

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ALINE FRAGA SILVA**

**IMPACTO DO ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO NA QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA**

**FORMIGA – MG
2015**

ALINE FRAGA SILVA

**IMPACTO DO ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO NA QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Ms. Mariana Guimarães dos Santos

FORMIGA – MG

2015

S586i Silva, Aline Fraga, 1990-.
Impacto do Acionamento de Motores de Indução na
Qualidade da Energia Elétrica / Aline Fraga Silva -- Formiga,
MG., 2015.
148p.: il.

Orientadora: Prof.^a Ms. Mariana Guimarães dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal Minas
Gerais - Campus Formiga

1. Qualidade da energia elétrica. 2. Motores de indução. 3.
Acionamento de máquinas elétricas. I. Santos, Mariana
Guimarães dos. II. Título.

CDD. 621.3

ALINE FRAGA SILVA

IMPACTO DO ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO NA QUALIDADE DA
ENERGIA ELÉTRICA

Aprovada em: ___/___/_____.
Resultado: _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Ms. Mariana Guimarães dos Santos
Orientadora

Prof. Ms. Patrick Santos de Oliveira
Avaliador

Prof. Ms. Renan Souza Moura
Avaliador

Formiga, 19 de janeiro de 2015.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Francisco e Rosilene, aos meus irmãos,
Felipe e Bruno, e a todos os amigos que
sempre me apoiaram incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e sempre a Deus, presente em todos os momentos, pela força e perseverança concedida nos momentos difíceis e por me permitir concluir mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Francisco e Rosilene, por me motivarem na busca de maior conhecimento e sabedoria e por não terem medido esforços para que eu pudesse alcançar mais este objetivo.

Aos meus irmãos, Felipe e Bruno, pelo constante incentivo e apoio nessa trajetória.

Ao Prof. Patrick Santos de Oliveira, pela experiência, paciência, dedicação e disponibilidade para a realização deste trabalho.

Ao Prof. José Antônio Moreira de Rezende pela importante contribuição na elaboração desta monografia.

Aos Professores Mariana Guimarães dos Santos e Renan Souza Moura pela participação na banca examinadora.

Aos meus amigos, pela amizade e companheirismo compartilhados ao longo dessa jornada.

A todos os professores e funcionários do Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Formiga que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) da cidade de Formiga/MG pela disponibilidade para a realização deste trabalho e ao fornecimento das informações solicitadas.

E a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram nessa caminhada.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre os problemas relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE), causados por motores elétricos de indução utilizados no Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) da cidade de Formiga/MG. Foi realizado um levantamento das principais características de funcionamento dos motores, principalmente em relação ao seu acionamento, que é considerado crítico em virtude da elevada corrente de partida. A partir dos dados de tensão, corrente, frequência e conteúdo harmônico coletados pelo analisador de qualidade da energia elétrica, foram feitas simulações por meio do *software* MATLAB®. Também foram realizadas modelagens computacionais dos métodos de partida de motores empregados no SAAE. O estudo tem por objetivo avaliar, através dos resultados obtidos das medições e simulações, o tipo de acionamento mais adequado para a autarquia, visando os benefícios econômicos de uma instalação eficiente, a diminuição da corrente na instalação elétrica e o aumento do tempo de vida útil da instalação e dos equipamentos.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica. Motores de indução. Acionamento de máquinas elétricas.

ABSTRACT

This work presents a study of the problems related to power quality (PQ), caused by electric induction motors used in the Water and Sewage Autonomous Service of Formiga/MG . A survey of the main operating characteristics of the motors was carried out, especially in relation to its drivers, which is considered critical due to the high starting current. From the voltage data, current, frequency and harmonic content measured by the power quality analyzer, simulations were performed using MATLAB® software. Were also carried out computer modeling of the motors starting methods employed in SAAE. The study aims to evaluate, through the results of measurements and simulations, the most appropriate type of driving to the installation, seeking the economic benefits of an efficient installation, decreased current at the electrical installation and the increase of the lifetime installation and equipment.

Keywords: Power quality. Induction motors. Starting electric machines.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

QEE - Qualidade da Energia Elétrica
SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST - Procedimentos de Distribuição
VTCD - Variações de Tensão de Curta Duração
VTLD - Variações de Tensão de Longa Duração
MIT - Motor de Indução Trifásico
ETA - Estação de Tratamento e Bombeamento de Água
MT - Média Tensão
THS - Tarifa Horo-Sazonal
SI - Sistema Internacional
pu - Por Unidade
 R_m - Resistência de magnetização
 L_m - Indutância de magnetização
J - Momento de inércia
DHTi - Distorção Harmônica Total de Corrente
DHTv - Distorção Harmônica Total de Tensão
 R_{scc} - Potência de curto-circuito
IEEE - *Institute of Electric and Electronics Engineers*
IEC - *International Electrotechnical Commission*
RMS - *Root Mean Square*
 R_P - *Snubber* resistivo
 C_P - *Snubber* capacitivo
inf - Infinito
 F_{cn} - *Function*
T - Torque mecânico
 ω - Velocidade angular
k - Constante de proporcionalidade
 P_m - Potência mecânica
P - Potência ativa
 Q_L - Potência reativa indutiva

Q_C - Potência reativa capacitiva

FP - Fator de Potência

V_P - Tensão de pico

V_{RMS} - Tensão eficaz

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relé de proteção.	23
Figura 2 - Disjuntor a óleo.	24
Figura 3 - Transformador de 45 kVA.	24
Figura 4 - Transformador de 112,5 kVA.	25
Figura 5 - Conjuntos motor-bomba utilizados para bombeamento.	25
Figura 6 - Diagrama unilifilar dos motores elétricos utilizados no bombeamento da água da captação.	26
Figura 7 - Água chegando ao sistema de tratamento.	26
Figura 8 - Tanque com misturadores.	27
Figura 9 - Tanques de decantação e filtragem.	27
Figura 10 - Equipamento responsável pela adição de cloro na água.	28
Figura 11 - Sistema de bombeamento de água do SAAE Formiga.	28
Figura 12 - Diagrama unifilar dos motores elétricos utilizados no sistema de distribuição de água.	29
Figura 13 - Transformadores trifásicos: 300 KVA (à esquerda) e 150 KVA (à direita).	29
Figura 14 - Motor de indução trifásico.	31
Figura 15 - Motor assíncrono com rotor gaiola de esquilo.	32
Figura 16 - Campo girante no estator em diferentes instantes (a), (b) e (c).	33
Figura 17 - Diagrama de força da partida direta.	35
Figura 18 - Diagrama de força da partida estrela-triângulo.	37
Figura 19 - Diagrama de força da partida compensadora.	38
Figura 20 - Corrente de partida na chave compensadora.	39
Figura 21 - Painel de acionamento dos motores do SAAE Formiga com partida compensadora.	39

Figura 22 - Controle de fases de um motor trifásico utilizando uma <i>soft-starter</i>	40
Figura 23 - Diagrama de blocos simplificados da <i>soft-starter</i>	41
Figura 24 - Comparativo da corrente entre partidas direta, estrela-triângulo e <i>soft-starter</i>	42
Figura 25 - Painel para acionamento do motor de 125 cv utilizando <i>soft-starter</i>	43
Figura 26 - Câmera termográfica FLIR série i5.	44
Figura 27 - Conjunto motor-bomba da ETA Santa Luzia.	45
Figura 28 - Analisador de qualidade de energia trifásico com flicker Minipa ET- 5061C.....	46
Figura 29 - Tela de configuração do analisador para um sistema trifásico a 3 fios.....	46
Figura 30 - Bloco pré-definido para transformador trifásico.....	48
Figura 31 - Configuração dos enrolamentos do transformador.....	49
Figura 32 - Configuração dos parâmetros do transformador de 300 kVA.....	51
Figura 33 - Bloco pré-definido do motor assíncrono.	51
Figura 34 - Configurações iniciais do motor assíncrono.....	52
Figura 35 - Configuração do bloco do motor de 125 cv.....	54
Figura 36 - Imagem termográfica da carcaça do motor de 100 cv.	55
Figura 37 - DHTi de cada fase do motor de 100 cv.....	57
Figura 38 - Bomba centrífuga tipo voluta ou caracol.....	57
Figura 39 - Rotor utilizado em bomba acoplada ao motor de 100 cv (à esquerda) e ao motor de 150 cv (à direita).....	58
Figura 40 - Corrente por fase do motor sobreaquecido.....	59
Figura 41 - Corrente por fase do motor com operação normal.....	59
Figura 42 - Imagem termográfica do motor em operação normal.....	60
Figura 43 - Medição da potência aparente do transformador de 300 kVA.	61
Figura 44 - Curva de carga global do transformador de 300 kVA.	61

Figura 45 - Medição da potência aparente do transformador de 150 kVA.	62
Figura 46 - Curva de carga global do transformador de 150 kVA.	63
Figura 47 - Perfil das tensões da Fase B do transformador de 300 kVA.	65
Figura 48 - Perfil das tensões da Fase B do transformador de 150 kVA.	66
Figura 49 - Perfil das tensões da Linha BC do transformador de 150 kVA.	67
Figura 50 - Distorção harmônica individual da tensão na Fase C do transformador de 300 kVA.	69
Figura 51 - Distorção harmônica individual da tensão na Fase C do transformador de 150 kVA.	70
Figura 52 - DHTv do transformador de 300 kVA.	71
Figura 53 - DHTv do transformador de 150 kVA.	71
Figura 54 - Distorção harmônica individual da corrente na Fase B do transformador de 300 kVA.	73
Figura 55 - Distorção harmônica individual da corrente na Fase B do transformador de 150 kVA.	74
Figura 56 - DHTi do transformador de 300 kVA.	74
Figura 57 - DHTi do transformador de 150 kVA.	75
Figura 58 - Variações de frequência no transformador de 300 kVA.	76
Figura 59 - Variações de frequência no transformador de 150 kVA.	77
Figura 60 - Afundamento de tensão.	78
Figura 61 - Diagrama de blocos da partida direta com transformador de 150 kVA.	79
Figura 62 - Diagrama de blocos da partida estrela-triângulo com transformador de 150 kVA.	81
Figura 63 - Diagrama de blocos da partida compensadora com transformador de 150 kVA.	82
Figura 64 - Afundamento de tensão na partida direta com transformador de 150 kVA.	83
Figura 65 - Corrente no motor de 15 cv na partida direta.	86
Figura 66 - Velocidade no motor de 15 cv na partida direta.	86

Figura 67 - Torque no motor de 15 cv na partida direta.....	87
Figura 68 - Diagrama de blocos da partida estrela-triângulo.	87
Figura 69 - Corrente no motor de 15 cv na partida estrela-triângulo.....	88
Figura 70 - Velocidade no motor de 15 cv na partida estrela-triângulo.....	88
Figura 71 - Torque no motor de 15 cv na partida estrela-triângulo.	89
Figura 72 - Corrente no motor de 15 cv na partida com chave compensadora.	90
Figura 73 - Velocidade no motor de 15 cv na partida com chave compensadora.	90
Figura 74 - Torque no motor de 15 cv na partida com chave compensadora....	91
Figura 75 - Diagrama de blocos da partida com <i>soft-starter</i>	91
Figura 76 - Corrente no motor de 15 cv na partida com <i>soft-starter</i>	92
Figura 77 - Velocidade no motor de 15 cv na partida com <i>soft-starter</i>	92
Figura 78 - Torque no motor de 15 cv na partida com <i>soft-starter</i>	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados utilizados para calcular os parâmetros dos transformadores.	50
Tabela 2 - Valores calculados.	50
Tabela 3 - Parâmetros do circuito equivalente do MIT.....	53
Tabela 4 - Parâmetros calculados do circuito equivalente do MIT.	53
Tabela 5 - Ordem, frequência e sequência dos harmônicos.	56
Tabela 6 - Faixas de limites de tensão para 220/127V.....	64
Tabela 7 - Quantidade de amostras que excederam os limites adequados da tensão de fase do transformador de 300 kVA.	64
Tabela 8 - Faixas de limites de tensão para 380/220V.....	65
Tabela 9 - Quantidade de amostras que excederam os limites adequados da tensão de fase do transformador de 150 kVA.	66
Tabela 10 - Quantidade de amostras que excederam os limites adequados da tensão de linha do transformador de 150 kVA.	67
Tabela 11 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).....	68
Tabela 12 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	70
Tabela 13 - Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental.....	72
Tabela 14 - Potência de curto-circuito dos transformadores do SAAE.....	73
Tabela 15 - Valores de potência da carga trifásica.....	81
Tabela 16 - Valores de tensão no secundário do transformador de 300 kVA. ...	83
Tabela 17 - Valores de tensão no secundário do transformador de 150 kVA. ...	83
Tabela 18 - Valores de tensão para a partida sequencial dos motores com transformador de 300 kVA.....	84
Tabela 19 - Valores de tensão para a partida sequencial dos motores com transformador de 150 kVA.....	85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Problema	18
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Hipótese	20
2 OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo geral	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3 REFERENCIAL TEÓRICO	22
3.1 SAAE Formiga	22
3.1.1 ETA Santa Luzia	23
3.2 Motor de Indução Trifásico.....	30
3.2.1 Princípio de funcionamento do MIT.....	32
3.3 Acionamento de motores de indução trifásicos.....	34
3.2.1 Partida direta	35
3.2.2 Partida estrela-triângulo	36
3.2.3 Partida com chave compensadora	37
3.2.4 Partida com <i>soft-starter</i>	40
4 MATERIAL E MÉTODOS	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 Inspeção com a câmera termográfica	55
5.2 Sobrecarga nos transformadores	60
5.3 Perfil de tensão.....	63
5.4 Distorção harmônica total da tensão	67
5.5 Distorção harmônica total da corrente.....	72

5.6 Variações de frequência	75
5.7 Afundamentos de tensão nas partidas dos motores	77
5.7.1 Partida simultânea dos motores	79
5.7.2 Partida sequencial dos motores	84
5.8 Análise dos métodos de partida dos motores	85
6 CONCLUSÃO	94
6.1 Continuação do trabalho	95
REFERÊNCIAS.....	97
ANEXO A - Cálculo dos parâmetros elétricos dos transformadores.....	101
ANEXO B - Interpolação linear dos parâmetros elétricos dos motores	103
ANEXO C - Curvas de carga do transformador de 300 kVA	104
ANEXO D - Curvas de carga do transformador de 150 kVA	106
ANEXO E - Perfil de tensão do transformador de 300 kVA.....	108
ANEXO F - Perfil de tensão do transformador de 150 kVA.....	118
ANEXO G - Distorção harmônica da tensão no transformador de 300 kVA.....	128
ANEXO H - Distorção harmônica da tensão no transformador de 150 kVA.....	133
ANEXO I - Distorção harmônica da corrente no transformador de 300 kVA....	138
ANEXO J - Distorção harmônica da corrente no transformador de 150 kVA...	143
ANEXO K - Rampa para a partida com <i>soft-starter</i>	148

1 INTRODUÇÃO

No passado, a questão da qualidade da energia elétrica (QEE) não era importante por dois motivos principais: o primeiro deles porque a maioria dos usuários não necessitava de um fornecimento de energia de alta qualidade, já que seus processos e equipamentos não eram tão sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade. O segundo deles está relacionado com as empresas brasileiras de eletricidade que, há quase meio século, operaram dentro de um regime de monopólio de tarifas com base no custo de serviço, significando que todo aumento ou redução de custos não implicava em aumento ou redução dos lucros respectivamente (SANTOS et al., 2006).

A preocupação cada vez mais acentuada com a qualidade da energia elétrica, principalmente nos últimos 15 anos, se deve à grande quantidade de equipamentos e processos sensíveis, decorrentes, principalmente, da aplicação da eletrônica de potência nos controles e processos automatizados, que são afetados por problemas de QEE (BONATTO et al., 2001). A busca por sistemas cada vez mais eficientes e processos cada vez mais produtivos, demanda equipamentos que se apresentam para o sistema como cargas não lineares (KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

O conceito de QEE está relacionado a um conjunto de fenômenos que podem ocorrer no sistema elétrico. Por definição, tem-se como sendo qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência que resulte em falha ou má operação do equipamento do consumidor (DUGAN et al., 2012).

Do ponto de vista acadêmico, qualidade da energia elétrica é a disponibilidade da energia elétrica, com forma de onda senoidal e pura, sem alterações na amplitude, emanando de uma fonte de potência infinita (ABREU et al., 1996).

Desde a década de 80, já se destacavam na literatura correlata estudos refletindo a preocupação dos impactos econômicos nos consumidores industriais devido aos problemas associados à QEE. Atualmente, pesquisadores têm dado grande atenção à evolução tecnológica das cargas industriais e em seus consumidores, uma vez que estes estão se tornando mais exigentes do ponto de vista da continuidade do fornecimento da energia como produto, confiabilidade e qualidade do serviço prestado (GHANDEHARI; JALILIAN, 2004).

No Brasil, a preocupação com a qualidade da energia elétrica vem crescendo cada vez mais, haja visto o empenho de órgãos reguladores como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), concessionárias e consumidores. A ANEEL através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), publicado em Dezembro/2008 em seu Módulo 8, trata da qualidade de energia elétrica no que tange ao serviço e produto em âmbito nacional (ANNUNCIACÃO, 2011).

A qualidade da energia em uma determinada barra do sistema elétrico é adversamente afetada por uma ampla variedade de distúrbios, que podem ser resumidos da seguinte forma (DUGAN et al., 2012):

- Transitórios (impulsivos e oscilatórios);
- Variações tensão de curta duração (VTCD): interrupções transitórias, afundamentos de tensão e elevações de tensão;
- Variações tensão de longa duração (VTLD): interrupções sustentadas, subtensões e sobretensões;
- Desequilíbrios;
- Distorção de forma de onda (harmônicos, corte de tensão, ruído etc.);
- Flutuações de tensão;
- Variações de frequência.

Problemas causados por qualidade de energia elétrica se não forem devidamente tratados, poderão causar prejuízos materiais (redução da vida útil ou até queima de transformadores, motores, capacitores e equipamentos eletrônicos sensíveis), bem como perturbações físicas em pessoas (incômodo visual devido ao efeito de cintilação, ou incômodo auditivo devido a ressonâncias eletromagnéticas), levando ao comprometimento da capacidade produtiva tanto das máquinas como das pessoas (DECKMANN; POMILIO, 2010).

1.1 Problema

Segundo Tsutiya (2004), o consumo de energia elétrica em um sistema de abastecimento de água é da ordem de 0,6 kWh por m³ de água produzida, ocorrendo 90% dessa despesa nos motores elétricos utilizados nas estações elevatórias de água.

As perdas de energia elétrica das companhias de saneamento originam-se principalmente por causa da baixa eficiência dos equipamentos eletromecânicos, por procedimentos operacionais inadequados e por falha na concepção dos projetos (GOMES, 2009).

