuja curva respeita a relação V/I	45
Figura 9 - Condutor visto pela vista frontal indicando a área a ser verificada a indutância interna.....	47
Figura 10 - Condutor visto em perspectiva.....	48
Figura 11 - Demonstração dos efeitos elétricos e magnéticos para verificação do efeito pelicular.....	50
Figura 12 - Representação de um condutor elétrico percorrido por uma corrente elétrica: (a) Corrente elétrica contínua. (b) Corrente elétrica de baixa frequência. (c) Corrente elétrica de alta frequência.	50
Figura 13 - Função de Bessel de grau zero e argumento complexo: [a] descrita a função de primeira espécie, para parte imaginária e real. [b] descrita a função de segunda espécie para uma componente real e imaginária.	55
Figura 14 - Modelo Fonte - carga.....	61

Figura 15 - Superposição da forma de onda de múltiplas frequências demonstrando as distorções harmônicas.....	63
Figura 16 - Superposição ponto a ponto demonstrando frequência, amplitude e sequência das harmônicas.....	63
Figura 17 - Forma de onda com características próximas a componente fundamental.	65
Figura 18 - Forma de onda com predominância da 3,5,7,9 ordem harmônica.....	65
Figura 19 - (a) $p(t) > 0$ potência está sendo absorvida; (b) $p(t) < 0$ indica que a potência está sendo fornecida pela fonte.	78
Figura 20 - Interface gráfica para realizar a verificação dos dados de perdas devido ao efeito pelicular por consequência das distorções harmônicas.	81
Figura 21 - Inserção de dados do condutor para verificação da curva de profundidade pelicular e os diversos efeitos.....	82
Figura 22 - Interface para inserir os dados de referente a frequência e dados da fonte alimentadora	82
Figura 23 - Campo para inserção dos dados do espectro harmônico em %.....	83
Figura 24 - Curva da profundidade pelicular para as múltiplas frequências, como resposta dos dados inseridos na plataforma de simulação.	84
Figura 25 - Resposta da impedância para as múltiplas frequências.	85
Figura 26 - Representação das perdas elétricas para cada componente das ordens harmônicas.	86
Figura 27 - Resposta do sistema, indicando dados de distorção harmônica total de corrente, distorção total de demanda, potência total com as distorções harmônicas e potência sem as distorções harmônicas.....	88
Figura 28 - Verificação das perdas em sistemas elétricos devido as distorções harmônicas PTDH, as perdas sem distorções harmônicas PTSH e a relação entre as perdas.	88

Figura 29 - Comparação da impedância em condutores 14 AWG com resistividade equivalente a $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ devido ao efeito pelicular	89
Figura 30 - Resistência em condutores 14 AWG com resistividade equivalente a $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ devido ao efeito pelicular simulado no software.....	90
Figura 31 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 45KVA no período de 12:00.....	92
Figura 32 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 45KVA no período de 21:00.....	92
Figura 33 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 45KVA no período de 02:00.....	92
Figura 34 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 12:00 para cargas residências, fase A.	95
Figura 35 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 12:00 para cargas residências, fase B.	95
Figura 36 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 12:00 para cargas residências, fase C.	95
Figura 37 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 12:00 para cargas residências, neutro.	96
Figura 38 - Z/Rcc para o condutor 2/0AWG com 9,3 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.96	
Figura 39 - Z/Rcc para o condutor 4/0AWG com 11,7 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.....	96
Figura 40 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00, fase A.	97

Figura 41 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00, fase B.	97
Figura 42 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00, fase C.	97
Figura 43 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00, neutro.	98
Figura 44 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.	98
Figura 45 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.	98
Figura 46 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.	99
Figura 47 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.	99
Figura 48 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 21:00 para cargas residências, fase A.	103
Figura 49 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 21:00 para cargas residências, fase B.	103
Figura 50 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 21:00 para cargas residências, fase C.	104

Figura 51 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 21:00 para cargas residências, neutro.	104
Figura 52 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00, fase A.	104
Figura 53 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00, fase B.	105
Figura 54 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00, fase C.	105
Figura 55 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00, neutro.	105
Figura 56 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.	106
Figura 57 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.	106
Figura 58 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.	106
Figura 59 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, no neutro.	107
Figura 60 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 02:00 para cargas residências, fase A.	108

Figura 61 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 02:00 para cargas residências, fase B.	109
Figura 62 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 02:00 para cargas residências, fase C.	109
Figura 63 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 02:00 para cargas residências, neutro.	109
Figura 64 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00, fase A.	110
Figura 65 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00, fase B.	110
Figura 66 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00, fase C.	110
Figura 67 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00, neutro.	111
Figura 68 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.	111
Figura 69 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.	111
Figura 70 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.	112

Figura 71 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.	112
Figura 72 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 225 KVA no período do expediente.	114
Figura 74 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 225 KVA no período da madrugada.	115
Figura 75 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do expediente para cargas comerciais, fase A.	117
Figura 76 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do expediente para cargas comerciais, fase B.	117
Figura 77 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do expediente para cargas comerciais, fase C.	117
Figura 78 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do expediente para cargas comerciais, neutro.	118
Figura 79 - Z/Rcc para o condutor 800 MCM com 22,6 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.	118
Figura 80 - Z/Rcc para o condutor 1000 MCM com 25,2 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.	118
Figura 81 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente, fase A.	119
Figura 82 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente, fase B.	119

Figura 83 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente, fase C.	119
Figura 84 - Representação das perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente, neutro.	120
Figura 85 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.	120
Figura 86 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.	120
Figura 87 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.	121
Figura 88 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.	121
Figura 89 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do almoço para cargas comerciais, fase A.	125
Figura 90 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do almoço para cargas comerciais, fase B.	125
Figura 91 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do almoço para cargas comerciais, fase C.	126
Figura 92 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do almoço para cargas comerciais, neutro.	126

Figura 93 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço, fase A.	126
Figura 94 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço, fase B.	127
Figura 95 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço, fase C.	127
Figura 96 - Perdas elétricas as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço, neutro.	127
Figura 97 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.	128
Figura 98 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.	128
Figura 99 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.	128
Figura 100 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.	129
Figura 101 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período madrugada para cargas comerciais, fase A.	130
Figura 102 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período madrugada para cargas comerciais, fase B.	131

Figura 103 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período madrugada para cargas comerciais, fase C.	131
Figura 104 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período madrugada para cargas comerciais, neutro.	131
Figura 105 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada, fase A.....	132
Figura 106 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada, fase B.....	132
Figura 107 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada, fase C.....	132
Figura 108 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada, neutro.....	133
Figura 109 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.	133
Figura 110 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.	133
Figura 111 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.	134
Figura 112 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.....	134

Figura 113 - Forma de onda do centro de controle de motores (CCM) do sistema de filtração 1 e 2.	138
Figura 114 - Espectro harmônico centro de controle de motores (CCM) do sistema de filtração 1 e 2.	138
Figura 115 - Z/Rcc para o condutor 95 mm ² com 11 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,52 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.	138
Figura 116 - Perdas elétricas para cada componente harmônica do centro de controle de motores (CCM) do sistema de filtração 1 e 2.	139
Figura 117 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.	139
Figura 118 - Forma de onda do centro de controle de motores (CCM) da Adega.	141
Figura 119 - Espectro harmônico centro de controle de motores (CCM) da Adega.	141
Figura 120 - Z/Rcc para o condutor 95 mm ² com 11 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,52 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.	142
Figura 121 - Perdas elétricas para cada componente harmônica do centro de controle de motores (CCM) da adega.	142
Figura 122 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do efeito pelicular	52
Tabela 2 - Sequência de fase dos harmônicos num sistema trifásico equilibrado	64
Tabela 3 - Limites das distorções harmônicas totais em % da tensão fundamental.	73
Tabela 4 - Limite para equipamentos classe A.....	74
Tabela 5 - Limite para equipamentos classe C.....	75
Tabela 6 - Limite para equipamentos classe D.....	75
Tabela 7 - Limite máximo para harmônicas ímpares em Sistemas de distribuição de 120 até 69kV.....	76
Tabela 8 - Limite máximo para harmônicas ímpares em Sistemas de distribuição de 69KV até 161KV.....	77
Tabela 9 - Limite máximo para Harmônicas Ímpares em sistemas de Distribuição superior a 161KV e sistemas de geração e cogeração isolados.	77
Tabela 10 - Limites percentuais de distorção da tensão de alimentação em relação à fundamental.	77
Tabela 11 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas residências de 45 KVA, às 12:00.....	93
Tabela 12 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas residências de 45 KVA, às 21:00.....	93
Tabela 13 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas residências de 45 KVA, às 02:00.....	93
Tabela 14 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistencia total do condutor devido ao efeito pelicular.....	100

Tabela 15 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistencia total do condutor devido ao efeito pelicular.....	101
Tabela 16 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00.....	102
Tabela 17 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.	102
Tabela 18 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00.....	107
Tabela 19 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.	108
Tabela 20 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00.....	113
Tabela 21 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.	113
Tabela 22 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas comerciais de 225 KVA, no período do expediente.	115
Tabela 23 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas comerciais de 225 KVA, no período do almoço.	115

Tabela 24 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas comerciais de 225 KVA, no período da madrugada.....	116
Tabela 25 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistencia total do condutor devido ao efeito pelicular.....	122
Tabela 26 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistencia total do condutor devido ao efeito pelicular.....	123
Tabela 27 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificada no transformador de 225 KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente.	124
Tabela 28 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.	124
Tabela 29 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no transformador de 225 KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço.	129
Tabela 30 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.	130
Tabela 31 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificada no transformador de 225 KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada.....	135
Tabela 32 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.	135

Tabela 33 - Espectro harmônico para as cargas do CCM do processo de filtração; Espectro harmônico para as cargas do CCM da adega.	137
Tabela 34 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no centro de controle de motores (CCM) do sistema de filtração 1 e 2.	140
Tabela 35 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.	140
Tabela 36 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no centro de controle de motores (CCM) da adega.	143
Tabela 37 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.	143
Tabela 38 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistencia total do condutor devido ao efeito pelicular.....	144

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

\vec{E}	-	Campo Elétrico;
\vec{A}	-	Área de uma esfera;
Q	-	Carga elétrica;
φ_e	-	Fluxo Elétrico;
r, R, a	-	Raio de uma esfera;
ϵ_0	-	Permissividade elétrica no vácuo;
ϵ	-	Permissividade elétrica;
ρ	-	Densidade superficial de carga;
\vec{B}	-	Campo Magnético;
φ_b	-	Fluxo Magnético;
i ou I	-	Corrente elétrica;
$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$	-	Operador divergente de um vetor \vec{E} ;
$\vec{\nabla} \times \vec{E}$	-	Operador rotacional de um vetor \vec{E} ;
$\vec{\nabla}^2 \vec{E}$	-	Operador laplaciano de um vetor \vec{E} ;
μ_0	-	Permeabilidade Magnética no vácuo;
\vec{H}	-	Fluxo Magnético;
$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	-	Taxa de variação do campo magnético no tempo;

\vec{j}	-	Densidade de corrente elétrica;
i_d	-	Corrente de deslocamento;
μ_e	-	Permeabilidade dos elétrons;
\vec{F}	-	Força;
σ	-	Condutividade elétrica;
W	-	Energia;
v_d	-	Velocidade de deriva;
l	-	Comprimento;
L	-	Indutância;
R	-	Resistência elétrica;
S	-	Superfície;
F_e	-	Força elétrica;
V_{AB}	-	Tensão entre o ponto A e B;
m	-	Massa;
a	-	Aceleração;
ω	-	Frequência angular;
μ	-	Permeabilidade Magnética do material;
δ	-	Profundidade pelicular;
τ	-	Taxa de relaxação do elétron no condutor;
l	-	Livre caminho médio;

J_0^B	-	Função de Bessel de grau 0 de 1ª espécie;
Y_0^B	-	Função de Bessel de grau 0 de 2ª espécie;
T	-	Parâmetro da equação diferencial de Bessel;
t	-	Coordenada de tempo;
Z	-	Impedância por unidade de comprimento;
$\sum P_n$	-	Somatório das potências ativas nominais;
P	-	Potência ativa;
Q	-	Potências reativas;
S	-	Potências Complexa;
π	-	Razão do diâmetro pelo comprimento de uma circunferência;
E_0	-	Campo elétrico superficial;
X_l	-	Reatância indutiva;
R_p	-	Resistência elétrica aparente;
A_p	-	Área aparente;
C_1, C_2	-	Constante de integração;
D	-	Distorção Volt-Ampères;
a_0, a_n, b_n		Coefficientes da série de Fourier;
$P_{1,3,5...25}$		Potência ativa para coeficientes ímpares;
$I_{real1,3,5...25}$		Corrente para coeficientes ímpares;
$Z_{real1,3,5...25}$		Impedância para coeficientes ímpares;

RESUMO

Num sistema elétrico, há diversas variáveis a serem analisadas de acordo com a carga instalada. Responsáveis por gerar distúrbios na forma de onda da tensão e da corrente elétrica, as distorções harmônicas, são caracterizadas por frequências de ordem superior a fundamental. Quando aplicado um campo elétrico variável em um condutor, pode-se verificar que a densidade de corrente elétrica não se propaga de forma uniforme dentro do condutor, visto que, a maior parcela da corrente elétrica se propaga na periferia do mesmo. Esse fenômeno é denominado efeito pelicular. O trabalho tem como objetivo avaliar as perdas em sistemas elétricos a fim de verificar quais são as intensidades dessas interações. Foi então, realizado um modelamento matemático e desenvolvido uma aplicação no Matlab, para verificação da profundidade pelicular e aumento da impedância aparente nos condutores, de acordo com as múltiplas frequências. Com isso, foi relacionado o aumento da impedância dos condutores com os valores de corrente elétrica para as múltiplas frequências, de forma a verificar as perdas elétricas individualmente para cada componente de frequência elétrica. A análise das perdas elétricas foi realizada em três modelos de carga: modelo de carga residencial, comercial e industrial. As respostas obtidas no modelamento, expôs que as perdas associadas as distorções harmônicas para o modelo de carga residencial foi de 5,70% de acordo com o espectro harmônico analisado; para o modelo comercial as perdas foram de 21,70% de acordo com o espectro verificado e para o modelo de carga industrial as perdas associadas as distorções harmônicas foram de 22,70% de acordo com a análise do espectro harmônico.

Palavra-chave: Perdas elétricas, distorções harmônicas, efeito pelicular.

ABSTRACT

An electrical system has some variables to be analyzed according to the installed charge. Responsible for generating disturbances in the waveform of the voltage and electric current, the harmonic distortions are characterized by frequencies of order higher than the fundamental. When applied a variable electric field in a conductor, it can be verified that the density of electric current does not propagate evenly inside the conductor, since, most of the electric current propagates in the periphery of the conductor. This phenomenon is called skin effect. The objective of this work is to evaluate the losses in electrical systems, in order to verify the intensities of these interactions. A mathematical modeling was developed and an application was developed in Matlab to check the depth of the skin and increase the apparent impedance in the conductors according to the multiple frequencies. With this, the increase of impedance of the conductors with the values of electric current for the multiple frequencies was related in order to verify the electrical losses individually for each component of electric frequency. The analysis of the electric losses was carried out in three load models: residential, commercial and industrial charge model. The responses obtained in the modeling showed that the losses associated to the harmonic distortions for the residential load model is 5.70% according to the harmonic spectrum analyzed; for the commercial model the losses were of 21.70% according to the verified spectrum and for the industrial load model the losses associated to the harmonic distortions were of 22.70% according to the analysis of the harmonic spectrum.

Keywords: Electrical losses, harmonic distortions, skin effect.

1. INTRODUÇÃO

Dentro de um sistema elétrico, há inúmeras variáveis a serem analisadas de acordo com a carga instalada. Um fator que atualmente vem chamando bastante atenção da pesquisa, são as distorções harmônicas, que é caracterizada por gerar ruídos no sistema elétrico, fazendo com que frequências de ordem superior à natural estejam presentes no sistema, tornando a forma de onda distinta de suas características originais ou esperadas, gerando assim grandes consequências ao sistema elétrico.

A partir do avanço da eletrônica de potência, era esperado que o aumento das cargas não lineares fosse exponencial. Este modelo de carga acaba sendo problemático para o sistema elétrico pelo fato da distorção da forma de onda da tensão e da corrente elétrica, fazendo com que a mesma se torne uma fonte geradora de ruídos na rede. Contudo, não só as cargas eletrônicas são responsáveis por gerar harmônicos, as máquinas elétricas como: transformadores, motores de indução, dentre outros, também são responsáveis por gerar esse tipo de ruído na rede elétrica. Portanto, pode-se verificar que boa parte dos equipamentos que estão inseridos no mercado possuem capacidade de gerar esse fenômeno elétrico.

Outro fenômeno analisado é o efeito pelicular. Este é caracterizado quando na presença de um campo elétrico variante em um condutor, é verificado que a densidade de corrente não se propaga de forma uniforme nos condutores, visto que a maior parcela dessa corrente elétrica se propaga na periferia do condutor.

Este fenômeno reduz a densidade de corrente no condutor, pelo fato do aumento da impedância interna do material. As propriedades de aumento de resistência e reatâncias no condutor estão relacionadas com a frequência da corrente elétrica imposta no mesmo, ou seja, impedância aparente e frequência são diretamente proporcionais.

Pelo fato do aumento da impedância aparente do condutor, fica trivial imaginar perdas de energia em blocos de potência por efeito joule.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

A interação entre as distorções harmônicas e o efeito pelicular é inevitável, pelo fato de trabalharmos com a mesma variável: a frequência. Visto que as distorções harmônicas estão presentes em diversos sistemas elétricos, conseqüentemente o efeito pelicular também estará inserido no mesmo. Pelo fato do aumento da impedância aparente do condutor, é possível verificar a perda de energia elétrica em forma de calor, pelo efeito joule.

Dependendo da intensidade das interações do efeito pelicular com as distorções harmônicas em determinados blocos de energias, as perdas podem variar de baixa, ou até serem intensas de acordo com a potência do sistema e a carga instalada. Por isso, realizar o mapeamento é primordial para avaliar e verificar a viabilidade de mitigar as conseqüências num sistema. Sabido que perdas de energia somadas a desgastes acentuados são sinônimos de aumento de custos, atenuar essas perdas é primordial num meio competitivo, onde as empresas têm o intuito de trabalhar afim de evitar custos indesejados.

3. OBJETIVO

3.1 Objetivos gerais

Avaliar as perdas em sistemas elétricos, a fim de verificar quais são as intensidades dessas interações, realizando a verificação da viabilidade de mitigação das mesmas, superando os obstáculos encontrados em sistemas com grandes blocos de energia, onde as perdas são intensas.

3.2 Objetivos Específicos

Para mapear as perdas em sistemas elétricos, será necessária, uma ferramenta para verificar essas variáveis. Com isso, será desenvolvido um software computacional, a fim de fazer essas verificações de forma minuciosa e eficiente.

4. HIPÓTESE

As perdas, devido ao efeito pelicular podem ser significativas em blocos de potência. Com isso é necessário realizar a quantização dessas perdas e utilizar um mecanismo para mitigar a mesma, garantindo uma melhor qualidade de energia e alto rendimento.

Em sistemas elétricos de potência, tal situação pode se tornar um problema, limitando a transmissão de energia por regulação de tensão. As perdas sob as linhas de transmissão se tornam tão intensas, a ponto de reduzir a tensão terminal da seção.

Em blocos de energia de menor potência, também podem ser vistas as consequências desses efeitos conjugados, gerando perdas de energias que poderão se tornar significativas de acordo com a intensidade desses efeitos.

Esses efeitos conjugados, também são responsáveis pelo desgaste mecânico dos componentes do meio e adjacências, pelo fato da dissipação de energia por efeito joule. A temperatura incidirá com maior amplitude no meio fazendo com que se acentuem os desgastes mecânicos dos equipamentos e condutores inseridos no sistema.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Campos estacionários, variantes no tempo e equações de Maxwell

Neste capítulo será introduzido a teoria de campos eletrostáticos e magnéticos estacionários, e sequencialmente campos variantes no tempo, abordando as equações de Maxwell.

Os ensaios de Michael Faraday e o modelo desenvolvido pelas “linhas de força” que Faraday introduziu em sua teoria de eletricidade e magnetismo, gerou entusiasmo em Maxwell em quantizar as forças elétricas e magnéticas em quatro equações básicas. James Clerk Maxwell era professor novato da universidade de Londres quando conheceu Faraday, que anos antes havia aposentado. A teoria de Maxwell foi desenvolvida após esse período na universidade, onde lhe custou o tempo de 5 anos, enquanto trabalhava sozinho em sua casa. [4]

5.1.1 Lei de Gauss para carga

Para introduzir a definição da lei de Gauss, será deduzida a equação do fluxo elétrico. De forma experimental, um campo elétrico uniforme \vec{E} cortando uma superfície de área \vec{A} perpendicularmente, é equivalente ao fluxo elétrico, ou seja, o produto vetorial de \vec{E} com a superfície de área \vec{A} será equivalente ao fluxo elétrico nessa superfície. [1] Representado pela Equação (1) e Figura 1:

$$\vec{E} \cdot \vec{A} = |E| \cdot |A| \cdot \cos \phi = \varphi_e \quad (1)$$

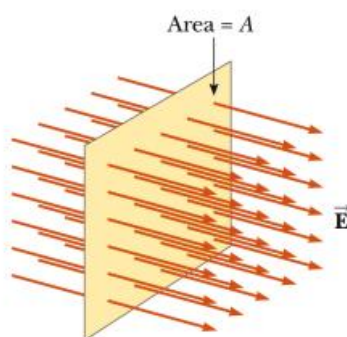


Figura 1 - Campo elétrico perpendicular à superfície \vec{A} .
Fonte: [1]

Deduzido o conceito de fluxo elétrico em uma superfície, já é possível prosseguir para o segundo passo. A lei de Gauss relaciona o fluxo elétrico com a carga elétrica contida dentro de uma superfície fechada. Dado pela equação (2): [1]

$$\varphi_e = \frac{Q_{int}}{\varepsilon} \quad (2)$$

Para provar isso, a lei de Coulomb demonstrará a Lei de Gauss para cargas pontuais. Supondo uma carga elétrica $Q +$ inserida em uma superfície esférica gaussiana fechada de raio r , poderá ser visto conforme inicia a dedução na Equação (3): [1]

$$\oint_A E \cdot dA \quad (3)$$

De forma simplificada, é obtida a Equação (4);

$$E \cdot A \quad (4)$$

Por dedução da Lei de Coulomb, representada pela Equação (5): [1]

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 4\pi r^2} \quad (5)$$

E sendo considerada a área de uma esfera equivalente a Equação (6);

$$A = 4\pi r^2 \quad (6)$$

Realizando o produto entre (5) e (6), conforme a Equação (7);

$$E \cdot A = \left(\frac{Q}{\varepsilon_0 4\pi r^2} \right) \cdot (4\pi r^2) \quad (7)$$

De forma simplificada, pode ser representada pela Equação (8);

$$E \cdot A = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (8)$$

Representando na forma integral, conforme a Equação (9): [1]

$$\oint_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (9)$$

A mesma poderá ser descrita da forma diferencial, conforme a Equação (10):
[1]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (10)$$

Sendo:

ρ - Densidade superficial de carga

ϵ_0 - Permissividade elétrica

A lei de Gauss é a primeira das 4 equações de Maxwell, e a lei fundamental do eletromagnetismo para carga elétrica. [1]

5.1.2 Lei de Gauss para o magnetismo

Para ser realizada uma análise de campos magnéticos, é necessária a definição de fluxo magnético, que é similar ao fluxo elétrico, ou seja, qualquer campo magnético \vec{B} que atravesse um elemento infinitesimal de área $d\vec{A}$ perpendicularmente, é equivalente ao fluxo magnético nessa superfície, conforme representado na Equação (11): [2]

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \varphi_b \quad (11)$$

Como visto anteriormente, para as cargas elétricas, as linhas de campo que entram ou saem da superfície, quantificam as cargas elétricas dentro da superfície fechada. Para o magnetismo existe uma distinção, os portadores magnéticos não possuem um modelo similar ao monopolo elétrico para as linhas de campo. A estrutura magnética é abordada como um dipolo, ou seja, todas as linhas que saem dos portadores magnéticos terão de voltar para ele. Para o magnetismo o fluxo magnético será sempre equivalente a zero. Em outras palavras, as linhas de campo de cargas elétrica se iniciam em cargas elétricas e terminam em cargas elétricas. Para o magnetismo o modelo é distinto, já que as linhas de campo formam curvas fechadas, então não se iniciam e terminam em qualquer ponto. [2]

A Figura 2 demonstra bem o que foi citado acima, quando é criada uma superfície gaussiana em torno de uma carga elétrica pontual. Pode ser visto que as linhas de campo que cortam essa superfície fechada quantificam a carga elétrica, ou seja, o fluxo elétrico que atravessa essa superfície é equivalente a quantidade de carga interna. Quando é traçada uma superfície fechada ao redor de um ímã conforme a Figura 2, verifica-se que todas as linhas de campo que saem do mesmo voltam para ele. O fluxo magnético nessa superfície fechada é equivalente a zero, ou seja, em uma superfície fechada, ele será equivalente a zero, ou nulo. [2]

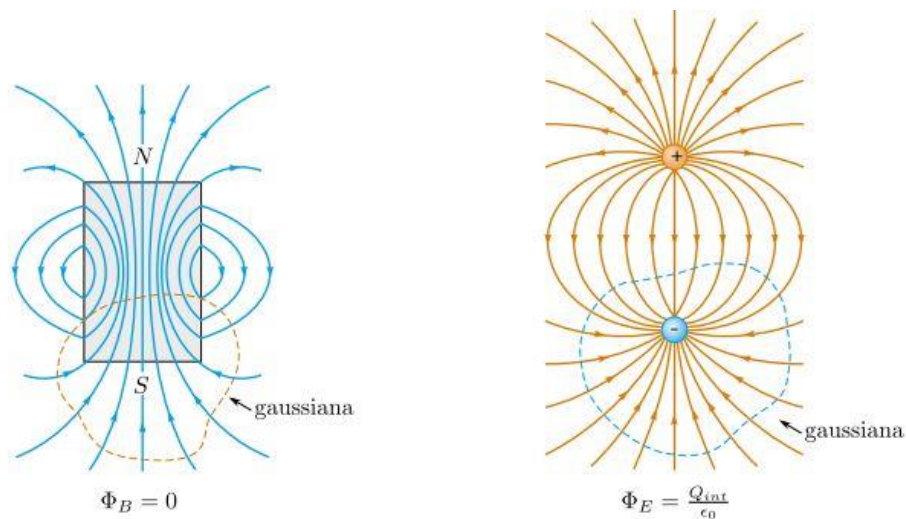


Figura 2 - Superfície Gaussiana em um ímã; Superfície Gaussiana em uma carga elétrica puntiforme.
Fonte: [2]

Com isso a lei de Gauss nos indica que o fluxo magnético em qualquer modelo de superfície gaussiana é equivalente a zero. O que nos permite admitir que não possui monopolos magnéticos ou cargas magnéticas, como representado na Equação (12). [2]

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (12)$$

A lei de Gauss para o magnetismo é a segunda equação das 4 equações de Maxwell, e a lei fundamental para o magnetismo. Na forma diferencial a Equação (13), é representada como: [2]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (13)$$

5.1.3 Lei de Faraday

Anteriormente foi verificado que cargas elétricas são capazes de criar campos elétricos. Com isso Faraday, fez diversas observações que relacionam campos elétricos variantes no tempo com indução eletromagnética.

Inicialmente Faraday verificou que quando se tem circuitos elétricos com correntes elétricas variantes no tempo, estes são capazes de realizar o processo de indução em circuitos elétricos fechados próximos a ele. Verificou de modo similar que quando possuía uma corrente elétrica uniforme, e variava o circuito elétrico fechado próximo a ele, também era realizado o processo de indução. Sendo assim, observou que a movimentação de um portador de campos magnéticos, um ímã, seria capaz de realizar o processo de indução de forma similar. Todas essas observações fizeram com que Faraday pudesse quantificar e definir a Lei de Faraday, indicando que a variação de campos magnéticos variantes no tempo é capaz de gerar uma tensão induzida e conseqüentemente, produzir uma corrente elétrica. [3]

Verificando a Figura 3, observa-se a representação de uma curva fechada e uma superfície imaginária S sob essa curva, onde é aplicado um campo magnético \vec{B} perpendicular a essa superfície. [3]

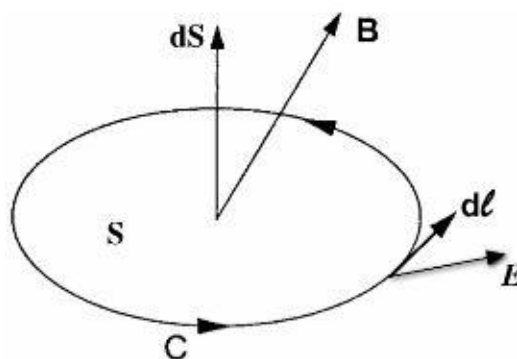


Figura 3 - Define uma região no espaço, onde é aplicado um campo magnético a uma superfície.
Fonte: [3]

Com isso define-se o fluxo magnético φ_b , como representado na equação (14):

[3]

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \varphi_b \quad (14)$$

A lei de Faraday afirma que a variação temporal do fluxo magnético é capaz de produzir um campo elétrico circulante no elemento infinitesimal $d\vec{l}$ da curva fechada. Sendo representado pela Equação (15): [3]

$$\frac{d\varphi_b}{dt} = - \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (15)$$

Com isso, foi possível relacionar a eletricidade com o magnetismo. Porém é verificado um sinal negativo imposto na equação; este é referente a Lei de Lenz, que afirma que quando um fluxo magnético é induzido em um material, o mesmo tende se opor a essa variação. [3]

A Figura 4 demonstra, pelo fato de o material tender a se opor à variação do fluxo magnético, verifica-se que ao se movimentar um ímã, as linhas de campo, geradas pelo anel circular fechado, tendem a se opor à variação do fluxo magnético.

[3]

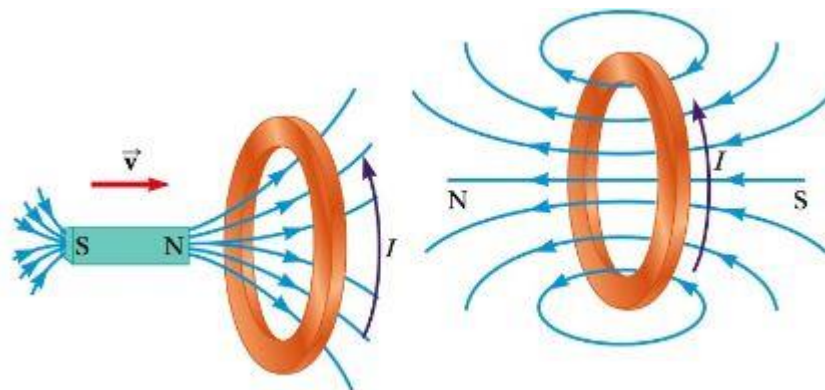


Figura 4 - Quando o ímã é deslocado gerando um campo magnético variante o anel tende a se opor a variação do fluxo magnético.