Sabe-se que o comportamento da tensão aplicada aos terminais do motor é um fator importante. Se o motor opera com uma tensão inferior à nominal, a corrente absorvida aumentará para manter o torque necessário, isto irá causar uma elevação das perdas por efeito Joule no estator e rotor, provocando elevação de temperatura. Se a tensão aplicada é superior à nominal, a corrente de magnetização irá aumentar com, no mínimo, uma proporção quadrática, podendo ocorrer a saturação da máquina. O rendimento e o fator de potência diminuirão porquanto as perdas no ferro aumentarão (SANTOS et al., 2006).

A presença de harmônicos e desbalanços de tensão, mesmo que pequenos, provocam grandes desequilíbrios de corrente. Desequilíbrios de corrente resultam em componentes de sequência negativa de corrente e de conjugado desenvolvido, acarretando em perdas adicionais, aumento no aquecimento dos enrolamentos e redução da vida útil dos mancais (SANTOS et al., 2006).

Vale ressaltar os custos econômicos associados às perdas com paradas não programadas, devido a falhas no sistema de alimentação dos motores (GIBELLI, 2009). Somando-se a esta informação, muitas das vezes, antes de se atingir os limites aceitáveis de corrente e tensão do motor de indução trifásico (MIT), tem-se a observação dos ajustes dos dispositivos de proteção associados ao circuito, que poderão atuar e provocar paradas intempestivas do sistema como um todo (LEIRIA et al., 2006).

1.2 Justificativa

Um dos instantes mais críticos é a partida de motores elétricos, pois nesse momento, os motores solicitam uma corrente muito maior do que em serviço contínuo, devido à mudança de estado de inércia do motor. A isso chamamos de pico de corrente. No instante da partida, essa corrente costuma variar na faixa de seis a oito vezes a corrente nominal do motor (FRANCHI, 2007).

Este trabalho apresenta um estudo de caso contendo os métodos de acionamento dos motores do SAAE da cidade de Formiga/MG. A proposta é analisar o regime de funcionamento dos motores e o atual método de acionamento dos mesmos, assim serão feitas simulações para analisar qual seria o melhor método de partida.

No SAAE, as partidas dos motores são realizadas sob plena carga, para evitar ar nas tubulações das bombas. No entanto, este procedimento faz com que o pico da corrente inicial seja maior quando comparado a uma partida a vazio, podendo chegar até dez vezes o valor nominal. Neste caso, o impacto da corrente de partida elevada se mantém enquanto o motor acelera, só reduzindo aos níveis normais quando o motor se aproxima da velocidade de regime. A aceleração pode se estender por vários segundos, dependendo do método de partida do motor, das características da carga e da inércia do rotor (DECKMANN; POMILIO, 2010).

Uma elevada corrente de partida, combinada à sobrecarga do transformador pode resultar em severos afundamentos de tensão.

Além disso, levar o transformador a operar na região de saturação, pode provocar o aparecimento de conteúdo harmônico na corrente e tensão.

A escolha inadequada do acionamento dos motores da instalação ainda pode onerar a fatura de energia com multas de ultrapassagem da demanda contratada.

1.3 Hipótese

Em se tratando de motores, o impacto na rede é bastante acentuado, devido à alta corrente de partida e da energia reativa consumida pelo motor de indução durante a partida. O método de acionamento pode muitas vezes ser determinante para a viabilidade de algum processo.

Uma análise completa para a escolha do método de acionamento mais indicado pode prevenir problemas, poupar investimentos futuros e garantir um desempenho melhor. Além disso, a diminuição do custo com a energia elétrica pode refletir na melhoria dos serviços prestados pela autarquia, uma vez que parte dos recursos economizados poderão ser investidos na manutenção dos equipamentos, melhoria do ambiente de trabalho e nos serviços prestados à sociedade.

2 OBJETIVOS

Neste capítulo serão relacionados e detalhados os objetivos do trabalho que conduzirão a metodologia da pesquisa para chegar aos resultados pretendidos.

2.1 Objetivo geral

Este trabalho apresentará um estudo sobre os métodos de partida dos motores do SAAE da cidade de Formiga, com o objetivo de comparar o desempenho dos motores com os diferentes métodos de partida no âmbito da QEE.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Modelar no Simulink os métodos de partida utilizados para o acionamento dos motores do SAAE;
- Determinar o tipo de acionamento mais adequado para cada motor específico, levando em consideração suas características e seu regime de uso;
- Melhorar a eficiência nos serviços de fornecimento e tratamento de água da autarquia, proporcionando redução de custos com energia elétrica e aumento da vida útil das instalações e equipamentos.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta um embasamento da literatura sobre o tema abordado neste trabalho.

3.1 SAAE Formiga

Por muitos anos, o fornecimento de água na cidade de Formiga foi feito de forma praticamente artesanal. Quase quatro mil metros de bicames de aroeira abasteciam as residências da cidade. Em 1889, a madeira foi substituída por canos de metal e 49 anos depois começaram a surgir os primeiros poços artesianos. Porém, o constante desenvolvimento do município exigiu a adoção de uma técnica moderna capaz de atender satisfatoriamente toda a população. Foi então que, em 27 de dezembro de 1971, foi instituído, através da Lei nº 837, o SAAE de Formiga (SAAE-FORMIGA, 2014).

O novo método garantiu água tratada para todo o município, que também teve seu esgoto canalizado, acabando com as fossas sépticas que existiam em diversos pontos da cidade.

Atualmente, o Serviço de Água em Formiga abastece cerca de 22 mil residências, incluindo a zona rural (SAAE-FORMIGA, 2014). A autarquia possui três unidades: uma no bairro Santa Luzia, uma no bairro Coração de Jesus e outra no bairro dos Quartéis.

As subestações elevatórias dos bairros Coração de Jesus e dos Quartéis possuem poucas cargas instaladas, por isso, não foram incluídas no estudo de caso deste trabalho.

O objeto de estudo foi a Estação de Tratamento e Bombeamento de Água (ETA) localizada no bairro Santa Luzia. A unidade é a principal instalação do SAAE de Formiga, possui o sistema de captação, tratamento, bombeamento e distribuição com vazão de 200 litros/segundo e produção diária de 16.000 m³ (SAAE-FORMIGA, 2014).

3.1.1 ETA Santa Luzia

A ETA Santa Luzia possui uma quantidade significativa de cargas instaladas e está ligada à rede de distribuição de energia elétrica na média tensão (MT), com tensão de atendimento de 13,8 kV.

A unidade está classificada no Subgrupo A4, caracterizado pela estrutura tarifária binômica, isto é, constituída por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável; e se enquadra na Tarifa Horo-Sazonal (THS) Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia (ANEEL, 2005).

Na cabine de entrada de energia elétrica da instalação há um relé de proteção, como mostra a Figura 1, que é usado para proteger o circuito contra sobrecargas.



Figura 1 - Relé de proteção.
Fonte: Da própria autora.

O disjuntor a óleo, mostrado na Figura 2, é utilizado para seccionar as fases em caso de *trip* do relé de proteção.



Figura 2 - Disjuntor a óleo.

Fonte: Da própria autora.

A ETA Santa Luzia possui quatro transformadores. O primeiro transformador, visto na Figura 3, possui potência aparente de 45 kVA, tensão de linha no secundário de 220 V e é responsável por fornecer energia ao setor administrativo do SAAE.



Figura 3 - Transformador de 45 kVA.

Fonte: Da própria autora.

O transformador trifásico com potência aparente de 112,5 kVA, apresentado na Figura 4, reduz a tensão de 13,8 kV do primário (tensão de linha) para 220 V no secundário. Sua função é fornecer energia elétrica aos motores elétricos trifásicos que acionam as bombas centrífugas.



Figura 4 - Transformador de 112,5 kVA.
Fonte: Da própria autora.

A captação é realizada através de barragem no rio Formiga, com adutora por gravidade de água bruta em manilha de concreto e ferro fundido.

Os conjuntos motor-bomba, mostrados na Figura 5, ficam ligados 24 horas por dia e são responsáveis pelo bombeamento de água da captação até o sistema de tratamento.



Figura 5 - Conjuntos motor-bomba utilizados para bombeamento.
Fonte: Da própria autora.

A Figura 6 ilustra o diagrama unifilar dos motores elétricos utilizados no processo de bombeamento da água da captação até o sistema de tratamento.

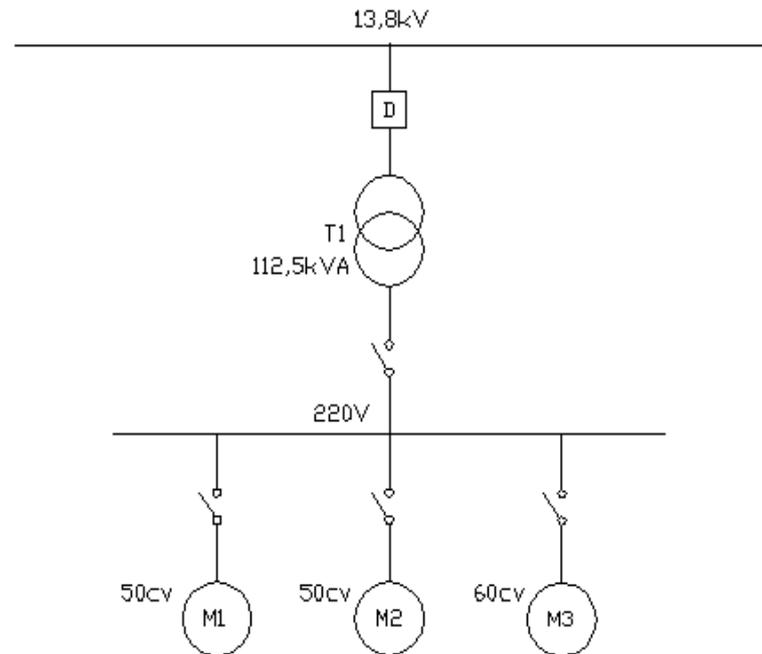


Figura 6 - Diagrama unifilar dos motores elétricos utilizados no bombeamento da água da captação.
Fonte: Elaboração da própria autora.

Quando a água chega da captação, como pode ser observado na Figura 7, está repleta de impurezas que devem ser retiradas pelo processo de tratamento, adequando a mesma ao consumo humano. Neste momento, são adicionados elementos químicos a água.



Figura 7 - Água chegando ao sistema de tratamento.
Fonte: Da própria autora.

Em seguida, ocorre o processo de floculação, em que a água é levada para um tanque com 4 misturadores de 15 cv (porém somente dois misturadores ficam ligados 24 horas por dia), que fazem com que as partículas em suspensão na água reajam com o coagulante formando flocos maiores. O tanque com os misturadores pode ser observado na Figura 8.



Figura 8 - Tanque com misturadores.
Fonte: Da própria autora.

Após a floculação, a água é bombeada para os tanques de decantação e filtragem, como mostra a Figura 9.



Figura 9 - Tanques de decantação e filtragem.
Fonte: Da própria autora.

Depois de ser filtrada, a água passa por um último processo, chamado de desinfecção, onde são adicionados cal, cloro e sulfato ferroso (FeSO_4).

O cloro utilizado nesta etapa é produzido na própria ETA da autarquia, por meio da eletrólise do cloreto de sódio (sal de cozinha). O sal é dosado num tanque de salmora, o que resulta em uma solução de 30% de cloreto de sódio. Essa solução é encaminhada para o reator, na proporção de 10% de salmora para 90% de água. Assim, o reator produz hipoclorito de sódio como fonte de cloro ativo. O hipoclorito vai

para o tanque de armazenamento, já dosado na água de forma automática (SAAE-FORMIGA, 2014). Todo esse percurso é sempre comandado pelo analisador de cloro, que emite as informações para análise. O processo de adição de cloro é realizado em tempo real e o equipamento responsável por essa dosagem pode ser visto na Figura 10.



Figura 10 - Equipamento responsável pela adição de cloro na água.
Fonte: Da própria autora.

Para a distribuição de água à população, a ETA Santa Luzia utiliza bombas centrífugas, apresentadas na Figura 11, acopladas aos motores elétricos.



Figura 11 - Sistema de bombeamento de água do SAAE Formiga.
Fonte: Da própria autora.

A Figura 12 mostra o diagrama unifilar das cargas utilizadas no processo de distribuição de água.

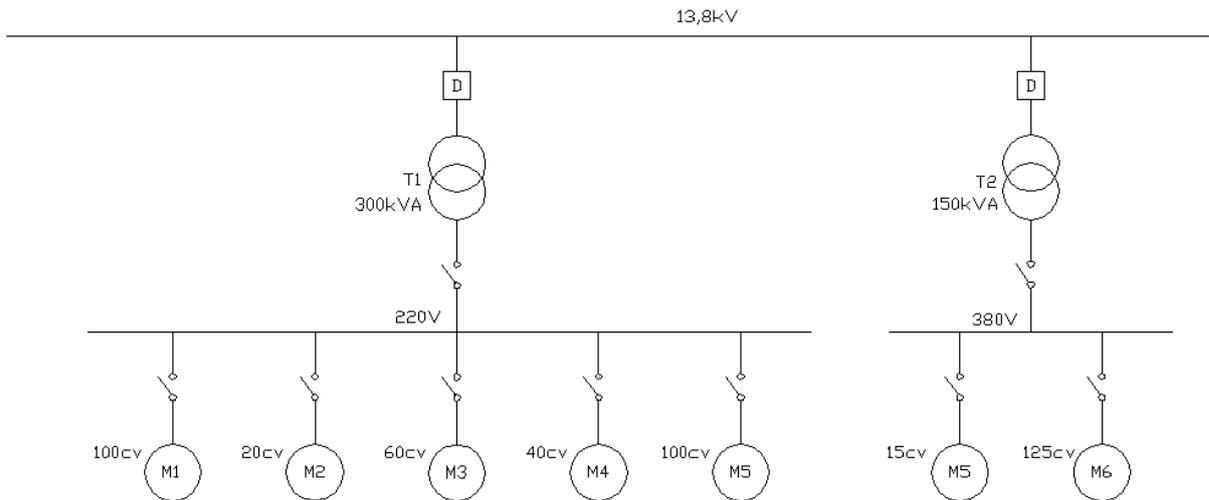


Figura 12 - Diagrama unifilar dos motores elétricos utilizados no sistema de distribuição de água.

Fonte: Elaboração da própria autora.

A Figura 13 apresenta os transformadores responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica de todo o processo de tratamento de água e também pelo sistema de bombeamento de água às residências, caixas d'água e demais subestações de bombeamento intermediárias existentes por toda a cidade.



Figura 13 - Transformadores trifásicos: 300 KVA (à esquerda) e 150 KVA (à direita).
Fonte: Da própria autora.

O transformador trifásico que possui potência aparente de 300 kVA alimenta os motores que operam em 220 V. O transformador trifásico com 150 kVA de potência aparente alimenta os motores que operam com tensão de 380 V.

3.2 Motor de Indução Trifásico

O motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. O motor assíncrono ou de indução é o mais usado de todas as máquinas rotativas, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica – baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, simplicidade de comando – com sua construção simples e grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos (WEG, 2014d).

Especificamente, nas empresas de saneamento, o emprego de motores elétricos é muito diversificado, passando por quase todas as etapas do processo. Porém, o seu uso mais significativo está ligado aos sistemas de bombeamento. Acoplado diretamente a uma bomba centrífuga, o motor elétrico passa a fazer parte do chamado conjunto motor-bomba, responsável pelo fornecimento de toda energia cinética necessária para que o fluido, no caso a água, alcance os mais distantes pontos do sistema em quantidade suficiente ao atendimentos das demandas (RODRIGUES, 2007).

O motor de indução utilizando o campo girante foi inventado por Nikola Tesla durante o período entre 1882 e 1887, porém, a máquina de M. O. Dolivo-Dobrovolsky, desenvolvida entre 1888 e 1890, é a que mais se assemelha aos motores atuais (IVANOV, 1984). Desde então, os motores elétricos vêm sofrendo uma série de desenvolvimentos e melhorias (SANTOS et al., 2006).

A Figura 14 mostra as partes constituintes de um motor de indução trifásico.

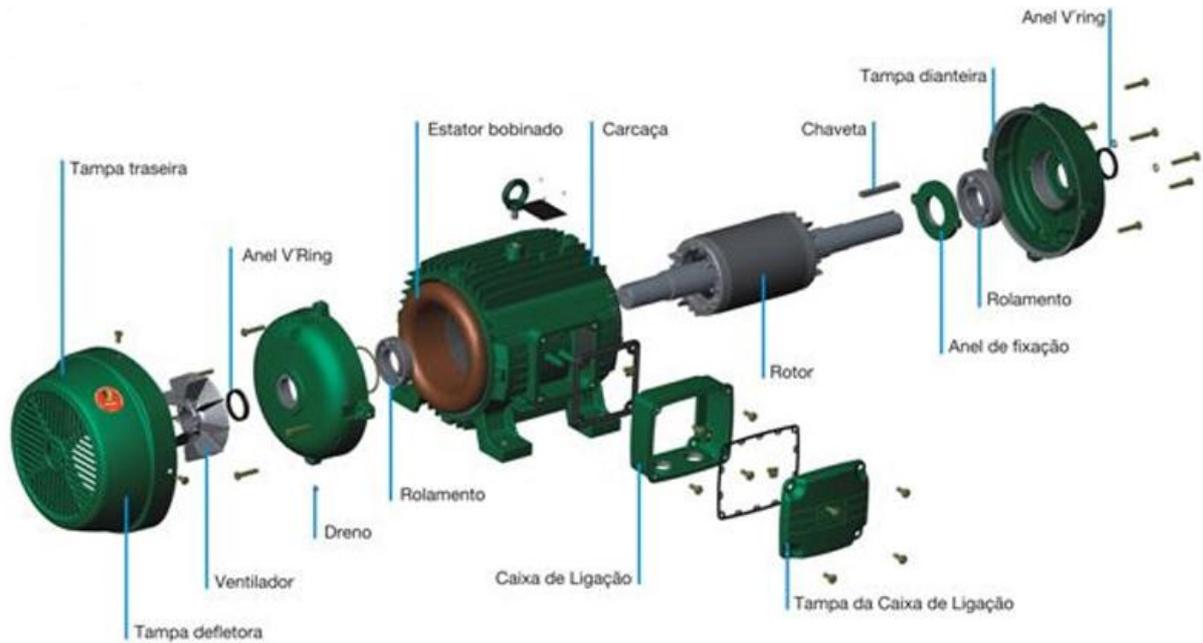


Figura 14 - Motor de indução trifásico.
Fonte: WEG, 2014c.

O MIT é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor. A parte fixa, o estator, contém os enrolamentos de armadura, os quais são alimentados por corrente alternada. O rotor é a parte móvel do motor, e pode ter enrolamento do tipo rotor gaiola de esquilo ou do tipo rotor bobinado, este último é semelhante ao enrolamento do estator (GONÇALVES, 2012).

Será dado ênfase ao motor de indução com rotor gaiola de esquilo, pois é o tipo de rotor empregado em todos os motores do SAAE Formiga.

No rotor gaiola de esquilo, os condutores do rotor estão curto-circuitados em cada terminal por anéis terminais contínuos; daí o nome de “gaiola de esquilo”. Nos rotores maiores, os anéis terminais são soldados aos condutores, em vez de serem moldados na construção do rotor (KOSOW, 1982). A Figura 15 apresenta o motor assíncrono com rotor gaiola de esquilo.



Figura 15 - Motor assíncrono com rotor gaiola de esquilo.
Fonte: WEG, 2004.

As barras do rotor tipo gaiola de esquilo nem sempre são paralelas ao eixo do rotor, mas podem ser colocadas em um pequeno ângulo em relação a ele, para produzir um torque mais uniforme e para reduzir o “zumbido” magnético durante a operação do motor (KOSOW, 1982).

Segundo WEG (2004), os motores de indução de gaiola, de baixa e média tensão, encontram vasto campo de aplicação, notadamente nos setores de siderúrgica, mineração, papel e celulose, saneamento, químico e petroquímico, e de cimento. São os mais empregados em qualquer aplicação industrial, devido à sua construção robusta e simples, além de ser a solução mais econômica, tanto em termos de motores como de comando e proteção.

3.2.1 Princípio de funcionamento do MIT

O campo girante é uma associação dos campos gerados pelos enrolamentos da armadura (GONÇALVES, 2012). Na Figura 16, é possível observar este fenômeno com clareza.

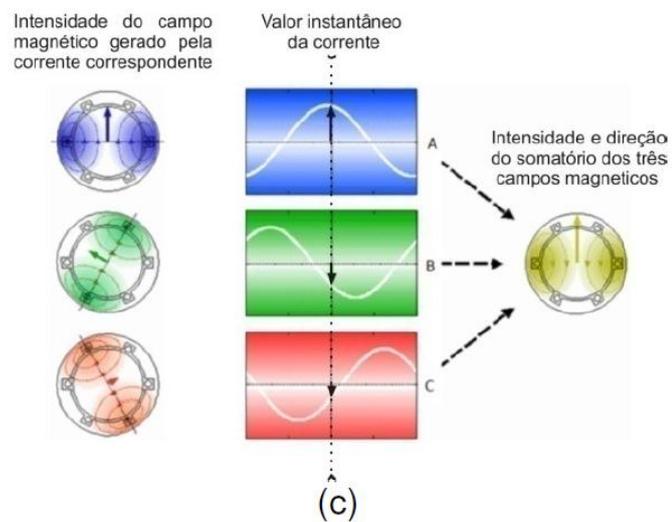
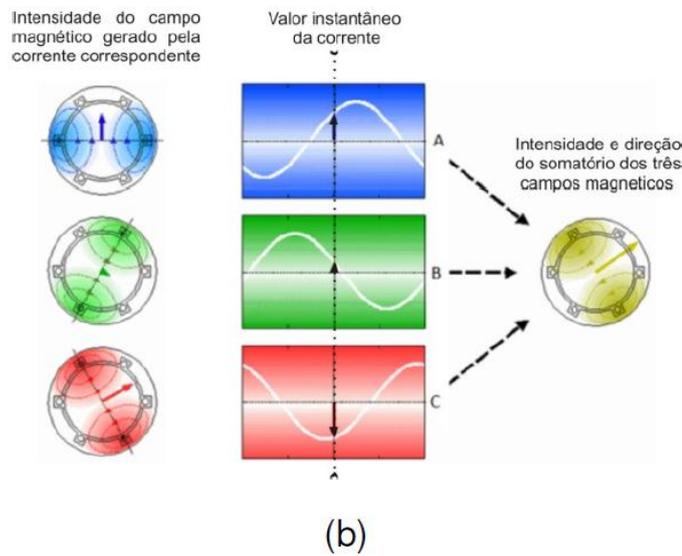
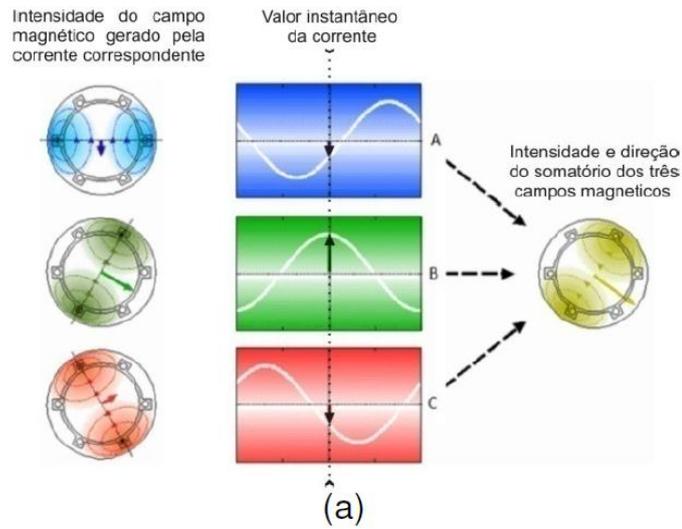


Figura 16 - Campo girante no estator em diferentes instantes (a), (b) e (c).

Fonte: GONÇALVES, 2012.

Os enrolamentos são excitados com correntes defasadas. Dessa forma, cada uma delas gera um campo magnético em determinada direção e com magnitude proporcional à magnitude da corrente passante em cada instante. Na Figura 16a, observa-se que as correntes da fase “a” e “c” estão negativas e com magnitude pequena, enquanto a fase “b” está no pico de sua amplitude positiva. Os campos magnéticos gerados estão representados pelos vetores correspondentes a cada fase e o campo resultante é a soma desses vetores. É evidente que o vetor da fase “b” é maior e, conseqüentemente, dita a direção da resultante de campo magnético neste instante. As Figuras 16b e 16c mostram instantes de tempo posteriores, bem como a rotação do campo magnético resultante. É importante ressaltar que o módulo do vetor resultante é constante, ele apenas gira no espaço (GONÇALVES, 2012).

O campo girante, criado pelo enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo cortam as barras do rotor) as quais geram correntes, e conseqüentemente, um campo magnético (WEG, 2004). Este campo, entretanto, está atrasado em relação ao campo girante do estator. A tentativa do campo do rotor em se alinhar com o campo girante do estator faz com que surja um torque no rotor, fazendo-o girar (GONÇALVES, 2012).

3.3 Acionamento de motores de indução trifásicos

Durante a partida, os motores elétricos solicitam uma corrente elevada do sistema de alimentação, muitas vezes da ordem de 6 a 10 vezes a sua corrente nominal de funcionamento (MEDEIROS, 1997). Na prática, deseja-se acionar uma carga, limitando-se a corrente de partida, evitando distúrbios na rede elétrica. Desta maneira, a escolha de um sistema de partida adequado, pode trazer benefícios como vida útil prolongada do motor e redução de custos de operação e manutenção.

Com o intuito de atenuar a intensidade da corrente de partida, e permitir adequado acionamento da máquina, métodos de acionamentos são utilizados. Os principais métodos de partida são: direta, estrela-triângulo, compensadora e chaves de partida eletrônicas (*soft-starter* e inversor de frequência). À seguir serão apresentados os tipos de acionamento que foram objeto de estudo deste trabalho.

3.2.1 Partida direta

A partida direta é a forma mais simples de partir um motor elétrico, como mostra o diagrama de força apresentado na Figura 17.

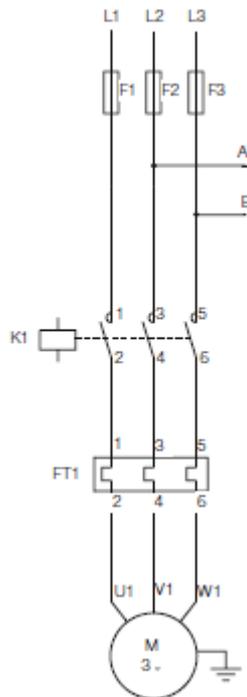


Figura 17 - Diagrama de força da partida direta.
Fonte: WEG, 2014a.

O MIT é conectado diretamente à rede, por meio de um contatores (K1), sendo ainda acrescido, ao circuito de força, fusíveis (F1, F2 e F3) e relé térmico (FT1), como dispositivos de proteção (BRITO, 2007).

Por imposição da concessionária, só podem ser partidos motores abaixo de 5 cv em partidas diretas e abaixo de 10 cv em instalações industriais (FRANCHI, 2007).

Segundo Kosow (1982), a partida direta à linha não precisa ser evitada, se a linha for de capacidade suficiente para prover a tensão nominal e a corrente requeridas pela partida do motor de indução e desde que tal partida não cause danos ao motor de indução.

De acordo com Franchi (2007), a partida direta deve ser utilizada nos seguintes casos:

- Baixa potência do motor de modo a limitar as perturbações originadas pelo pico de corrente.

- A máquina movimentada não necessita de uma aceleração progressiva e está equipada com um dispositivo mecânico (reductor) que evita uma partida muito rápida.
- O conjugado de partida é elevado.

3.2.2 Partida estrela-triângulo

Consiste na alimentação do motor com uma redução de tensão nas bobinas durante a partida. O motor parte em estrela, isto é, com uma tensão de 58% da tensão nominal, e depois que atinge uma velocidade próxima da nominal, a ligação é comutada para triângulo, assumindo a tensão nominal. A passagem da ligação estrela para a ligação em triângulo é controlada por um temporizador (FRANCHI, 2007).

Durante a partida, a corrente e o conjugado do motor são reduzidos a 1/3 dos valores nominais. Desta forma, este sistema pode ser utilizado somente em casos onde o conjugado do motor em estrela for maior que o conjugado da carga (RAMOS, 2009). Na prática, a chave estrela-triângulo é utilizada quase que exclusivamente para partidas de máquinas a vazio, isto é, sem carga. Somente depois de ter atingido a tensão nominal é que a carga pode ser aplicada (FRANCHI, 2007).

O MIT somente poderá utilizar o método de partida estrela-triângulo se possuir uma ligação em dupla tensão (por exemplo, 220/380 V ou 380/660 V) (BRITO, 2007). Os motores devem ter no mínimo seis bornes de ligação (FRANCHI, 2007). O diagrama de força da chave de partida estrela-triângulo pode ser visto na Figura 18.

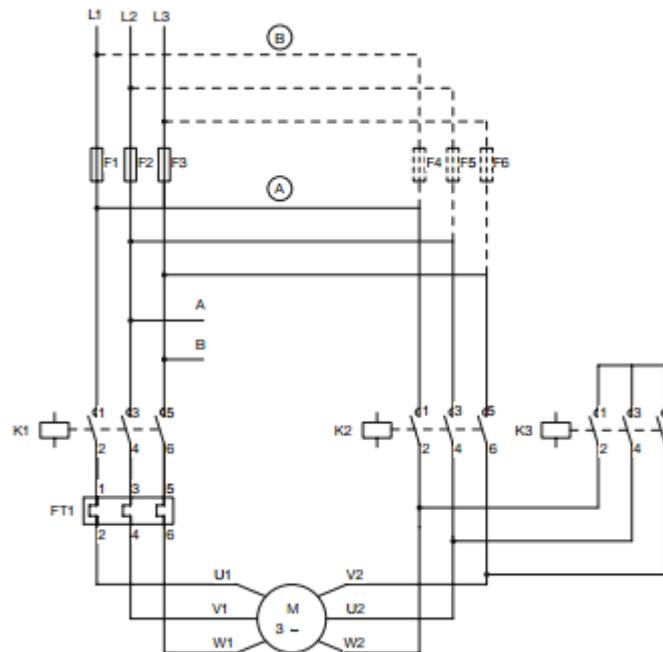


Figura 18 - Diagrama de força da partida estrela-triângulo.
Fonte: WEG, 2014a.

No diagrama de força, os contatores K1 e K3 fazem o fechamento do motor em estrela. A ligação em triângulo é feita através dos contatores K1 e K2.

3.2.3 Partida com chave compensadora

Embora esse método tenha custo inicial mais alto que o método de partida estrela-triângulo, apresenta a vantagem de permitir ajuste de tensão e de corrente absorvida por simples mudança de *taps*. Normalmente os autotransformadores de partida têm *taps* para 50%, 65% e 80% da tensão nominal (BRUSTOLINI, 2010).

Desta forma, o conjugado motor da máquina acionada e a corrente que circula no enrolamento do motor ficam reduzidos por fatores correspondentes ao *tap* escolhido para a operação (FRANCHI, 2007).

A Figura 19 mostra o diagrama esquemático do circuito de força de uma chave compensadora.

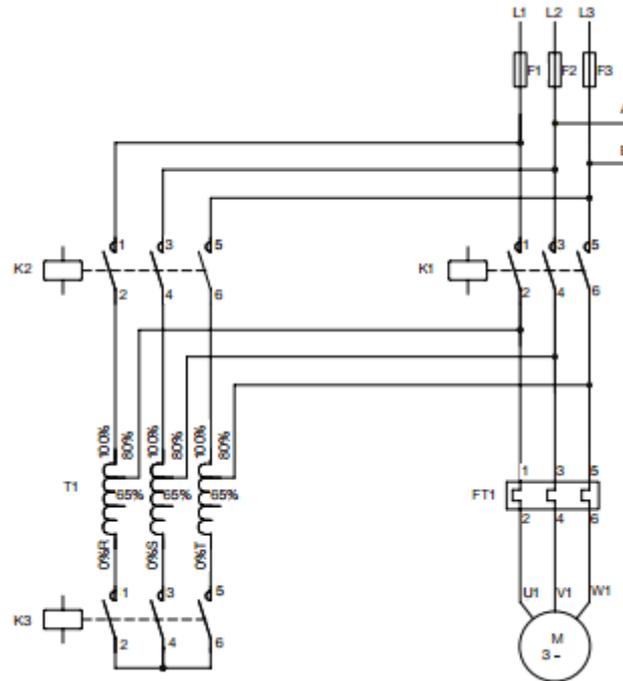


Figura 19 - Diagrama de força da partida compensadora.
Fonte: WEG, 2014a.

De acordo com Franchi (2007), esse método de partida é utilizado geralmente para motores acima de 15 cv. A partida é feita em três etapas:

1. Na primeira etapa, o autotransformador é ligado primeiramente em estrela e em seguida o motor é ligado à rede por intermédio de uma parte dos enrolamentos do autotransformador. A partida é feita com uma tensão reduzida em função da relação de transformação. O autotransformador possui derivações que possibilitam escolher a relação de transformação e a tensão reduzida mais apropriada.
2. Na segunda etapa, antes de passar à tensão plena, a ligação em estrela é aberta. Essa operação é realizada quando se atinge a velocidade de equilíbrio no final do primeiro período.
3. A ligação à plena tensão é feita após a segunda etapa, em que o autotransformador é desligado do circuito.

Na Figura 20, um gráfico ilustra o comportamento da corrente de partida da chave compensadora com relação à partida direta.

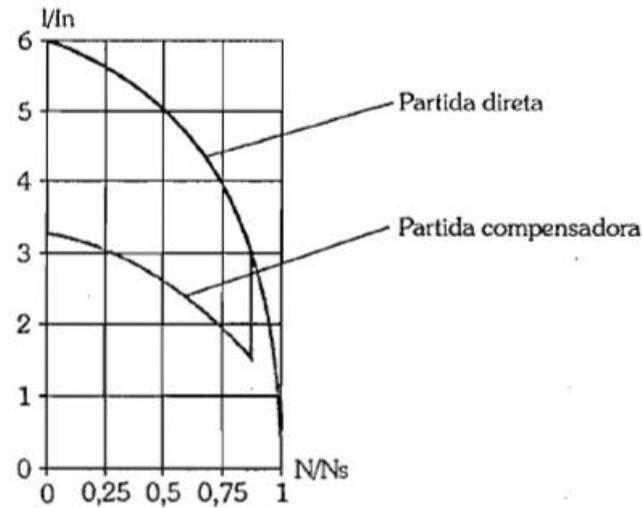


Figura 20 - Corrente de partida na chave compensadora.
Fonte: FRANCHI, 2007.

Assim, temos a redução das tensões aplicadas no motor de acordo com a derivação do transformador (*tap*) no qual está ligado:

- *Tap* 50% reduz para 25% o valor de partida direta.
- *Tap* 65% reduz para 42% o valor de partida direta.
- *Tap* 80% reduz para 64% o valor de partida direta.

A Figura 21 mostra o painel para o acionamento de 3 motores de 220 V da ETA Santa Luzia utilizando a partida com chave compensadora.



Figura 21 - Painel de acionamento dos motores do SAAE Formiga com partida compensadora.
Fonte: Da própria autora.

3.2.4 Partida com *soft-starter*

Segundo Franchi (2007), com o advento da eletrônica de potência; torna-se cada vez mais economicamente viável e prático o uso de chaves eletrônicas de partida de motores.

As chaves de partida *soft-starters* são destinadas ao comando de motores de corrente contínua e corrente alternada, assegurando a aceleração e desaceleração progressivas e permitindo uma adaptação da velocidade às condições de operação (FRANCHI, 2007).

A alimentação do motor, quando é colocado em funcionamento, é feita por aumento progressivo da tensão, o que permite uma partida sem golpes e reduz o pico de corrente. Isso é obtido por intermédio de um conversor com tiristores em antiparalelo, montados de dois a dois em cada fase da rede (FRANCHI, 2007).

A Figura 22 mostra os gráficos de variação de tensão em cada fase, controlando as fases de um motor trifásico.

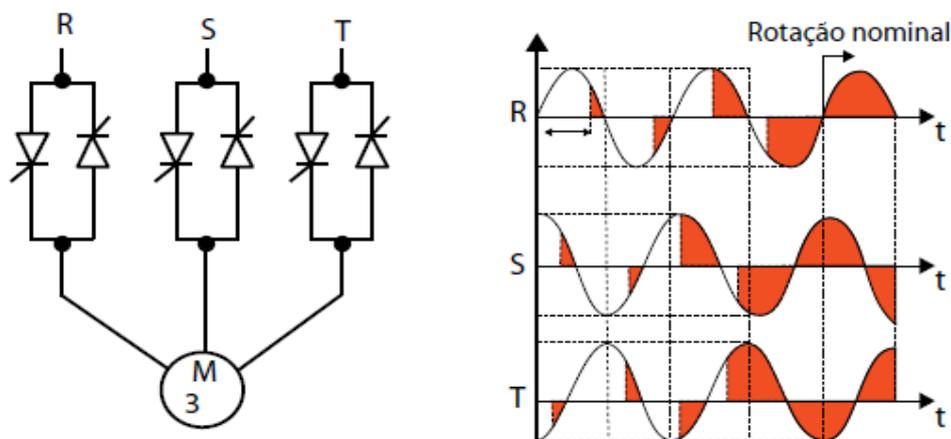


Figura 22 - Controle de fases de um motor trifásico utilizando uma *soft-starter*.

Fonte: DREHER, 2009.