Fonte: [3]

Em outras palavras, quando se tem fluxos magnéticos variantes no tempo, este é capaz de realizar o processo de indução em materiais a sua proximidade, e é sabido pela Lei de Lenz, que o material tende a se opor à variação do fluxo magnético

gerado. Com isso, a Lei de Faraday da forma pontual pode ser representada pela Equação (16): [3]

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (16)$$

5.1.4 Lei de Ampère

Após a descoberta de Orested, em 1819, foi verificada a interação da corrente elétrica com o magnetismo. Foi necessário modelar e quantificar esses efeitos, que foram denominados efeitos eletromagnéticos. [2]

Foi verificado que quando aplicada uma corrente elétrica em um condutor, o mesmo era capaz de interagir com uma bússola colocada em suas proximidades, isso por conta do efeito eletromagnético que será demonstrado adiante. Na Figura 5 fica claro o fenômeno, e na Figura 5.a pode ser verificado que quando não é aplicada uma corrente elétrica, não há interação com as bússolas. Já na Figura 5.b, quando aplicada uma corrente elétrica i no condutor, a mesma é capaz de realizar a interação com as bússolas colocadas em sua volta. [2]

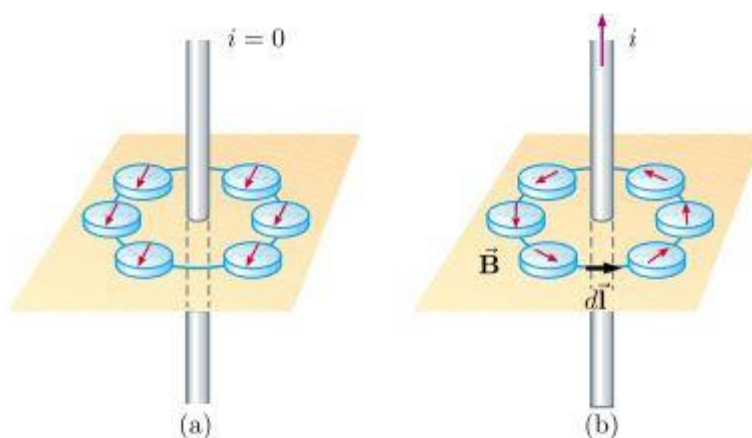


Figura 5 - a) Bússolas posicionadas ao redor de um condutor, com corrente elétrica equivalente a zero; b) Bússolas interagindo com uma corrente elétrica i .

Fonte: [2]

Essa interação é devido a um efeito eletromagnético. Quando aplicada uma corrente em um condutor, é possível verificar que o mesmo é capaz de produzir um

campo magnético \vec{B} , radial em torno do condutor. A intensidade do campo \vec{B} é diretamente proporcional a corrente elétrica imposta no condutor, e é inversamente proporcional à distância do condutor. Então pela Equação (17) o campo magnético pode ser dado por: [2].

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi r} \quad (17)$$

Agora, calculando o produto de um campo \vec{B} com um elemento infinitesimal $d\vec{l}$ de um caminho circular radial, como definido anteriormente pelas bússolas ao longo do condutor, esse produto é uniforme ponto a ponto. Com isso, analisando a Equação (18): [2]

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \quad (18)$$

Sendo levada em consideração a Equação (19): [2]

$$\left(\frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi r}\right) \cdot (2\pi r) = \quad (19)$$

É então obtida a Equação (20), representada abaixo: [2]

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad (20)$$

Então a Lei de Ampère, poderá ser definida como a circulação de \vec{B} em torno de qualquer curva fechada, que será equivalente a $\mu_0 i$, cujo μ_0 é a permeabilidade magnética do meio e i é a corrente elétrica que circula no condutor. [2]

A lei de Ampère é a quarta das leis de Maxwell, uma das primordiais para o eletromagnetismo, e poderá ser descrita da forma diferencial. Mas para isso, deve ser sabido o conceito de densidade de corrente, conforme a equação (21). [2]

$$i = \oint_S \vec{j} \cdot \hat{n} d\vec{a} \quad (21)$$

Aplicando a Equação (21) na (20) poderá ser verificada na forma diferencial, sendo representada pela Equação (22): [2]

$$\oint_C \vec{\nabla}_x \vec{B} = \mu_0 \oint_S \vec{j} \cdot \hat{n} d\vec{a} \quad (22)$$

Com isso é possível obter a Equação (23) e o vetor de densidade de campo que pode ser dado pela Equação (24): [2]

$$\vec{\nabla}_x \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad (23)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (24)$$

Então finalmente é obtida a Equação (25) representada a seguir: [2]

$$\vec{\nabla}_x \vec{H} = \vec{j} \quad (25)$$

Portanto, quando há necessidade de verificar o campo magnético gerado por uma corrente elétrica, é utilizada a lei de Ampère, onde a corrente elétrica é definida pela variação de cargas elétricas em função do tempo, $\frac{dQ}{dt}$. Analisando a Figura 6, na superfície $A1$ representada pela curva C , é possível afirmar que a corrente elétrica que circula nesse condutor é definida pela variação das cargas elétricas em função do tempo, ou seja, é possível aplicar a lei de Ampère. Agora analisando a superfície $A2$ onde pode-se verificar a curva mais externa a essa superfície, é possível concluir que, nesse instante não há variação de corrente na forma diferencial $\frac{dQ}{dt}$, ou seja, nesse caso a lei de Ampère não atenderia os requisitos. Com isso, foi necessário introduzir na equação de Ampère um conceito de corrente de deslocamento, ou seja, nesse instante ao examinar as terminações desses condutores como placas paralelas, similar a um circuito capacitivo, no momento do carregamento toda energia transportada pela corrente elétrica é transformada em campo elétrico entre as placas paralelas. [2]

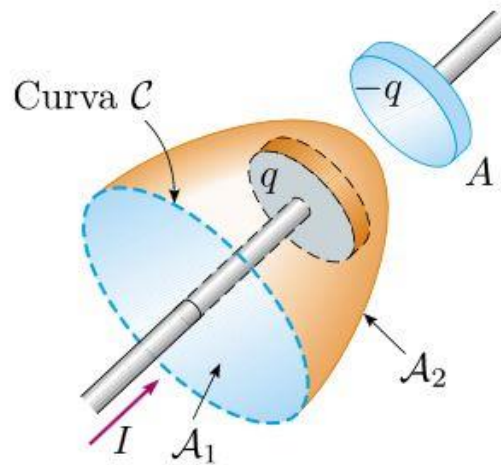


Figura 6 - Condutor entre placas paralelas, onde aplicada uma corrente I para carregamento do capacitor.
Fonte: [2]

Então é possível adicionar o conceito de corrente de deslocamento entre as placas. Representando então a Equação (26): [2]

$$i_d = \varepsilon_0 \frac{d\varphi_e}{dt} \quad (26)$$

Este será adicionado com o intuito de generalizar a equação, que será definida como Lei de Ampère-Maxwell, onde a mesma poderá ser definida pelas Equações (27) e (28): [2]

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(i + i_d) \quad (27)$$

$$\oint_c \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \varepsilon_0 \frac{d\varphi_e}{dt} \right) \quad (28)$$

Inserindo a equação (21) em (28), é obtida a Equação (29) e na forma pontual a Equação (30): [2]

$$\oint_c \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\oint_s \vec{j} \cdot \hat{n} d\vec{a} + i_d \right) \quad (29)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (30)$$

5.1.5 Equações de Maxwell

Então as quatro equações de Maxwell podem ser definidas conforme as Equações (10), (13), (16) e (30) representadas a seguir:

$$\text{Lei de Gauss para carga} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (10)$$

$$\text{Lei de Gauss para o magnetismo} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (13)$$

$$\text{Lei de Faraday} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (16)$$

$$\text{Lei de Ampère-Maxwell} \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (30)$$

5.2 Resistividade e resistência elétrica

Neste tópico será introduzido o conceito de resistividade elétrica dos materiais condutores e isolantes, demonstrando suas propriedades e definições.

Serão verificadas as propriedades da resistência elétrica, descrevendo quais os conceitos que irão relacionar o campo elétrico aplicado com o deslocamento de portadores de carga dentro de um condutor. Chegando assim a definição da Lei de Ohm.

5.2.1 Resistividade Elétrica

Conforme verificado anteriormente, a definição de corrente elétrica é a taxa de transferência de portadores de carga, em um determinado instante de tempo, demonstrada na Equação (31): [4]

$$\frac{dQ}{dt} = i \quad (31)$$

O incremento da taxa de variação de corrente Δi que atravessa uma superfície perpendicular Δa , nos dá o conceito de densidade de corrente elétrica, representada pela Equação (21). [4]

Inserindo o conceito de densidade volumétrica de carga, será obtida a Equação (32): [4]

$$\Delta Q = \rho_v \cdot \Delta s \quad (32)$$

Verificando que quando se desloca certo pacote ou densidade volumétrica de cargas elétricas em um trecho determinado, pode-se deduzir que igualando as Equações (31) e (32) é obtida a Equação (33), e trabalhando verifica-se a equação (34): [4]

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \rho_v \cdot \Delta s \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (33)$$

$$\Delta i = \rho_v \cdot \Delta s \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (34)$$

Através dos conceitos de densidade de corrente, é possível definir a Equação (35): [4]

$$\vec{J} = \rho_v \cdot v \quad (35)$$

Agora, verificando a Figura 7, quando aplicado um campo elétrico \vec{E} em um condutor, é exercida uma força elétrica no mesmo, definida por Coulomb, que está representada pela Equação (36): [4]

$$\vec{F} = -e \cdot \vec{E} \quad (36)$$

Ou seja, quando aplicado um campo elétrico em um condutor com elétrons livres, é exercida uma força elétrica entre eles, conforme definição acima. Pela lei da conservação de energia, esta força irá fazer com que os elétrons livres adquiram uma propriedade de aceleração, conforme segunda lei de Newton, o princípio fundamental da dinâmica, representado pela Equação (37): [4]

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (37)$$

Sendo feita uma análise para o espaço livre, o elétron se acelera e adquire uma propriedade de um aumento de velocidade constante, e é sabido que isso não acontece. Num material cristalino, o elétron exerce diversas colisões com a rede cristalina, fazendo com que o mesmo adquira uma propriedade de velocidade média

constante. Esta velocidade é definida como velocidade de deriva v_d , e está interligada a intensidade do campo elétrico \vec{E} aplicado, e pela mobilidade ou permeabilidade μ_e dos elétrons dentro de um material, representado pela Equação (38): [4]

$$v_d = -\mu_e \cdot E \quad (38)$$

O sinal negativo afirma que a velocidade dos elétrons está de modo contrário ao campo elétrico. De modo trivial, é possível verificar que a velocidade de deriva de pequenos centímetros por segundo é capaz de produzir um aumento de temperatura considerável. [4]

Associando as Equações (35) e (38), representado como a Equação (39): [4]

$$\frac{\vec{J}}{\rho_v} = -\mu_e \cdot E \quad (39)$$

Então, densidade de corrente pode ser representada pela Equação (40): [4]

$$\vec{J} = -\rho_v \mu_e E \quad (40)$$

Mas usualmente, pode-se definir $\rho_v \mu_e$ como condutividade elétrica σ . Com isso é definido a relação do campo elétrico com a densidade de corrente elétrica conforme a Equação (41): [4]

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (41)$$

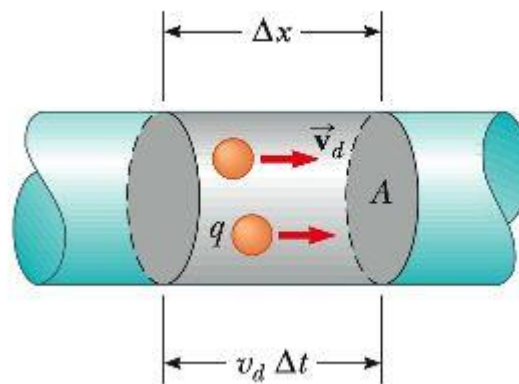


Figura 7 - Campo elétrico executando uma força elétrica na carga q .
Fonte: [5]

5.2.2 Resistência elétrica e Lei de Ohm

Explicar o conceito de diferença de potencial é crucial para prosseguir. Quando realizada a aplicação de uma força elétrica em uma carga Q , é necessária a aplicação de um campo elétrico \vec{E} , conforme representado na Equação (42): [4]

$$F_e = Q \cdot E \quad (42)$$

Porém quando aplicada essa força, este deverá se movimentar num sentido, e assim, o trabalho é realizado. Agora se analisado esse trabalho em elementos infinitesimais de distância, verifica-se a variação da energia. Uma observação trivial, é que neste momento a energia está sendo perdida, portanto, por conversão é adotado o sinal negativo, com isso avaliando as Equações (43) e (44): [4]

$$dW = -Q \cdot E \cdot dl \quad (43)$$

$$W = -Q \int_{Inicial}^{Final} E \cdot dl \quad (44)$$

É possível apresentar o conceito de diferença de potencial onde, ajustando a Equação (44), é obtida a Equação (45) e finalmente a diferença de potencial na Equação (46): [4]

$$\frac{W}{Q} = - \int_{Inicial}^{Final} E \cdot dl \quad (45)$$

$$V_{AB} = - \int_B^A E \cdot dl \quad (46)$$

Com isso é possível analisar a resistência de um material, simplificando a Equação (46) representando-a como Equação (47). [4]

$$V_{AB} = EL \quad (47)$$

Agora isolando o termo de campo elétrico, é obtida a Equação (48) e inserindo o conceito de densidade de corrente da Equação (41), será obtida a Equação (49): [4]

$$E = \frac{V_{AB}}{L} \quad (48)$$

$$\vec{J} = \sigma \frac{V_{AB}}{L} \quad (49)$$

Sabendo que a densidade de corrente é igual a relação entre a corrente elétrica e a área, é possível formular a Equação (50), e isolando o termo representado pela diferença de potencial entre dois pontos, é obtida a Equação (51): [4]

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V_{AB}}{L} \quad (50)$$

$$V_{AB} = \frac{L}{\sigma \cdot A} \cdot I \quad (51)$$

Sendo a resistência elétrica representada pela Equação (52), é finalmente possível chegar a Equação (53): [4]

$$R = \frac{L}{\sigma \cdot A} \quad (52)$$

$$V_{AB} = R \cdot I \quad (53)$$

Assim é definida a lei de Ohm, da seguinte forma: a resistência de um condutor é proporcional à tensão elétrica e inversamente proporcional a corrente elétrica. Materiais resistivos apresentam uma curva bem próxima da linear conforme Figura 8.

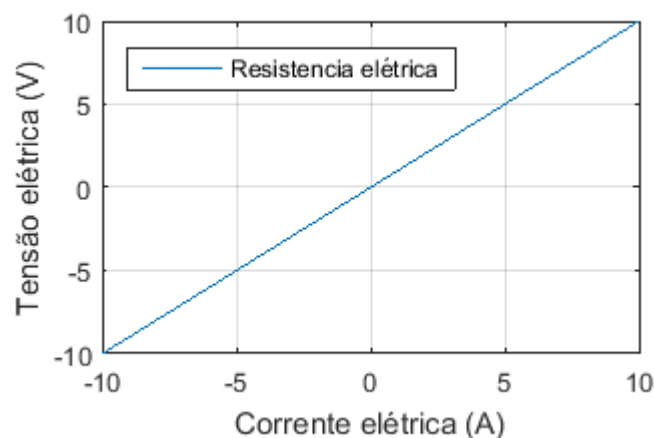


Figura 8 - Material resistivo, cuja curva respeita a relação V/I.
Fonte: Autores

5.3 Indutância

Assim como a resistência e a capacitância, a indutância também apresenta propriedades muito importantes a serem estudadas, pois complementam conceitos que serão abordados sobre o comportamento do efeito pelicular. [11]

Resumidamente a resistência consiste na razão entre a tensão e a corrente. A capacitância consiste na razão entre uma determinada carga e a diferença de potencial entre duas superfícies. [11]

Já a indutância consiste em um elemento que armazena o modelo de carga em forma de campos magnéticos, sob o qual existe uma determinada tensão. Quando circulada uma corrente elétrica variável em um solenoide, esta gera uma variação no fluxo magnético que pela lei de Faraday induz uma tensão em suas extremidades. Com isso pode ser verificada a Equação (54): [11]

$$\varphi = Li \quad (54)$$

Que pela lei de Faraday onde $\frac{d\varphi_b}{dt} = -\varepsilon$, obtendo assim a Equação (55): [11]

$$V(t) = -L \frac{di}{dt} \quad (55)$$

5.3.1 Auto-indução

Um ponto importante para o cálculo de autoindutância em condutores, é o conceito de fluxo concatenado. Todo condutor quando, circulado por uma corrente elétrica é capaz de gerar um fluxo magnético, com isso podemos verificar esse fluxo enlaçado totalmente ou parcialmente. O fluxo concatenado é a superfície que enlaça o fluxo magnético em relação ao fluxo total. [20]

Então, igualando a Equação (55), com a derivada do fluxo magnético, como representado pela equação (56), é obtida a Equação (57): [20]

$$V(t) = -L \frac{di}{dt} = \frac{d\varphi_b N}{dt} \quad (56)$$

$$L = \frac{d\varphi_b N}{di} \quad (57)$$

Inserindo conceito de campo atribuído pela Equação (14) em (57), é obtida a Equação (58): [20]

$$L = \frac{d \vec{B} \cdot \vec{S} \cdot N}{di} \quad (58)$$

Atribuindo conceito de fluxo magnético e permeabilidade magnética, é verificada a Equação (59): [20]

$$L = \frac{d \mu \cdot \vec{H} \cdot \vec{S} \cdot N}{di} \quad (59)$$

Decompondo o fluxo magnético e simplificando a equação pode-se observar as equações (60) e (61) como: [20]

$$L = \frac{d \mu \cdot \vec{S} \cdot N Ni}{di} \frac{1}{l} \quad (60)$$

$$L = \frac{d}{di} \mu i N^2 \frac{S}{l} \quad (61)$$

5.3.1.1 Indutância interna em um condutor

Na grande maioria dos condutores, quando aplicado um campo elétrico, estes possuem capacidade de oposição a passagem da corrente elétrica, criação de campos magnéticos, dentre outras propriedades. Neste instante verifica-se a propriedade de oposição de geração de campos magnéticos dentro desses materiais. Considerando a Equação (20) da lei de Ampère e (61): [20]

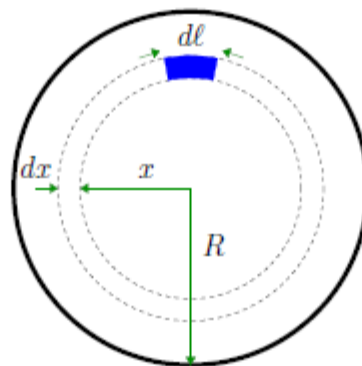


Figura 9 - Condutor visto pela vista frontal indicando a área a ser verificada a indutância interna.
Fonte: [20]

A partir da Figura 9 e 10, onde o condutor é visto de frente e a indutância interna é vista pela área de raio x , é possível deduzir a Equação (62), ou de forma simplificada a Equação (63): [20]

$$B(2\pi x) = \frac{\pi x^2}{\pi R^2} \mu_0 i \quad (62)$$

$$B = \frac{x}{2\pi R^2} \mu_0 i \quad (63)$$

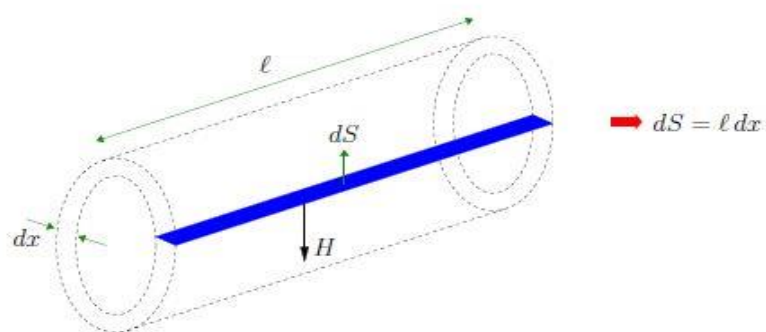


Figura 10 - Condutor visto em perspectiva.
Fonte: [20]

A densidade de fluxo com a corrente elétrica é proporcional a área de raio x , sendo assim, pode ser representado pela Equação (64): [20]

$$d\lambda = \frac{x^2}{R^2} d\varphi \quad (64)$$

Inserindo o conceito de campo magnético para um elemento do fluxo, é obtida a Equação (65): [20]

$$d\lambda = \frac{x^2}{R^2} \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (65)$$

Decompondo o campo magnético conforme a Equação (17), é obtida a Equação (66): [20]

$$d\lambda = \frac{x^2}{R^2} \frac{x}{2\pi R^2} \mu_0 i dx \quad (66)$$

Aplicando o conceito de integração, é obtida a Equação (67): [20]

$$\int d\lambda = \int_0^R \frac{x^3}{2\pi R^4} \mu_0 i dx \quad (67)$$

De forma simplificada, é então estruturada a Equação (68): [20]

$$\lambda_{interno} = \frac{\mu_0}{8\pi} i \quad (68)$$

Com isso, é possível obter a Equação (69) e (70): [20]

$$L = \frac{d\lambda_{interno}}{di} \quad (69)$$

$$L_{interno} = \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (70)$$

A contribuição magnética para a oposição da passagem da corrente elétrica alternada é dada pela reatância indutiva interna (X_l), que depende dos dados de frequência angular e indutância interna do condutor, conforme a Equação (71) descrita abaixo: [20]

$$X_l = \omega L_i \quad (71)$$

5.4 Efeito Pelicular

Quando um campo elétrico variante no tempo é aplicado em um condutor, é verificada uma propriedade pelicular, da corrente elétrica, que é uma consequência das teorias de Maxwell. De forma geral, analisando um condutor elétrico, com uma corrente elétrica filamental circulando pelo interior do mesmo, e verificando que esta corrente elétrica seja variável em função do tempo, esta terá um campo magnético rotacional associado a ela de acordo com a lei de Ampère. Porém essa variação temporal do campo magnético, também induzirá um campo elétrico perpendicular ao mesmo e oposto ao fluxo de corrente elétrica de acordo com a lei de Lenz. Pelo fato de o campo elétrico possuir maior intensidade no centro do condutor, este é capaz de induzir correntes elétricas no mesmo, fazendo com que pelo fato da superposição

de correntes elétricas, estas possam interagir reduzindo ou extinguindo as mesmas, dentro do centro dos condutores. Esses fenômenos poderão ser demonstrados conforme Figura 11: [12]

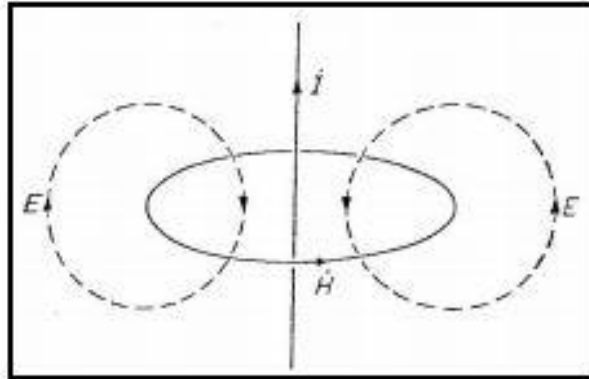


Figura 11 - Demonstração dos efeitos elétricos e magnéticos para verificação do efeito pelicular.
Fonte: [12]

Na Figura 12, verifica-se que quando aplicada correntes de frequências distintas ou quando se trabalha com materiais distintos, os fenômenos verificados são variados. A Figura 12 demonstra bem esses efeitos, representando que em um condutor com uma corrente elétrica contínua, esta se propaga com densidade uniforme por todo condutor. Já correntes elétricas variantes no tempo se propagam com densidades diferentes. Quando aumentado os valores de frequência, a densidade de corrente elétrica se reduz: [12]

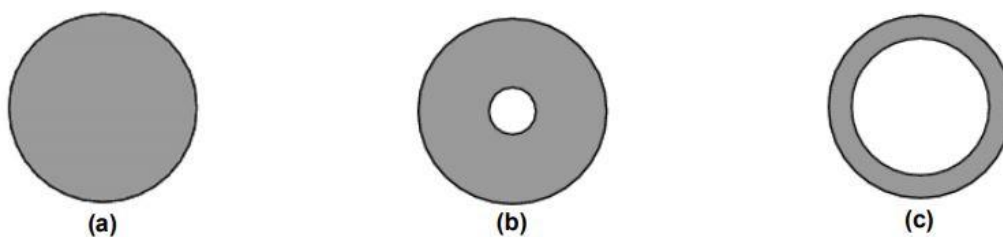


Figura 12 - Representação de um condutor elétrico percorrido por uma corrente elétrica: (a) Corrente elétrica contínua. (b) Corrente elétrica de baixa frequência. (c) Corrente elétrica de alta frequência.
Fonte: [12]

A propriedade de maior densidade de corrente na superfície do condutor pode ser quantificada, e é denominada profundidade pelicular (δ). A avaliação é realizada de acordo com a distribuição de corrente elétrica no condutor, quando esta cai e^{-1} da

densidade da corrente elétrica em relação à superfície do condutor, podendo verificar a região de condução efetiva do mesmo. Com isso verifica-se a Equação (72): [12].

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_r}{\omega\mu}} \quad (72)$$

Onde:

ω Frequência angular da corrente elétrica

μ Permeabilidade magnética do condutor

5.4.1 Classificação do efeito pelicular

O efeito pelicular, é diretamente proporcional a frequência, a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética do condutor. Verificado do ponto de vista microscópico, o efeito pelicular é analisado em função do deslocamento dos elétrons, ou seja, o caminho livre médio dos elétrons que irá determinar o percurso médio entre duas colisões dos elétrons, da profundidade pelicular, e do período de relaxação do elétron no condutor. Onde o tempo de relaxação no condutor pode ser representado pela Equação (73): [12]

$$\tau = \frac{l}{v_d} \quad (73)$$

Sendo:

τ - Tempo de relaxação do elétron no condutor

l - Livre caminho médio

Dessa forma, é possível ter diversas classificações para esses efeitos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do efeito pelicular

$\lambda \ll \delta$ e $\lambda \ll \frac{v_d}{\omega}$	Efeito pelicular clássico
$\frac{v_d}{\omega} \ll \lambda \ll \delta$	Relaxação
$\delta \ll \lambda$ e $\delta \ll \frac{v_d}{\omega}$	Efeito pelicular anômalo
$\frac{v_d}{\omega} \ll \delta \ll l$	Reflexão anômala

Fonte: [12]

5.4.2 Modelagem do efeito pelicular

De acordo com as equações de Maxwell, é possível modelar e descrever o modelo pelicular em condutores elétricos. Então, considerando num momento inicial um meio sem cargas elétricas, onde a densidade de cargas elétricas é nula, conforme a Equação (74): [12]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (74)$$

E atribuindo a equação (30) e considerando a equação (24) isolando o fluxo magnético como representado na Equação (75), é obtida a Equação (76): [12]

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (75)$$

$$\vec{\nabla}_x \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} \right) = \vec{j} + \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (76)$$

De forma simplificada, pode ser representada como a Equação (77): [12]

$$\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla}_x \vec{B} = \vec{j} + \epsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (77)$$

Considerando que a corrente de deslocamento é muito pequena em relação a corrente elétrica total, é formulada a Equação (78): [12]

$$\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla}_x \vec{B} = \vec{j} \quad (78)$$

Evidenciando o Rotacional do Campo magnético é obtida a Equação (79): [12]

$$\vec{\nabla}_x \vec{B} = \vec{j} \mu_0 \quad (79)$$

Realizando o rotacional da equação da lei de Faraday, será obtida a Equação (80): [12]

$$\vec{\nabla}_x(\vec{\nabla}_x \vec{E}) = -\vec{\nabla}_x \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\frac{\partial \vec{\nabla}_x \vec{B}}{\partial t} \quad (80)$$

Aplicando a Equação (79) em (80) é obtida a Equação (81): [12]

$$\vec{\nabla}_x(\vec{\nabla}_x \vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (81)$$

Segundo a teoria de cálculo vetorial a Equação (81) pode ser representada de acordo com a Equação (82): [12]

$$\vec{\nabla}^2_x \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (82)$$

E de acordo com lei de Ohm substituindo a equação (41) em (82), a mesma se reduz a Equação (83): [12]

$$\vec{\nabla}^2_x \frac{\vec{j}}{\sigma} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (83)$$

5.4.3 Considerações geométricas para um condutor cilíndrico

Devido à maior demanda dos condutores cilíndricos pela flexibilidade e a praticidade nas instalações elétricas, fica trivial realizar a análise em torno do mesmo. Considerando que, este possui um comprimento (b) infinitamente maior que o raio (a), e pelo fato de trabalhar com condutor cilíndrico, é possível simplificar a equação (83), demonstrando em coordenadas radiais, conforme a Equação (84): [12]

$$\nabla^2(\rho_r \vec{j}) = \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_r \vec{j})}{\partial r} + \frac{\partial^2(\rho_r \vec{j})}{\partial r^2} = \mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (84)$$

A corrente elétrica se deslocará em sentido ao eixo z, em função da variável tempo e da coordenada radial, visto que a componente do sentido radial é pequena e não ocorrerá variação com a componente angular, conforme a Equação (85): [12]

$$\vec{J} = \vec{J}_z \hat{k} \quad (85)$$

Verificando que, quando se é aplicado um campo elétrico variável periódico e senoidal, é encontrada a Equação (86): [12]

$$\vec{J} = (J(r)e^{i\omega t})\hat{k} \quad (86)$$

Onde frequência angular é definida por ω descrita pela Equação (87): [12]

$$\omega = 2\pi f \quad (87)$$

Então substituindo (86) em (84), é obtida a Equação (88): [12]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_r (J(r)e^{i\omega t})\hat{k})}{\partial r} + \frac{\partial^2(\rho_r (J(r)e^{i\omega t})\hat{k})}{\partial r^2} = \mu_0 \frac{\partial (J(r)e^{i\omega t})\hat{k}}{\partial t} \quad (88)$$

Simplificando, é obtida Equação (89): [12]

$$\frac{\partial^2(\rho_r J(r))}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_r J(r))}{\partial r} - i\mu_0 \omega J(r) = 0 \quad (89)$$

Mudando a variável, é obtida Equação (90): [12]

$$\frac{\partial^2(E(r))}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial(E(r))}{\partial r} + T^2 E(r) = 0 \quad (90)$$

Onde T^2 é definido pela Equação (91) e conseqüentemente T é definido pela Equação (92): [12]

$$T^2 = -\frac{i\mu_0 \omega}{\rho_r} \quad (91)$$

$$T = \frac{1-i}{\delta} \quad (92)$$

Verificada a forma diferencial, a equação possui uma solução geral conhecida, a equação de Bessel modificada. Com isso a resposta geral será dada pela Equação (93): [12]

$$\rho_r J(r) = C_1 J_0^B(Tr) + C_2 Y_0^B(Tr) \quad (93)$$

Sendo assim, as funções de Bessel de grau zero de 1º e 2º espécie, são definidas por J_0^B e Y_0^B .

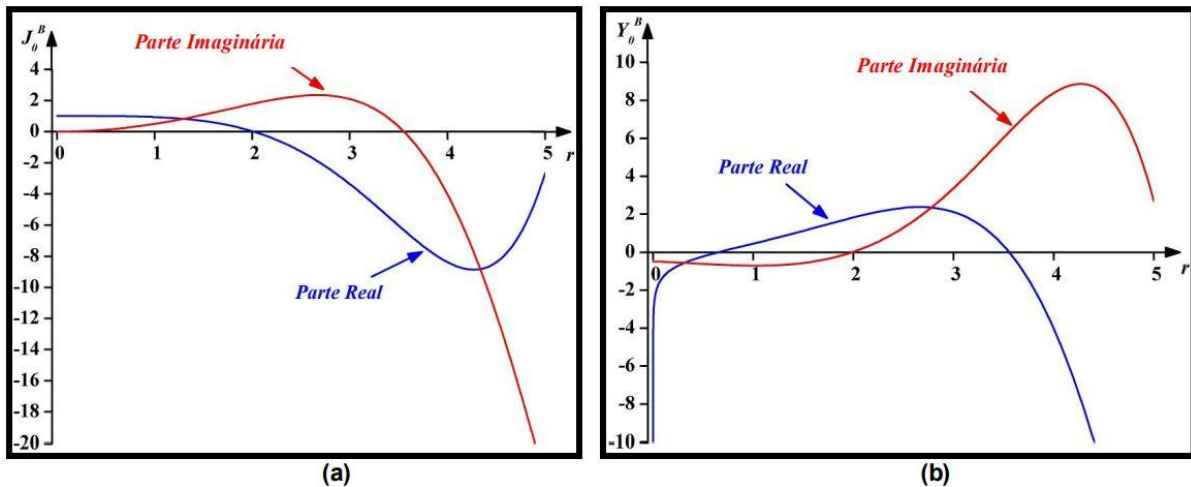


Figura 13 - Função de Bessel de grau zero e argumento complexo: [a] descrita a função de primeira espécie, para parte imaginária e real. [b] descrita a função de segunda espécie para uma componente real e imaginária.

Fonte: [12]

A partir dos dados é possível gerar uma curva para demonstrar os fenômenos descritos e assim dar sequência com a dedução: [12]

Na Figura 13, para o gráfico [a] é possível avaliar a função de Bessel de grau zero de primeira espécie. Verificado que tanto as componentes reais e imaginária, possuem valores finitos. Já no gráfico [b] é possível verificar que a função de Bessel de 2ª espécie, possui valores finitos para componente imaginária. Porém a parte real apresenta valores infinitos quando o raio tende a zero, ou seja, no centro do condutor, pode-se constatar a resposta de aumento da densidade da corrente elétrica. Com isso, esses dados não correspondem com a física do problema analisado e assim deve-se considerar uma condição para continuação das deduções, e para tal deve ser adotada a Equação (94): [12]

$$C_2 = 0 \quad (94)$$

Considerando um campo elétrico superficial, de acordo com a Equação (95):
[12]

$$C_1 = \frac{E_0}{\rho_r J_0^B(Ta)} \quad (95)$$

Substituindo (94) e (95) em (93) é obtida a Equação (96): [12]

$$J(r) = \frac{E_0}{\rho_r J_0^B(Ta)} J_0^B(Tr) \quad (96)$$

5.4.4 Modelamento da impedância dos condutores

A impedância de um condutor é dada pela Equação (97): [12]

$$Z = \frac{E_0}{i} \quad (97)$$

A corrente elétrica é dada pela Equação (98) ou de forma mais simples como a Equação (99): [12]

$$i = \int_0^a J(r)(2\pi r dr) \quad (98)$$

$$i = (2\pi r) \int_0^a J(r) dr \quad (99)$$

Inserindo a Equação (96) em (99), é obtida a Equação (100): [12]

$$i = (2\pi E_0) \int_0^a \frac{r J_0^B(Tr)}{\rho_r J_0^B(Ta)} dr \quad (100)$$

Substituindo (100) na Equação (97), é obtida a Equação (101): [12]

$$Z = \frac{J_0^B(Ta)}{2\pi \int_0^a \frac{r}{\rho_r} J_0^B(Tr) dr} \quad (101)$$

Predefinir o valor normalizado da impedância em função da resistência elétrica é necessário para a análise, considerando o comprimento unitário, conforme a Equação (102): [12]

$$R = \rho_r \frac{L}{\pi r_a^2} \quad (102)$$

Então, normalizando é obtida a Equação (103) ou de forma simplificada (104): [12]

$$\frac{Z}{R} = \frac{\frac{J_0^B(Ta)}{2\pi \int_0^a \frac{r}{\rho_r} J_0^B(Tr) dr}}{\rho_r \frac{L}{\pi r^2}} \quad (103)$$

$$\frac{Z}{R} = \frac{r_a^2 J_0^B(Ta)}{2\rho_r \int_0^a \frac{r}{\rho} J_0^B(Tr) dr} \quad (104)$$

5.4.4 Modelamento do efeito pelicular clássico

De acordo com o efeito pelicular clássico, é considerado que a resistividade do condutor é invariável, ou seja, ela é constante, então é obtida a Equação (105): [12]

$$\rho_r = \rho_0 \quad (105)$$

Substituindo as equações (104) em (105), é obtida a Equação (106): [12]

$$\frac{Z}{R} = \frac{Ta J_0^B(Ta)}{2 J_1^B(Ta)} \quad (106)$$

5.4.5 Modelamento para uma aproximação linear do efeito pelicular

O valor da resistência elétrica em um condutor de seção circular, é definida pela Equação (102). [12]

De acordo com a teoria do efeito pelicular apresentada, é possível modelar e aproximar o valor da área da seção transversal em função da área efetiva de condução, ou seja, podendo assim aproximar para um valor de resistência elétrica aparente R_p , utilizando um valor de área aparente A_p conforme a Equação (107) descrita abaixo: [12]

$$R_p = \rho_r \frac{l}{A_p} \quad (107)$$

A área aparente poderá ser definida da seguinte forma: de acordo com o estudo do efeito pelicular é possível definir como o valor da resistência aparente a diferença da profundidade pelicular pelo raio do condutor, ou seja, será trabalhado com o valor da área efetiva de condução de corrente elétrica, conforme a Equação (108). [12]

$$A_p = \pi a^2 - \pi(a - \delta)^2 \quad (108)$$

Então, inserindo (108) em (107) é obtida a Equação (109):

$$R_p = \rho_r \frac{l}{\pi a^2 - \pi(a - \delta)^2} \quad (109)$$

5.5 Qualidade de energia elétrica

Devido à grande demanda de energia elétrica, e pelo fato dos equipamentos inseridos no mercado necessitarem desse modelo de fonte de energia, foi desenvolvido um ramo dentro da engenharia elétrica responsável por estudar os fenômenos da qualidade de fornecimento. Com isso, é possível definir qualidade de energia elétrica como um estudo dos fenômenos que geram distorções no modelo de tensão e corrente elétrica. Qualquer distúrbio que seja capaz de gerar distorções no sistema elétrico e/ou prejudique a qualidade da energia elétrica ou operação dos equipamentos, estão inseridos no ramo de qualidade de energia elétrica. De forma genérica, pode-se dizer que existem quatro formas de perturbações do sinal nas instalações elétricas, sendo: perturbações na amplitude da tensão, perturbações na frequência do sinal, perturbações na forma de onda do sinal, desequilíbrio de tensão ou correntes de sistemas trifásicos. [7]

5.5.1 Perturbações na amplitude da tensão

Se tratando de perturbação de amplitude da tensão, pode-se verificar que são situações que ocorrem variação da tensão em um sinal senoidal perfeito. Essas variações podem ser classificadas como afundamento (sag), interrupção, sobretensão, sobretensão transitória, flutuação, cintilação (flicker) e subtensão. [14]

Em situações que ocorrem uma queda brusca de tensão e posteriormente um restabelecimento da mesma em um curto intervalo de tempo (10ms há 1 minuto), pode-se caracterizar este fator como afundamento de tensão (sag). [14]

Já em situações que a tensão é inferior a um determinado limite (geralmente de 1% da tensão de serviço), este fator é caracterizado como interrupção da alimentação. [14]

Tanto o afundamento quanto a interrupção ocorrem geralmente devido ao aumento da corrente elétrica, seja por partidas ou comutações de cargas de grandes módulos de potência, ou curtos-circuitos. [14]

Quando se verifica uma tensão na qual o valor eficaz é superior ao valor da tensão de alimentação (normalmente 10% do valor), este fenômeno se caracteriza como sobretensão, podendo ser de longa ou curta duração. [14]

Já a sobretensão transitória é caracterizada por ocorrer em um período de curta duração e, geralmente, apresentar um forte amortecimento na forma de onda. [14]

Estes efeitos de sobretensão são gerados por diversos motivos, geralmente por conexões e desconexões de determinados elementos da instalação, em serviço de grupos geradores, comutação em banco de capacitores, etc. O impulso transitório causado por sobretensão pode comprometer a vida útil de equipamentos como transformadores e motores e ainda danificar equipamentos de eletrônica de potência. [14]

Em situações de variação na amplitude do sinal, periodicamente ou aleatoriamente, em uma faixa de mais ou menos 10% do valor nominal, são caracterizados como efeitos de flutuação de tensão. [14]

O efeito de cintilação (flicker), pode ser notado com a variação de luminosidade num intervalo de tempo. [14]

Ambos os efeitos, tanto de flutuação como de cintilação são originados em cargas de rápidas variações em seu funcionamento. Os principais equipamentos que provocam essas perturbações são as máquinas de solda resistiva, motores no momento de partida, conexão e desconexão de grandes cargas e outros. [14]

A subtensão é caracterizada quando ocorre uma flutuação comum a forte queda de tensão. Este fator causa um superaquecimento em transformadores e em máquinas girantes devido ao aumento da corrente elétrica. [14]

5.5.2 Perturbações na frequência do sinal

Problemas no sistema de geração e transmissão de energia elétrica ou ainda em sistemas que possuam grupos geradores e sistemas de cogeração são geralmente os causadores de perturbações na frequência, que se caracterizam nas variações da mesma em torno do valor nominal. Este fator provoca o funcionamento incorreto de motores, e a atuação de equipamentos de proteção contra sub frequência. [14]

5.5.3 Desequilíbrio de tensão ou corrente em sistemas trifásicos

Quando identificada uma diferença significativa entre os valores eficazes de uma instalação elétrica, caracterizamos este fator como desequilíbrio de tensão/corrente. O desequilíbrio de corrente é verificado quando a intensidade de corrente que circula pelas três fases é diferente, provocando assim uma corrente diferente de zero no condutor neutro. O resultado deste fator é o sobreaquecimento nos componentes da instalação.

Geralmente, é admitido um desequilíbrio de corrente máximo de 10%, e entre 2 ou 3% de tensão. [14]

5.5.4 Perturbações na forma de onda

A teoria das harmônicas elétricas se deriva dos estudos de fontes acústicas, onde significa a vibração de uma corda, ou uma coluna de ar, com frequências múltiplas da frequência fundamental, caracterizada por uma distorção da forma de onda. Com isso, no ramo da eletricidade, são verificados esses efeitos com as componentes da tensão e corrente elétrica. [8]

5.6 Interações entre carga e fonte

Com o avanço da eletrônica, algumas das características da energia elétrica passou a não somente depender da eletricidade produzida ou fornecida em si, mas também dos tipos de cargas que se encontram no consumidor final. [18]

Existem diversas perturbações que podem influenciar tanto na interação entre fontes e cargas, como na operação das cargas. Essas perturbações podem ser classificadas como: [18]

Sistema-Carga

- Desequilíbrio de tensão;
- Oscilação de tensão;
- Afundamento ou Elevação de tensão;
- Interrupção de tensão;
- Harmônicas de tensão;

Carga-Sistema

- Corrente Reativa;
- Corrente desbalanceada;
- Flutuação de tensão;
- Correntes Harmônicas;

A qualidade de energia apresenta uma dualidade de fatores diretamente relacionados, visto que a corrente que circula na instalação é diretamente influenciada de acordo com a qualidade de tensão aplicada, assim como o tipo de carga que pode influenciar no perfil da tensão. [18]

A interação é ilustrada através da Figura 14, onde demonstra um diagrama unifilar simplificado com fonte e cargas lineares e não lineares.

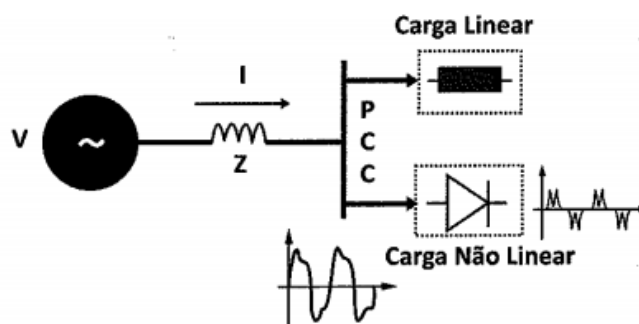


Figura 14 - Modelo Fonte - carga.
Fonte: [18]

Cargas lineares quando alimentadas por uma onda senoidal não distorcem o formato da mesma. Já as cargas não lineares mesmo alimentadas por fontes senoidais produzem uma corrente distorcida, no que conseqüentemente causa

distúrbios na rede elétrica. Para formas de onda não senoidais de tensão, as cargas não lineares produzem correntes harmônicas em diferentes níveis de proporção. [18]

Analisando de forma mais específica, quando correntes de cargas não lineares passam pela impedância entre a fonte e a carga, resultam na distorção da onda senoidal de tensão (ΔV_{dh}). [18]

Com isso, ao se considerar a tensão na barra de carga (V_{bc}) pode ser representada pela Equação (110):

$$V_{bc} = V - \Delta V_{dh} \quad (110)$$

Como analisado, conclui-se que as cargas não lineares influenciam diretamente na qualidade de energia, distorcendo a corrente e indiretamente distorcendo a forma de onda da tensão. [18]

Através do sistema e da carga é sabido que apresentam efeitos recíprocos na qualidade de tensão e corrente. A tensão distorcida não pode ser controlada mesmo com influência mútua entre o suprimento e a carga, ou seja, uma mesma carga adicionada em diferentes pontos de um determinado sistema de potência pode resultar em valores de tensão diferentes. [18]

5.7 Caracterização das distorções harmônicas

A caracterização das harmônicas dentro de um sistema se dá de forma permanente, diferentemente de outros fenômenos transitórios como afundamento de tensão, descargas atmosféricas, dentre outros. Estas produzem distorções periódicas, na forma de onda da tensão e corrente de acordo com a carga instalada. Os modelos de forma de onda são verificados pelos seus conteúdos harmônicos, onde a amplitude e defasagem angular são descritos por uma análise de Fourier. [9]

Um dos parâmetros de qualidade de energia é o nível de distorções harmônicas numa instalação elétrica. A condição de fornecimento deve estar dentro dos parâmetros estabelecidos, com uma forma de onda senoidal. Contudo, há diversos componentes ligados a rede com características não lineares que acaba gerando essas distorções na forma de onda da tensão e corrente elétrica. Essas distorções são avaliadas matematicamente através da verificação da forma de onda

periódica não senoidal. Com isso, qualquer forma de onda periódica que possua em seu estado, uma frequência distinta do modelo fundamental, poderá ser decomposta conforme uma série de Fourier, com uma frequência fundamental e frequências múltiplas da fundamental. [8]

A característica da forma de onda poderá tomar diversos aspectos de acordo com a carga instalada. Pode-se exemplificar esse sinal conforme a Figura 15, verificando o sinal T. Nota-se que este é a superposição do sinal 1 e 5 que são caracterizados por senóides perfeitas com frequências e amplitudes distintas. [14]

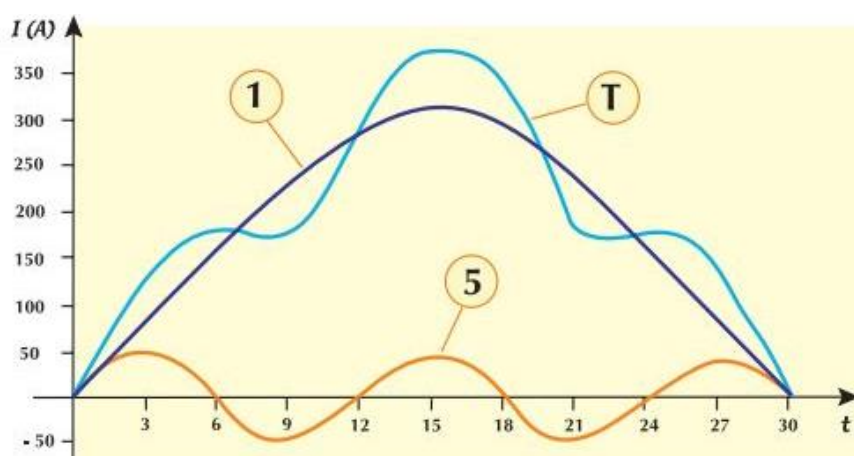


Figura 15 - Superposição da forma de onda de múltiplas frequências demonstrando as distorções harmônicas.
Fonte: [14]

A partir desses dados é possível constituir ponto a ponto o sinal de T de acordo com a superposição desses sinais, conforme Figura 16: [14]

t	Sinal 1 (A)	Sinal 5 (A)	Sinal T (A) sinal 1+sinal 5
3	90	50	140
6	190	0	190
9	230	-50	180
12	300	0	300
15	310	50	360
18	300	0	300
21	230	-50	180
24	190	0	190
27	90	50	140
30	0	0	0

Figura 16 - Superposição ponto a ponto demonstrando frequência, amplitude e sequência das harmônicas.
Fonte: [14]

A partir desse modelo é possível decompor as componentes e verificar as mesmas separadamente ou verificar a superposição de todas essas frequências, verificando o modelo de distorção final. Contudo, há diversos modelos de decomposição e verificação das distorções harmônicas, como a transformada de Wavelett, FFT (Fast Fourier Transformer), dentre outras. [8]

5.7.1 Ordem, sequência das harmônicas e frequência

A sequência de fase dos sinais harmônicos são descritas em sistemas elétricos de acordo com a sequência de fase do sistema e a ordem das harmônicas, conforme a Tabela 2 descreve:

Tabela 2 - Sequência de fase dos harmônicos num sistema trifásico equilibrado

<i>h</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>seq.</i>	+	-	0	+	-	0	+	-	0
<i>h</i>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<i>seq</i>	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Fonte: [14]

Pode-se descrever as harmônicas em sistemas elétricos de duas formas: Harmônicas pares e ímpares. [14]

As componentes ímpares são deparadas na totalidade dos sistemas elétricos. Já os elementos pares são verificados com mais frequência em sistemas com assimetria de corrente devido a existência de elementos contínuos. [14]

5.7.2 Espectro Harmônico

Devido à necessidade de decomposição das componentes elétricas de um sistema com distorções harmônicas para realizar a verificação de valores de amplitude e frequência de forma independente, foi desenvolvido uma forma de representação desses dados através de um gráfico de barras, onde cada barra representa uma componente harmônica com sua frequência, valor eficaz e defasagem, que é descrito como espectro harmônico. [14]

A representação do espectro harmônico é descrita no domínio da frequência. Em tese, as componentes harmônicas poderiam ser descritas infinitamente em termos das múltiplas frequências, porém devido aos baixos valores de amplitude que influenciam minimamente na composição de uma forma de onda, é analisado até a 25ª ordem harmônica, pois após essa ordem as perturbações se tornam insignificantes para as distorções da forma de onda.

Para realizar a verificação do espectro harmônico com mais clareza, será analisada as Figuras 17 e 18. Inicialmente a Figura 17 demonstra uma forma de onda bem próxima da senoidal, ou seja, as amplitudes das demais harmônicas tendem a zero, de forma a não influenciar no modelo da forma de onda. Já na Figura 18, é possível realizar a verificação de uma forma de onda distorcida. Analisando os espectros harmônicos, é possível verificar a presença da predominância da 3, 5, 7, 9 ordem harmônica, onde estas possuem maiores amplitudes. [14]

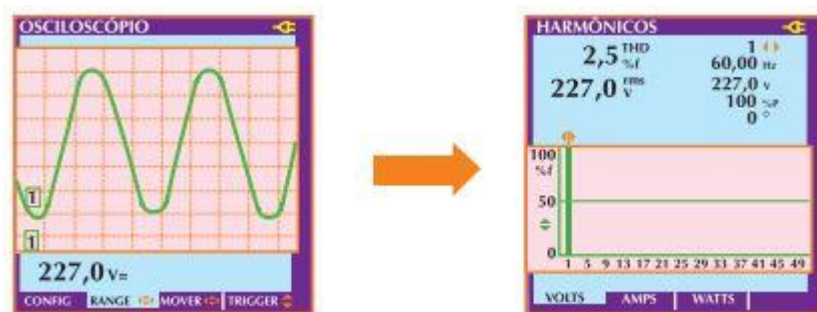


Figura 17 - Forma de onda com características próximas a componente fundamental.
Fonte: [14]

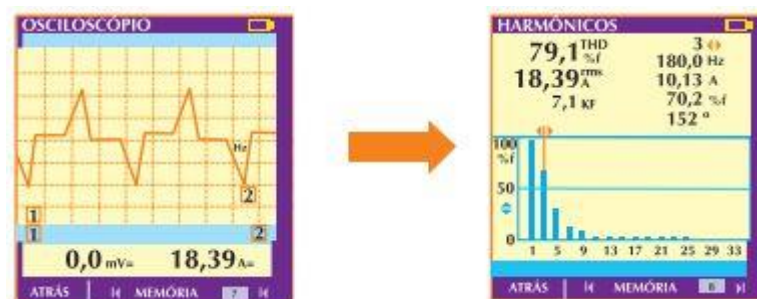


Figura 18 - Forma de onda com predominância da 3,5,7,9 ordem harmônica.
Fonte: [14]

5.7.3 Método de caracterização das distorções harmônicas pela teoria de Fourier

As teorias de Fourier são ferramentas primordiais para realizar análises das formas de onda para diversos os modelos de funções. Estas serão bastante relevantes no mapeamento dos modelos de forma de onda da corrente e tensão elétrica.

5.7.4 Série de Fourier

As séries trigonométricas, ou séries de Fourier, são séries que representam funções periódicas em funções elementares de senos e cossenos. [10]

Então, é possível definir a Equação (111) como a equação geral; [10]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nw_0t) + b_n \text{sen}(nw_0t)] \quad (111)$$

Sendo que, os coeficientes são dados pelas Equações (112), (113) e (114): [10]

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt \quad (112)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0(nw_0t)}^{t_0+T} f(t) \cos(nw_0t) dt \quad (113)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0(nw_0t)}^{t_0+T} f(t) \text{sen}(nw_0t) dt \quad (114)$$

E, de acordo com as relações de Euler, podemos considerar os termos de cosseno e seno conforme as Equações (115) e (116): [10]

$$\cos(nw_0t) = \frac{1}{2} [e^{jnw_0t} + e^{-jnw_0t}] \quad (115)$$

$$\text{sen}(nw_0t) = \frac{1}{j2} [e^{jnw_0t} - e^{-jnw_0t}] \quad (116)$$

Com isso, é obtida a Equação (117); [10]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{a_n}{2} [e^{jnw_0t} + e^{-jnw_0t}] + \frac{b_n}{j2} [e^{jnw_0t} - e^{-jnw_0t}] \right\} \quad (117)$$

De forma ordenada considerando como Equação (118): [10]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{a_n - jb_n}{2} \right) e^{jnw_0t} + \left(\frac{a_n + jb_n}{2} \right) e^{-jnw_0t} \right] \quad (118)$$

Considerando para a Equação (118), os termos que deduzam Equação (119): [10]

$$c_n = \frac{1}{2} (a_n - jb_n) \quad (119)$$

Sendo $n = 1, 2, 3, 4 \dots$

Substituindo (113) e (114) em (119), é formulada a Equação (120): [10]

$$c_n = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{2}{T} \right) \int_{t_0(nw_0t)}^{t_0+T} f(t) \cos(nw_0t) dt - jb_n - j \left(\frac{2}{T} \right) \int_{t_0(nw_0t)}^{t_0+T} f(t) \sin(nw_0t) dt \right\} \quad (120)$$

Onde C_n é dado pela Equação (121): [10]

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-jnw_0t} dt \quad (121)$$

Com isso a forma compacta de expressar a série de Fourier é finalmente obtida pela Equação (122): [10]

$$F(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jnw_0t} \quad (122)$$

5.7.4 Série de Fourier para funções pares e ímpares

As funções podem ser definidas de acordo com a simetria da forma de onda, sendo essa ferramenta um facilitador nos cálculos. [17]

Pode-se definir uma função com uma simetria par conforme a Equação (123): [17]

$$f(t) = f(-t) \quad (123)$$

A equação acima descreve a função par, devido somente aos polinômios que possuem um valor no expoente par. Possuem esse atributo que satisfaz a equação e a simetria descrita. [17]

Sendo assim, reduzimos para somente os coeficientes, conforme as Equações (124) e (125) e (126): [17]

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt \quad (124)$$

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (125)$$

$$b_n = 0, \text{ para todos valores de } n \quad (126)$$

Para uma simetria ímpar, é utilizada a Equação (127): [17]

$$f(t) = -f(-t) \quad (127)$$

A equação acima descreve a simetria ímpar, devido somente os polinômios de expoente ímpar, possuir essa característica que satisfaz a equação e a simetria ímpar.

Reduzindo para somente os coeficientes, que são verificadas nas Equações (128), (129) e (130): [17]

$$a_0 = 0 \quad (128)$$

$$a_n = 0, \quad \text{para todos valores de } n \quad (129)$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \quad (130)$$

5.7.5 Transformada de Fourier

Levando-se em consideração as Equações (121) e (122), transformando uma função periódica em aperiódica, realizando em $T \rightarrow \infty$, onde nesse instante a função

não se repete, e verifica-se que quando T aumenta, a distância entre as frequências harmônicas nw_0 e $(n + 1)w_0$ diminuem. Assim, teremos as Equações (131) e (132): [10]

$$\Delta w = (n + 1)w_0 - nw_0 \quad (131)$$

$$w_0 = \frac{2\pi}{T} \Rightarrow \frac{1}{T} = \frac{\Delta w}{2\pi} \quad (132)$$

Como verificado anteriormente, quando $T \Rightarrow \infty$, é considerado: [10]

$$\frac{1}{T} \rightarrow \frac{dw}{2\pi}$$

Com isso, quando $T \Rightarrow \infty$ a frequência acaba deixando de ser uma variável discreta e acaba se tornando uma variável constante, com isso, é obtido: [10]

$$nw_0 \rightarrow w \text{ quando } T \Rightarrow \infty$$

Assumindo que C_n também varia inversamente a T , quando $T \rightarrow \infty$ então $C_n \rightarrow 0$. O valor do produto $C_n T$, assume: [10]

$$C_n T \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

Quando $T \rightarrow \infty$

E finalmente, pode-se representar a transformada de Fourier conforme a Equação (133): [10]

$$F(\omega) = F\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (133)$$

5.8 Indicadores de distorção harmônica

São medidas e análises triviais para verificação de um sistema elétrico. Estes possuem a proposta de comparação com um referencial descrito em normas para verificação do desempenho das instalações elétricas.

5.8.1 Distorção harmônica total (DHT)

Este indicador é definido para realizar um mapeamento numérico das distorções harmônicas em um ponto da instalação, em função da porcentagem da

amplitude das distorções, e a componente fundamental, conforme a Equação (134). [9]

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (134)$$

5.8.2 Distorção harmônica total de corrente (DHT_i)

Este é um dos indicadores primordiais para as instalações com cargas não lineares, onde a corrente é um dos principais elementos que sofrem com as distorções harmônicas. Contudo, estes podem ser interpretados de forma errônea para cargas de baixa potência. Um elevado valor de DHT_i não poderá ser levado em consideração, caso o sistema possua desprezíveis valores de carga. Então, pode ser verificada então a Equação (135). [9]

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (135)$$

5.8.3 Distorção harmônica total de demanda (DTT)

Para ajustar a interpretação das baixas potências da DHT_i , foi desenvolvido o DTT com intuito de melhorar a interpretação dos sistemas com distorções harmônicas. Este é similar ao DHT_i , com uma distinção; é verificado com uma porcentagem do valor nominal da corrente elétrica, ou valor máximo, ao invés de utilizar o valor da porcentagem da componente fundamental. Este torna o sistema mais realista pelo fato de realizar a relação pelo dos níveis de distorção, representando então a Equação (136). [9]

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_{nominal}} \quad (136)$$

5.8.4 Fator de distorção

Quando verificado um circuito sem a presença de componentes harmônicas, onde há uma predominância de cargas indutivas ou capacitivas, é possível realizar a verificação de defasagem da corrente elétrica em relação à tensão elétrica, denominando este como fator de potência. Quando examinado os circuitos com a presença de distorções harmônicas, devem-se realizar mais de uma análise nessa

relação, onde se adiciona um fator de distorção. Este representa uma redução nos valores de fator de potência devido às propriedades de perda da componente senoidal, ou seja, devido as propriedades não senoidais da forma de onda, esta reduz o valor do fator de potência do sistema, representado pelas Equações (137) e (138) para fator de potência. [15]

$$FD = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \quad (137)$$

$$Fp = \cos(\phi) FD \quad (138)$$

5.8.5 Fator de desclassificação (K)

O fator K é definido para transformadores, onde o mesmo é utilizado de forma a prever as perdas por aquecimento devido à circulação de correntes harmônicas nestas máquinas elétricas estáticas. As subestações de baixa tensão, de fato, são as mais sensíveis às distorções harmônicas de corrente, que provocam sobreaquecimento e falha prematura nos equipamentos. Historicamente, os transformadores dessas subestações eram dimensionados de acordo com os dados de cargas lineares, no entanto pelo fato de circular correntes harmônicas nestes, esses sofriam aquecimentos adicionais que o reduzia a confiabilidade. O fator K é um fator de desclassificação que indica quanto que se deve reduzir de potência devido a presença das distorções harmônicas, representado pela Equação (139). [14]

$$K = \sum_{h=1}^{h_{maximo}} \left(\frac{I_h}{I_{rms\ total}} \right)^2 h^2 \quad (139)$$

5.9 Normas referentes às distorções harmônicas

Qualquer distúrbio que seja capaz de gerar distorções no sistema elétrico e/ou prejudique a qualidade da energia elétrica ou operação dos equipamentos estão inseridos no ramo de qualidade de energia elétrica. [7]

5.9.1 Normas Nacionais

É necessário estabelecer parâmetros para avaliar a qualidade de energia. Então, a ANEEL (Agência nacional de energia elétrica), estabelece os procedimentos sobre a qualidade de energia elétrica no Brasil. [6]

As distorções harmônicas são fenômenos associados aos distúrbios da forma de onda senoidal da frequência fundamental em termos da tensão e corrente elétrica. [6]

Então, é necessário verificar dados primários de tensão e correntes e manipular esses valores para realizar comparações, com isso, pode-se verificar as Equações (140), (141), (142), (143), (144): [6]

$$DIT_H \% = \frac{V_H}{V_1} \quad (140)$$

Sendo:

$DIT_H \% =$ Distorção harmônica individual de tensão de ordem h ;

$V_H =$ Tensão harmônica de ordem h ;

$V_1 =$ Tensão fundamental medida;

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \text{ máx}} V_H^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (141)$$

Sendo:

$DTT \% =$ Distorção harmônica total de tensão;

$h =$ todas as ordens harmônicas de 2 até $h \text{ máx}$.

$$DTT_p = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_H^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (142)$$

Sendo:

$DTT_p \% =$ Distorção harmônica total de tensão para os componentes pares não múltiplos de 3

$h =$ todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10 \dots$).