A subida progressiva da tensão pode ser controlada pela rampa de aceleração ou dependente do valor da corrente de limitação, ou ligada a esses dois parâmetros (FRANCHI, 2007). Assim, a *soft-starter* assegura:

- O controle das características de funcionamento, principalmente durante os períodos de partida e de parada;
- A proteção térmica do motor e do controlador;

- A proteção mecânica da máquina movimentada por supressão dos golpes e redução da corrente de partida.

O funcionamento das *soft-starters* está baseado na utilização da ponte tiristorizada, que é comandada por uma placa eletrônica de controle, a fim de ajustar a tensão de saída, conforme programação feita pelo usuário (FRANCHI, 2007). A Figura 23 mostra o diagrama de blocos de uma *soft-starter*.

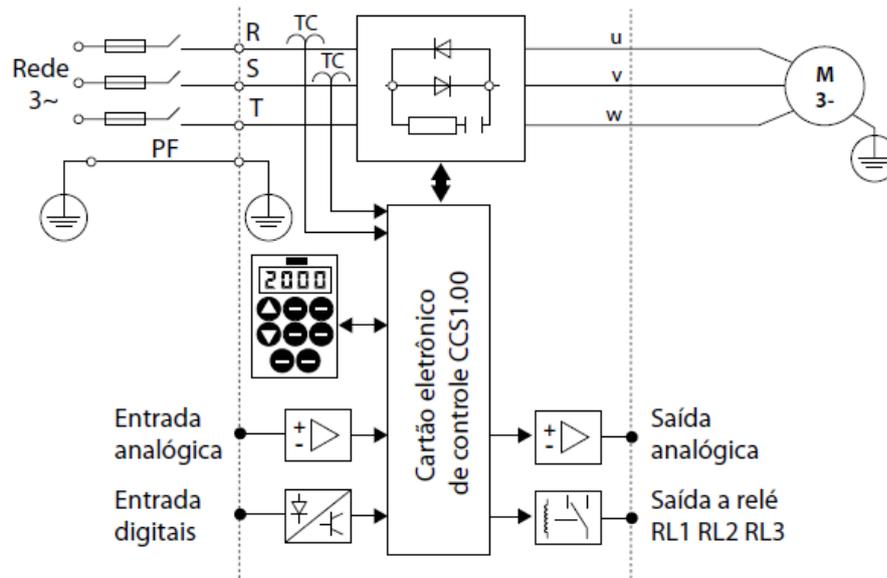


Figura 23 - Diagrama de blocos simplificados da *soft-starter*.
Fonte: FRANCHI, 2007.

Como mostra o diagrama de blocos, a *soft-starter* controla a tensão da rede por meio do circuito de potência constituído pelos tiristores, que varia o ângulo de disparo, variando a tensão eficaz do motor elétrico.

O principal objetivo do funcionamento da *soft-starter* é reduzir a tensão de partida de um motor elétrico. Como o torque é proporcional a essa tensão, o motor parte com torque reduzido (DREHER, 2009). A Figura 24 mostra um gráfico comparativo da corrente de partida direta, estrela-triângulo e *soft-starter* em função do tempo.

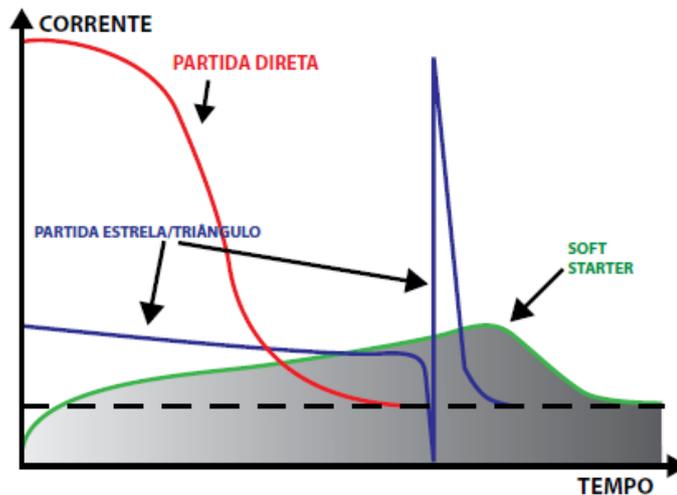


Figura 24 - Comparativo da corrente entre partidas direta, estrela-triângulo e *soft-starter*.
Fonte: DREHER, 2009.

As principais funções da *soft-starter* são:

- Controle do tempo de aceleração e desaceleração do motor;
- Limitação de corrente;
- Conjugado de partida;
- Frenagem por corrente contínua;
- Proteção do acionamento por sobrecarga;
- Proteção do motor contra aquecimento;
- Detecção de desequilíbrio ou falta de fase do motor.

Nos últimos anos, a partida eletrônica vem sendo amplamente utilizada em sistemas de bombeamento devido as seguintes razões: proteção eletrônica integral do motor; diminuição dos efeitos dos transitórios hidráulicos nos sistemas de bombeamento (variações de pressão e vazão); limitação dos picos de corrente na partida; limitação de quedas de tensão na partida; diminuição de choques mecânicos; aumento da vida útil do motor e outros equipamentos (TSUTIYA, 2005).

Na ETA Santa Luzia os motores de 380 V utilizam o método de partida com chave *soft-starter*. A Figura 25 mostra o painel para o acionamento do motor de 125 cv.



Figura 25 - Painel para acionamento do motor de 125 cv utilizando *soft-starter*.
Fonte: Da própria autora.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a medição e inspeção das cargas no SAAE Formiga, foram utilizados uma câmera termográfica e um analisador de qualidade da energia elétrica.

A análise do espectro de cores apresentado no termograma é uma técnica preditiva para inspeção e monitoramento de temperatura. A detecção do sobreaquecimento de componentes em instalações elétricas pode indicar o subdimensionamento dos mesmos, fugas de corrente ou outros problemas de qualidade da energia elétrica. A câmera termográfica usada nas inspeções pode ser vista na Figura 26.



Figura 26 - Câmera termográfica FLIR série i5.
Fonte: FLIR, 2014.

O estudo de caso com a câmera termográfica consiste em identificar a causa do sobreaquecimento de um motor e propor a solução do problema.

Nos últimos cinco anos, de acordo com as informações fornecidas pelo SAAE, o conjunto motor-bomba ilustrado na Figura 27, apresentou problemas de funcionamento.



Figura 27 - Conjunto motor-bomba da ETA Santa Luzia.
Fonte: Da própria autora.

O motor, que tem potência nominal de 100 cv, passou a operar em regime permanente com aquecimento excessivo. O funcionamento em temperaturas elevadas reduzia drasticamente a vida útil do motor. Cada motor operava em média por 2 anos e queimava. Na última queima, o motor funcionou por apenas 3 meses.

No entanto, sempre que ocorria a queima, o motor era imediatamente substituído pelo reserva, mas sem que a causa da queima fosse investigada. Uma mitigação mais detalhada desse problema será realizada na Seção 5.1

O analisador de qualidade realiza a leitura de inúmeros parâmetros elétricos, como: potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, componentes harmônicos até a 49ª ordem, níveis de tensão e corrente, além da verificação de variações de tensão de curta (VTCD) e longa (VTLD) duração. Os valores medidos podem ser visualizados através de gráficos ou diagramas vetoriais em tempo real ou podem ser analisados em um computador através do *software* TOPVIEW. A Figura 28 apresenta o analisador de qualidade utilizado nas medições.



Figura 28 - Analisador de qualidade de energia trifásico com flicker Minipa ET-5061C.

Fonte: MINIPA, 2014.

Antes de realizar a medição de qualquer parâmetro, é de fundamental importância selecionar o tipo de sistema elétrico, a frequência, o tipo de garra de corrente, a escala total da garra de corrente e a proporção VT do transformador de tensão externo que pode ser acoplado com o instrumento (configuração do analisador) (MINIPA, 2013). O analisador permite conexão com os seguintes sistemas:

- Sistema trifásico 4 fios Estrela (trifásico + neutro + terra);
- Sistema trifásico 3 fios Delta (trifásico + terra);
- Sistema trifásico 3 fios ARON Delta (trifásico + neutro + terra);
- Sistema monofásico (fase + neutro + terra).

Na ETA Santa Luzia o sistema elétrico é trifásico 3 fios Delta, portanto, para uma medição correta a conexão do instrumento foi feita de acordo com a tela de configuração do analisador, como mostra a Figura 29.

12/09/2006 – 16:55:10			
CONFIGURAÇÃO ANALISADOR			
	Sistema	3WIRE	
	Freq [Hz]	60	
	Tipo Garra	FLEX	
	FS [A] Garra	3000	
	Taxa VT	1	
AVANÇADO		MOD(+)	MOD(-)

Figura 29 - Tela de configuração do analisador para um sistema trifásico a 3 fios.

Fonte: MINIPA, 2013.

Outra função a ser parametrizada para gravar os valores medidos é o período de integração, que corresponde ao intervalo de tempo entre dois registros consecutivos no âmbito da duração de medida. Para a realização deste trabalho, o período de integração para o armazenamento dos dados foi configurado para 15 min. No transformador de 300 kVA, as medições foram realizadas do dia 16/06/2014 à 01/07/2014 e foram registradas 1448 amostras. Para o transformador de 150 kVA, o período de medição foi de 20/08/2014 à 10/10/2014, totalizando 4880 amostras.

Com os dados obtidos, foi feita a análise com ênfase na sobrecarga e vida útil dos transformadores, perfil de tensão, distorção harmônica da tensão e corrente e desvios de frequência.

Para avaliar o tipo de acionamento mais adequado para cada motor da autarquia, visando a eficiência da instalação e a redução dos problemas relacionados à qualidade da energia elétrica durante a partida, foram realizadas simulações a partir dos dados coletados pelo analisador de qualidade. As modelagens e simulações computacionais foram implementadas no *software* MATLAB®.

O MATLAB®, cujo nome deriva de *MATrix LABoratory*, é uma poderosa ferramenta de computação numérica, com um ambiente de trabalho de fácil utilização e uma potente capacidade para realização de cálculos matemáticos de forma interativa. Fornece uma linguagem de programação própria, que permite o desenvolvimento de programas mais simples e compactos do que quando desenvolvidos numa das linguagens de programação mais tradicionais, como C, Fortran ou Pascal (MORAIS; VIEIRA, 2013).

Um aspecto importante deste *software* é o fato de integrar um grande conjunto de pacotes de funções, organizadas segundo diferentes áreas do cálculo científico, designadas por *toolboxes*. O usuário pode recorrer a *toolboxes* dos mais diversos domínios, garantindo a utilidade desta ferramenta para profissionais de diferentes áreas, desde a tradicional engenharia, passando, por exemplo, pelos profissionais de investigação médica e terminando em profissionais das ciências econômicas. O programador pode enriquecer o MATLAB® criando as suas próprias bibliotecas de funções ou estendendo as existentes (MORAIS; VIEIRA, 2013).

O Simulink é um pacote integrado ao MATLAB®, usado para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, tanto lineares quanto não-lineares, contínuos e/ou discretos no tempo (UFSM, 2010). Neste trabalho, foi utilizado para simular, a partir de modelos, os métodos de partida dos motores do SAAE Formiga.

A modelagem de circuitos de potência, no Simulink, utiliza o conjunto de bibliotecas chamado *SimPowerSystems*, o qual emprega análise por meio de variáveis de estado para estudo de transitórios de sistemas eletrodinâmicos. No *SimPowerSystems*, vários elementos presentes em circuitos de potência, tais como fontes, linhas de transmissão, elementos passivos (resistência, capacitância e indutância), dispositivos semicondutores de potência e máquinas elétricas podem ser encontrados, na forma representativa de um bloco, disponível em uma biblioteca específica (DABNEY; HARMAN, 1998).

O Simulink possui ainda uma série de configurações que dão flexibilidade ao usuário, permitindo, por exemplo, a configuração dos parâmetros de entrada de cada bloco. Dessa forma, é possível adequar uma simulação de acordo com às necessidades de um determinado sistema.

Para simular os tipos de acionamento dos motores elétricos empregados no SAAE Formiga, foram usados dois blocos principais: transformador e motor. A Figura 30 mostra o bloco da biblioteca do Simulink para o transformador trifásico de 2 enrolamentos.

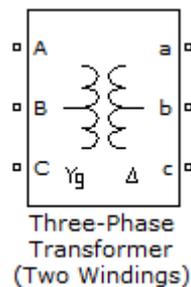


Figura 30 - Bloco pré-definido para transformador trifásico.

Fonte: Da própria autora.

Para parametrizar o bloco, basta clicar duas vezes sobre ele que abrirá a janela de configuração. Na aba *Configuration* foi escolhido o tipo de conexão dos enrolamentos do transformador. Para todas as simulações realizadas neste trabalho, os transformadores foram configurados com o primário conectado em estrela aterrado e o secundário ligado em delta, como mostra a Figura 31.

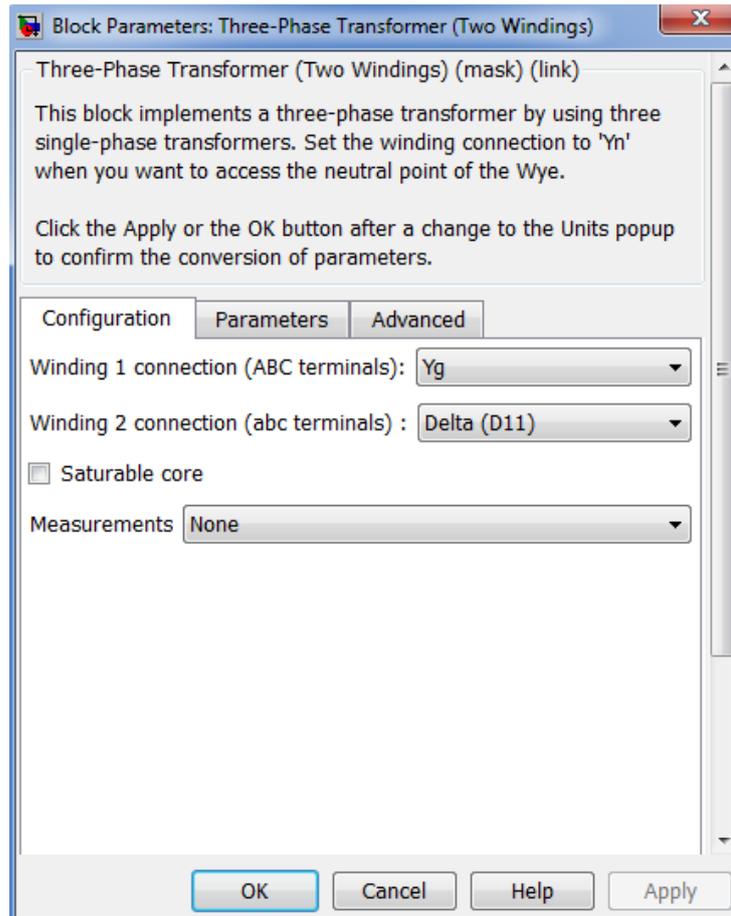


Figura 31 - Configuração dos enrolamentos do transformador.
Fonte: Da própria autora.

Uma das dificuldades do trabalho foi conseguir os parâmetros elétricos tanto do transformador quanto do motor. Como os dados não foram fornecidos pelos fabricantes, no caso dos transformadores, os valores foram calculados utilizando os dados de placa: potência aparente, tensão e impedância. Também foi usada a relação X/R . Usualmente, transformadores de potência tem uma relação X/R aproximadamente igual a 20 (DEL VECCHIO, 2002). Os dados disponíveis para calcular os parâmetros do circuito equivalente de cada transformador são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados utilizados para calcular os parâmetros dos transformadores.

Dados disponíveis	Transformador 300 kVA	Transformador 150 kVA
S_{base} (kVA)	300	150
V_{base} (kV)	13,8	13,8
V_s (V)	220	380
Z_{pu} (%)	4,3	4,3
X/R	20	20

Fonte: Da própria autora.

É importante ressaltar que na placa do transformador de 150 kVA não constava o valor da impedância. No entanto, para fins de simulação, adotou-se o valor 4,3%.

A partir dos dados disponíveis foram calculados os parâmetros do primário do transformador. O algoritmo desenvolvido para os cálculos consta no ANEXO A. A Tabela 2 apresenta os valores calculados.

Tabela 2 - Valores calculados.

Valores calculados	Transformador 300 kVA	Transformador 150 kVA
Z_{base} (Ω)	634,8	1270
Z_1 (Ω)	27,29	54,59
R_1 (Ω)	1,363	2,726
L_1 (mH)	72,3	144,6

Fonte: Da própria autora.

Com os valores calculados foi feita a parametrização do bloco de cada transformador. No Simulink, os valores podem ser inseridos com unidades do SI (Sistema Internacional) ou em pu (Por Unidade). Neste caso, os dados do primário de cada transformador foram preenchidos com unidades do SI e convertidos em pu pelo próprio bloco. Assim, os valores obtidos em pu foram utilizados para configurar os parâmetros do secundário. A Figura 32 mostra a configuração do transformador de 300 kVA.

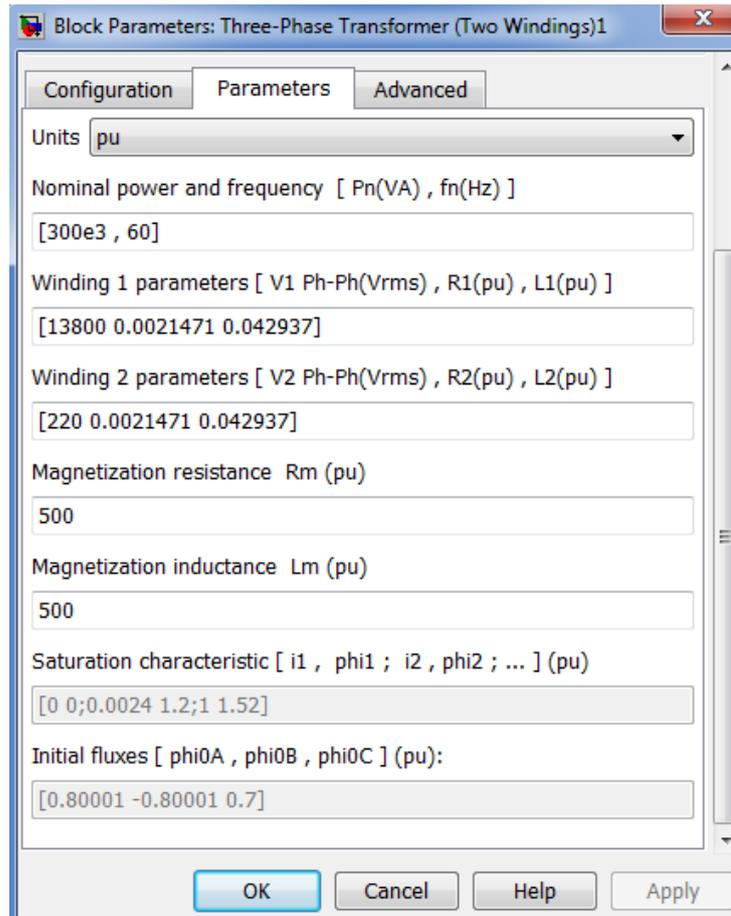


Figura 32 - Configuração dos parâmetros do transformador de 300 kVA.