$hp =$ máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_H^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (143)$$

Sendo

DTT_i % = Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3

h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11 \dots$).

h_i = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3

$$DTT_3 = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_H^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (144)$$

Sendo:

DTT_3 % = Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12 \dots$)

h_3 = máxima ordem harmônica múltipla de 3

Os limites para as harmônicas em % da tensão fundamental constam na Tabela 3 conforme ANEEL: [6]

Tabela 3 - Limites das distorções harmônicas totais em % da tensão fundamental.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ KV}$	$1,0 \text{ KV} < V_n < 69 \text{ KV}$	$69 \text{ KV} < V_n < 230 \text{ KV}$
$DTT_{95\%}$	10%	8,0%	5,0%
$DTT_{p95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_{l95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_{395\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: [6]

5.9.2 Normas internacionais

A norma IEC 61000-3-2 2005 estabelece limites para inserir correntes harmônicas em sistemas de suprimento de energia elétrica, ou seja, ela especifica o máximo de componentes harmônicas pode ser estabelecida por um determinado equipamento. [22]

Esta norma se aplica a todos os equipamentos eletrônicos e elétricos com correntes de entrada de até 16A por fase, sendo estes equipamentos conectados a sistemas de distribuição de baixa tensão. Sistemas com tensão nominal inferior a 220V (fase-neutro), não apresentam limites definidos. [22]

A IEC 61000-3-2 classifica os equipamentos de quatro formas (A, B, C e D) para limitação de corrente harmônica. [22]

Os equipamentos do tipo A são considerados equipamentos trifásicos equilibrados, ou equipamentos de uso residencial, dentre outros. Já na classe B consistem em ferramentas portáteis e equipamentos de solda simples. [22]

A Tabela 4 representa os limites de corrente para os equipamentos de classe A, e para equipamentos de classe B são múltiplos de 1,5 da Tabela 4. [22]

Tabela 4 - Limite para equipamentos classe A.

Ordem harmônica	Máxima corrente harmônica permitida
n	A
Harmônicas ímpares	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15 ≤ n ≤ 39	0,15 x 15/n
Harmônicas pares	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
8 ≤ n ≤ 40	0,23 x 8/n

Fonte: [22]

Os equipamentos de classe C são voltados para iluminações incandescentes, LEDS, entre outras. A Tabela 5 estabelece os limites para os equipamentos de classe C: [22]

Tabela 5 - Limite para equipamentos classe C.

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida expressa em porcentagem da frequência fundamental %
2	2
3	$30 \times \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
11 $\leq n \leq 39$ (somente harmônicas ímpares)	3
* λ é o fator de potência do circuito	

Fonte: [22]

Na classe D estão os equipamentos menor ou igual a 600 W ou o de potência específica, a Tabela 6 representa os limites de corrente da classe D: [22]

Tabela 6 - Limite para equipamentos classe D.

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida por watt mA/W	Máxima corrente harmônica permitida A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 $\leq n \leq 39$ (somente harmônicas ímpares)	3,85/n	Ver tabela para classe A

Fonte: [22]

A norma IEEE 519 limita em percentual as harmônicas em sistemas de potência. A norma estabelece metas para projetos de sistemas elétricos com cargas lineares ou não lineares, definindo assim a qualidade de energia estabelecida ao ponto de acoplamento comum. [23]

Esta norma é aplicada para situações de regime permanente, já que em regimes transitórios as condições podem exceder os valores estabelecidos. [23]

A limitação de harmônicas na norma tem como base a relação entre a fundamental corrente de carga e a corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum. [23]

O nível de tensão e nível de corrente de curto circuito difere os limites de harmônicas, sendo de forma proporcional estabelecido que quanto maior a corrente de curto circuito em relação a corrente de carga, maiores serão os limites. [23]

Para valores de tensão entre 120 e 69KV, a Tabela 7 representa os respectivos limites: [23]

Tabela 7 - Limite máximo para harmônicas ímpares em Sistemas de distribuição de 120 até 69kV.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TDD
<20	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	5,0%
20-50	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%	8,0%
50-100	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%	12,0%
100-1000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15,0%
>1000	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20,0%

Fonte: [23]

Para valores entre 69KV e 161KV, a Tabela 8 representa os respectivos limites: [23]

Tabela 8 - Limite máximo para harmônicas ímpares em Sistemas de distribuição de 69KV até 161KV.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TDD
<20	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
20-50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%
50-100	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%	6,0%
100-1000	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%	7,5%
>1000	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%	10,0%

Fonte: [23]

Para sistemas de distribuição com valores superiores a 161KV ou sistemas de geração e cogeração isolados, a Tabela 9 representa os respectivos limites: [23]

Tabela 9 - Limite máximo para Harmônicas Ímpares em sistemas de Distribuição superior a 161KV e sistemas de geração e cogeração isolados.

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	THD
<50	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
>50	3,0%	1,5%	1,15%	0,45%	0,22%	3,75%

Fonte: [23]

Vinte e cinco por cento dos valores das Tabelas 7, 8 e 9 correspondem os limites para componentes harmônicas pares. [23]

A Tabela 10 representa os valores de limite de distorção da tensão de alimentação em relação à fundamental: [23]

Tabela 10 - Limites percentuais de distorção da tensão de alimentação em relação à fundamental.

Tensão no ponto de acoplamento comum	Harmônicas individuais	TDHV
69kV e abaixo	3,0%	5,0%
69,001kV-161kV	1,5%	2,5%
acima de 161kV	1,0%	1,5%

Fonte: [23]

5.10 Conceitos de potência

Definições e cálculos de potência são cruciais para o estudo de caso que será desenvolvido, por isso é de extrema importância discorrer sobre o assunto de forma transparente.

5.10.1 Potência instantânea

Para qualquer circuito ou dispositivo, através do produto entre a tensão aplicada e a corrente que por ele circula é possível obter o valor da potência instantânea, grandeza cujo módulo geralmente varia no tempo, representado pela Equação (145). [15]

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (145)$$

Por convenção para $p(t)$ positivo em um especificado valor de t , o dispositivo estará absorvendo potência. Para $p(t)$ negativo, o dispositivo estará fornecendo potência.

Representado na Figura 19 para melhor compreensão:

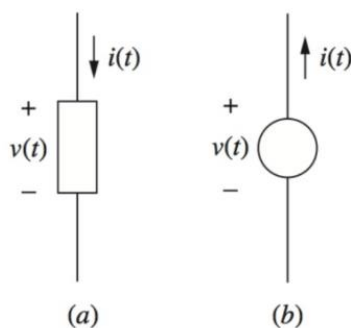


Figura 19 - (a) $p(t) > 0$ potência está sendo absorvida; (b) $p(t) < 0$ indica que a potência está sendo fornecida pela fonte.

Fonte: [15]

5.10.2 Potência ativa

Funções periódicas, onde o produto da corrente e tensão resultam em uma função periódica da potência instantânea. A potência ativa, assim denominada por representar a potência que é convertida de uma forma elétrica para uma forma não elétrica ou vice-versa. A potência ativa P é calculada através da Equação (146): [15]

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) i(t) dt \quad (146)$$

Onde T é o período de uma função senoidal. Os limites de integração indicam que pode iniciar o processo de integração em qualquer tempo inicial, mas deve-se concluí-lo em um período completo na sequência. [15]

Conforme as formas de onda descritas pela teoria de Fourier, são estabelecidas as Equações (147) e (148) para v e i como: [15]

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(\omega t + \theta_v), \quad (147)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(\omega t + \theta_i), \quad (148)$$

A potência ativa pode ser expressa conforme a Equação (149): [15]

$$P = \sum P_n = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} I_n V_n \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (149)$$

Ou ainda, conforme a Equações (150) e (151): [15]

$$P = \sum P_n = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{n,rms} V_{n,rms} \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (150)$$

$$P = \sum P_n = \sum I_{n,rms}^2 Z \quad (151)$$

5.10.3 Potência reativa

Pode-se definir potência reativa como a potência elétrica trocada entre o campo magnético de um indutor e a fonte que o alimenta ou ainda o campo elétrico de um capacitor e a fonte que o alimenta. Pode ser expressa conforme a Equação (152): [17]

$$Q = \frac{1}{2} V_m I_m \sin(\theta_v - \theta_i) \quad (152)$$

Ou ainda, conforme a Equação (153): [17]

$$Q = V_{rms} I_{rms} \text{sen}(\theta_v - \theta_i) \quad (153)$$

5.10.4 Distorção Volt-Ampères

Conforme descrito os termos de potência ativa e potência reativa, deve-se considerar o termo de potência para as correntes nas frequências que são diferentes da frequência de tensão. Como poderá ser expressa na Equação (154): [15]

$$D = V_{1,rms} \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{n,rms}^2} \quad (154)$$

5.10.5 Potência complexa

A potência complexa é obtida através da soma da potência ativa com a potência reativa, ou seja, pode ser definida de acordo com a Equação (155): [17]

$$S = P + jQ \quad (155)$$

Ou ainda, caracterizada pelas Equações (156), (157), (158): [17]

$$S = \frac{1}{2} V I^* \quad (156)$$

$$S = I_{ef}^2 Z^* \quad (157)$$

$$S = \frac{V_{ef}^2}{Z^*} \quad (158)$$

5.10.6 Potência aparente

A potência aparente é obtida através do módulo da potência complexa, conforme a Equação (159), abaixo: [15]

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (159)$$

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Simulação computacional

O modelamento das características harmônicas, efeito pelicular e perdas elétricas em condutores por efeito joule, foi realizado no software MATLAB. Com o objetivo de verificação de forma rápida e fácil, foi desenvolvido uma aplicação na plataforma GUIDE do MATLAB, com intuito de facilitar a inserção de dados no sistema para verificação dessas interações elétricas.

Com a interface criada, torna-se possível inserir os valores de espectro harmônico da corrente elétrica e os dados do condutor, e assim verificar os valores de profundidade pelicular, relação da impedância para corrente alternada, tomando como base a componente contínua da resistência e as perdas devido a interação das harmônicas com o efeito pelicular. A Figura 20 demonstra a interface do gráfico para realizar as verificações.

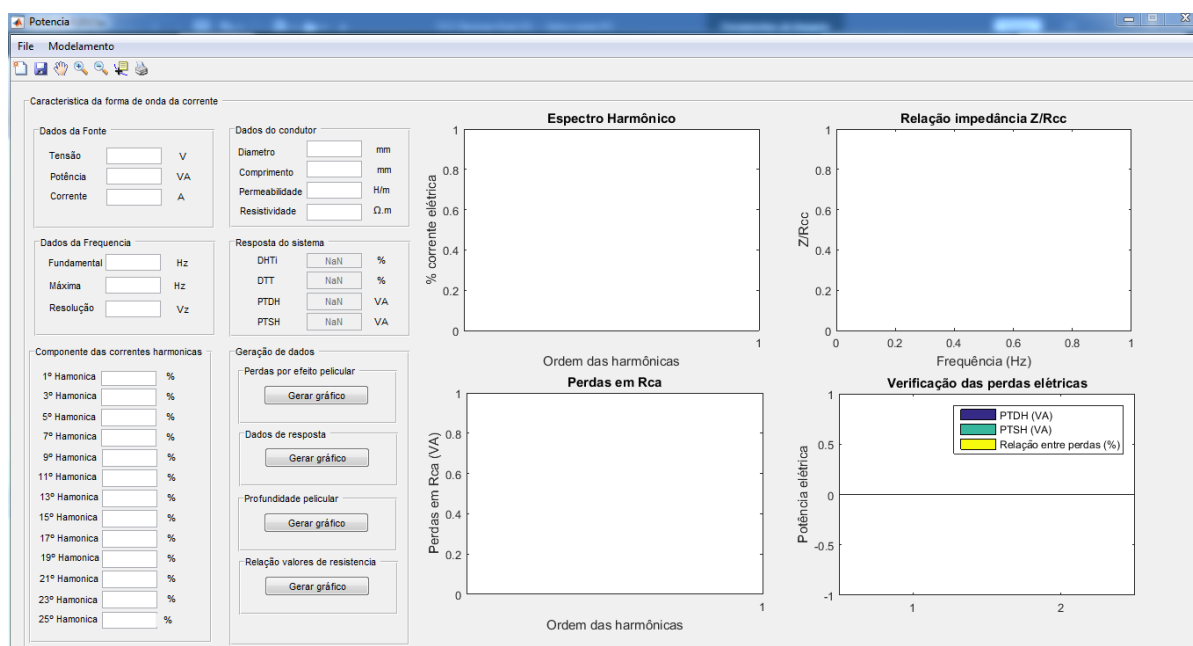
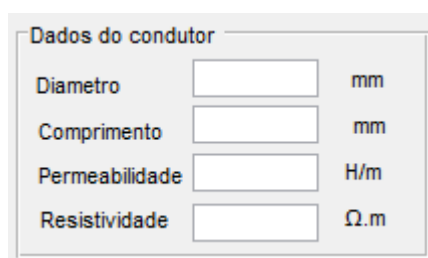


Figura 20 - Interface gráfica para realizar a verificação dos dados de perdas devido ao efeito pelicular por consequência das distorções harmônicas.

Fonte: Autores

Para realizar a verificação dos dados, é necessário aplicar valores nos campos de coleta das variáveis para realizar o processamento e gerar os devidos resultados. Com isso, existe a demanda de inserir os dados específicos do condutor, da corrente elétrica e dados da fonte e carga.

A inserção dos dados do condutor, se dá conforme Figura 21, onde deverá ser aplicado o diâmetro do condutor (mm), comprimento (mm), permeabilidade magnética (H/m) que está inserido o condutor e a resistividade elétrica ($\Omega.m$).



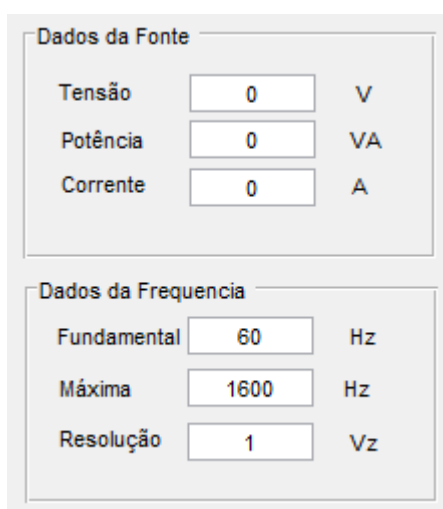
Dados do condutor

Diametro	<input type="text"/>	mm
Comprimento	<input type="text"/>	mm
Permeabilidade	<input type="text"/>	H/m
Resistividade	<input type="text"/>	$\Omega.m$

Figura 21 - Inserção de dados do condutor para verificação da curva de profundidade pelicular e os diversos efeitos.

Fonte: Autores

Já no campo “Dados da fonte”, deverão ser inseridos os dados da fonte alimentadora da carga, com os parâmetros de tensão (V), potência (VA) e corrente (A) da 1ª ordem. Já no campo “Dados da frequência” deverão ser inseridos os valores da frequência fundamental (Hz), máxima frequência (Hz) de análise e a resolução, conforme descreve Figura 22.



Dados da Fonte

Tensão	<input type="text" value="0"/>	V
Potência	<input type="text" value="0"/>	VA
Corrente	<input type="text" value="0"/>	A

Dados da Frequencia

Fundamental	<input type="text" value="60"/>	Hz
Máxima	<input type="text" value="1600"/>	Hz
Resolução	<input type="text" value="1"/>	Vz

Figura 22 - Interface para inserir os dados de referente a frequência e dados da fonte alimentadora

Fonte: Autores

No campo “Componentes das correntes harmônicas” deverão ser inseridos valores do espectro harmônico em (%) da corrente de 1ª ordem para análise individual de cada componente até a 25ª ordem, conforme descreve Figura 23.

Componente das correntes harmonicas		
1º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
3º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
5º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
7º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
9º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
11º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
13º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
15º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
17º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
19º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
21º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
23º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%
25º Hamonica	<input type="text" value="0"/>	%

Figura 23 - Campo para inserção dos dados do espectro harmônico em %.
Fonte: Autores

A interface desenvolvida, tem o intuito de facilitar a inserção dos dados no sistema, como também facilitará a coleta e representação dos dados de resposta. Os dados de permeabilidade magnética (H/m), resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$) e frequência (Hz), serão aplicados na equação (87) e (72) para verificação da profundidade pelicular do condutor.

$$\omega = 2\pi f \quad (87)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_r}{\omega\mu}} \quad (72)$$

Logo em seguida, os dados coletados da profundidade pelicular, para as múltiplas frequências, serão aplicados na equação (92), e em seguida, com os dados do diâmetro do condutor, será aplicado na equação (106).

$$T = \frac{1 - i}{\delta} \quad (92)$$

$$\frac{Z}{R} = \frac{Ta J_0^B(Ta)}{2 J_1^B(Ta)} \quad (106)$$

Com isso, poderá ser obtida a resposta da profundidade pelicular conforme Figura 24, e a resposta da relação da impedância Zca em função da componente continua da resistência CC em forma de um gráfico de barras conforme descrita na Figura 25.

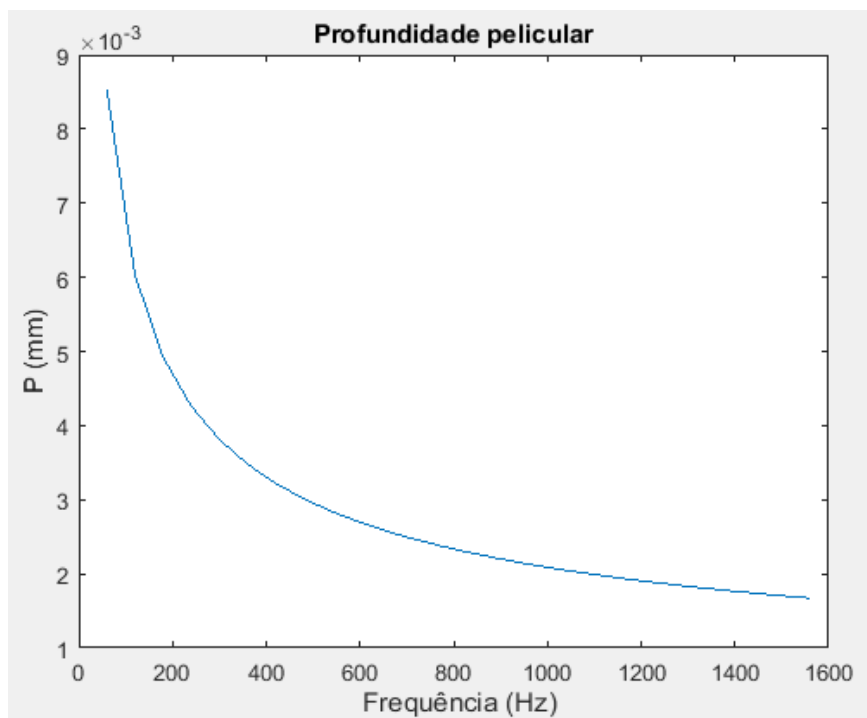


Figura 24 - Curva da profundidade pelicular para as múltiplas frequências, como resposta dos dados inseridos na plataforma de simulação.

Fonte: Autores

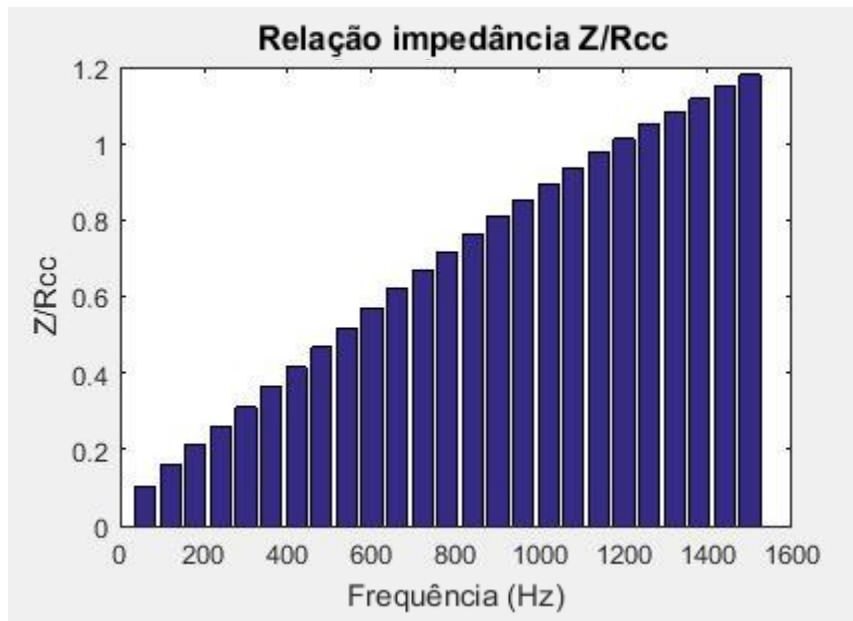


Figura 25 - Resposta da impedância para as múltiplas frequências.
Fonte: Autores

Devido às interações das distorções harmônicas com o efeito pelicular, foi realizado o modelamento para verificar os valores das distorções harmônicas de acordo com o espectro harmônico que será inserido, conforme Figura 23. Estes dados de % do espectro será modelado de acordo com a equação (160), para verificação da corrente, para cada componente harmônica.

$$I_{real1,3,5...25} = \frac{I^{(\%)}_{1,3,5...25} I_1}{100} \quad (160)$$

Examinado os valores de corrente elétrica para cada componente harmônica $I_{real1,3,5...25}$, é possível relacionar cada componente de corrente elétrica harmônica, para as componentes de impedância, e com isso, mapear quais serão os valores de perdas obtidas pelo efeito joule, devido as componentes harmônicas. Verificando que a impedância do condutor varia de acordo com a variação da frequência, foi modelado o valor de aumento de impedância para cada ordem harmônica, conforme equação (161), e com isso, adaptamos a equação (151) para (162) conforme diversas componentes de impedância.

$$Z_{real} = \frac{Z}{R} R + R \quad (161)$$

$$P = \sum P_n = \sum I_{n,rms}^2 Z \quad (151)$$

$$P_{1,3,5...25} = I_{real1,3,5...25}^2 Z_{real1,3,5...25} \quad (162)$$

Tendo como resposta a Figura 26, foi demonstrado as perdas para cada componente de frequência elétrica, ou seja, foi possível mapear as perdas devido o efeito pelicular por consequência das distorções harmônicas para cada componente da frequência elétrica.

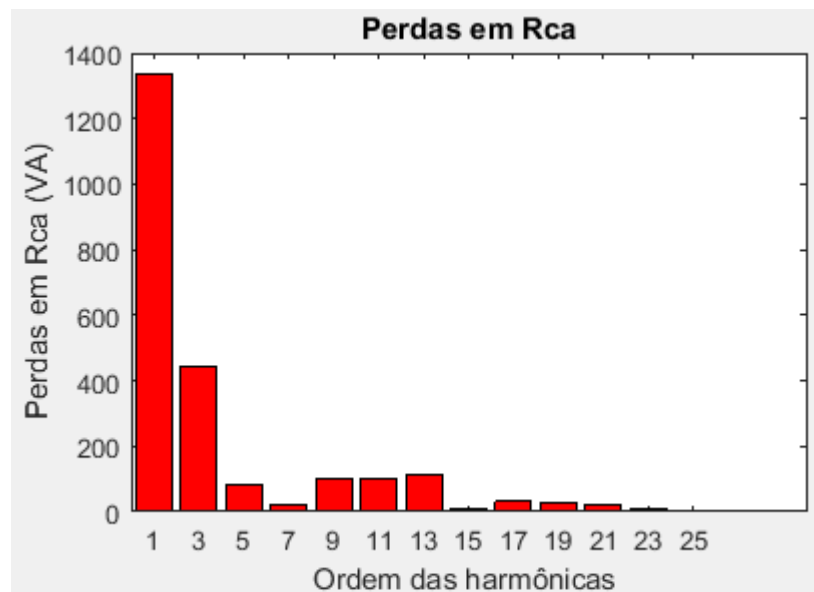


Figura 26 - Representação das perdas elétricas para cada componente das ordens harmônicas.
Fonte: Autores

Com isso, a resposta do sistema é primordial para verificação dos dados e ratifica o objetivo proposto na pesquisa. Através das equações (135), (136), (163), (164) e (165) foi possível verificar os indicadores de distorção harmônica total de corrente, distorção harmônica de demanda, potência total devida as distorções

harmônicas (PTDH) e a potência total sem as distorções harmônicas (PTSH), e com isso, relacionar estas.

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (135)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_{nominal}} \quad (136)$$

$$P_{Total} = \sum P_{1,3,5...25} \quad (163)$$

$$P_1 = I_1^2 Z_1 \quad (164)$$

$$R_{\frac{P_{total}}{P}} = \frac{P_{Total} - P_1}{P_{Total}} \quad (165)$$

Estas respostas são demonstradas na interface conforme Figura 27. Na Figura 28 é demonstrado através de gráficos de barras, os valores de potência total devida as distorções harmônicas (PTDH) e a potência total sem as distorções harmônicas (PTSH), e a relação entre as potências. A análise da relação das potências é primordial, visto que para os cálculos de perdas em sistemas elétricos, muitas das vezes, são desconsiderados as distorções harmônicas e o efeito pelicular em condutores. Portanto, esta relação demonstra uma taxa de erro, da potência elétrica dissipada devido as interações do efeito pelicular conjugado com as distorções harmônicas em sistemas elétricos.

Resposta do sistema		
DHTi	<input type="text"/>	%
DTT	<input type="text"/>	%
PTDH	<input type="text"/>	%
PTSH	<input type="text"/>	%

Figura 27 - Resposta do sistema, indicando dados de distorção harmônica total de corrente, distorção total de demanda, potência total com as distorções harmônicas e potência sem as distorções harmônicas.

Fonte: Autores

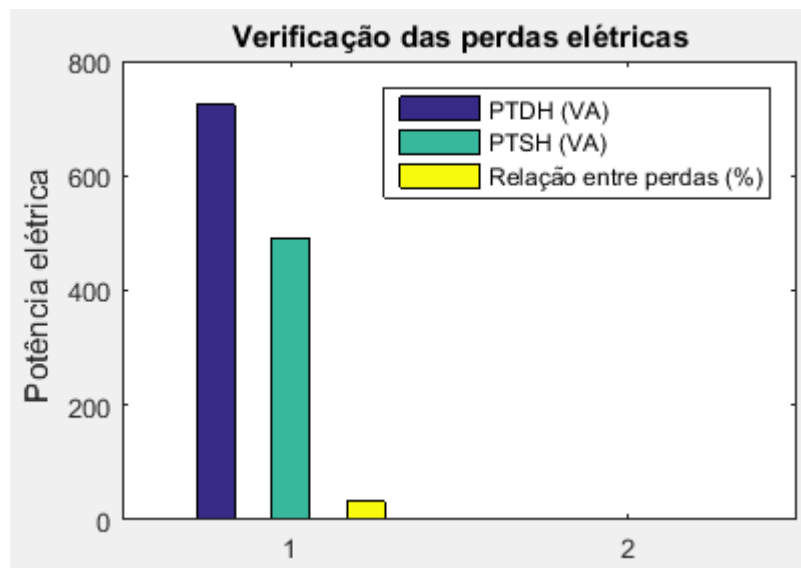


Figura 28 - Verificação das perdas em sistemas elétricos devido as distorções harmônicas PTDH, as perdas sem distorções harmônicas PTSH e a relação entre as perdas.

Fonte: Autores

6.2 Comprovação do modelamento

Devido à alta complexidade dos cálculos, foi verificada a necessidade de realizar comparações para a garantia da confiabilidade do software.

Com isso, os cálculos de efeito pelicular em condutores foram comparados com os dados simulados em condutores realizados no trabalho “Medidas do efeito pelicular em condutores de cobre – Proposta de um novo modelo”. Então, a Figura 29 apresentada a curva de verificação do modelo de efeito pelicular clássico comparado com o ensaio realizado no condutor 14AWG com resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.

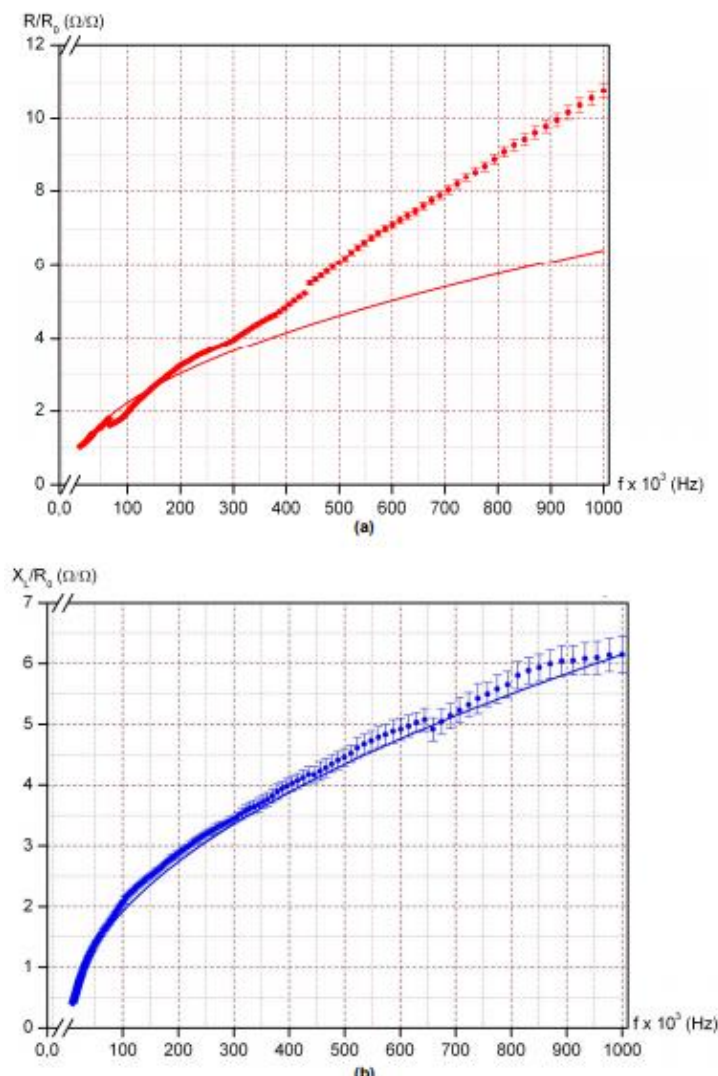


Figura 29 - Comparação da impedância em condutores 14 AWG com resistividade equivalente a $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ devido ao efeito pelicular

Fonte: [12]

Na Figura 30, é demonstrado os valores simulados no software desenvolvido para mapeamento das perdas do efeito pelicular em condutores devido as distorções harmônicas.

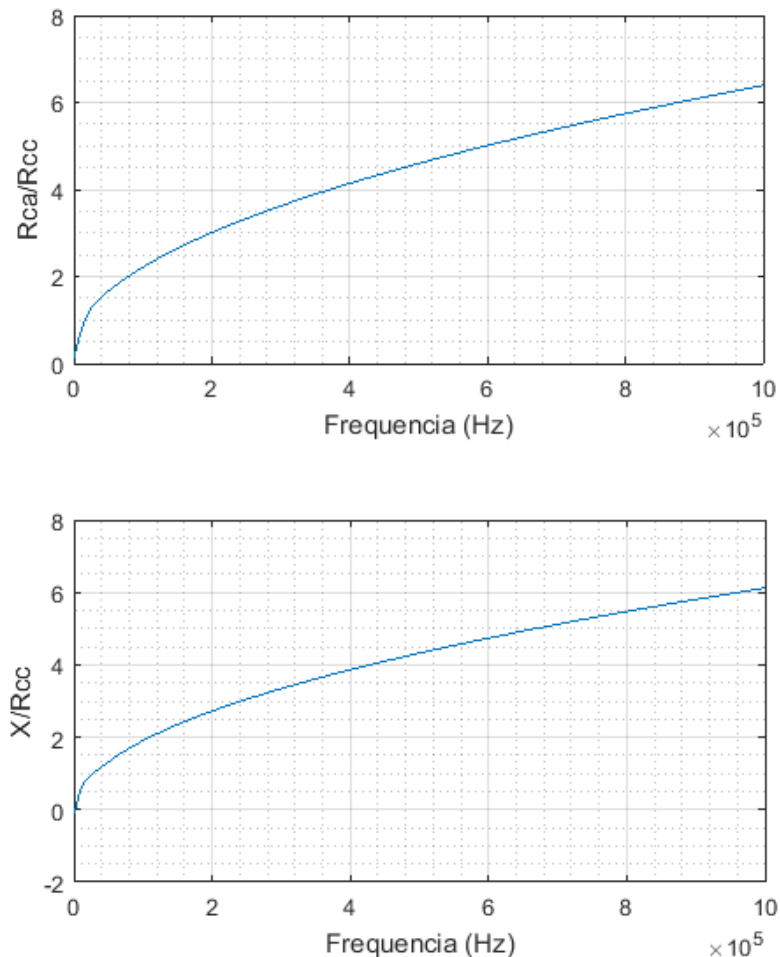


Figura 30 - Resistência em condutores 14 AWG com resistividade equivalente a $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ devido ao efeito pelicular simulado no software.
Fonte: Autores

Pode ser verificado que os gráficos apresentam similaridade, demonstrando que o modelamento do efeito pelicular é eficaz para o modelo de cálculos. Na Figura 29, os termos de baixa frequência apresentam erros baixos, sendo que os valores de erro aumentam de acordo com o aumento dos valores de frequência. Entretanto, na pesquisa abordada, as componentes harmônicas são analisadas somente até componentes de 25^o ordem ou 1500 Hz. Com esses dados, o sistema se torna confiável devido aos baixos valores de erro experimental.

6.3 Ensaio e simulações

Para garantir a funcionalidade do software, e realizar a avaliação de perdas elétricas das cargas geradoras de distorções harmônicas, foi realizado estudos de caso com intuito de mapear as perdas em 3 cenários distintos, onde há a presença da distorção.

Devido ao avanço e a comercialização dos equipamentos eletrônicos, houve a preocupação dos efeitos que estes causam na rede elétrica, juntamente com as perdas de energia. Com isso, foi realizado o mapeamento das perdas elétricas em um sistema de distribuição de energia elétrica responsável pela alimentação de cargas residenciais. Os dados de distorção foram coletados de pesquisas já realizadas. O intuito principal é realizar o mapeamento das perdas elétricas do sistema.

A segunda análise foi realizada em um cenário de distribuição de energia alimentadora de cargas comerciais. Os dados das distorções também foram coletados de pesquisas já realizadas no ramo de qualidade de energia.

E, o último caso, foi realizar uma análise das perdas em um modelo de carga industrial, onde a presença das distorções se apresenta de forma mais acentuada devido a instalação de equipamentos mais propícios a esses efeitos.

6.3.1 Caso 1 – Distribuição de energia elétrica para cargas residenciais

O ensaio realizado, tem o intuito de demonstrar as perdas devido a distorções harmônicas em um sistema de distribuição alimentadora de cargas residenciais. [19]

Para cargas elétricas residenciais, foi realizada as medições em 3 horários, 12 horas, 21 horas e 02 horas, em um transformador 45KVA, 11,4 KV/220 V. A Figura 31, 32, 33 demonstra a forma de onda da corrente elétrica para os devidos horários. [19]

O medidor utilizado na análise foi ION 7650, desenvolvido pela Power Measurement, [19] com classe de exatidão D.

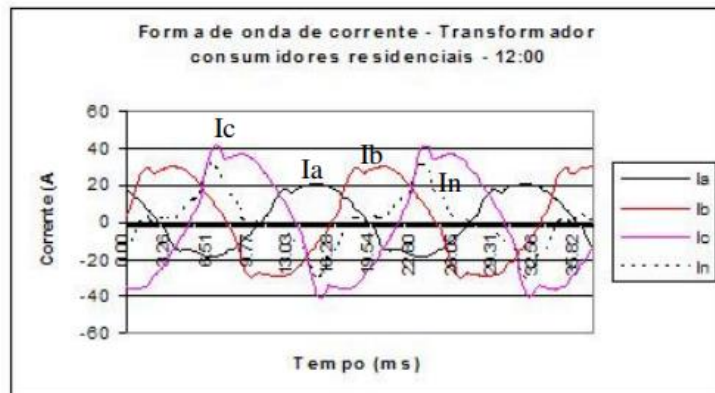


Figura 31 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 45KVA no período de 12:00.
Fonte: [19]

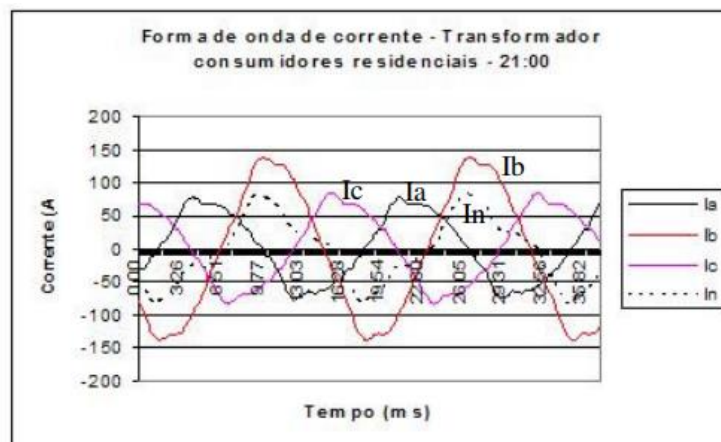


Figura 32 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 45KVA no período de 21:00.
Fonte: [19]

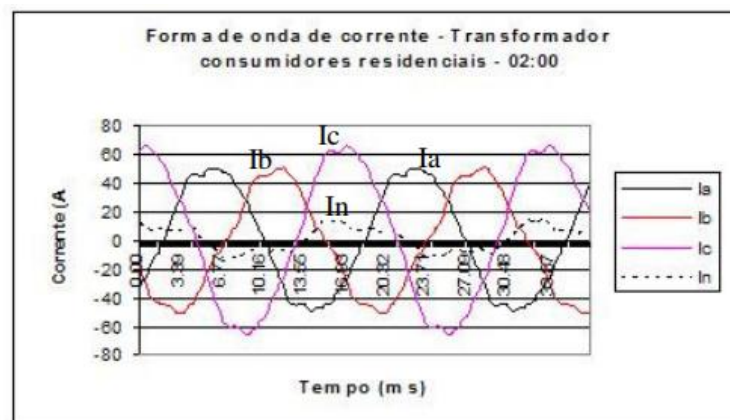


Figura 33 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 45KVA no período de 02:00.
Fonte: [19]

A partir da demonstração da forma de onda da corrente elétrica, esta pode ser verificada no domínio da frequência, com intuito de verificar de forma individual cada componente para aplicação no software de simulação de perdas elétricas. Conforme demonstra Tabela (11), (12) e (13).

Tabela 11 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas residências de 45 KVA, às 12:00.

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 14,61$		$I_{rms} = 22,79$		$I_{rms} = 28,55$		$I_{rms} = 14,74$	
	THD _i = 10,52		THD _i = 12,97		THD _i = 16,15		THD _i = 50,50	
	F. crista = 1,29		F. crista = 1,32		F. crista = 1,40		F. crista = 2,11	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-50,11	100,00	-165,22	100,00	79,22	100,00	126,34
3	6,61	-157,10	9,03	177,05	12,15	175,12	47,87	179,02
5	6,26	34,98	7,98	139,78	9,72	-98,77	10,53	-144,89
7	3,77	-133,79	3,65	99,23	4,99	-34,75	5,75	-38,433
9	2,34	59,76	1,84	37,24	2,56	24,24	11,49	28,338
11	0,85	-102,99	0,63	-19,30	0,84	89,93	1,38	22,683

Fonte: [19]

Tabela 12 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas residências de 45 KVA, às 21:00.

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 51,06$		$I_{rms} = 95,30$		$I_{rms} = 54,49$		$I_{rms} = 48,12$	
	THD _i = 11,37		THD _i = 5,82		THD _i = 11,15		THD _i = 27,52	
	F. crista = 1,57		F. crista = 1,39		F. crista = 1,45		F. crista = 2,11	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-29,34	100,00	-140,64	100,00	95,29	100,00	-135,49
3	8,56	-166,51	3,84	152,09	9,70	-157,99	26,98	-174,26
5	6,33	23,69	4,02	160,16	4,46	-91,85	1,80	162,55
7	3,44	-159,47	1,48	93,20	2,71	-66,99	2,98	-158,66
9	1,86	36,54	0,74	8,78	1,18	-49,09	4,12	-2,0892
11	0,80	179,09	0,39	-99,37	1,34	21,25	0,45	-29,692

Fonte:[19]

Tabela 13 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas residências de 45 KVA, às 02:00.

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 36,11$		$I_{rms} = 34,55$		$I_{rms} = 46,42$		$I_{rms} = 8,422$	
	THD _i = 5,37		THD _i = 5,17		THD _i = 7,85		THD _i = 42,05	
	F. crista = 1,36		F. crista = 1,44		F. crista = 1,40		F. crista = 1,55	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-37,51	100,00	-150,22	100,00	85,13	100,00	74,099
3	4,18	-147,69	4,98	90,51	3,83	-175,12	39,07	165,08
5	2,59	42,91	5,52	-179,41	2,89	-39,61	4,23	-146,09
7	1,76	-162,73	2,24	123,31	1,51	-50,85	7,21	176,7
9	1,28	23,86	1,08	83,59	0,63	8,70	12,26	26,077
11	1,79	179,12	0,92	137,81	1,63	-7,36	2,27	112,77

Fonte: [19]

Para o modelo acima foi utilizado nas bases de cálculo, condutores 2/0AWG com 9,3 mm de diâmetro para os condutores de fase, e 4/0 AWG com 11,7 mm para os condutores de neutro, todos de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1, com comprimento de 100 m.

Com isso, para os dados de medição de 12:00 no transformador de 45 KVA 11,4 KV/220 V é apresentado o espectro harmônico nas Figuras 34, 35, 36, 37. A relação de Z/R_{cc} é apresentada nas Figuras 38 e 39. A potência dissipada é apresentada nas Figuras 40, 41, 42, 43. As perdas elétricas totais com distorção harmônica; perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas e relação das perdas nas Figuras 44, 45, 46, 47.

A representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência e os valores de resistência total do condutor devido ao efeito pelicular, é dada na Tabela 14 para os condutores 2/0AWG e na Tabela 15 para condutores 4/0 AWG; todos de cobre com resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ com um comprimento de 100m.

Na Tabela 16 é demonstrado as perdas para cada componente harmônica, e as perdas totais devido as interações das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores. Na Tabela 17, é demonstrado os valores das potências totais com distorções harmônicas; os valores das potências totais desconsiderando as distorções harmônicas e o percentual de perdas com as distorções harmônicas.

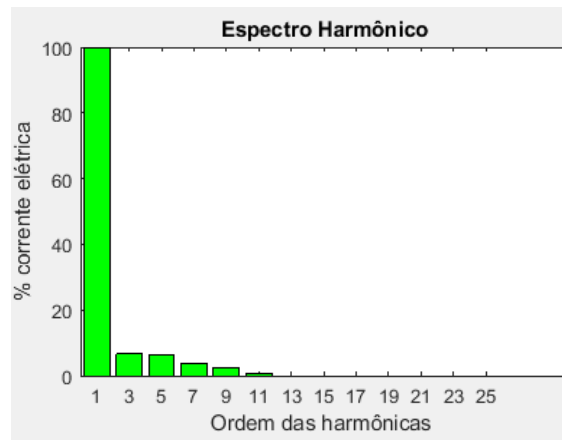


Figura 34 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 12:00 para cargas residências, fase A.
Fonte: Autores

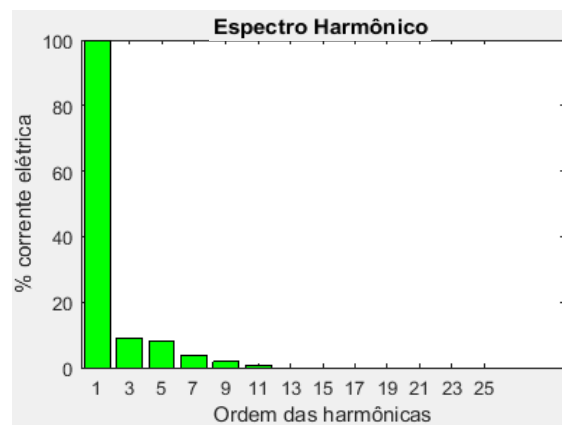


Figura 35 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 12:00 para cargas residências, fase B.
Fonte: Autores

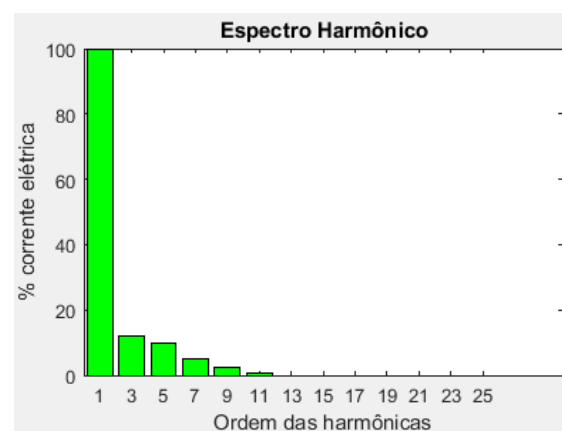


Figura 36 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 12:00 para cargas residências, fase C.
Fonte: Autores

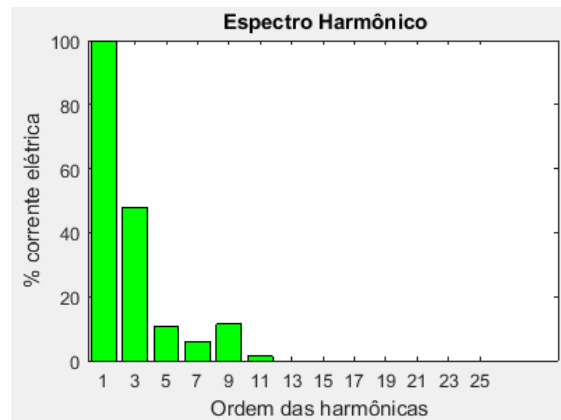


Figura 37 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 12:00 para cargas residências, neutro.
Fonte: Autores

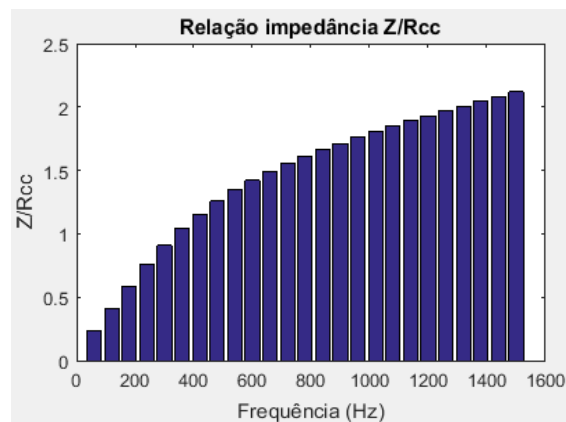


Figura 38 - Z/Rcc para o condutor 2/0AWG com 9,3 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.
Fonte: Autores

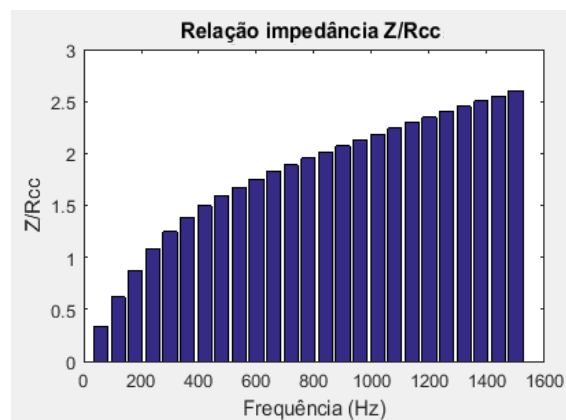


Figura 39 - Z/Rcc para o condutor 4/0AWG com 11,7 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.
Fonte: Autores

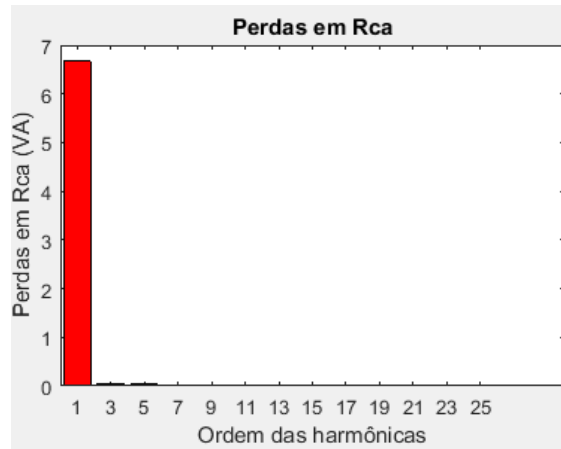


Figura 40 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00, fase A.
Fonte: Autores

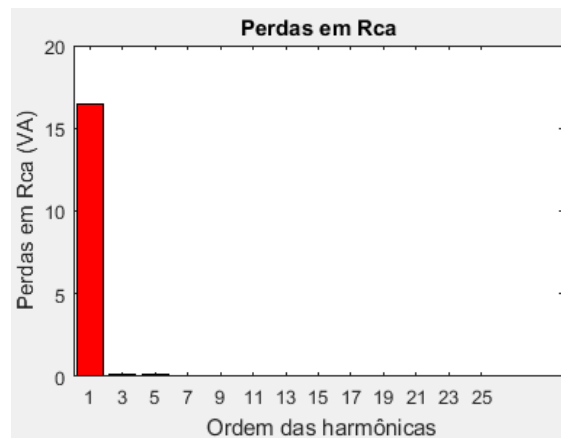


Figura 41 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00, fase B.
Fonte: Autores



Figura 42 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00, fase C.
Fonte: Autores

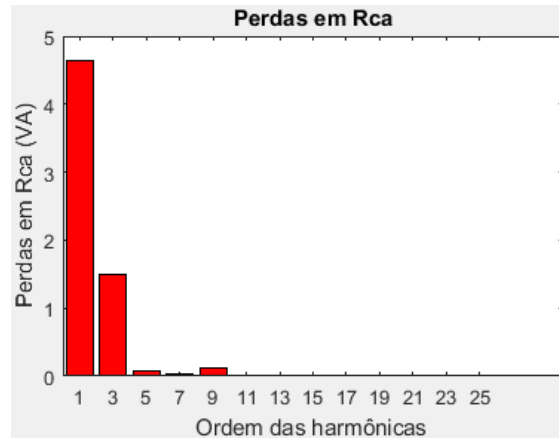


Figura 43 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00, neutro.
Fonte: Autores

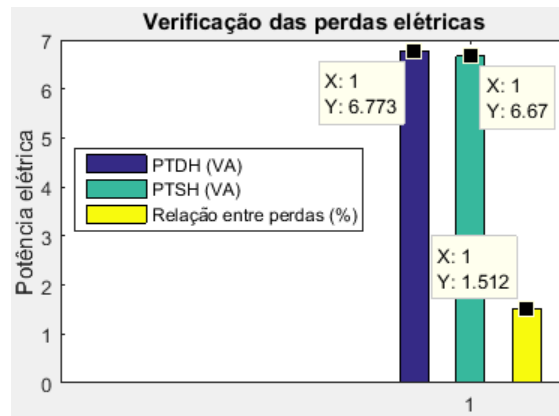


Figura 44 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.
Fonte: Autores

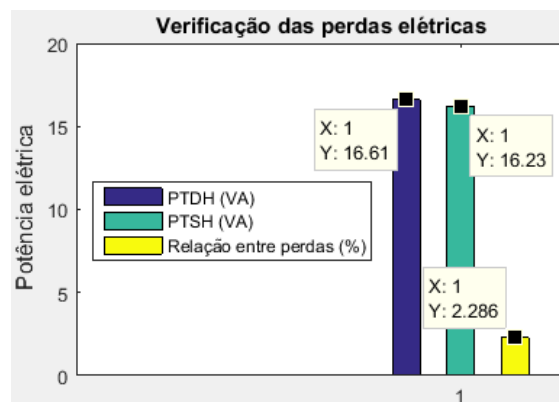


Figura 45 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.
Fonte: Autores

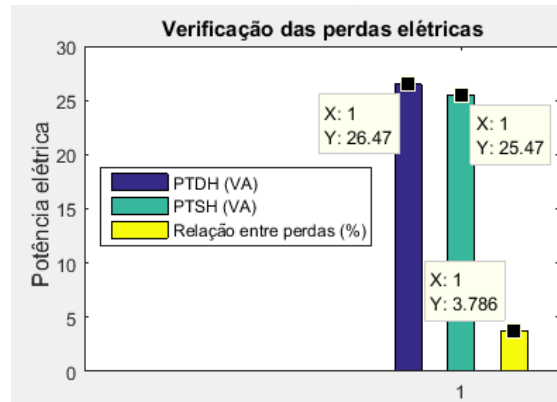


Figura 46 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.

Fonte: Autores

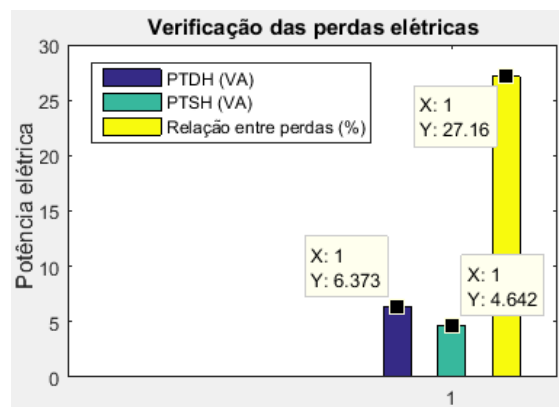


Figura 47 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.

Fonte: Autores

Tabela 14 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistencia total do condutor devido ao efeito pelicular.

Ordem das harmônicas	$\frac{Z}{r_{cc}}$	Z_t
0	0.0000	0.0253
1	0.2342	0.0312
3	0.5891	0.0402
5	0.9080	0.0483
7	1.1562	0.0546
9	1.3446	0.0594
11	1.4914	0.0631
13	1.6111	0.0661
15	1.7136	0.0687
17	1.8051	0.0710
19	1.8894	0.0732
21	1.9689	0.0752
23	2.0449	0.0771
25	2.1184	0.0790

Fonte: Autores

Tabela 15 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistencia total do condutor devido ao efeito pelicular.

Ordem das harmônicas	$\frac{Z}{r_{cc}}$	Z_t
0	0.0000	0.0160
1	0.3356	0.0214
3	0.8717	0.0299
5	1.2486	0.0360
7	1.4965	0.0399
9	1.6764	0.0428
11	1.8228	0.0452
13	1.9523	0.0472
15	2.0724	0.0492
17	2.1865	0.0510
19	2.2959	0.0527
21	2.4015	0.0544
23	2.5034	0.0560
25	2.6019	0.0576

Fonte: Autores

Tabela 16 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 12:00.

Ordem das harmônicas	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro	Total
	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada
	(VA)	(VA)	(VA)	(VA)	(VA)
1	6.6703	16.2306	25.4717	4.6423	53.0149
3	0.0375	0.1704	0.4842	1.4908	2.1829
5	0.0404	0.1598	0.3720	0.0867	0.6589
7	0.0166	0.0378	0.1108	0.0287	0.1939
9	0.0069	0.0104	0.0317	0.1228	0.1718
11	0.0010	0.0013	0.0036	0.0019	0.0078
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fonte: Autores

Tabela 17 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.

Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA)	Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA)	Relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
56.2302	53.0149	5.71%

Fonte: Autores

Para os dados de medição de 21:00 no transformador de 45 KVA 11,4 KV/220 V é apresentado, o espectro harmônico nas Figuras 48, 49, 50, 51. A potência dissipada é apresentada nas Figuras 52, 53, 54, 55. As perdas elétricas totais com distorção harmônica; perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas e relação das perdas nas Figuras 56, 57, 58, 59.

Na Tabela 18 é demonstrado as perdas para cada componente harmônica, e as perdas totais devido as interações das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores. Na Tabela 19, é demonstrado os valores das potências totais com distorções harmônicas; os valores das potências totais desconsiderando as distorções harmônicas e o percentual de perdas com as distorções harmônicas.

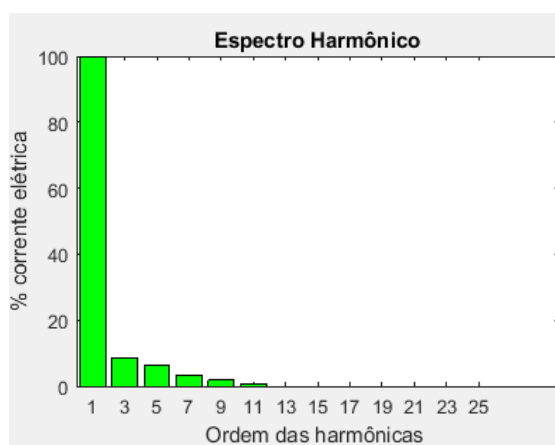


Figura 48 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 21:00 para cargas residências, fase A.

Fonte: Autores

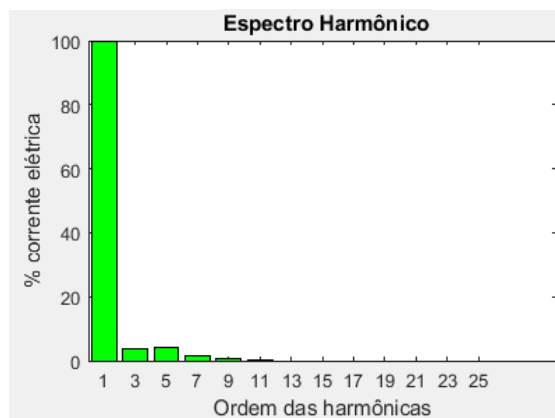


Figura 49 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 21:00 para cargas residências, fase B.