Fonte: Da própria autora.

Os valores da resistência (R_m) e indutância de magnetização (L_m) utilizados foram do próprio modelo do Simulink por dificuldades na obtenção dos dados reais e, portanto, devem refletir em alteração na dinâmica dos transitórios no acionamento dos motores.

A Figura 33 ilustra o bloco utilizado para simular o motor assíncrono.

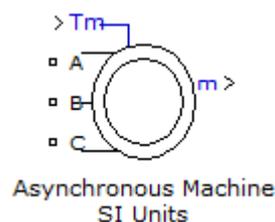


Figura 33 - Bloco pré-definido do motor assíncrono.
Fonte: Da própria autora.

Ao abrir a janela de configuração, na aba *Configuration*, é possível definir o tipo de entrada mecânica: torque mecânico ou velocidade angular; o tipo de rotor: gaiola de esquilo, gaiola de esquilo duplo ou rotor bobinado; e por fim, tem-se a referência para o circuito, ou seja, se ele está refletido no lado do rotor, estator ou modo síncrono.

A Figura 34 mostra a configuração que foi adotada para todos os motores utilizados neste trabalho.

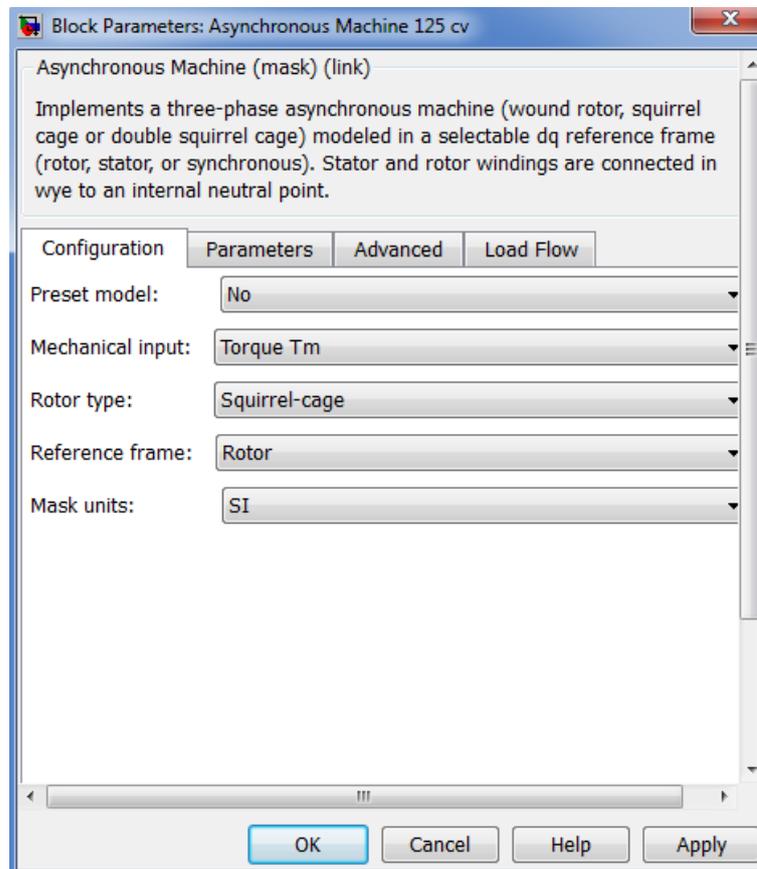


Figura 34 - Configurações iniciais do motor assíncrono.
Fonte: Da própria autora.

Nota-se que na aba *Configuration*, há ainda o campo *Present model* onde é possível escolher um motor com os parâmetros elétricos fornecidos pelo próprio Simulink. No entanto, caso a biblioteca não forneça o motor que o usuário precisa, basta clicar na aba *Parameters* e fazer as configurações necessárias.

Como os motores da autarquia são antigos e não atendem a Portaria nº 553 da Lei de Eficiência Energética nº 10.295 que entrou em vigor em dezembro de 2009, não foi possível o fabricante disponibilizar os parâmetros elétricos.

Diante disso, os parâmetros do motor: resistência e indutância do estator e rotor, indutância mútua e momento de inércia foram determinados com base nos valores da Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do circuito equivalente do MIT.

P_n (cv)	R_s (Ω)	X_{ls} (Ω)	R_r (Ω)	X_{lr} (Ω)	X_m (Ω)
4	5,35	15,36	12,46	13,05	227,49
15	1,92	4,86	0,86	2,22	93,3
75	0,27	0,84	0,11	0,80	28,9
150	0,098	0,51	0,04	0,68	14,6

Fonte: ASSUNÇÃO; ASSUNÇÃO, 2008.

No entanto, além do motor de 15 cv, o SAAE Formiga possui motores com as seguintes potências: 20, 40, 60, 100 e 125 cv. Logo, para determinar os valores dos parâmetros destes motores foi feita a interpolação linear com os dados da Tabela 3. O algoritmo da interpolação está no ANEXO B. Os valores calculados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros calculados do circuito equivalente do MIT.

P_n (cv)	R_s (Ω)	L_{ls} (mH)	R_r (Ω)	L_{lr} (mH)	L_m (mH)	J (Kg.m ²)
15	1,92	12,9	0,86	5,90	247,5	0,0638
20	1,7825	12,0	0,7975	5,60	233,3	0,1188
40	1,2325	8,40	0,5475	4,30	176,3	0,2406
60	0,6825	4,90	0,2975	3,10	119,4	0,4931
100	0,2127	1,90	0,0867	2,0	64,0	0,8740
125	0,1553	1,60	0,0633	1,90	51,4	1,56

Fonte: Da própria autora.

Os valores do momento de inércia (J) são de acordo com WEG (2014b). A Figura 35 mostra a configuração do bloco do motor de 125 cv, utilizando os dados da Tabela 4.

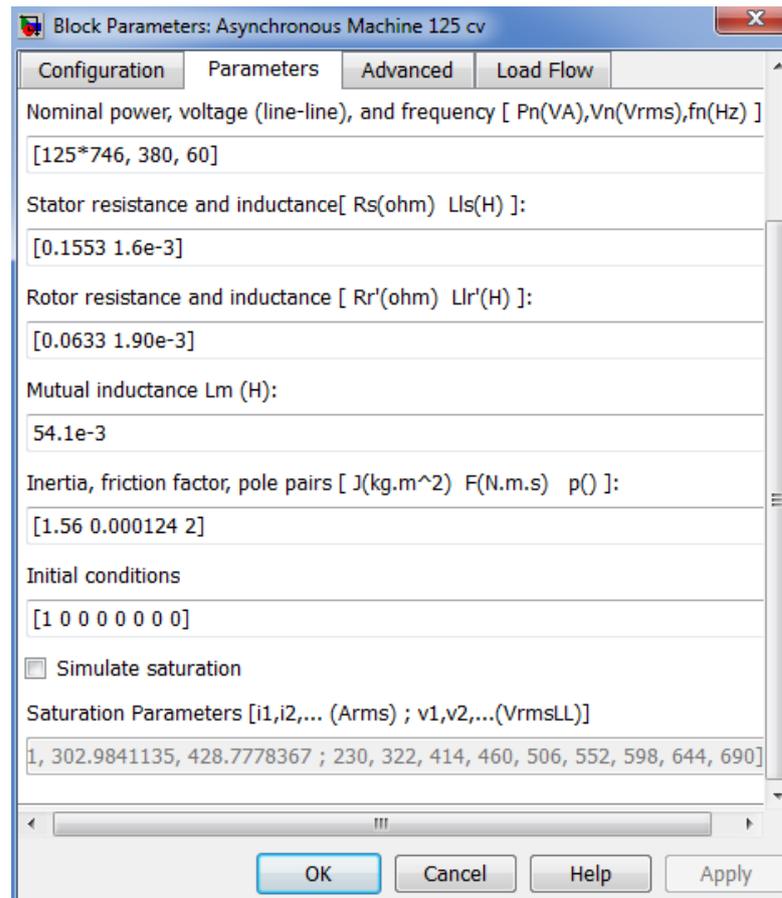


Figura 35 - Configuração do bloco do motor de 125 cv.
Fonte: Da própria autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a câmera termográfica, as medições do analisador de qualidade e as simulações no MATLAB®.

5.1 Inspeção com a câmera termográfica

Foram tiradas fotos do motor de 100 cv em regime permanente para verificar a existência de aquecimento excessivo. A Figura 36 ilustra a temperatura na carcaça deste motor.

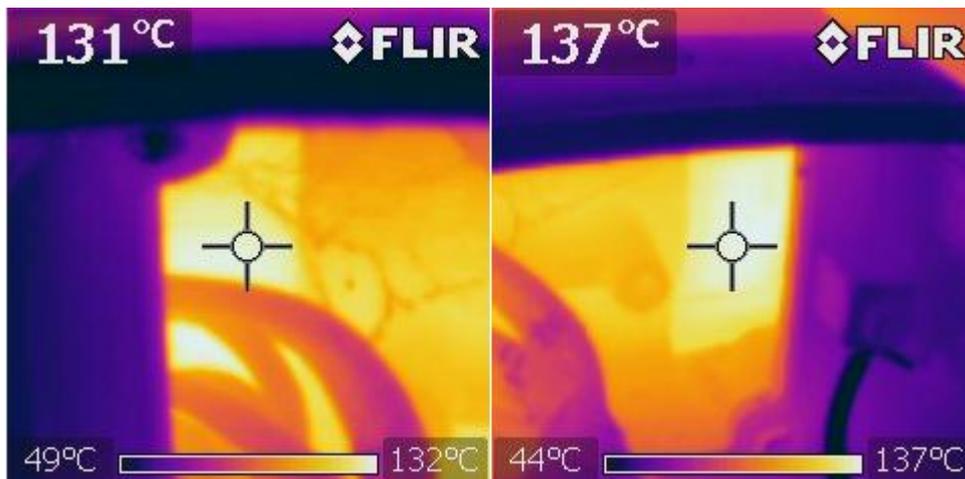


Figura 36 - Imagem termográfica da carcaça do motor de 100 cv.
Fonte: Da própria autora.

Considerando-se que um motor de indução trifásico apresenta uma forma construtiva robusta e uma construção simples, a sua vida útil pode ser considerada como sendo dependente predominantemente, da vida útil da isolamento dos seus enrolamentos (LOBOSCO; DIAS, 1988). O estado desta isolamento é afetada por diversos fatores agressivos, tais como umidade, esforços elétricos e mecânicos, vibração, ambientes corrosivos, ambientes com material particulado ou com poeiras ou gases inflamáveis. Dentre estes fatores, um dos mais relevantes é representado pela temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados (WEG, 2005).

O motor de 100 cv possui classe de isolamento B, cujo limite de temperatura conforme as normas IEC 60034-1 e NBR 17094, é 130 °C (WEG, 2014d). O limite de temperatura depende do tipo de material empregado, na Classe B, são utilizados

materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com este (BULGARELLI, 2006).

Um aumento da ordem de 10 °C na temperatura da isolação acima de sua classe térmica normalmente reduz sua vida útil pela metade. Esta limitação de temperatura refere-se ao ponto mais quente da isolação e não necessariamente aos enrolamentos como um todo. Deste modo, a existência de apenas um “ponto quente” no interior dos enrolamentos pode levar ao comprometimento do estado de todo o sistema de isolação do motor (BULGARELLI, 2006).

Inicialmente foi feita uma relação de problemas que poderiam ocasionar a elevação da temperatura no motor e ser responsável pela redução da vida útil do sistema de isolação dos enrolamentos:

- Tensão elevada;
- Sobrecarga;
- Partidas frequentes;
- Carga com elevada inércia;
- Presença de harmônicos de sequência negativa.

Os harmônicos são classificados quanto à sua ordem, frequência e sequência, conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 - Ordem, frequência e sequência dos harmônicos.

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n * 60	(+, -, 0)

Fonte: MORENO, 2001.

Foram descartados problemas com o nível de harmônicos, uma vez que as medições evidenciaram menos de 3% de distorção harmônica total da corrente (DHTi) em cada uma das fases do motor, como pode ser visto na Figura 37. As harmônicas de sequência negativa contribuem com torque negativo, freando literalmente o motor, o que resultaria em aumento do consumo e conseqüente sobreaquecimento indesejado (MORENO, 2001).

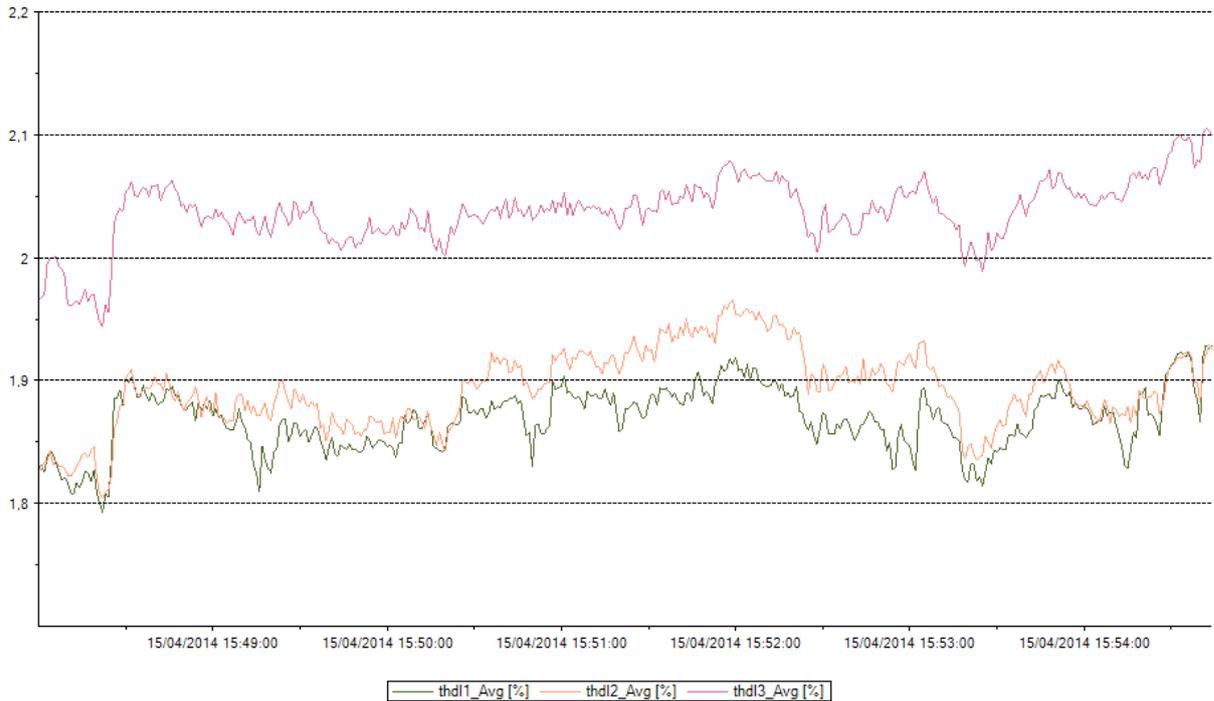


Figura 37 - DHTi de cada fase do motor de 100 cv.
Fonte: Da própria autora.

Após a última queima do motor foi investigada a presença de algum problema na bomba acoplada ao motor elétrico, constatando que o sobreaquecimento do motor de 100 cv era consequência da utilização equivocada do rotor que fica fixado no eixo da bomba. No SAAE são utilizadas bombas centrífugas tipo voluta ou caracol, como pode ser vista na Figura 38.



Figura 38 - Bomba centrífuga tipo voluta ou caracol.
Fonte: Da própria autora.

O rotor utilizado na bomba é para motores com potência mínima de 150 cv, sendo esta superior a do motor em operação. Isto levou o motor a operar com sobrecarga, fazendo com que o equipamento fosse submetido a um esforço maior do que foi projetado.

A Figura 39 mostra a diferença entre a peça ideal para o motor de 100 cv, localizada à esquerda, e a peça que estava sendo utilizada no conjunto motor-bomba, à direita.



Figura 39 - Rotor utilizado em bomba acoplada ao motor de 100 cv (à esquerda) e ao motor de 150 cv (à direita).

Fonte: Da própria autora.

Os níveis de corrente medidos no motor quando este operava sobrecarregado estava cerca de 75 A acima do valor nominal da corrente, que é 240 A. Após a substituição da peça a corrente drenada pelo motor foi reduzida em 43%. A Figura 40 mostra os valores das correntes por fase do motor operando sobrecarregado.

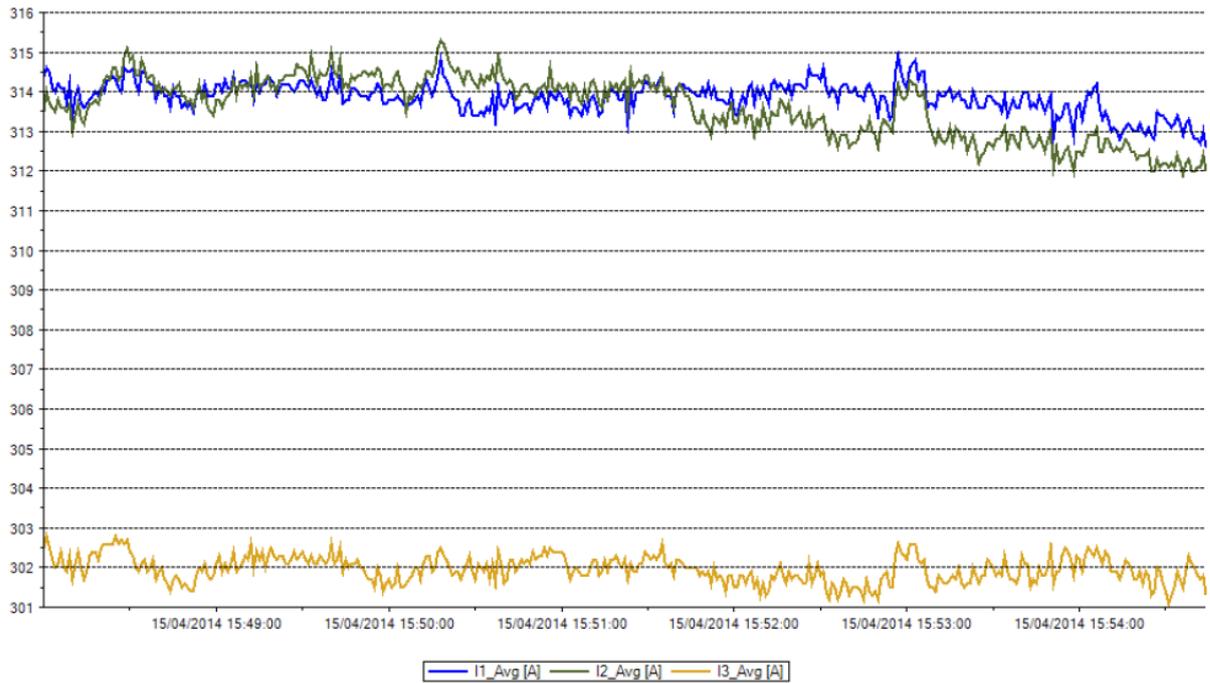


Figura 40 - Corrente por fase do motor sobrecarregado.
Fonte: Da própria autora.