Fonte: Autores

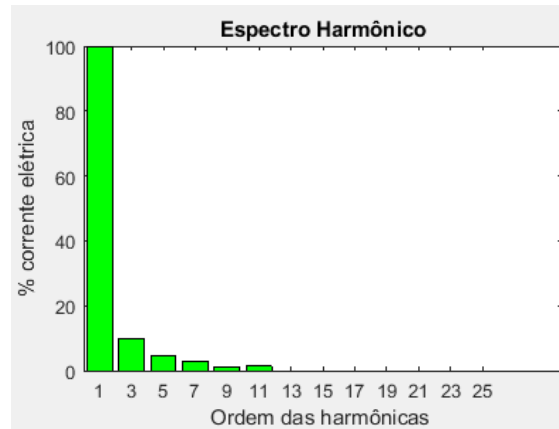


Figura 50 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 21:00 para cargas residências, fase C.
Fonte: Autores

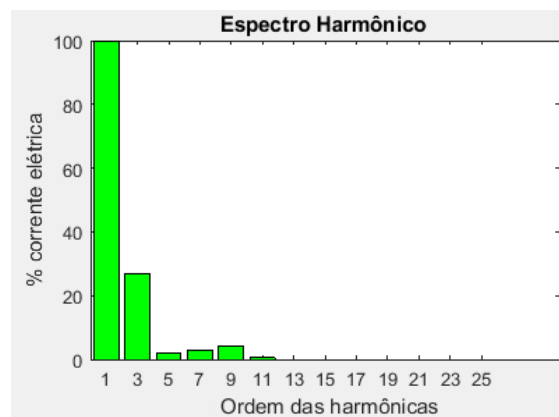


Figura 51 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 21:00 para cargas residências, neutro.
Fonte: Autores

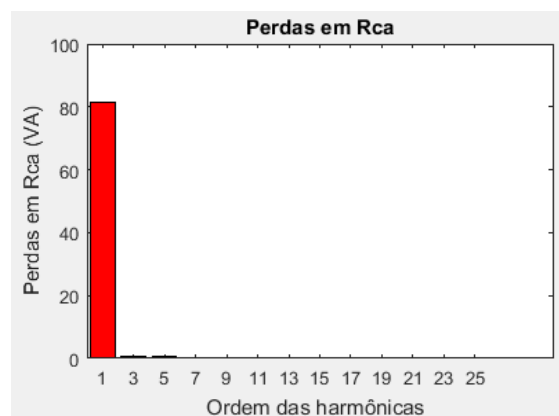


Figura 52 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00, fase A.
Fonte: Autores

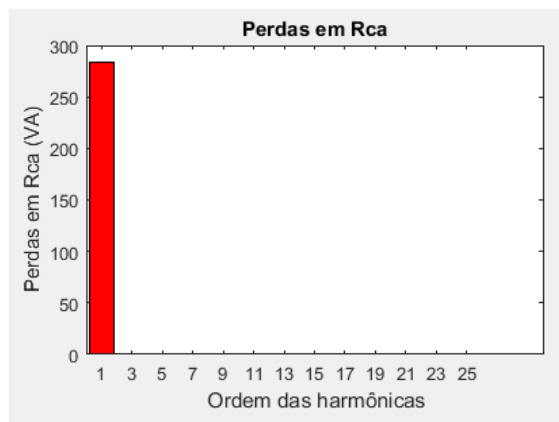


Figura 53 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00, fase B.
Fonte: Autores

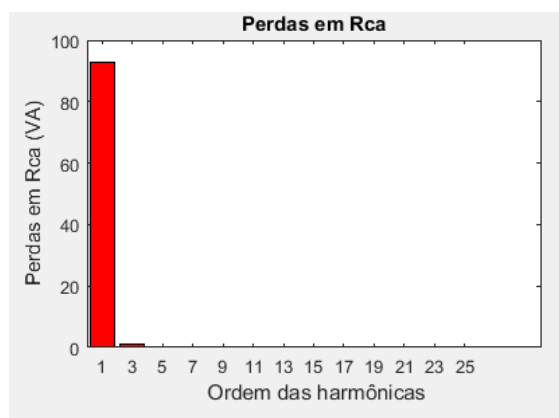


Figura 54 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00, fase C.
Fonte: Autores



Figura 55 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00, neutro.
Fonte: Autores

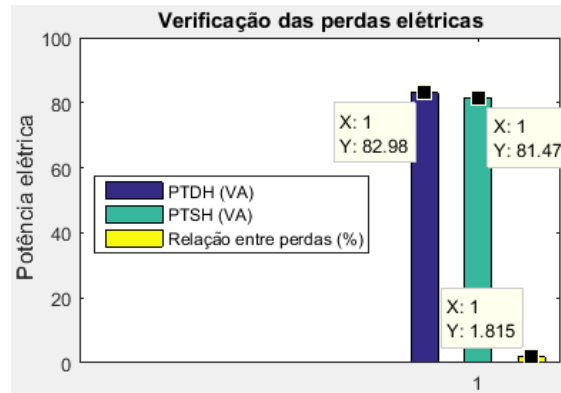


Figura 56 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.

Fonte: Autores

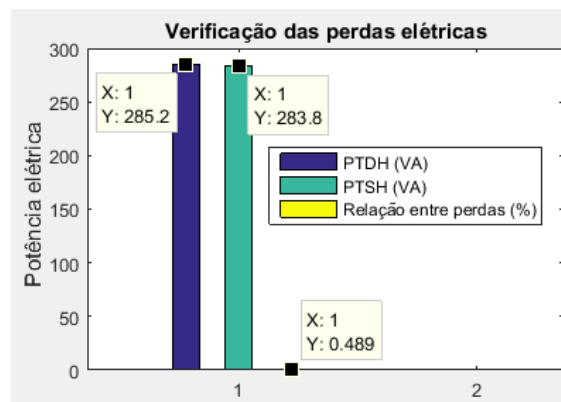


Figura 57 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.

Fonte: Autores

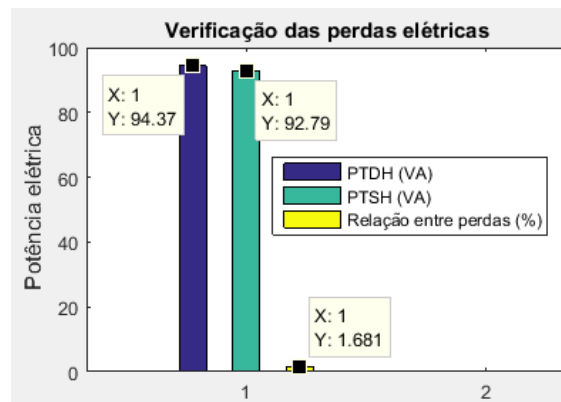


Figura 58 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.

Fonte: Autores

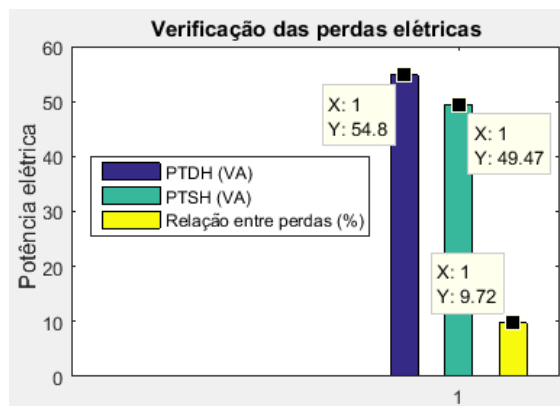


Figura 59 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, no neutro.

Fonte: Autores

Tabela 18 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 21:00.

Ordem das harmônicas	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro	Total
	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)
1	81.4718	283.8124	92.7853	49.4749	507.5444
3	0.7687	0.5389	1.1241	5.0470	7.4787
5	0.5047	0.7091	0.2853	0.0270	1.5261
7	0.1684	0.1086	0.1191	0.0821	0.4782
9	0.0535	0.0295	0.0245	0.1683	0.2758
11	0.0105	0.0087	0.0336	0.0021	0.0549
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fonte: Autores

Tabela 19 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.

Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA)	Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA)	Relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
517.3581	507.5444	1.89%

Fonte: Autores

Para os dados de medição de 02:00 no transformador de 45 KVA 11,4 KV/220 V é apresentado, o espectro harmônico nas Figura 60, 61, 62, 63. A potência dissipada é apresentada nas Figuras 64, 65, 66, 67. As perdas elétricas totais com distorção harmônica; perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas e relação das perdas nas Figuras 68, 69, 70, 71.

Na Tabela 20 é demonstrado as perdas para cada componente harmônica, e as perdas totais devido as interações das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores. Na Tabela 21, é demonstrado os valores das potências totais com distorções harmônicas; os valores das potências totais desconsiderando as distorções harmônicas e o percentual de perdas com as distorções harmônicas.

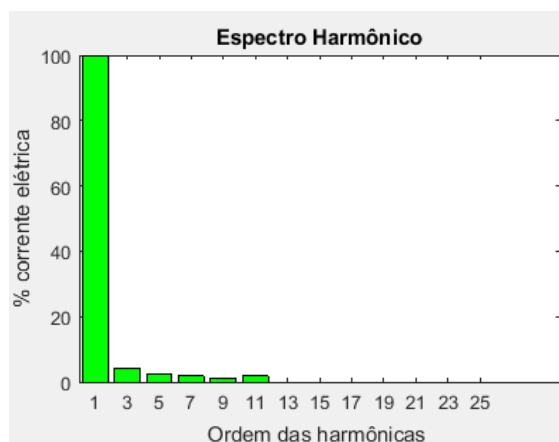


Figura 60 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 02:00 para cargas residências, fase A.

Fonte: Autores

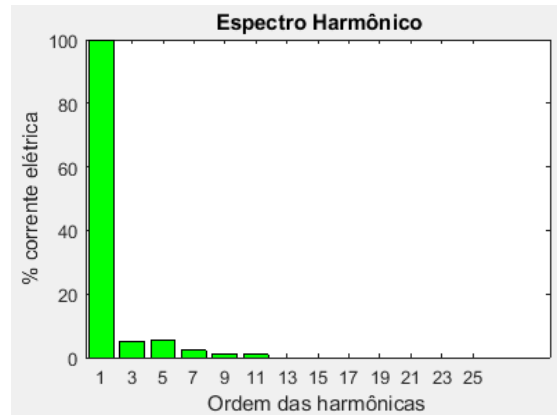


Figura 61 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 02:00 para cargas residências, fase B.
Fonte: Autores

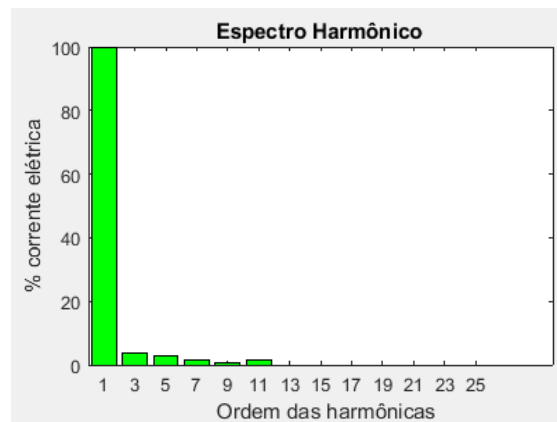


Figura 62 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 02:00 para cargas residências, fase C.
Fonte: Autores

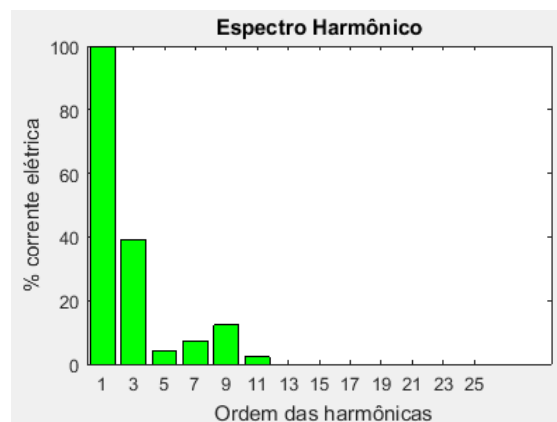


Figura 63 - Espectro harmônico, das medições no transformador 45 KVA as 02:00 para cargas residências, neutro.
Fonte: Autores

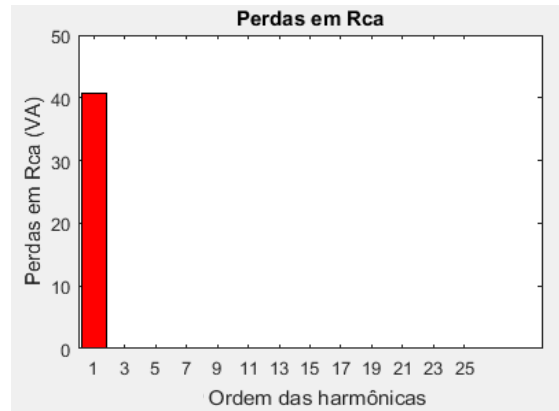


Figura 64 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00, fase A.
Fonte: Autores

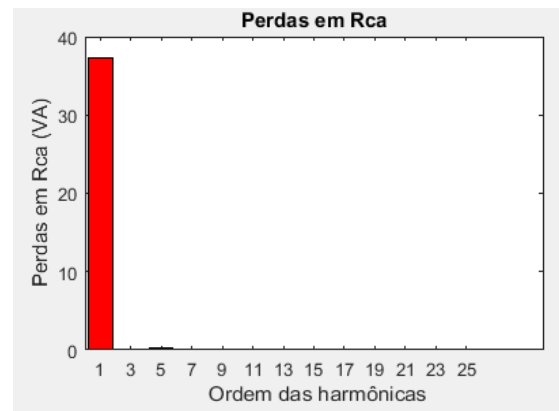


Figura 65 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00, fase B.
Fonte: Autores

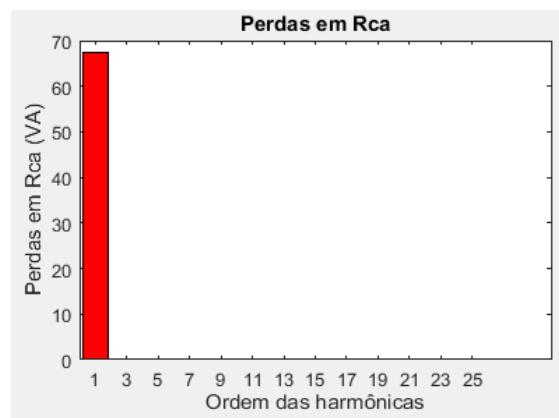


Figura 66 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00, fase C.
Fonte: Autores

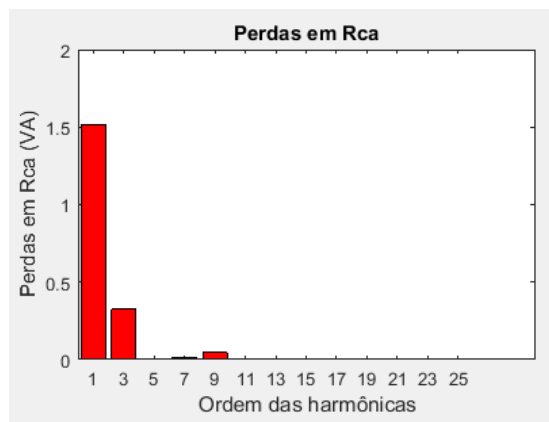


Figura 67 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00, neutro.

Fonte: Autores

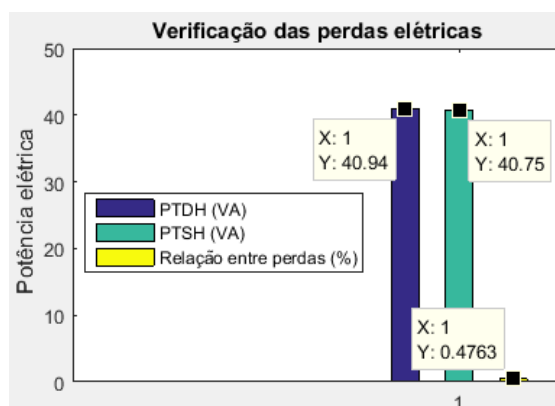


Figura 68 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.

Fonte: Autores

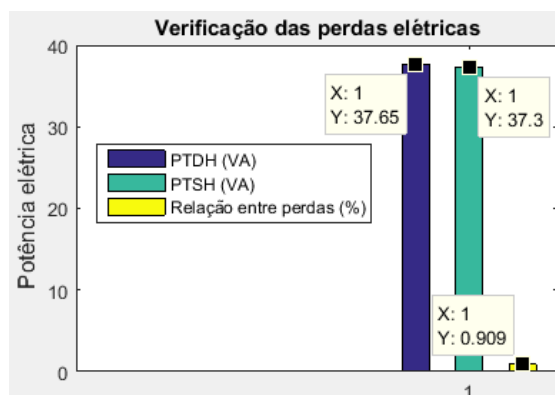


Figura 69 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.

Fonte: Autores

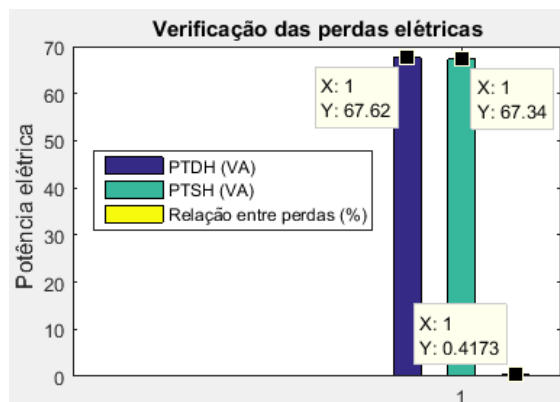


Figura 70 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.

Fonte: Autores

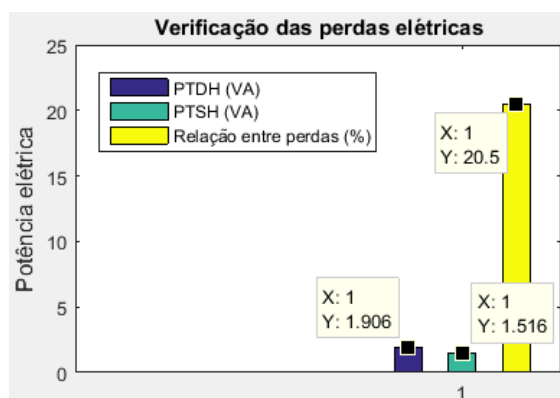


Figura 71 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.

Fonte: Autores

Tabela 20 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no transformador de 45 KVA alimentadora de cargas residenciais, as 02:00.

Ordem das harmônicas	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro	Total
	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)
1	40.7475	37.3028	67.3373	1.5155	146.9031
3	0.0917	0.1191	0.1272	0.3242	0.6622
5	0.0423	0.1757	0.0869	0.0046	0.3095
7	0.0221	0.0327	0.0268	0.0147	0.0963
9	0.0127	0.0083	0.0051	0.0456	0.0717
11	0.0264	0.0064	0.0361	0.0017	0.0706
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fonte: Autores

Tabela 21 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.

Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA)	Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA)	Relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
148.1134	146.9031	0.8171%

Fonte: Autores

6.3.2 Caso 2 – Distribuição de energia elétrica para cargas comerciais

Para cargas elétricas comerciais, foram realizadas as medições em 3 horários, expediente, almoço e madrugada em um transformador 225 KVA. As Figuras 72, 73, 74 demonstram a forma de onda da corrente elétrica para os devidos horários. [19]

O medidor utilizado na análise foi ION 7650, desenvolvido pela Power Measurement, [19] com classe de exatidão D.

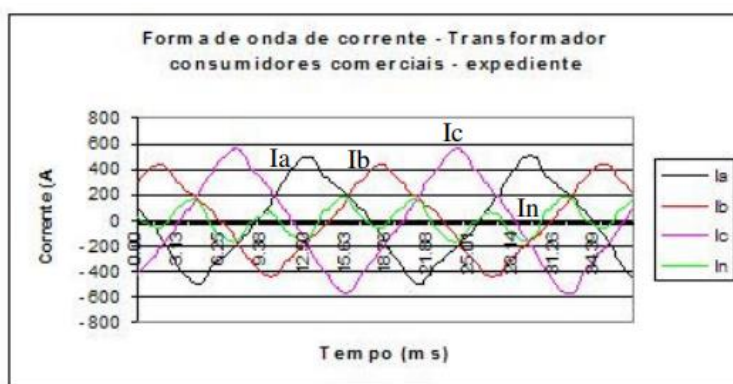


Figura 72 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 225 KVA no período do expediente. Fonte: [19]

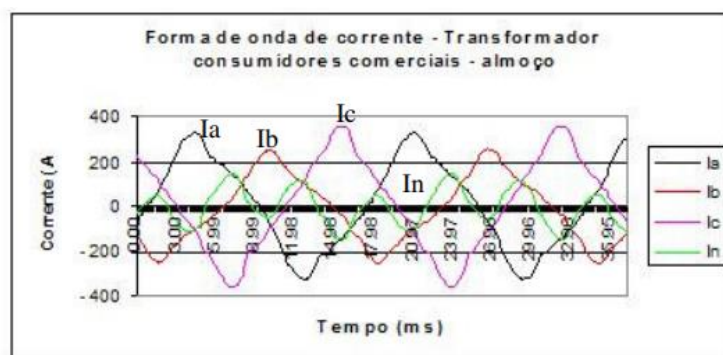


Figura 73 - Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 225 KVA no período do almoço. Figura: [19]

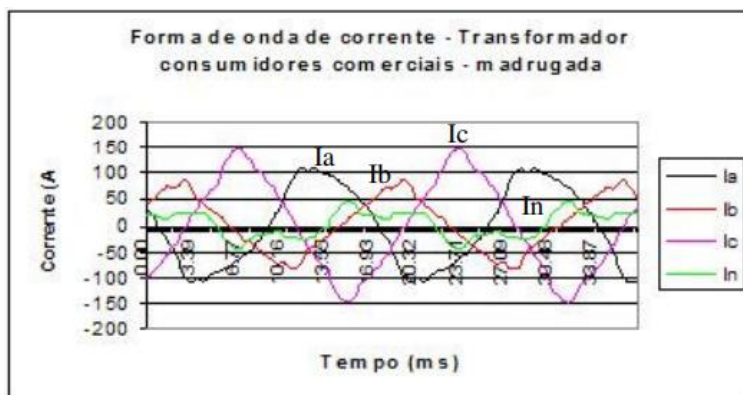


Figura 74 -Forma de onda da corrente elétrica, transformador de 225 KVA no período da madrugada.
Fonte: [19]

A partir da demonstração da forma de onda da corrente elétrica, esta pode ser verificada no domínio da frequência, com intuito de verificar de forma individual cada componente para aplicação no software de simulação de perdas elétricas. Conforme demonstra Tabelas 22, 23, 24.

Tabela 22 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas comerciais de 225 KVA, no período do expediente.

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 307,71$		$I_{rms} = 273,73$		$I_{rms} = 356,42$		$I_{rms} = 105,10$	
	$THD_i = 14,61$		$THD_i = 13,56$		$THD_i = 11,06$		$THD_i = 192,89$	
	F. crista = 1,64		F. crista = 1,62		F. crista = 1,60		F. crista = 1,66	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-9,91	100,00	-126,91	100,00	110,96	100,00	-108,59
3	13,51	-165,64	13,01	-168,07	8,01	-179,58	192,03	10,00
5	4,26	-3,43	2,65	89,54	1,87	-142,30	7,99	-165,05
7	1,99	128,74	1,69	-8,50	1,46	-108,93	5,79	15,92
9	1,41	-87,47	1,28	-34,22	1,15	-64,86	16,97	107,04
11	0,63	47,96	0,37	45,39	0,26	-126,62	1,16	-95,32

Fonte: [19]

Tabela 23 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas comerciais de 225 KVA, no período do almoço.

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 197,72$		$I_{rms} = 144,10$		$I_{rms} = 211,23$		$I_{rms} = 81,91$	
	$THD_i = 16,88$		$THD_i = 19,27$		$THD_i = 16,49$		$THD_i = 187,25$	
	F. crista = 1,65		F. crista = 1,74		F. crista = 1,70		F. crista = 1,79	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-10,93	100,00	-133,06	100,00	117,89	100,00	-100,33
3	15,72	-158,13	17,89	-178,75	14,80	-179,63	183,32	8,6362
5	4,67	13,97	5,66	106,91	6,00	-138,44	5,97	-59,703
7	1,34	159,53	2,14	27,35	2,93	-110,64	7,37	50,83
9	1,81	-77,91	2,09	-10,43	1,11	-85,53	16,23	117,32
11	0,85	77,81	0,77	-25,69	1,20	-139,25	0,76	10,12

Fonte: [19]

Tabela 24 - Dados do espectro harmônico de um transformador alimentador de cargas comerciais de 225 KVA, no período da madrugada.

Harm.	Fase A		Fase B		Fase C		Neutro	
	$I_{rms} = 75,81$		$I_{rms} = 50,66$		$I_{rms} = 88,64$		$I_{rms} = 23,67$	
	THD _i = 13,44		THD _i = 13,87		THD _i = 10,39		THD _i = 64,15	
	F. crista = 1,45		F. crista = 1,68		F. crista = 1,61		F. crista = 1,76	
	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)	Mod. (%)	Ang. (graus)
1	100,00	-13,29	100,00	-136,00	100,00	116,142	100,00	-100,72
3	12,23	-119,91	11,58	111,58	8,04	171,278	61,68	15,68
5	3,88	111,52	4,19	-28,25	6,15	-112,15	14,37	102,52
7	2,43	7,17	3,84	179,82	2,21	-71,183	5,21	178,25
9	2,23	-93,24	4,29	47,21	0,62	-58,031	5,47	154,27
11	1,37	126,85	2,73	-59,71	0,53	-37,73	4,71	133,93

Fonte: [19]

Para o modelo acima foi utilizado nas bases de cálculo, condutores de 800 MCM com 22,6 mm de diâmetro para os condutores de fase e 1000 MCM com 25,2 mm para os condutores de neutro, todos de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1, com comprimento de 100 m.

Para os dados de medição no período do expediente no transformador de 225 KVA 11,4 KV/220 V é apresentado, o espectro harmônico na Figuras 75, 76, 77, 78. A relação de Z/R_{cc} é apresentada nas Figuras 79, 80. A potência dissipada é apresentada na figura 81, 82, 83, 84. As perdas elétricas totais com distorção harmônica; perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas e relação das perdas nas Figuras 85, 86, 87, 88.

A representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência e os valores de resistência total do condutor devido ao efeito pelicular, é dada na Tabela 25 para os condutores 800 MCM e na Tabela 26 para os condutores de 1000 MCM; todos de cobre com resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ com um comprimento de 100m.

Na Tabela 27 é demonstrado as perdas para cada componente harmônica, e as perdas totais devido as interações das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores. Na Tabela 28, é demonstrado os valores das potências totais com distorções harmônicas; os valores das potências totais desconsiderando as distorções harmônicas e o percentual de perdas com as distorções harmônicas.

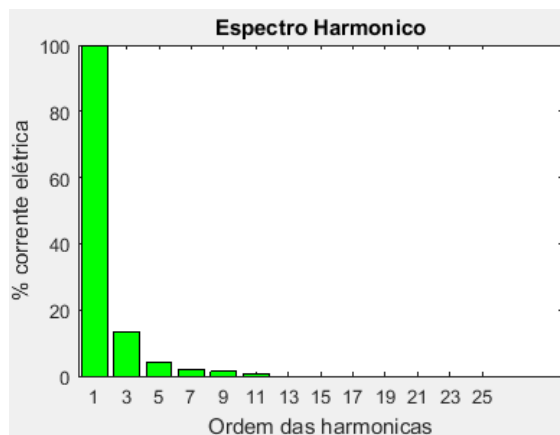


Figura 75 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do expediente para cargas comerciais, fase A.
Fonte: Autores

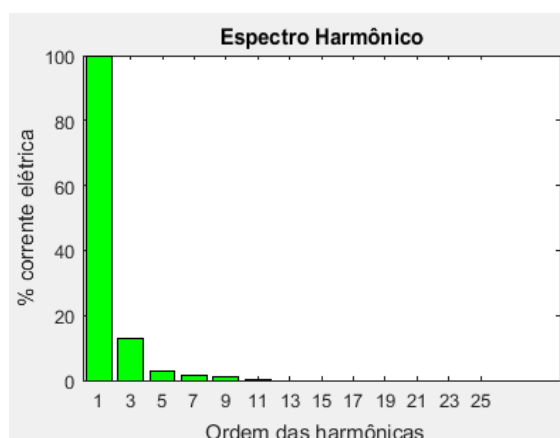


Figura 76 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do expediente para cargas comerciais, fase B.
Fonte: Autores

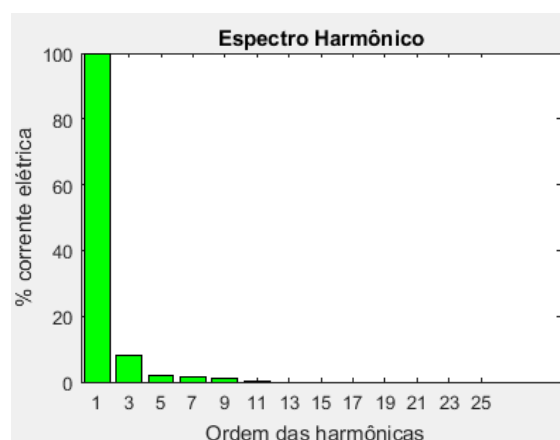


Figura 77 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do expediente para cargas comerciais, fase C.
Fonte: Autores

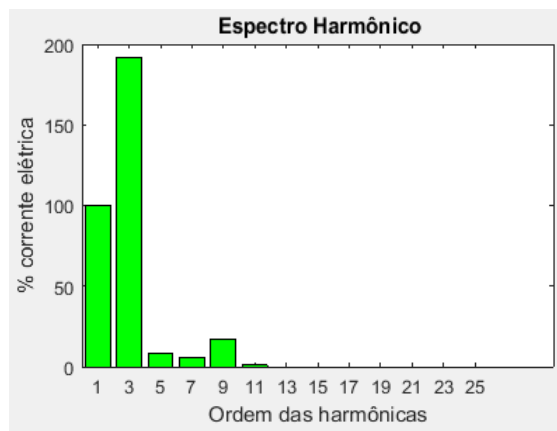


Figura 78 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do expediente para cargas comerciais, neutro.

Fonte: Autores

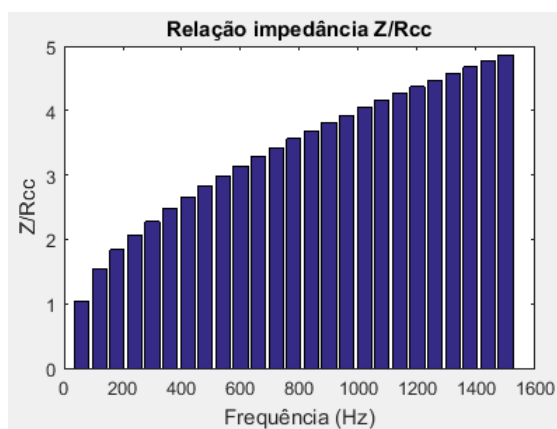


Figura 79 - Z/Rcc para o condutor 800 MCM com 22,6 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.

Fonte: Autores

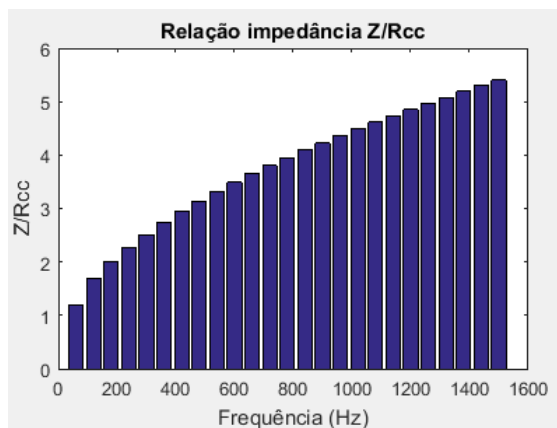


Figura 80 - Z/Rcc para o condutor 1000 MCM com 25,2 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.