A redução significativa da corrente pode ser observada na Figura 41.

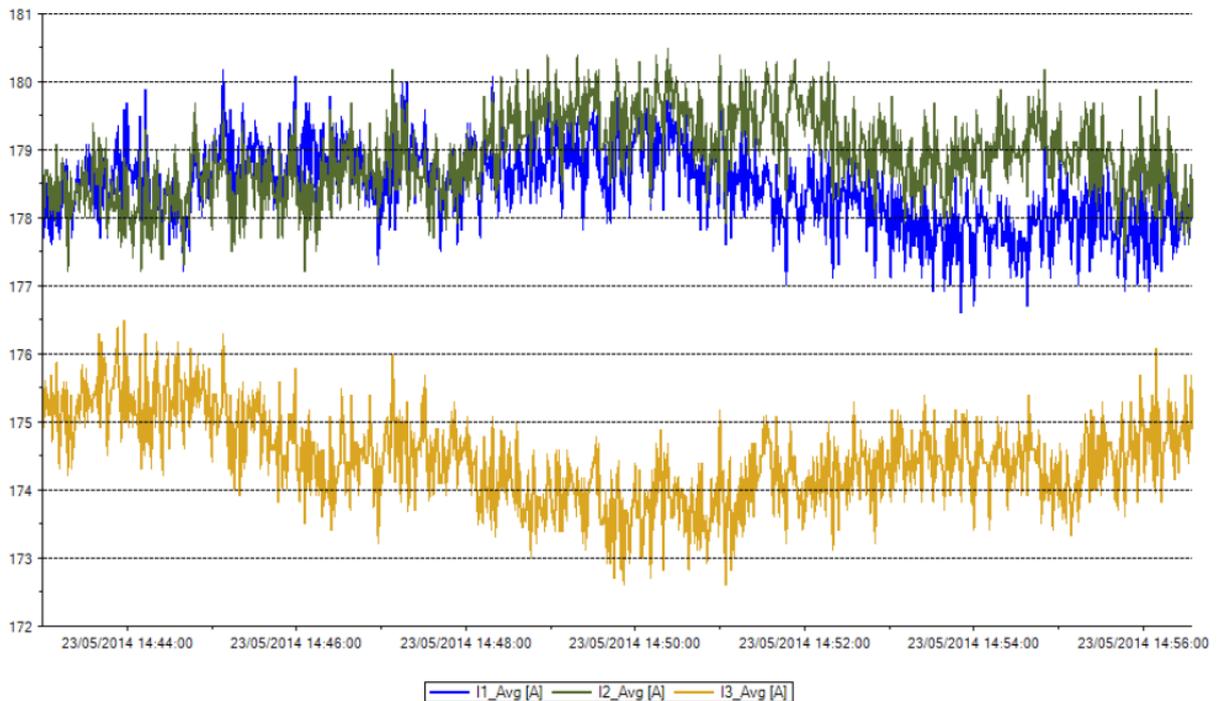


Figura 41 - Corrente por fase do motor com operação normal.
Fonte: Da própria autora.

Com a redução da corrente absorvida pelo motor as perdas por aquecimento foram diminuídas e a temperatura de operação do equipamento foi normalizada, como mostra a Figura 42.

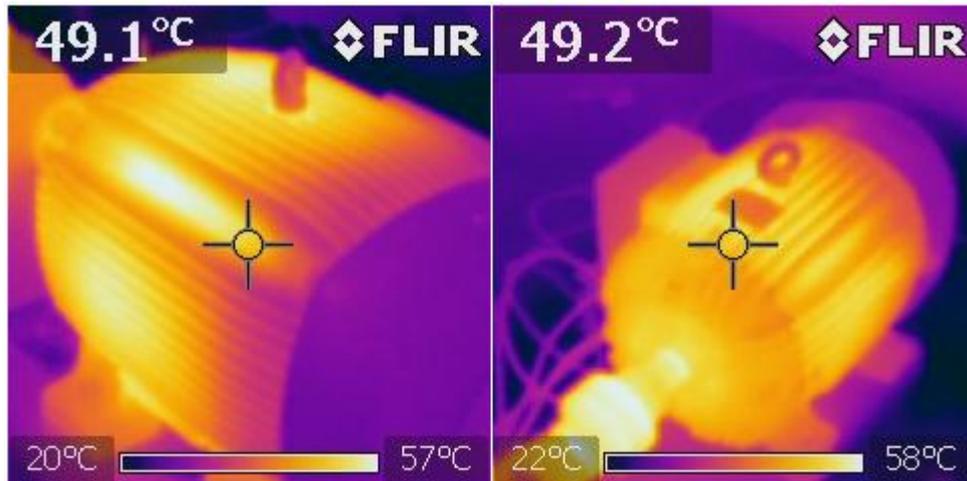


Figura 42 - Imagem termográfica do motor em operação normal.
Fonte: Da própria autora.

5.2 Sobrecarga nos transformadores

O máximo aproveitamento da potência de um transformador se dá através de aplicações de cargas ao equipamento, de forma a não comprometer a sua vida útil. Os valores das cargas máximas admissíveis dependem de vários fatores, incluindo as características de projeto, construção e operação, a curva diária de carregamento, o histórico de carregamento, o programa de manutenção, a temperatura ambiente, o período de carregamento acima da potência nominal, as perdas envolvidas, etc. (GODEC; SARUNAC, 1992).

No transformador de 300 kVA, a medição realizada com o analisador de qualidade registrou valores máximos e médios da potência aparente. Durante o período analisado, foram medidos valores máximos superiores a potência nominal, como pode ser visto na Figura 43.

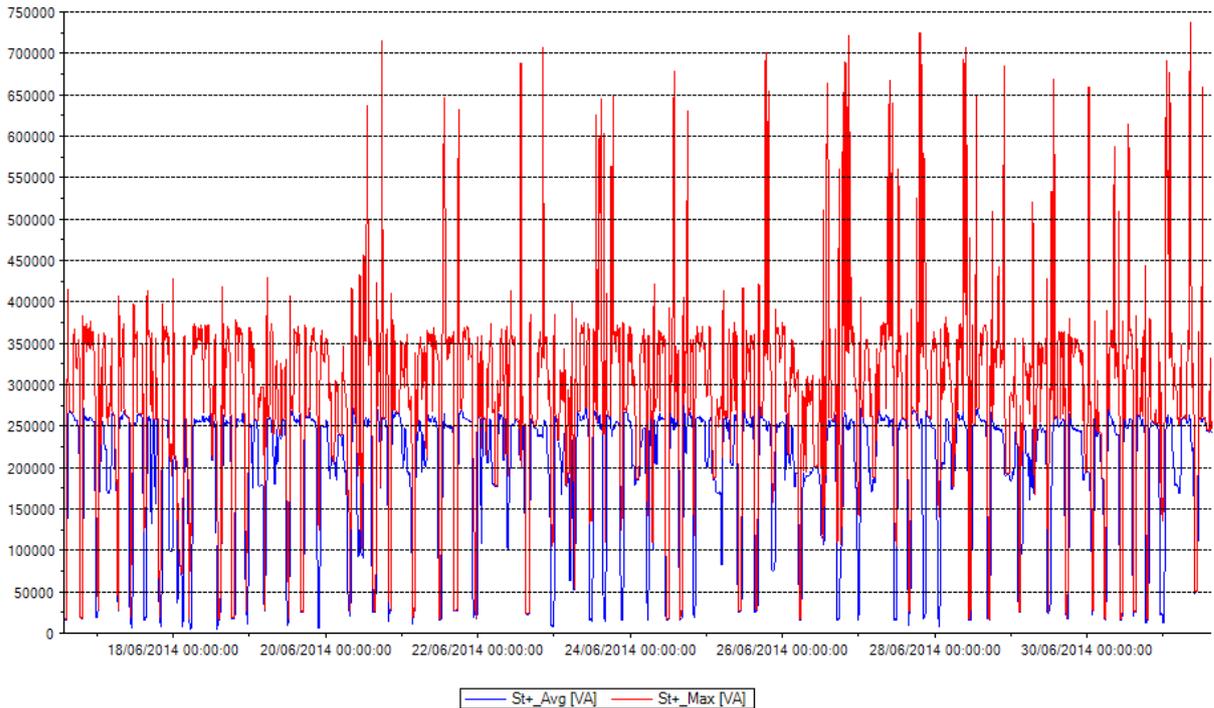


Figura 43 - Medição da potência aparente do transformador de 300 kVA.
Fonte: Da própria autora.

Para verificar a existência de sobrecarga, foi traçada a curva de carga global média e máxima do transformador. As curvas foram plotadas no MATLAB® utilizando os valores de potência aparente medidos pelo analisador de qualidade. Para melhor visualização do nível de carregamento do transformador no gráfico, os valores em kVA foram transformados em pu. A Figura 44 mostra o nível de carregamento do transformador de 300 KVA.

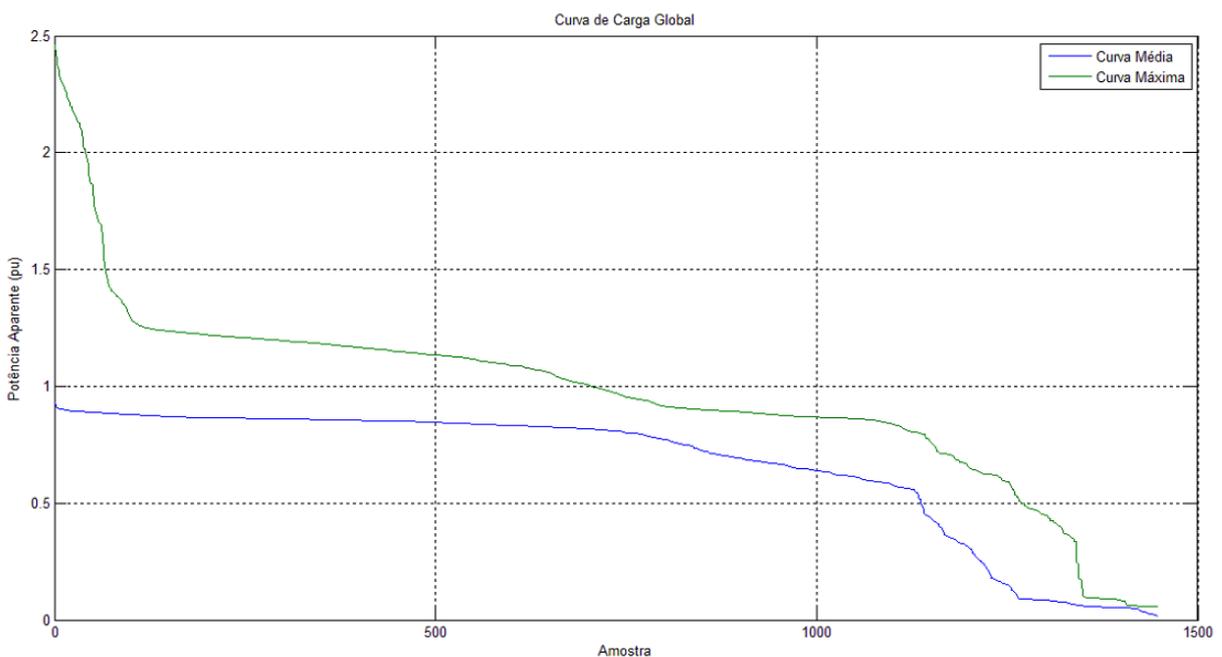


Figura 44 - Curva de carga global do transformador de 300 kVA.
Fonte: Da própria autora.

Através do gráfico da Figura 44, verificou-se que durante o período analisado houve sobrecarga de aproximadamente 2,5 vezes a capacidade do transformador. De acordo com o relatório gerado na simulação computacional, este transformador operou 48,55% do tempo em sobrecarga.

Rood (1963) propôs um método para estimativa de vida útil de transformadores de distribuição baseado no ciclo e pico de carga anual. Estudos preliminares mostraram que um aumento no carregamento de 24% causa um aumento de 20 vezes na taxa de envelhecimento de um transformador e que carregamentos esporádicos também têm uma significativa influência no envelhecimento da isolação.

O algoritmo utilizado na análise da sobrecarga do transformador de 300 kVA encontra-se no ANEXO C.

Também foi realizada a medição com o analisador no transformador de 150 kVA para verificar a existência de sobrecarga. Os valores médios foram inferiores a potência aparente nominal do transformador. No entanto, os valores máximos ultrapassaram a potência nominal, como mostra a Figura 45.

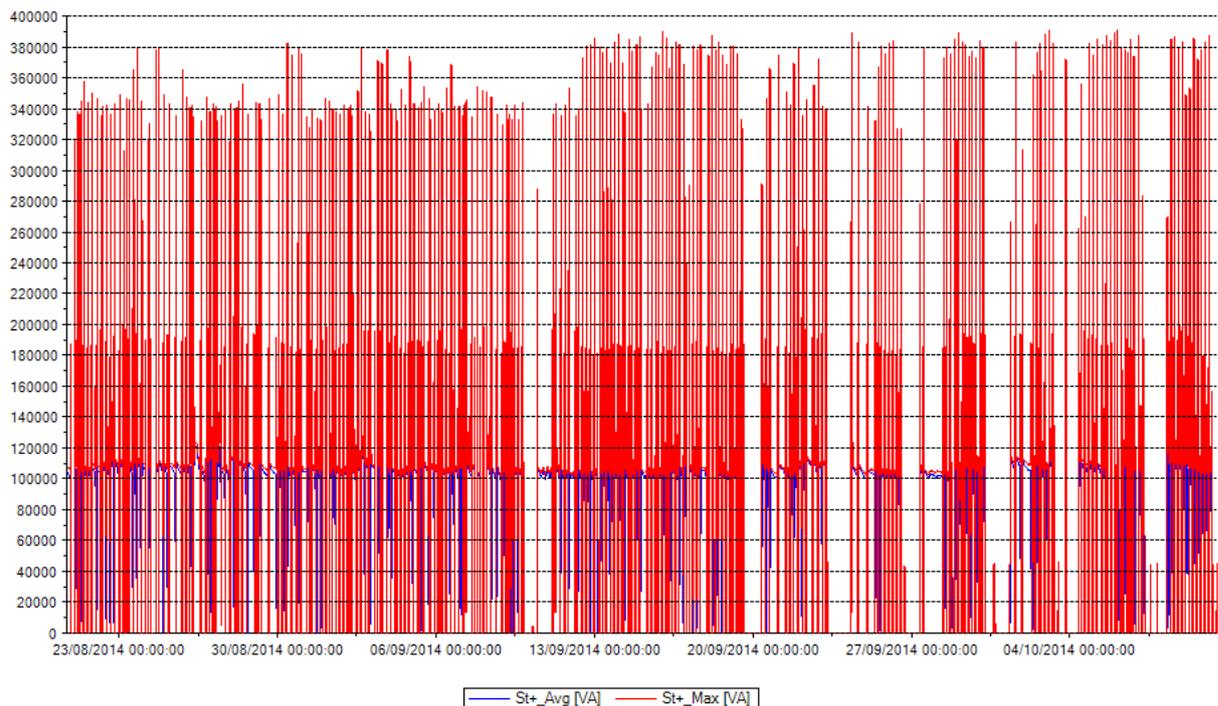


Figura 45 - Medição da potência aparente do transformador de 150 kVA.
Fonte: Da própria autora.

Assim como no transformador de 300 kVA, os valores medidos foram analisados no MATLAB® por meio do algoritmo do ANEXO D. O transformador de 150 kVA também operou com sobrecarga, como mostra a Figura 46. Observa-se que a

sobrecarga foi superior a 2,5 vezes a capacidade do transformador, no entanto, ocorreu por um período menor: 10,23% do tempo.

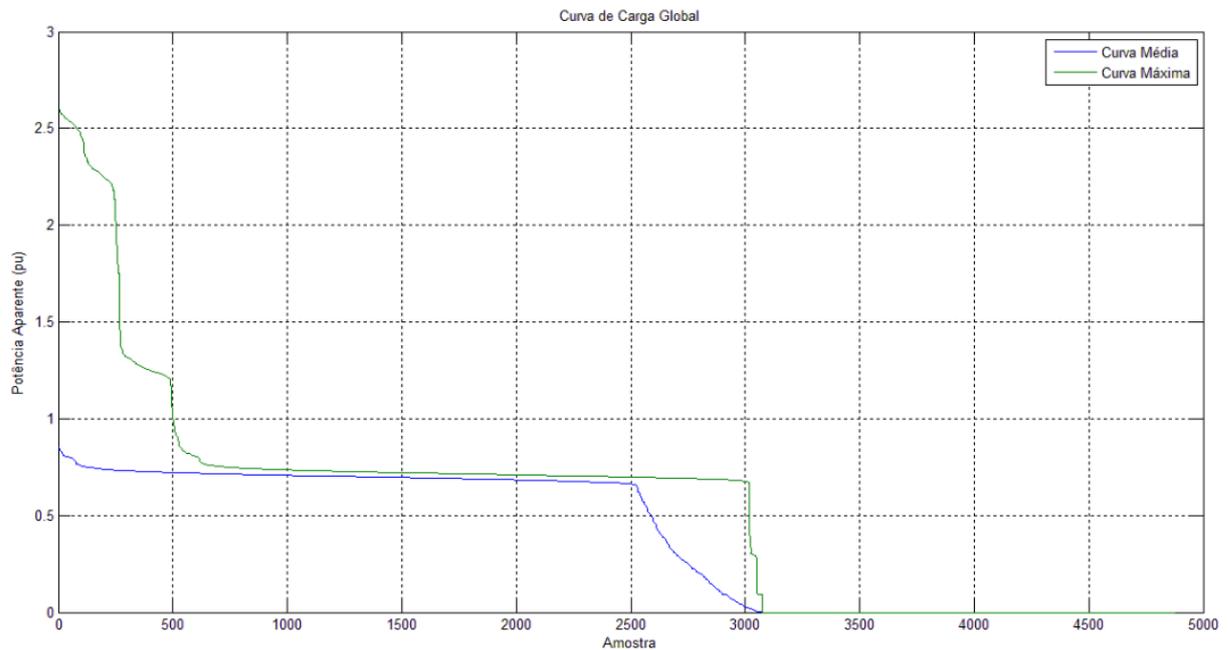


Figura 46 - Curva de carga global do transformador de 150 kVA.
Fonte: Da própria autora.

A vida útil técnica estimada de um transformador a operar em plena carga é de 20 anos, mas quando opera em subcarga, a sua vida útil técnica passa a ser superior a 20 anos e, quando opera em sobrecarga, a sua vida útil técnica torna-se inferior a 20 anos (MONIZ, 2007).