Fonte: Autores

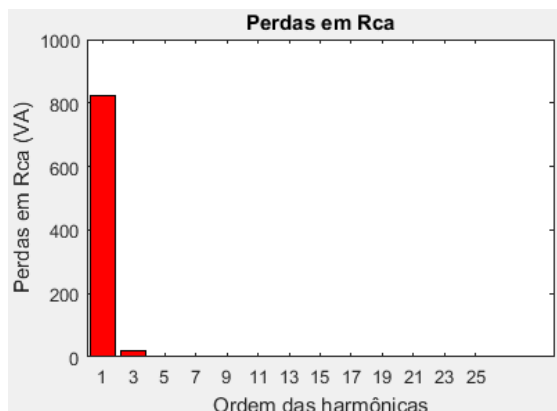


Figura 81 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente, fase A.

Fonte: Autores

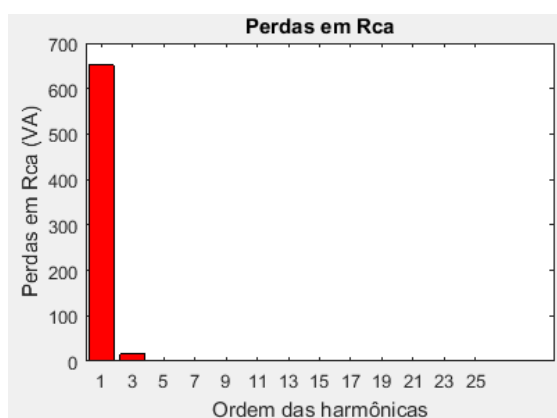


Figura 82 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente, fase B.

Fonte: Autores

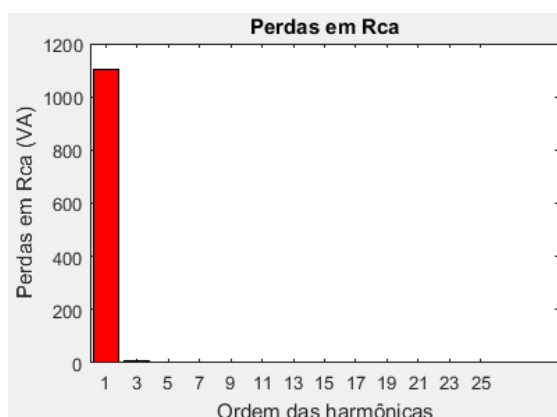


Figura 83 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente, fase C.

Fonte: Autores

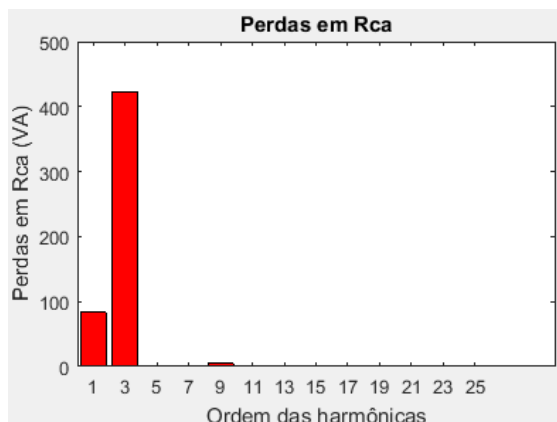


Figura 84 - Representação das perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente, neutro.
Fonte: Autores

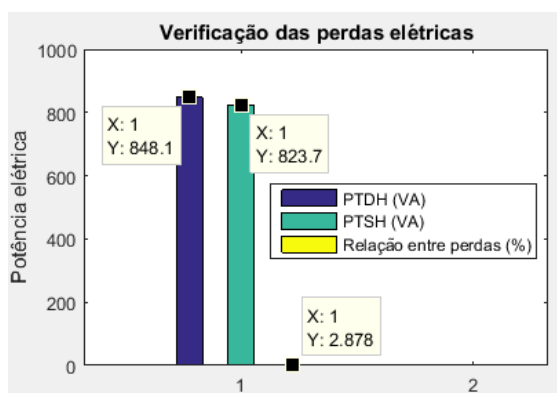


Figura 85 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.
Fonte: Autores

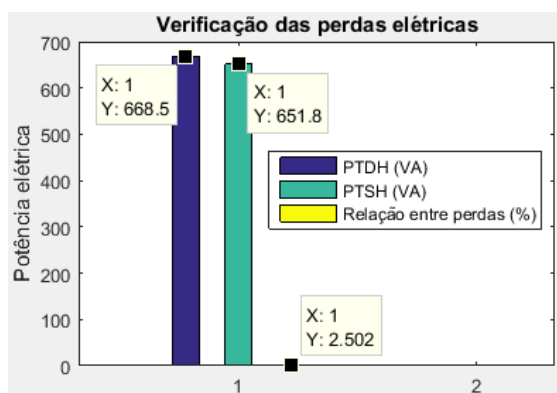


Figura 86 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.
Fonte: Autores

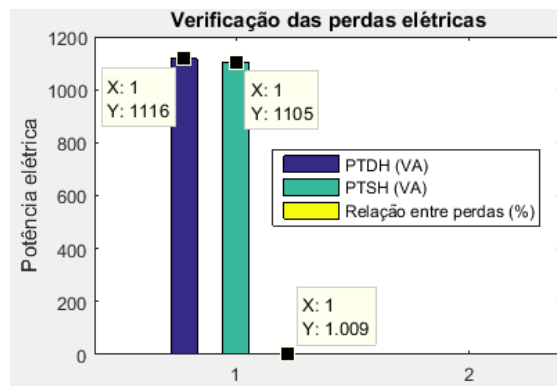


Figura 87 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.

Fonte: Autores

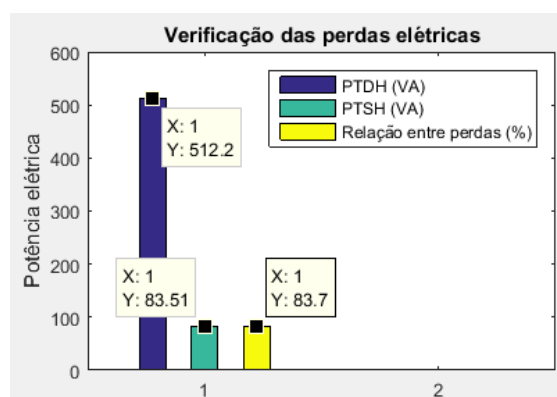


Figura 88 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.

Fonte: Autores

Tabela 25 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistência total do condutor devido ao efeito pelicular.

Ordem das harmônicas	$\frac{Z}{r_{cc}}$	Z_t
0	0	0.0043
1	1.0289	0.0087
3	1.8359	0.0122
5	2.2774	0.0141
7	2.6556	0.0157
9	2.9896	0.0171
11	3.2883	0.0184
13	3.5599	0.0196
15	3.8109	0.0206
17	4.0454	0.0216
19	4.2664	0.0226
21	4.4760	0.0235
23	4.6760	0.0243
25	4.8674	0.0252

Fonte: Autores

Tabela 26 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistencia total do condutor devido ao efeito pelicular.

Ordem das harmônicas	$\frac{Z}{r_{cc}}$	Z_t
0	0	0.0034
1	1.1922	0.0076
3	2.0083	0.0104
5	2.5132	0.0121
7	2.9425	0.0136
9	3.3151	0.0149
11	3.6469	0.0160
13	3.9490	0.0171
15	4.2286	0.0180
17	4.4900	0.0189
19	4.7365	0.0198
21	4.9703	0.0206
23	5.1932	0.0214
25	5.4066	0.0221

Fonte: Autores

Tabela 27 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificada no transformador de 225 KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do expediente.

Ordem das harmônicas	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro	Total
	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)
1	823.6797	651.8084	1105.1	83.5062	2664.0943
3	21.0141	15.4212	9.9000	422.5735	468.9088
5	2.4146	0.7394	0.6000	0.8543	4.6083
7	0.5877	0.3354	0.4000	0.5035	1.8266
9	0.3220	0.2100	0.3000	4.7337	5.5657
11	0.0691	0.0189	0.0000	0.0238	0.1118
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fonte: Autores

Tabela 28 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.

Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA)	Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA)	Relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
3145.1155	2664.0943	15.29%

Fonte: Autores

Para os dados de medição no período do almoço no transformador de 225 KVA é apresentado, o espectro harmônico nas Figuras 89, 90, 91, 92. A potência dissipada é apresentada nas Figuras 93, 94, 95, 96. As perdas elétricas totais com distorção harmônica; perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas e a relação das perdas nas Figuras 97, 98, 99, 100.

Na Tabela 29 é demonstrado as perdas para cada componente harmônica, e as perdas totais devido as interações das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores. Na Tabela 30, é demonstrado os valores das potências totais com distorções harmônicas; os valores das potências totais desconsiderando as distorções harmônicas e o percentual de perdas com as distorções harmônicas.

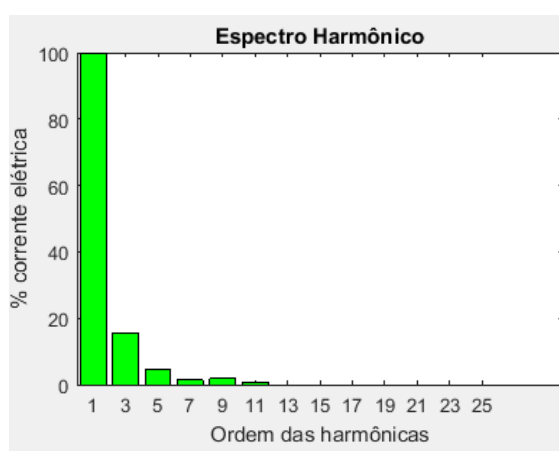


Figura 89 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do almoço para cargas comerciais, fase A.

Fonte: Autores

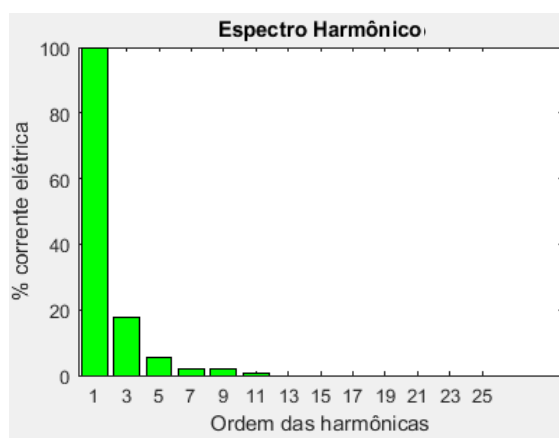


Figura 90 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do almoço para cargas comerciais, fase B.

Fonte: Autores

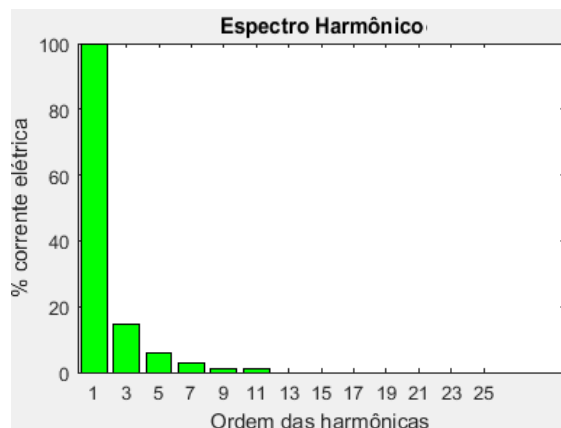


Figura 91 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do almoço para cargas comerciais, fase C.

Fonte: Autores

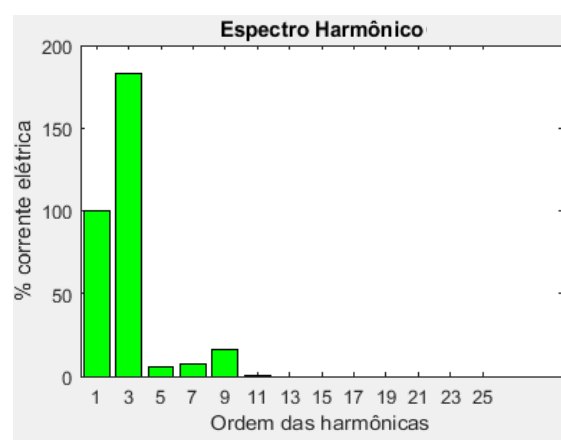


Figura 92 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período do almoço para cargas comerciais, neutro.

Fonte: Autores

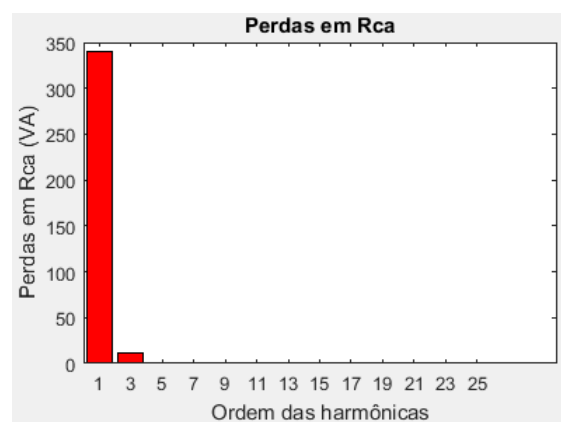


Figura 93 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço, fase A.

Fonte: Autores

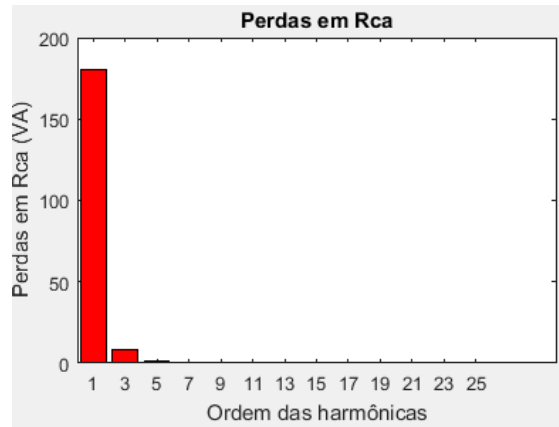


Figura 94 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço, fase B
Fonte: Autores

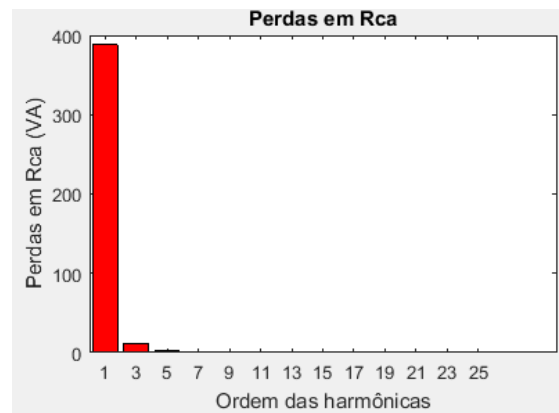


Figura 95 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço, fase C
Fonte: Autores

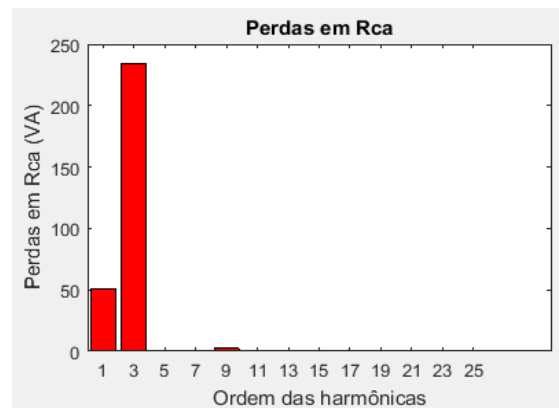


Figura 96 - Perdas elétricas as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço, neutro.
Fonte: Autores

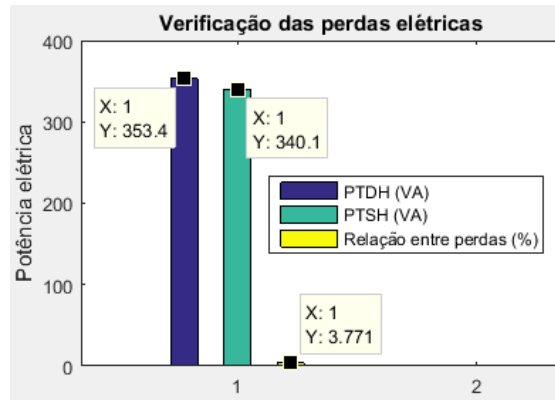


Figura 97 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.

Fonte: Autores

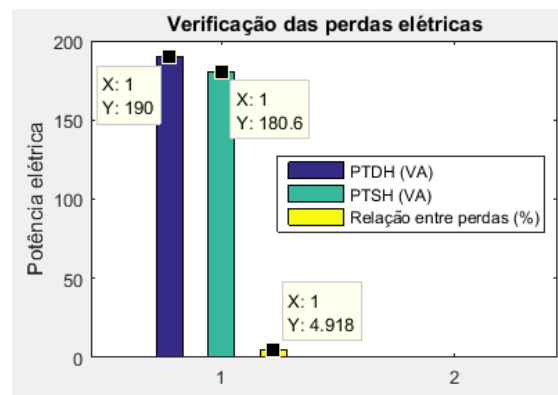


Figura 98 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.

Fonte: Autores

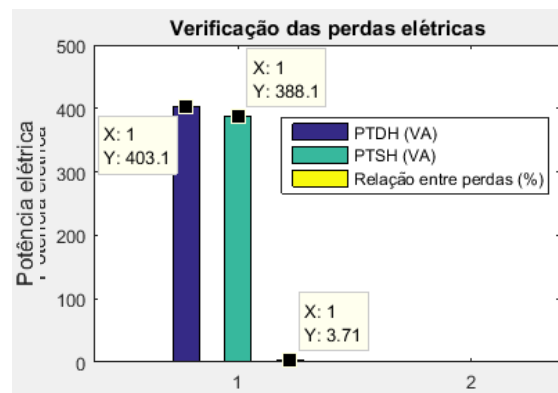


Figura 99 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.

Fonte: Autores

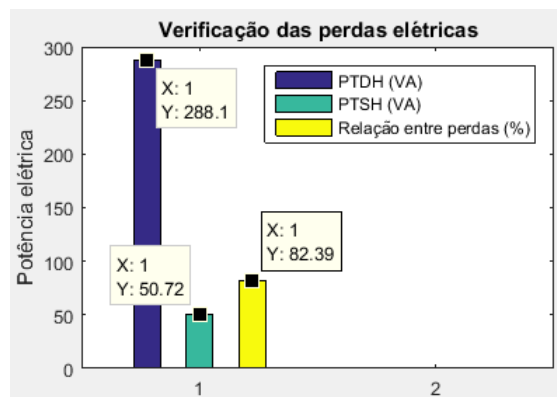


Figura 100 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.

Fonte: Autores

Tabela 29 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no transformador de 225 KVA alimentadora de cargas comerciais, no período do almoço.

Ordem das harmônicas	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro	Total
	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)
1	340.0763	180.6355	388.1382	50.7209	959.5709
3	11.7469	8.0810	11.8837	233.9118	256.6234
5	1.1981	0.9348	2.2572	0.2897	4.6798
7	0.1100	0.1490	0.6004	0.4955	1.3549
9	0.2191	0.1552	0.0940	2.6299	3.0950
11	0.0519	0.0226	0.1181	0.0062	0.1988
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fonte: Autores

Tabela 30 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.

Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA)	Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA)	Relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
1225.5228	959.5709	21.70%

Fonte: Autores

Para os dados de medição no período noturno no transformador de 225 KVA é apresentado, o espectro harmônico nas Figuras 101, 102, 103, 104. A potência dissipada é apresentada nas Figuras 105, 106, 107, 108. As perdas elétricas totais com distorção harmônica; perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas e a relação das perdas nas Figuras 109, 110, 111, 112.

Na Tabela 31 é demonstrado as perdas para cada componente harmônica, e as perdas totais devido as interações das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores. Na Tabela 32, é demonstrado os valores das potências totais com distorções harmônicas; os valores das potências totais desconsiderando as distorções harmônicas e o percentual de perdas com as distorções harmônicas

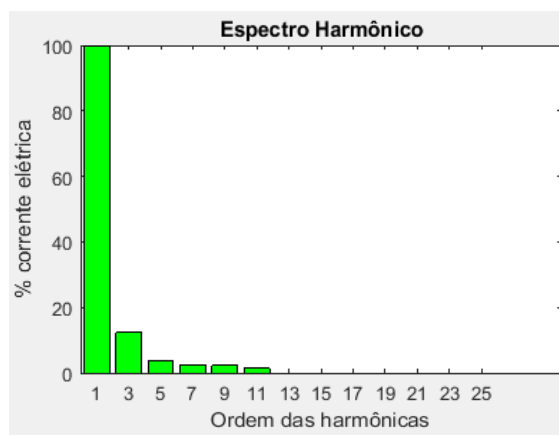


Figura 101 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período madrugada para cargas comerciais, fase A.

Fonte: Autores

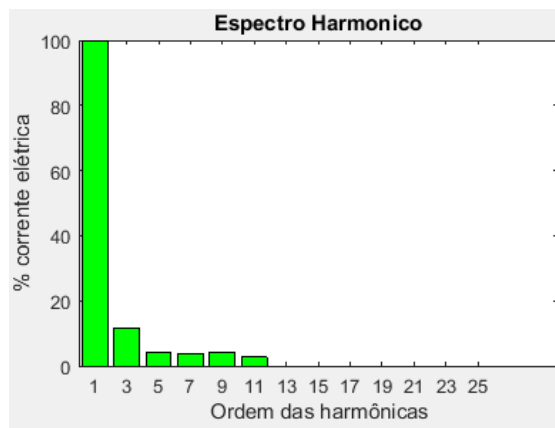


Figura 102 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período madrugada para cargas comerciais, fase B.
Fonte: Autores

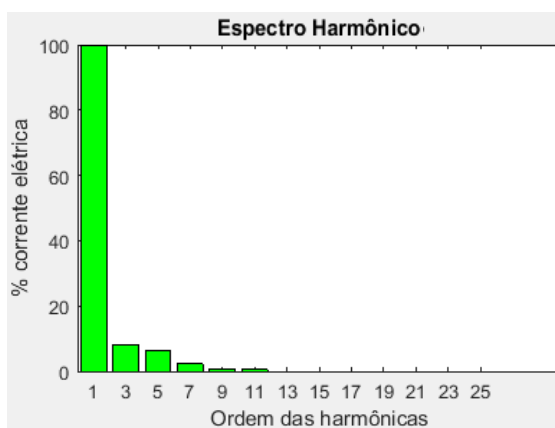


Figura 103 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período madrugada para cargas comerciais, fase C.
Fonte: Autores

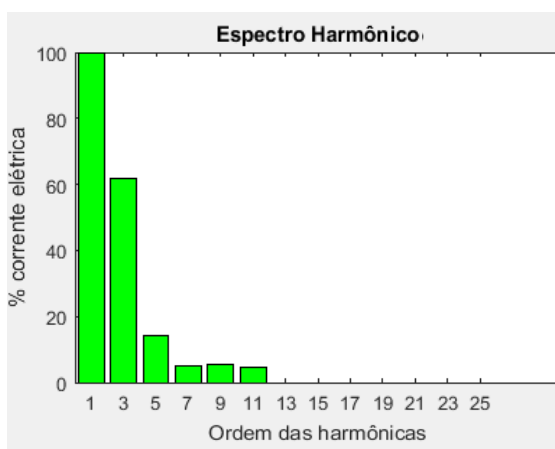


Figura 104 - Espectro harmônico, das medições no transformador 225 KVA no período madrugada para cargas comerciais, neutro.
Fonte: Autores



Figura 105 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada, fase A
Fonte: Autores



Figura 106 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada, fase B
Fonte: Autores



Figura 107 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada, fase C.
Fonte: Autores

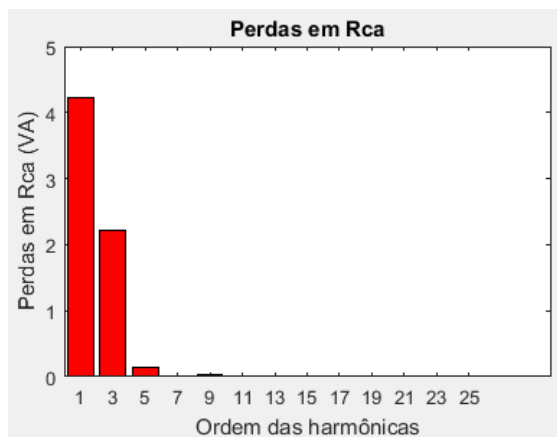


Figura 108 - Perdas elétricas para as distorções harmônicas verificadas no transformador de 225KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada, neutro
Fonte: Autores

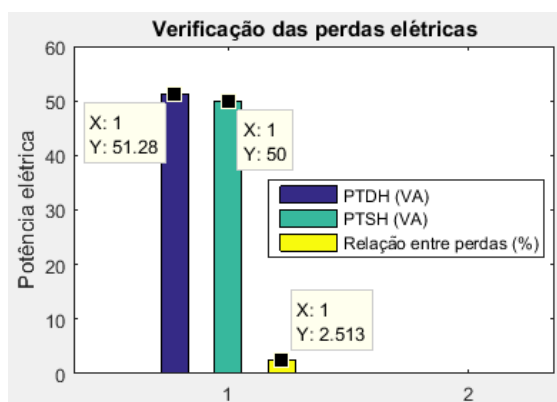


Figura 109 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase A.
Fonte: Autores

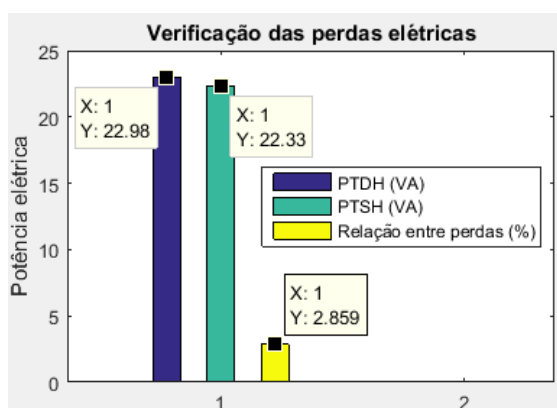


Figura 110 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase B.
Fonte: Autores

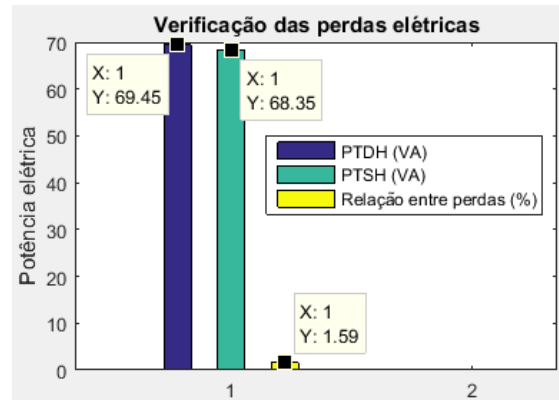


Figura 111 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, da fase C.

Fonte: Autores

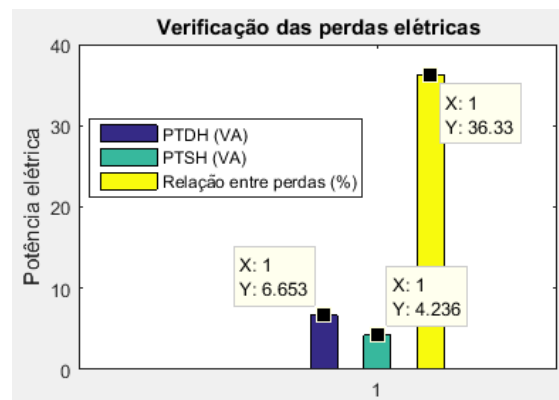


Figura 112 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, do neutro.

Fonte: Autores

Tabela 31 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificada no transformador de 225 KVA alimentadora de cargas comerciais, no período da madrugada.

Ordem das harmônicas	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro	Total
	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)	Potência elétrica dissipada (VA)
1	49.9952	22.3257	68.3494	4.2355	144.9058
3	1.0453	0.4185	0.6176	2.2113	4.2927
5	0.1216	0.0633	0.4176	0.1402	0.7427
7	0.0532	0.0593	0.0601	0.0207	0.1933
9	0.0489	0.0808	0.0052	0.0249	0.1598
11	0.0198	0.0352	0.0041	0.0199	0.0790
13	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fonte: Autores

Tabela 32 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.

Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA)	Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA)	Relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
150.3733	144.9058	3.63%

Fonte: Autores

6.3.3 Caso 3 - Distorções harmônicas em sistemas industriais

O ensaio realizado, tem o intuito de demonstrar as perdas elétricas devido as distorções harmônicas em uma fábrica de cerveja e gêneros alimentícios. [21]

As cargas verificadas são referentes a dois centros de controle de motores (CCM), onde estão presentes diversos equipamentos tiristorizados e máquinas elétricas. A verificação das perdas foram em dois setores específicos: CCM do processo de filtração e CCM da Adega de fermentação. [21]

Para o CCM do processo de Filtração, a carga instalada, referente a máquinas elétricas e inversores de frequência é equivalente a 464,54 KW. [21]

Para o CCM do processo de Adega de fermentação, a carga instalada, referente a máquinas elétricas, e inversores de frequência é equivalente a 349,5 KW. [21]

As medições foram realizadas com o alicate amperímetro 2060 LEM. [21]

Para base de cálculos, foram utilizados condutores de 3 x 95 mm², com o diâmetro equivalente a 11 mm, de cobre, com resistividade $1,52 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, conforme fabricante, e permeabilidade magnética do meio referente a 1, com comprimento de 30 m. [21]

As Figuras 113 e 118 demonstram a forma de onda da corrente elétrica. Já as Figuras 114 e 119 demonstram o espectro da forma de onda. As Figuras 115 e 120 demonstram os valores de relação entre as resistências R_{ca}/R_{cc} . As Figuras 116 e 121 demonstram os valores de perdas elétricas para cada ordem harmônica. As Figuras 117 e 122 demonstram as perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica. A Tabela 33 tem o intuito de demonstrar os dados do espectro harmônico ensaiado.

Nas Tabelas 34 e 36 são demonstradas as perdas por cada componente harmônica, e as perdas totais devido as interações das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores. Nas Tabelas 35 e 37, são demonstrados os valores das potências totais com distorções harmônicas; os valores das potências totais

desconsiderando as distorções harmônicas e o percentual de perdas com as distorções harmônicas. A representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência e os valores de resistência total do condutor devido ao efeito pelicular, é dada na Tabela 38 para os condutores 3 x 95mm² de cobre com resistividade de $1,52 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ com um comprimento de 30m.

Tabela 33 - Espectro harmônico para as cargas do CCM do processo de filtração; Espectro harmônico para as cargas do CCM da adega.