5.3 Perfil de tensão

Para cada valor de tensão nominal há uma faixa de tensão de leitura considerada adequada, com intervalos superiores e inferiores considerados precários e críticos. Por exemplo, para uma ligação trifásica com tensão nominal de 220 V, as faixas de limites de tensão são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Faixas de limites de tensão para 220/127V.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (109 \leq TL < 116 \text{ ou } 133 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

Fonte: ANEEL, 2014.

Como forma de evidenciar os problemas que eventualmente ocorrem no local, a regulamentação do PRODIST, Módulo 8, sugere que seja realizada uma campanha de medições de longa duração, aumentando o espaçamento entre a coleta de amostras. Adotando essa metodologia, pode-se verificar o comportamento das tensões de fase e de linha ao longo dos dias (ANEEL, 2014).

Foi analisado o perfil das tensões de fase (A, B e C) e das tensões de linha (AB, BC e CA), considerando os valores máximos e mínimos.

Primeiramente foi verificado o perfil das tensões do secundário do transformador da 300 kVA. Os valores medidos foram plotados no MATLAB® e os resultados estão na Tabela 7.

Tabela 7 - Quantidade de amostras que excederam os limites adequados da tensão de fase do transformador de 300 kVA.

	Quantidade de Amostras	
	Faixa Precária	Faixa Crítica
Fase A	1	0
Fase B	2	0
Fase C	1	0

Fonte: Da própria autora.

De acordo com limites estabelecidos pelo PRODIST na Tabela 6, as amostras da Fase B excederam a faixa considerada adequada em 0,2 e 0,1 V. Os valores registrados foram respectivamente 133,2 e 133,1 V. O valor medido da amostra da Fase A e da Fase C na faixa precária foi 133,1 V. O algoritmo desenvolvido para gerar os resultados do perfil de tensão do secundário do transformador de 300 kVA está disponível no ANEXO E.

A Figura 47 ilustra o perfil das tensões da Fase B.

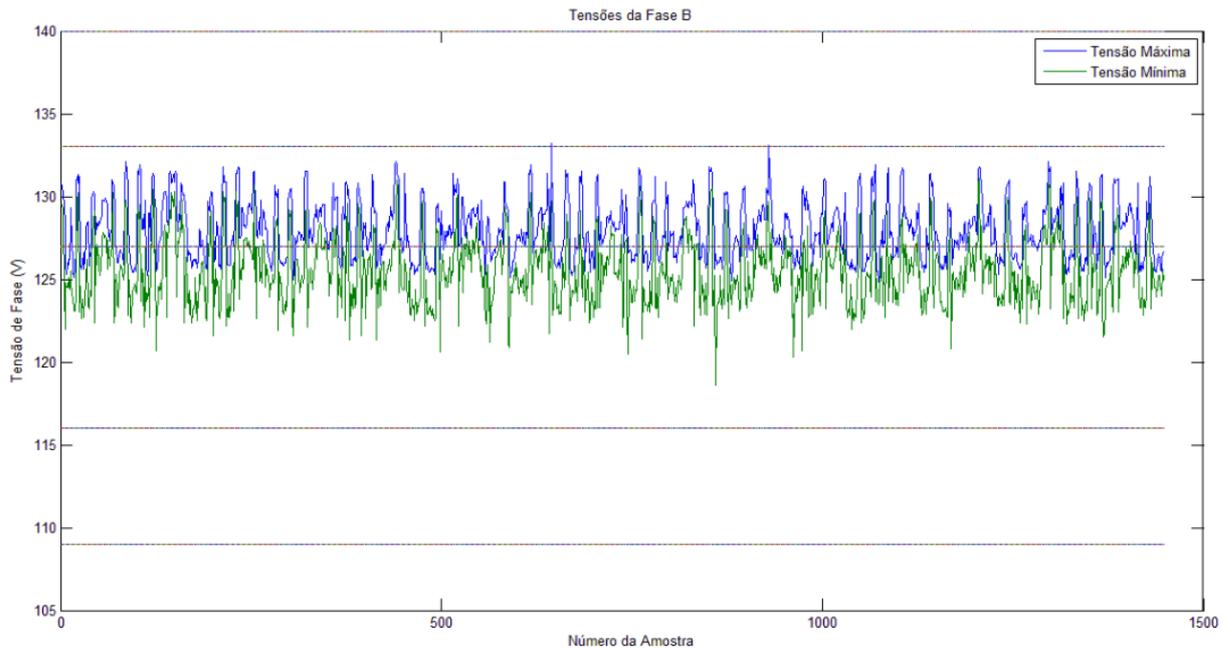


Figura 47 - Perfil das tensões da Fase B do transformador de 300 kVA.
Fonte: Da própria autora.

As tensões de linha (AB, BC e CA) não apresentaram valores na faixa crítica ou precária de tensão.

A análise do perfil das tensões do secundário do transformador de 150 kVA foi feita com base na Tabela 8, que estabelece as faixas de limites de tensão para 380/220V, segundo o Módulo 8 do PRODIST.

Tabela 8 - Faixas de limites de tensão para 380/220V.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(348 \leq TL \leq 396) / (201 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(327 \leq TL < 348 \text{ ou } 396 < TL \leq 403) /$ $(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 327 \text{ ou } TL > 403) /$ $(TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: ANEEL, 2014.

Os valores de tensão registrados durante a medição foram simulados no MATLAB® e os resultados obtidos estão na Tabela 9. Constatou-se que em todas as fases, as tensões excederam os limites da faixa de tensão adequada.

Tabela 9 - Quantidade de amostras que excederam os limites adequados da tensão de fase do transformador de 150 kVA.

	Quantidade de Amostras	
	Faixa Precária	Faixa Crítica
Fase A	41	261
Fase B	96	272
Fase C	60	260

Fonte: Da própria autora.

Através da Tabela 9, concluiu-se que a Fase B apresentou o comportamento mais crítico, com maior quantidade de amostras nas faixas precária e crítica de tensão.

A Figura 48 apresenta o perfil das tensões da Fase B.

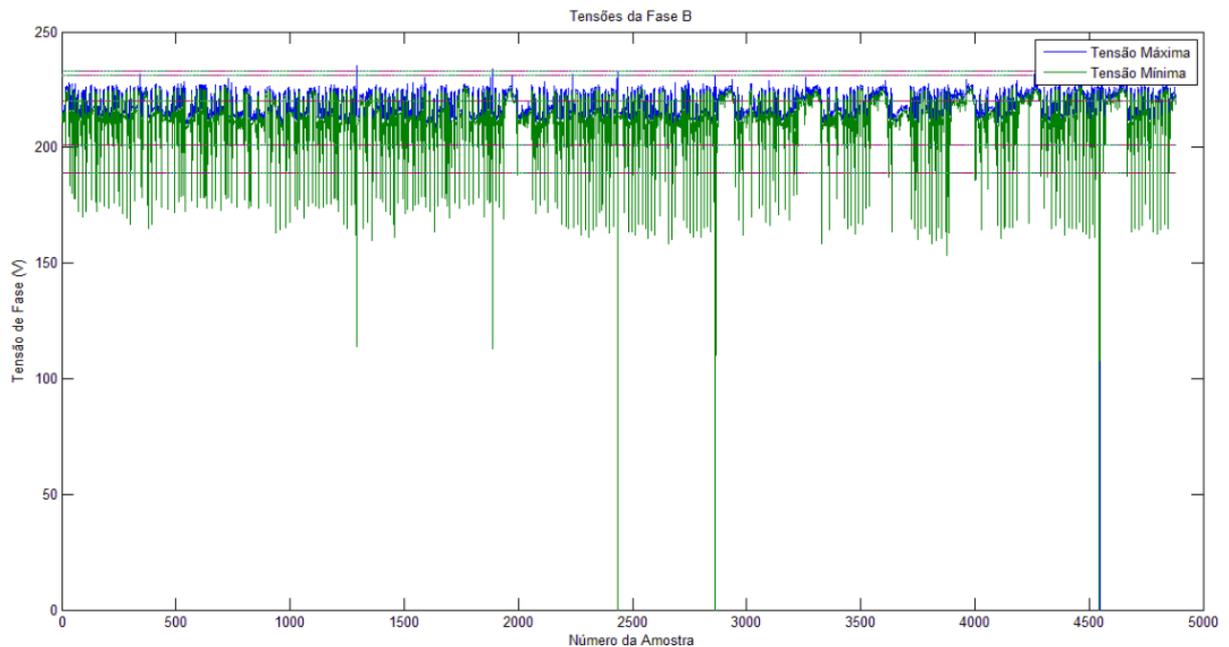


Figura 48 - Perfil das tensões da Fase B do transformador de 150 kVA.

Fonte: Da própria autora.

A mesma análise foi realizada para as tensões de linha. Em todos os casos, os limites de tensão da faixa adequada para a tensão de linha foram excedidos, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Quantidade de amostras que excederam os limites adequados da tensão de linha do transformador de 150 kVA.

	Quantidade de Amostras	
	Faixa Precária	Faixa Crítica
Linha AB	77	268
Linha BC	86	267
Linha CA	54	260

Fonte: Da própria autora.

A Figura 49 ilustra o comportamento das tensões da Linha BC.

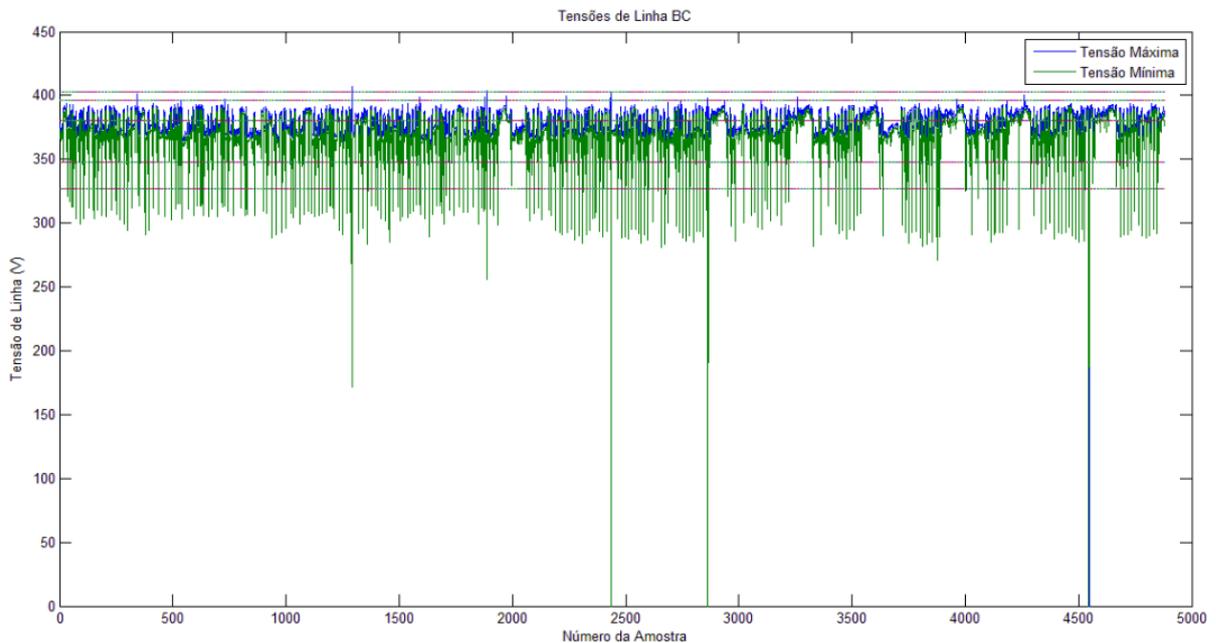


Figura 49 - Perfil das tensões da Linha BC do transformador de 150 kVA.

Fonte: Da própria autora.

O algoritmo desenvolvido para analisar o perfil de tensão do secundário do transformador de 150 kVA encontra-se no ANEXO F.

5.4 Distorção harmônica total da tensão

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental, que no caso da rede de alimentação é 60 Hz (ANEEL, 2014).

A Tabela 11 reproduz os valores de referência estabelecidos pela ANEEL para as distorções harmônicas individuais.

Tabela 11 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	$V_N \leq 1 \text{ kV}$		$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_N \leq 230 \text{ kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	> 25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	> 21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	> 12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL, 2014.

As medições com o analisador de qualidade foram realizadas no secundário dos transformadores de 300 e 150 kVA. Os valores registrados incluem distorções harmônicas individuais de tensão até a 11ª ordem.

Foram analisados os harmônicos individuais de cada fase dos transformadores. O harmônico que apresentou maior índice de distorção em ambos os transformadores foi o de 5º ordem. No transformador de 300 kVA, o 5º harmônico foi mais dominante na Fase C, como mostra a Figura 50.

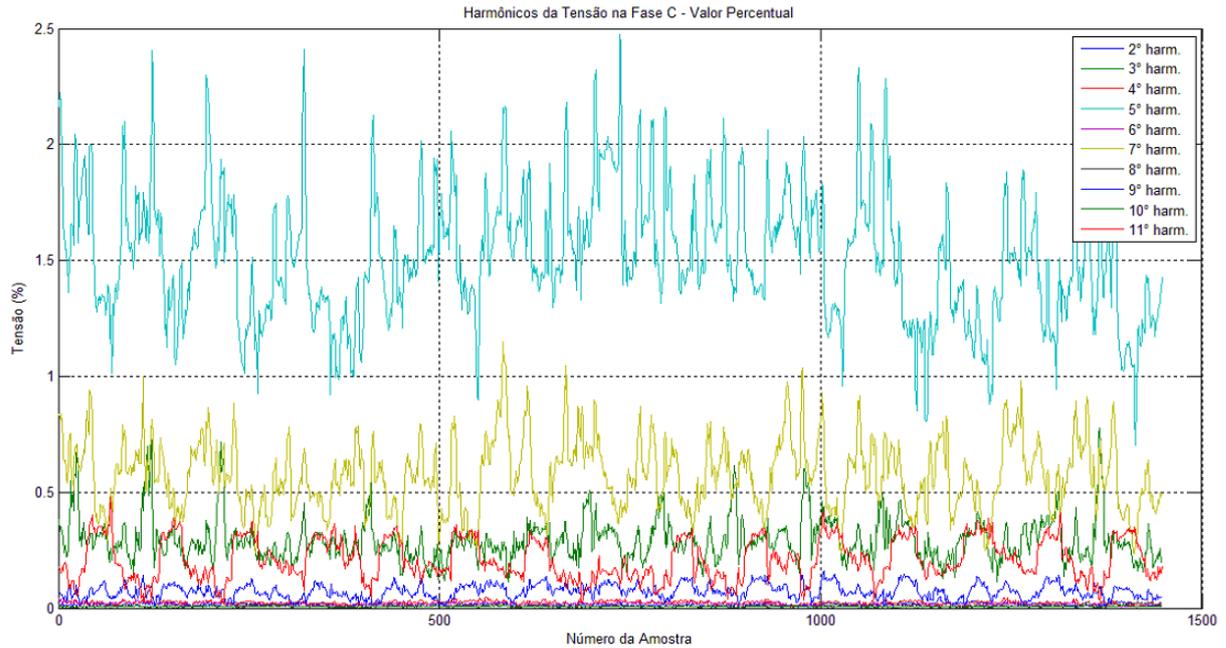


Figura 50 - Distorção harmônica individual da tensão na Fase C do transformador de 300 kVA.

Fonte: Da própria autora.

No entanto, os valores registrados de distorção harmônica individual estão dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL, conforme a Tabela 11.

No transformador de 150 kVA, a Fase C também apresentou maiores índices de distorção harmônica individual de tensão, com destaque para o 5º harmônico. Contudo, os valores não excederam os limites de referência, como pode ser visto na Figura 51.

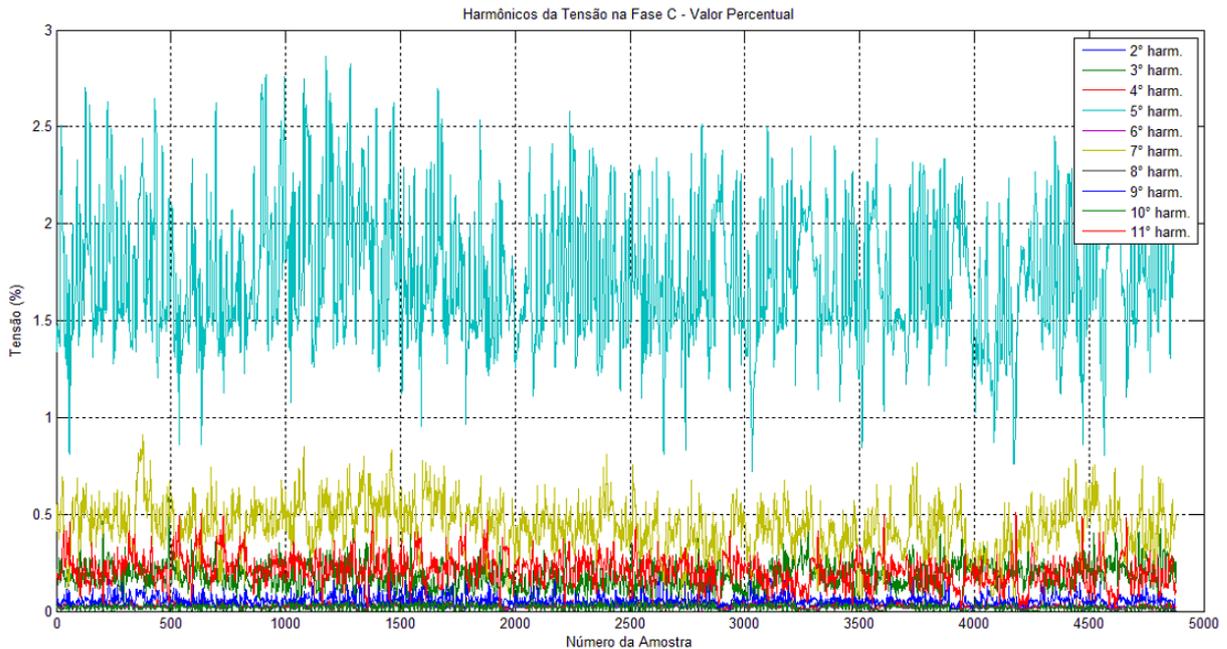


Figura 51 - Distorção harmônica individual da tensão na Fase C do transformador de 150 kVA.

Fonte: Da própria autora.

O PRODIST, em seu Módulo 8, também define os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão, apresentados na Tabela 12. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE (ANEEL, 2014).

Tabela 12 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT _v) (%)
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$	3

Fonte: ANEEL, 2014.

A Figura 52 ilustra a DHT_v das fases do transformador de 300 kVA.