Harmônicas Filtração	Fase	Harmônicas Adega	Fase
	Irms= 195,8A		Irms= 51,7A
	TDHi= 32,5%		TDHi= 37,8%
	Modulo (%)		Modulo (%)
1	94,6	1	92,6
3	6,85	3	2,79
5	30,8	5	32,84
7	5,06	7	14,5
9	0,94	9	0,46
11	6,81	11	7,66
13	1,98	13	5,18
15	0,092	15	0,11
17	2,73	17	4,35
19	0,80	19	3,69
21	0,17	21	0,19
23	1,19	23	3,25
25	0,45	25	2,14

Fonte: Adaptado [21]

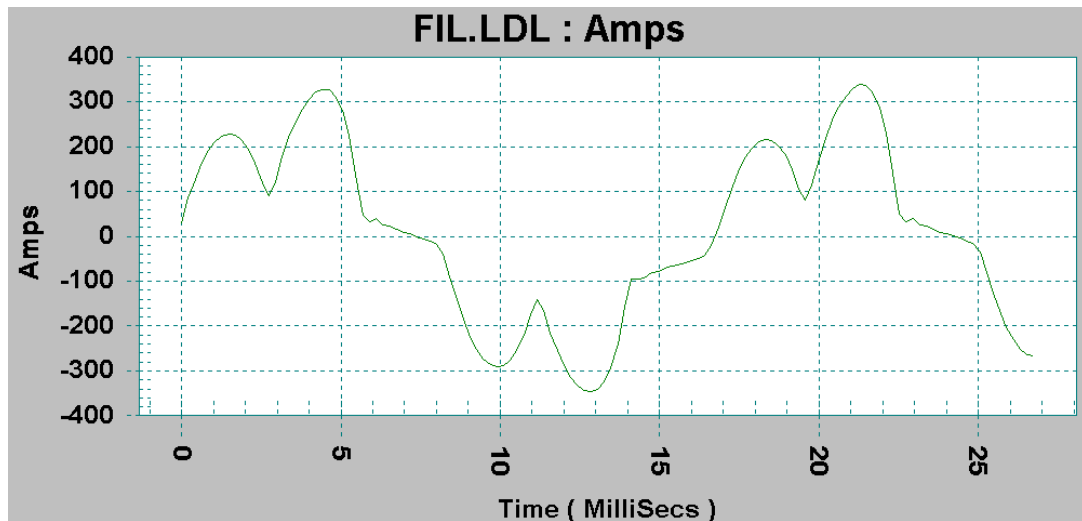


Figura 113 - Forma de onda do centro de controle de motores (CCM) do sistema de filtração 1 e 2.
Fonte: [21]

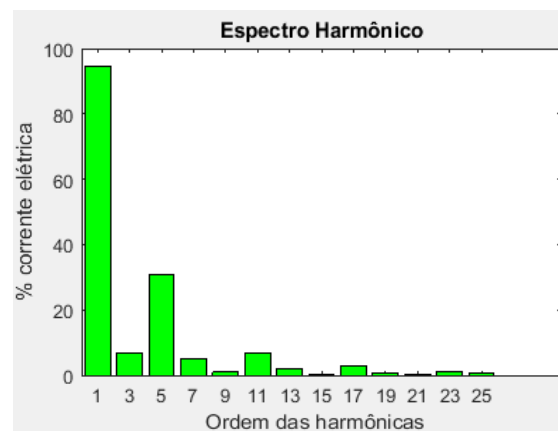


Figura 114 - Espectro harmônico centro de controle de motores (CCM) do sistema de filtração 1 e 2.
Fonte: Autores

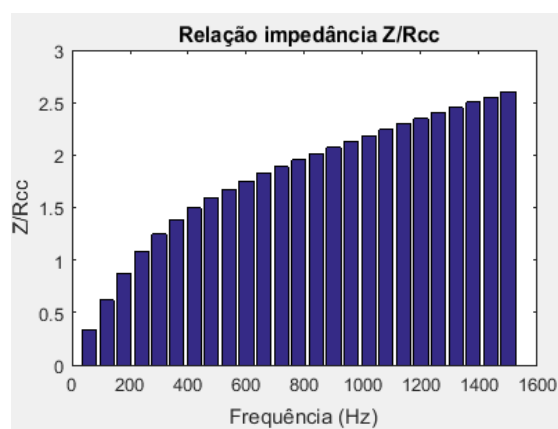


Figura 115 - Z/R_{cc} para o condutor 95 mm^2 com 11 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,52 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.
Fonte: Autores

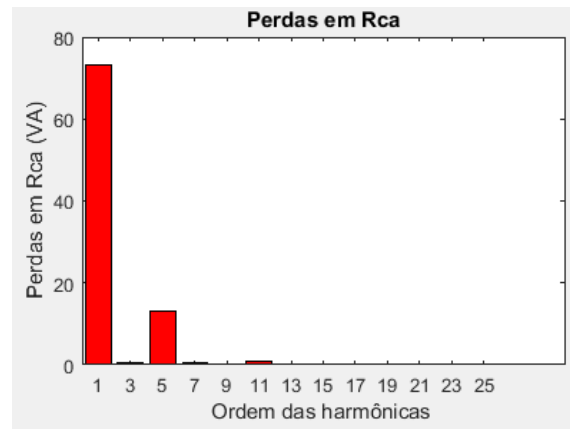


Figura 116 - Perdas elétricas para cada componente harmônica do centro de controle de motores (CCM) do sistema de filtração 1 e 2.
Fonte: Autores

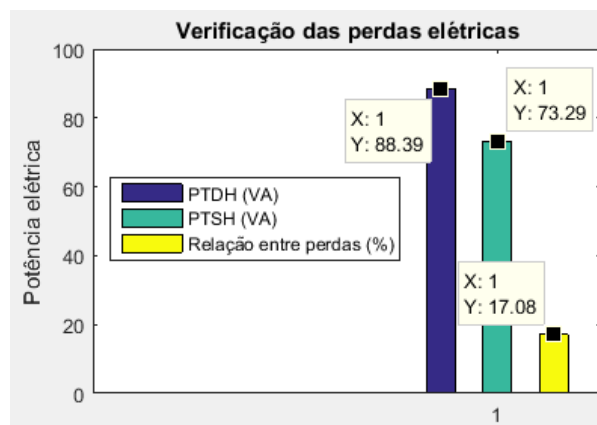


Figura 117 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
Fonte: Autores

Tabela 34 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no centro de controle de motores (CCM) do sistema de filtração 1 e 2.

Ordem das harmônicas	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro	Total
	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada
1	73.2932	73.2932	73.2932	73.2932	219.8796
3	0.5386	0.5386	0.5386	0.5386	2.1544
5	13.0808	13.0808	13.0808	13.0808	52.3232
7	0.3920	0.3920	0.3920	0.3920	1.5680
9	0.0145	0.0145	0.0145	0.0145	0.0580
11	0.8028	0.8028	0.8028	0.8028	3.2112
13	0.0710	0.0710	0.0710	0.0710	0.2840
15	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0008
17	0.1456	0.1456	0.1456	0.1456	0.5824
19	0.0129	0.0129	0.0129	0.0129	0.0516
21	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0024
23	0.0304	0.0304	0.0304	0.0304	0.1216
25	0.0045	0.0045	0.0045	0.0045	0.0180

Fonte: Autores

Tabela 35 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.

Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA)	Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA)	Relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
280.2552	219.8796	21.54%

Fonte: Autores

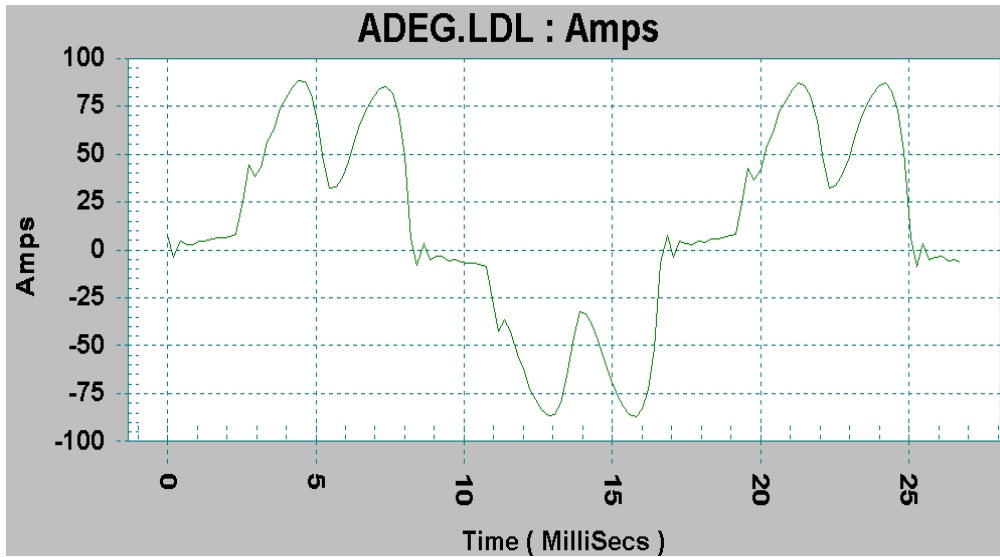


Figura 118 - Forma de onda do centro de controle de motores (CCM) da Adeg.
Fonte: [21]

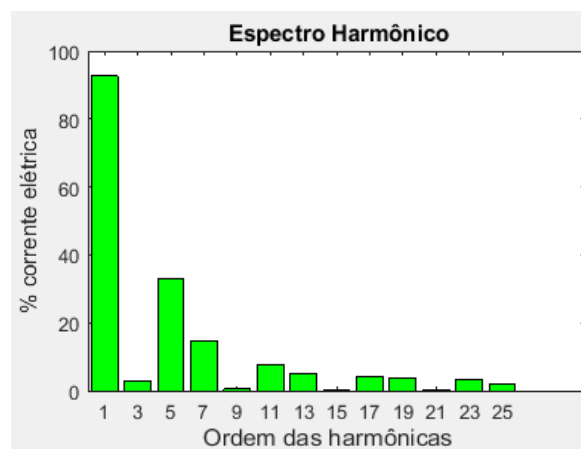


Figura 119 - Espectro harmônico centro de controle de motores (CCM) da Adeg.
Fonte: Autores

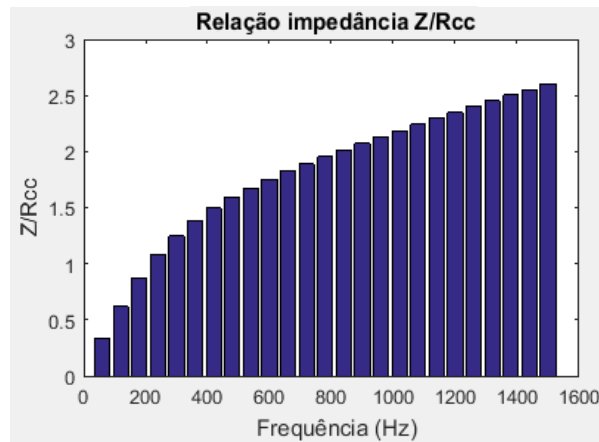


Figura 120 - Z/Rcc para o condutor 95 mm² com 11 mm de diâmetro, de cobre com uma resistividade de $1,52 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ e permeabilidade relativa equivalente a 1.

Fonte: Autores

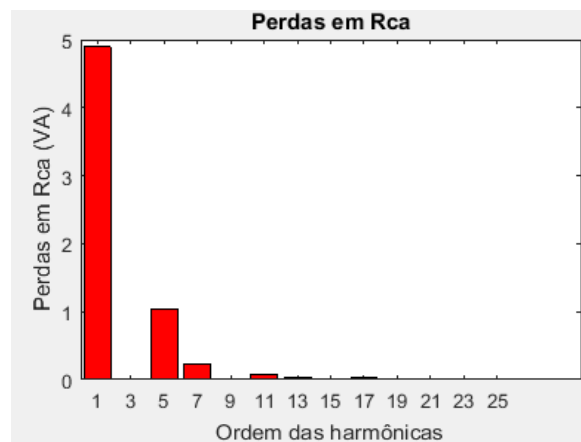


Figura 121 - Perdas elétricas para cada componente harmônica do centro de controle de motores (CCM) da adegá.

Fonte: Autores

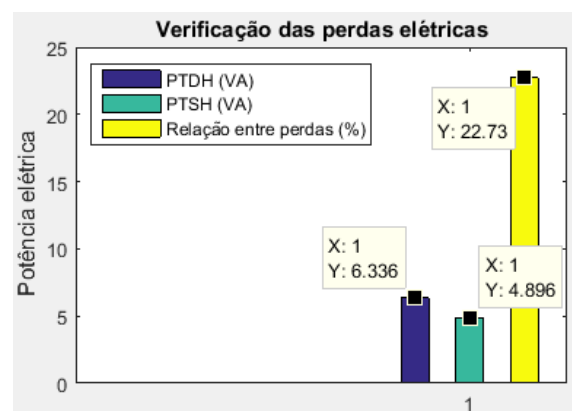


Figura 122 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica PTDH; Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas; relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.

Fonte: Autores

Tabela 36 - Dados de perdas elétricas para cada componente harmônica verificadas no centro de controle de motores (CCM) da adega.

Ordem das harmônicas	Fase A	Fase B	Fase C	Total
	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada	Potência elétrica dissipada
1	4.8962	4.8962	4.8962	19.5848
3	0.0062	0.0062	0.0062	0.0248
5	1.0368	1.0368	1.0368	4.1472
7	0.2244	0.2244	0.2244	0.8976
9	0.0002	0.0002	0.0002	0.0008
11	0.0708	0.0708	0.0708	0.2832
13	0.0339	0.0339	0.0339	0.1356
15	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	0.0258	0.0258	0.0258	0.1032
19	0.0192	0.0192	0.0192	0.0768
21	0.0001	0.0001	0.0001	0.0004
23	0.0158	0.0158	0.0158	0.0632
25	0.0071	0.0071	0.0071	0.0284

Fonte: Autores

Tabela 37 - Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA), perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA), relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas, para o sistema trifásico.

Perdas elétricas totais com distorção harmônica (PTDH), (VA)	Perdas elétricas sem considerar as distorções harmônicas (PTSH), (VA)	Relação das perdas com distorção harmônica pelas perdas sem distorções harmônicas.
25.3460	19.5848	22.73%

Fonte: Autores

Tabela 38 - Representação do aumento da impedância aparente tomando como referência a componente contínua da resistência; Resistência total do condutor devido ao efeito pelicular.

Ordem das harmônicas	$\frac{Z}{r_{cc}}$	Z_t
0	0	0.0016
1	0.3356	0.0021
3	0.8718	0.0030
5	1.2487	0.0036
7	1.4967	0.0040
9	1.6766	0.0043
11	1.8230	0.0045
13	1.9525	0.0047
15	2.0726	0.0049
17	2.1867	0.0051
19	2.2961	0.0053
21	2.4017	0.0054
23	2.5037	0.0056
25	2.6022	0.0058

Fonte: Autores

7. RESULTADOS E CONCLUSÕES

De acordo com os dados coletados nas simulações para os 3 modelos de carga, pode-se verificar um aumento significativo dos valores de perdas devido as interações do efeito pelicular com as distorções harmônicas.

Para o caso 1, modelo de cargas residenciais, pode se verificar 5.70% de aumento de perdas devido a interação das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores, em sua pior condição devido as distorções harmônicas.

Para o caso 2, modelo de cargas comerciais, pode ser visto 21.70%% de perdas elétricas devido a interação das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores, verificado na pior condição de TDHi.

Para o caso 3, modelo de carga industrial, pode ser visto 22.73% de perdas devido a interação das distorções harmônicas com o efeito pelicular em condutores, sendo verificado a pior condição de TDHi.

Nos casos residenciais, as distorções harmônicas conjugadas com o efeito pelicular, não apresentam valores exorbitantes de perdas. Mas devido ao avanço da eletrônica e a comercialização desses equipamentos, é possível realizar uma projeção de perdas acentuadas num futuro. Nos casos comerciais e industriais, já é possível visualizar um aumento significativo nos valores de perdas de potência elétrica devido às distorções harmônicas conjugados com efeito pelicular. Com isso, conforme o objetivo descreve, realizar o mapeamento das perdas elétricas devido as interações, é necessário para uma análise de viabilidade de mitigação dessas perdas.

Portanto, é possível verificar as interações do efeito pelicular com as distorções harmônicas através das demonstrações apresentadas. Visto que, na literatura, esses efeitos são somente analisados individualmente, o trabalho realizado vem evidenciar a consequência das interações conjugadas desses efeitos, gerando assim uma contribuição para a comunidade científica, permitindo a simulação para qualquer modelo de carga gerando uma resposta detalhada através do software com confiabilidade e rapidez.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] http://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320292_2012/Cap2.pdf [17/05/2018]
- [2] http://sites.if.ufrj.br/esoares/wp-content/uploads/sites/50/2014/08/7-Fontes_de_Campo_Magnetico.pdf [17/05/2018]
- [3] http://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320292_2012/Cap8.pdf [20/05/2018]
- [4] Hayt & Buck, Eletromagnetismo, 8ª edição
- [5] http://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320292_2012/Cap5.pdf [21/05/2018]
- [6] http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9 [24/06/2018]
- [7] Qualidade de energia elétrica – Joaquim Eloir Rocha – 2006
- [8] http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCap.pdf [25/06/2018]
- [9] Estimativa de estados de distorções harmônicas em sistemas elétricos de potência utilizando estratégias evolutivas.
- [10] <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/mcap05.pdf> [26/06/2018]
- [11] <http://macbeth.if.usp.br/~gusev/indutancia> [15/07/2018]
- [12] <http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/121.pdf> [21/07/2018]
- [13] <http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/view/18164/6992> [21/07/18]
- [14] Harmônicas nas instalações elétricas – Causas, efeitos e soluções – Procobre (Instituto brasileiro do cobre) [07/09/18]
- [15] Eletrônica de potência: Análise e projetos de circuitos – HART, Daniel W.
- [16] http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9
- [17] Circuitos elétricos 8ª edição – Nilsson | Riedel

[18] Harmônicos em Sistemas Elétricos - Ruth Pastôra Saraiva Leão, Fernando Luiz Marcelo Antunes e Raimundo Furtado Sampaio

[19]<https://www.ppgee.ufmg.br/documentos/Defesas/606/versaoFinalIgor.pdf>
[13/10/2018]

[20] www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro/cursos/et720/Cap5-parte1.pdf [13/10/2018]

[21] GUEDES JUNIOR, O. M. ; SOUZA, Teófilo Miguel de . ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM BARRAMENTO INDUSTRIAL DE UMA EMPRESA ALIMENTÍCIA. In: XXXIII International Sodebras Congress, 2015, Salvador. XXXIII International Sodebras Congress, 2015. v. XXXIII. p. 1-5.[01/09/2018]

[22] IEC 61000-3-2, 2005[29/09/2018]

[23]IEEE 519, 1992[29/09/2018]

[24]https://www.standrews.ac.uk/~jcgl/Scots_Guide/audio/skineffect/page1.html[28/10/2018]

[25] Matlab R2015a

ANEXO

```

%% Modelamento efeito pelicular
d=il7*1e-3           % diametro do condutor x1e-3 para transformar em mm
com=il8*1e-3        % comprimento do condutor x1e-3 para transformar em mm
m=il9               % Permeabilidade magnética relativa do condutor
res=il10            % Resistividade do condutor
fv1=[60:60:1500];  % Frequencia do sistema (tendo inicio e final, com
incrementos de 60hz)
w=2*pi*fv1         % Velocidade angular
a=d/2              % Raio do condutor
area=pi*(a^2)      % Area condutor
% Calculo da profundidade pelicular %
mr=pi*4e-7         % Permeabilidade magnética do ar
me=m*mr            % permeabilidade magnética especifica
p= sqrt((2*res)./(me*w)); % Calculo profundidade pelicular dos
condutores (p)
resito=((res*com)/area) % resistencia em corrente contínua%
%% Relação impedancia do condutor em função da resistencia em corrente CC
t=(1-i)./p         % Descoberta valor de T
z=((t*a)/2).*((bessely (0,t*a))./(bessely (1,t*a))) % Equação de
Bessel para verificação do efeito pelicular em condutores
abs(z)
%% Plotagem curva Z/Rccaxes(handles.axes1);
axes(handles.axes2);
bar(fv1,abs(z))
title('Relação impedância Z/Rcc')
xlabel ('Frequência (Hz)')
ylabel ('Z/Rcc')

%% calculos para determinar a corrente RMS real das harmonicas%%
inominal=il3
ihl11=il11/100*inominal;
ihl12=il12/100*inominal;
ihl13=il13/100*inominal;
ihl14=il14/100*inominal;
ihl15=il15/100*inominal;
ihl16=il16/100*inominal;
ihl17=il17/100*inominal;
ihl18=il18/100*inominal;
ihl19=il19/100*inominal;
ihl20=il20/100*inominal;
ihl21=il21/100*inominal;
ihl22=il22/100*inominal;
ihl23=il23/100*inominal;

%% Determinação da Frequencia do sistema
fv=linspace(1,25,13)

%% Bar graph da corrente nominal do sistema
ilt=[il11;il12;il13;il14;il15;il16;il17;il18;il19;il20;il21;il22;il23];
axes(handles.axes1);
bar(fv,ilt,'g')
title('Espectro Harmônico')
xlabel ('Ordem das harmônicas')
ylabel ('% corrente elétrica')

```

```

%% Corrente eletrica
ihl=[ihl11;ihl12;ihl13;ihl14;ihl15;ihl16;ihl17;ihl18;ihl19;ihl20;ihl21;ihl
22;ihl23];
hul1=[ihl11;0;ihl12;0;ihl13;0;ihl14;0;ihl15;0;ihl16;0;ihl17;0;ihl18;0;ihl1
9;0;ihl20;0;ihl21;0;ihl22;0;ihl23];
hul=hul1
%% Potencia elétrica calculada
impedancia=resito.*abs(z) + resito
pot=impedancia.*(hul.^2)'
pottotal=sum(pot)
%% Plotagem grafico de perdas
pot1=[pot(1,1) pot(1,3) pot(1,5) pot(1,7) pot(1,9) pot(1,11) pot(1,13)
pot(1,15) pot(1,17) pot(1,19) pot(1,21) pot(1,23) pot(1,25)]
v=[1:2:25]
axes(handles.axes3);
bar(v,pot1,'r')
title('Perdas em Rca')
xlabel ('Ordem das harmônicas')
ylabel ('Perdas em Rca (VA)')

%% Indicadores de distorção
dth=((sqrt((ihl12^2)+(ihl13^2)+(ihl14^2)+(ihl15^2)+(ihl16^2)+(ihl17^2)+(ih
l18^2)+(ihl19^2)+(ihl20^2)+(ihl21^2)+(ihl22^2)+(ihl23^2)))/ihl11)
dhti=dth*100
irms=ihl11*(sqrt(1+(dth)^2))
in=il2/il1
dtt=(dhti*ihl11)/in
dteste=sqrt(((sqrt(sum(hul.^2)))^2-ihl11^2)/ihl11^2)
%% Perdas com harmonicas e sem harmonicas
perdarca=abs(pottotal)
perdarcc=(resito*(inominal^2))
relacaorcarcc=((perdarca-perdarcc)/perdarca)*100
Z60=z(1,1)
impedancia60=abs(Z60)
resistencia60=impedancia60*resito + resito
perdas60=((hul(1,1))^2)*resistencia60
relacaorca60=((perdarca-perdas60)/perdarca)*100
y=[perdarca perdas60 relacaorca60
0,0,0]
axes(handles.axes4);
bar(y,0.5)
title('Verificação das perdas elétricas')
ylabel ('Potência elétrica')
legend('PTDH (VA)', 'PTSH (VA)', 'Relação entre perdas (%)')

%% Importar valores
set(handles.edit58,'string',dhti)
set(handles.edit59,'string',dtt)
set(handles.edit63,'string',perdarca)
set(handles.edit64,'string',perdas60)

d=i17*1e-3 % diametro do condutor x1e-3 para transformar em mm
com=i18*1e-3 % comprimento do condutor x1e-3 para transformar em mm
m=i19 % Permeabilidade magnética relativa do condutor
res=i110 % Resistividade do condutor
fv1=[60:60:1500]; % Frequencia do sistema (tendo inicio e final, com
incrementos de 60hz)
w=2*pi*fv1 % Velocidade angular

```

```

a=d/2                % Raio do condutor
area=pi*(a^2)        % Area condutor
% Calculo da profundidade pelicular %
mr=pi*4e-7           % Permeabilidade magnética do ar
me=m*mr              % permeabilidade magnética especifica
p= sqrt((2*res)./(me*w));          % Calculo profundidade pelicular dos
condutores (p)
resito=((res*com)/area); % resistencia em corrente contínua%
%% Relação impedancia do condutor em função da resistencia em corrente CC
t=(1-i)./p           % Descoberta valor de T
z=((t*a)/2).*((bessely (0,t*a))./(bessely (1,t*a)))          % Equação de
Bessel para verificação do efeito pelicular em condutores

%% calculos para determinar a corrente RMS real das harmonicas%%
inominal=il3
ihl11=il11/100*inominal;
ihl12=il12/100*inominal;
ihl13=il13/100*inominal;
ihl14=il14/100*inominal;
ihl15=il15/100*inominal;
ihl16=il16/100*inominal;
ihl17=il17/100*inominal;
ihl18=il18/100*inominal;
ihl19=il19/100*inominal;
ihl20=il20/100*inominal;
ihl21=il21/100*inominal;
ihl22=il22/100*inominal;
ihl23=il23/100*inominal;

% Determinação da Freqüencia do sistema
fv=linspace(1,25,13)

%% Bar graph da corrente nominal do sistema
ilt=[il11;il12;il13;il14;il15;il16;il17;il18;il19;il20;il21;il22;il23];
%% Corrente eletrica
ihl=[ihl11;ihl12;ihl13;ihl14;ihl15;ihl16;ihl17;ihl18;ihl19;ihl20;ihl21;ihl
22;ihl23];
hull=[ihl11;0;ihl12;0;ihl13;0;ihl14;0;ihl15;0;ihl16;0;ihl17;0;ihl18;0;ihl1
9;0;ihl20;0;ihl21;0;ihl22;0;ihl23];
hul=hull %verificar se tera que dividir por raiz de 2
%% Potencia elétrica calculada
impedancia=resito.*z + resito
pot=impedancia.*(hul.^2)
v=[1:1:25]
pototal=sum(pot)

%% Indicadores de distorção
dth=((sqrt((ihl12^2)+(ihl13^2)+(ihl14^2)+(ihl15^2)+(ihl16^2)+(ihl17^2)+(ih
l18^2)+(ihl19^2)+(ihl20^2)+(ihl21^2)+(ihl22^2)+(ihl23^2)))/ihl11)
dhti=dth*100
irms=ihl11*(sqrt(1+(dth)^2))
in=il2/il1
dtt=(dhti*ihl11)/in

%% Perdas com harmonicas e sem harmonicas
perdarca=abs(pototal)
perdarcc=(resito*(inominal^2))

```

```

relacaorcarcc=((perdarca-perdarcc)/perdarca)*100
Z60=z(1,1)
impedancia60=abs(Z60)
resistencia60=impedancia60*resito + resito
perdas60=((hul(1,1))^2)*resistencia60
relacaorca60=((perdarca-perdas60)/perdarca)*100
y=[perdarca perdas60 relacaorca60
    0,0,0]
r=[perdarca perdarcc relacaorcarcc
    0,0,0]
title('Verificação das perdas elétricas')
xlabel ('RCC; RCA; (%) entre perdas')
ylabel ('Potencia elétrica')
legend('PTDH (VA)', 'PTSH (VA)', 'Relação entre perdas (%)')

%% Importar valores
figure (1)
subplot(2,2,1)
bar(y ,0.5)
title('Verificação das perdas elétricas')
xlabel ('RCA; RCA60; (%) entre perdas')
ylabel ('Potencia elétrica')
legend('PTDH (VA)', 'PTSH (VA)', 'Relação entre perdas (%)')
subplot(2,2,2)
bar(r ,0.5)
title('Verificação das perdas elétricas')
xlabel ('RCA; RCC; (%) entre perdas')
ylabel ('Potencia elétrica')
legend('PTDH (VA)', 'PTCC (W)', 'Relação entre perdas (%)')
subplot(2,2,3)
bar([ dhti dtt 0
    0 0 0],0.5)
title('Indicadores de distorção harmonica')
xlabel ('DTHi DTT')
ylabel ('%')
legend('DTHi', 'DTT')
subplot(2,2,4)
bar([ irms in 0
    0 0 0],0.5)
title('Corrente do circuito')
xlabel ('Irms Inominal')
ylabel ('Corrente (A)')
legend('Irms', 'Inominal')

%% Modelamento efeito pelicular
d=i17*1e-3 % diametro do condutor x1e-3 para transformar em mm
com=i18*1e-3 % comprimento do condutor x1e-3 para transformar em mm
m=i19 % Permeabilidade magnética relativa do condutor
res=i110 % Resistividade do condutor
fv1=[i14:60:i15]; % Frequencia do sistema (tendo inicio e final, com
incrementos de 60hz)
w=2*pi*fv1; % Velocidade angular
a=d/2; % Raio do condutor
% Calculo da profundidade pelicular %
mr=pi*4e-7 % Permeabilidade magnética do ar
me=m*mr; % permeabilidade magnética especifica

```

```

p= sqrt((2*res)./(me*w));          % Calculo profundidade pelicular dos
condutores (p)

%% Plotagem curva Z/Rccaxes(handles.axes1);
figure(1)
plot(fv1,p)
title('Profundidade pelicular')
xlabel ('Frequencia (Hz)')
ylabel ('P (mm)')

%% Modelamento efeito pelicular
d=i17*1e-3          % diametro do condutor x1e-3 para transformar em mm
com=i18*1e-3       % comprimento do condutor x1e-3 para transformar em mm
m=i19              % Permeabilidade magnética relativa do condutor
res=i110           % Resistividade do condutor
fv1=[i14:60:i15]; % Frequencia do sistema (tendo inicio e final, com
incrementos de 60hz)
w=2*pi*fvl        % Velocidade angular
a=d/2             % Raio do condutor
% Calculo da profundidade pelicular %
mr=pi*4e-7        % Permeabilidade magnética do ar
me=m*mr           % permeabilidade magnética especifica
p= sqrt((2*res)./(me*w));          % Calculo profundidade pelicular dos
condutores (p)

%% Relação impedancia do condutor em função da resistencia em corrente CC
t=(1-i)./p        % Descoberta valor de T
z=((t*a)/2).*((bessely (0,t*a))./(bessely (1,t*a)));      % Equação de
Bessel para verificação do efeito pelicular em condutores

%% Plotagem curva Z/Rccaxes(handles.axes1);
figure(1);
subplot(1,2,1)
bar(fv1,real(z))
xlabel ('Frequencia (Hz)')
ylabel ('Rca/Rcc')
subplot(1,2,2)
bar(fv1,imag(z), 'r')
xlabel ('Frequencia (Hz)')
ylabel ('X/Rcc')

```