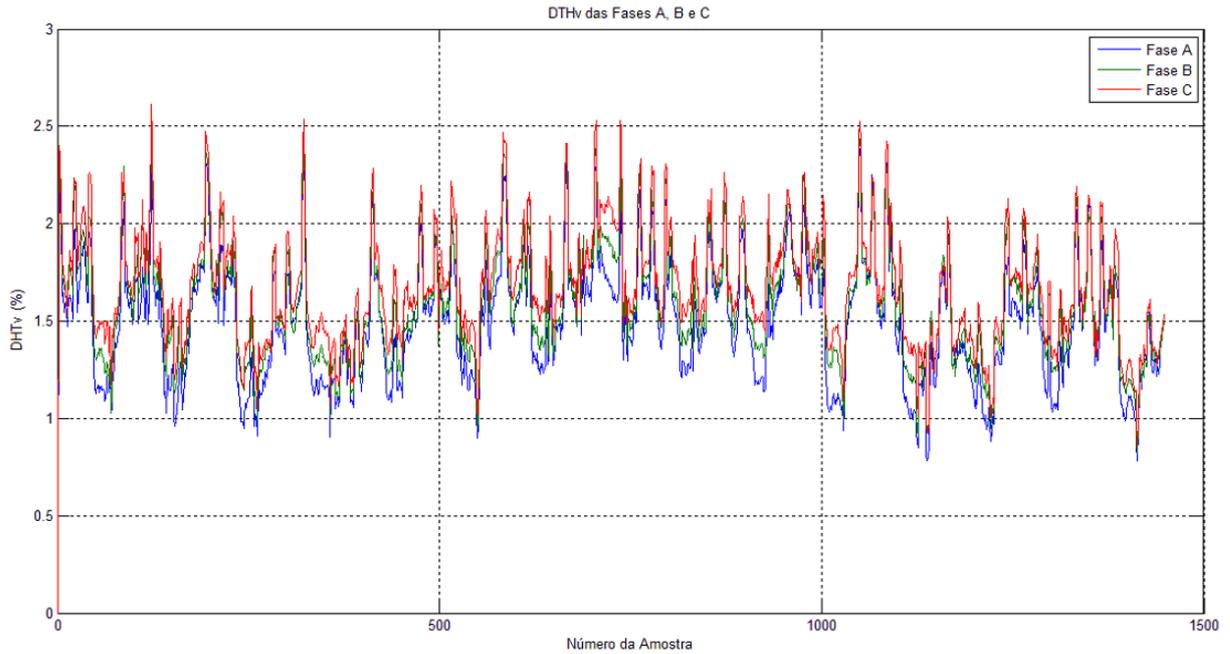


Figura 52 - DHTv do transformador de 300 kVA.
Fonte: Da própria autora.

A distorção harmônica total de tensão do transformador de 150 kVA é mostrada na Figura 53.

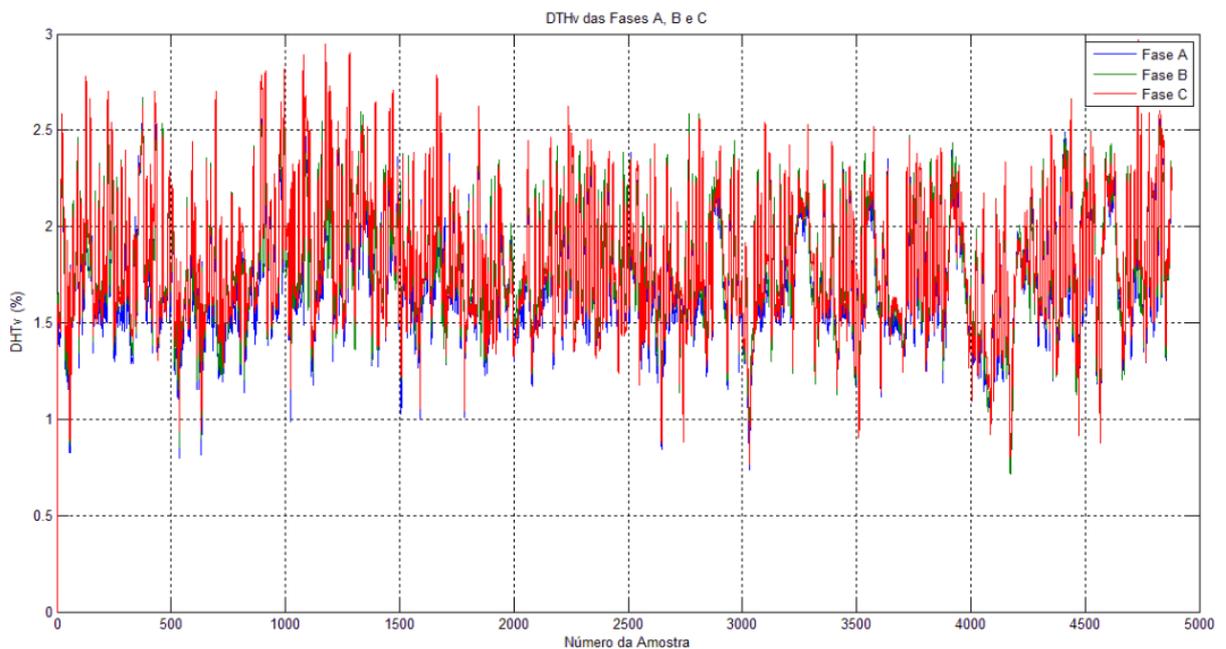


Figura 53 - DHTv do transformador de 150 kVA.
Fonte: Da própria autora.

Embora os transformadores tenham apresentado níveis de distorção harmônica total de tensão, os valores não excederam os limites estabelecidos pela norma, que, neste caso, é de 10%.

O algoritmo desenvolvido para a realização da análise da distorção harmônica da tensão para o transformador de 300 kVA pode ser visto no ANEXO G e do transformador de 150 kVA no ANEXO H.

5.5 Distorção harmônica total da corrente

Nas medições realizadas com o analisador de qualidade, foram registradas distorções harmônicas de corrente até a 49ª ordem, no entanto, foram analisados os harmônicos até a 11ª ordem, pois estes apresentaram maior relevância em relação aos demais.

Os limites harmônicos de correntes de equipamentos ligados à rede de distribuição de baixa tensão com corrente por fase maior que 16 A são definidos pela IEC 61000-3-4, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental.

Mínimo R_{sce}	Fator de distorção harmônica admissível (%)		Limites individuais de harmônico admissível I_n/I_1 (%)					
	THD	PWHD	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Fonte: IEC, 1998.

Define-se potência de curto-circuito (R_{sce}) como a relação entre a potência nominal (MVA) do transformador e a sua impedância. A Tabela 14 mostra os valores da potência de curto-circuito dos transformadores analisados neste trabalho.

Tabela 14 - Potência de curto-circuito dos transformadores do SAAE.

Potência nominal do transformador (MVA)	Impedância do transformador (%)	R _{sce}
0,3	4,3	6,98
0,15	4,3	3,49

Fonte: Da própria autora.

Logo, os valores da Tabela 13 utilizados como referência foram para um R_{sce} mínimo igual a 66.

O algoritmo usado para gerar os resultados dos transformadores de 300 e 150 kVA encontram-se respectivamente no ANEXO I e no ANEXO J.

Os resultados mostraram que em todas as fases do transformador de 300 kVA houve predominância do 3° e 5° harmônicos e que estes excederam os limites, respectivamente, de 23 e 11% de distorção estabelecidos pela norma. Dentre as fases, a que apresentou os maiores índices de distorção harmônica individual de corrente foi a Fase B, como mostra a Figura 54.

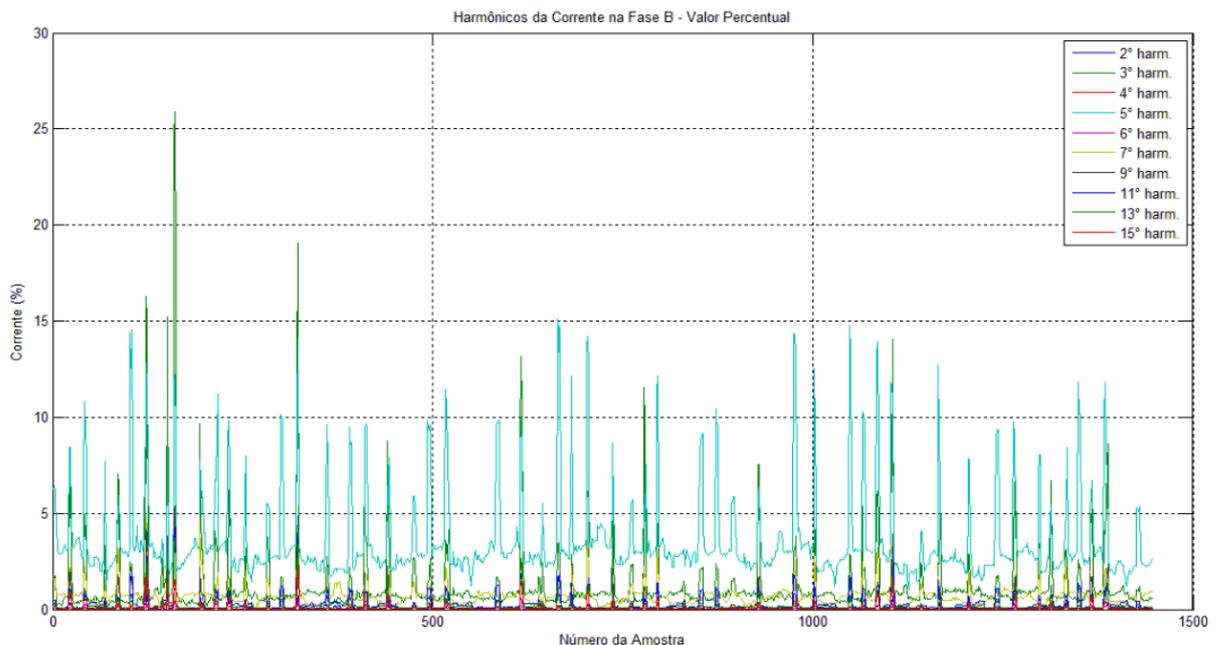


Figura 54 - Distorção harmônica individual da corrente na Fase B do transformador de 300 kVA.

Fonte: Da própria autora.

No transformador de 150 kVA, os harmônicos de 3ª e 5ª ordem também foram predominantes sobre os demais e ultrapassaram os valores de referência apresentados na Tabela 13, exceto na Fase C, onde o 3º harmônico não excedeu o limite de 23%. A Figura 55 ilustra a distorção harmônica individual da corrente da Fase B, que apresentou comportamento mais crítico em relação ao conteúdo harmônico.

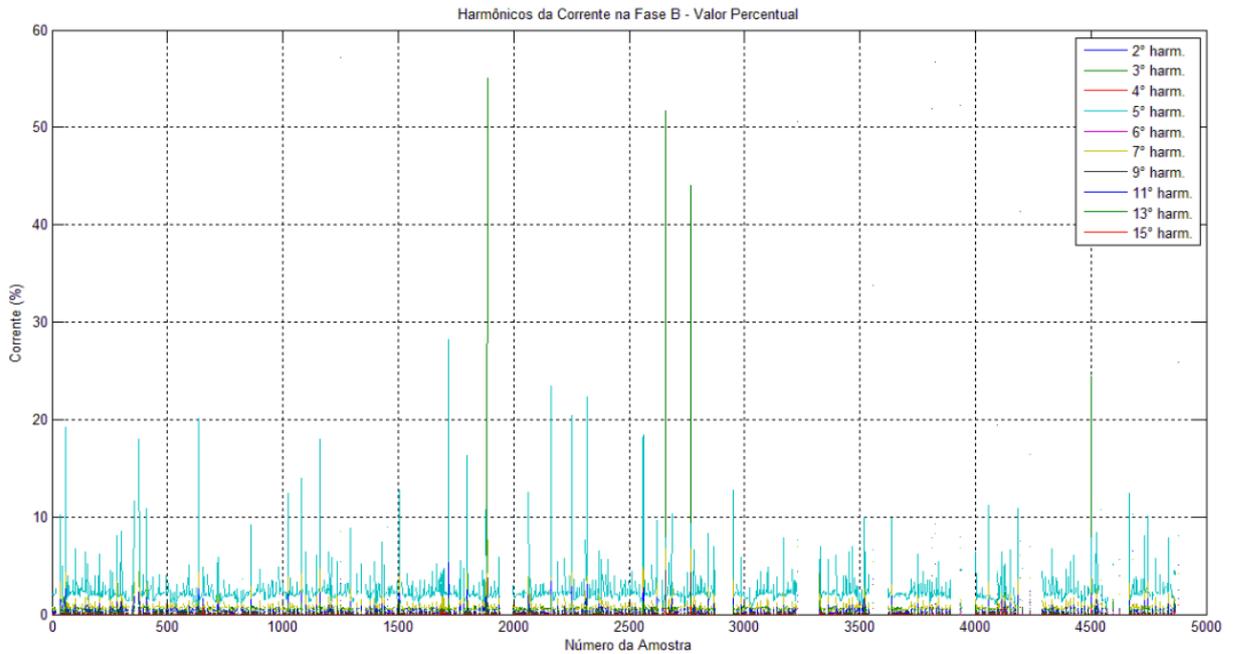


Figura 55 - Distorção harmônica individual da corrente na Fase B do transformador de 150 kVA.

Fonte: Da própria autora.

Também foi analisada a distorção harmônica total da corrente de ambos os transformadores. A Figura 56 mostra a DHTi do transformador de 300 kVA, verifica-se que durante o período analisado, não foi ultrapassado o limite de 25% estabelecido pela norma.

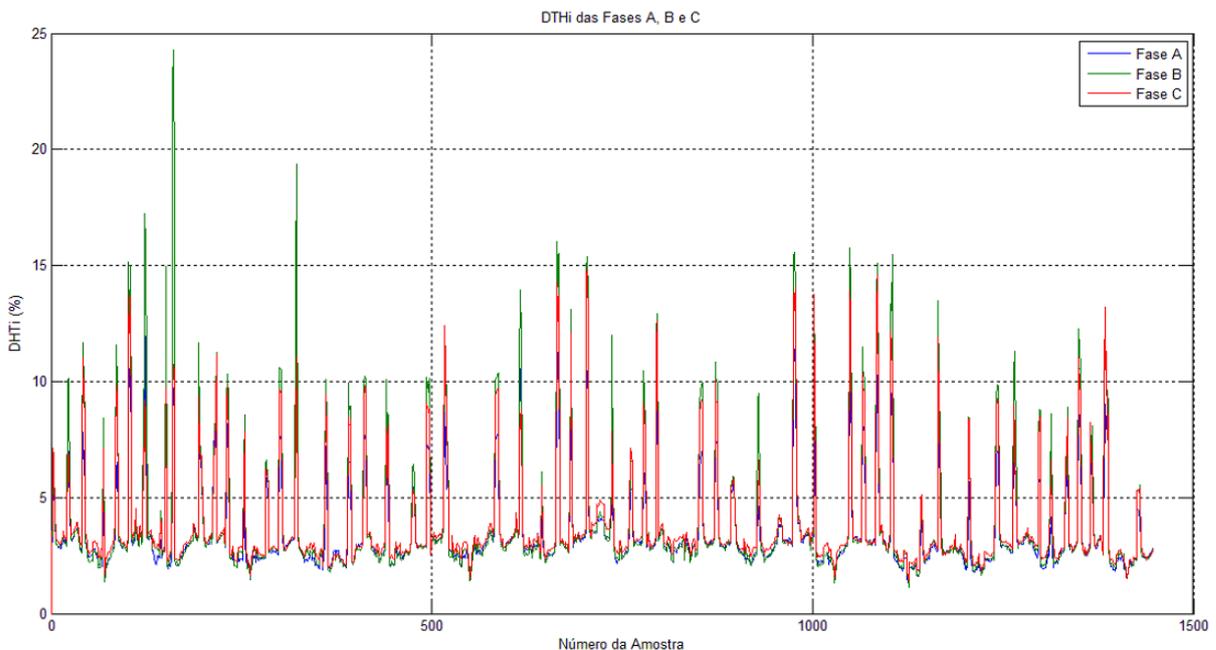


Figura 56 - DHTi do transformador de 300 kVA.

Fonte: Da própria autora.

No entanto, no transformador de 150 KVA o valor de referência da DHTi (25%) foi ultrapassado nas três fases, como pode ser visto na Figura 57.

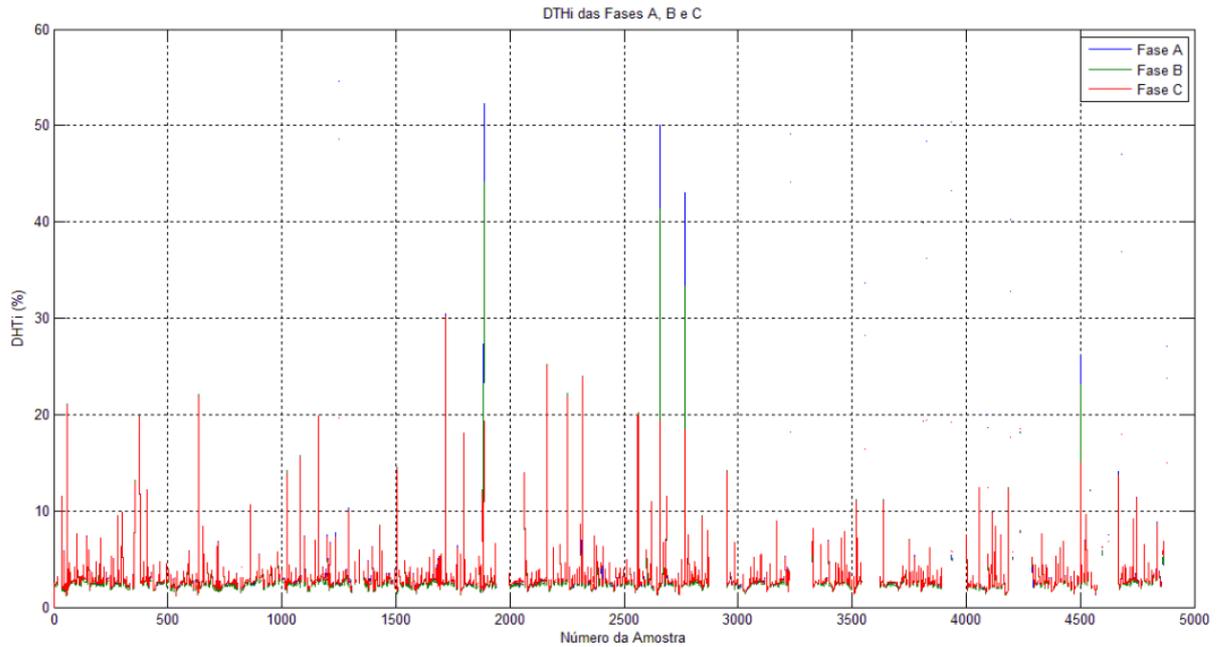


Figura 57 - DHTi do transformador de 150 kVA.
Fonte: Da própria autora.

5.6 Variações de frequência

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (ANEEL, 2014).

As variações de frequência do transformador de 300 kVA podem ser vistas na Figura 58.

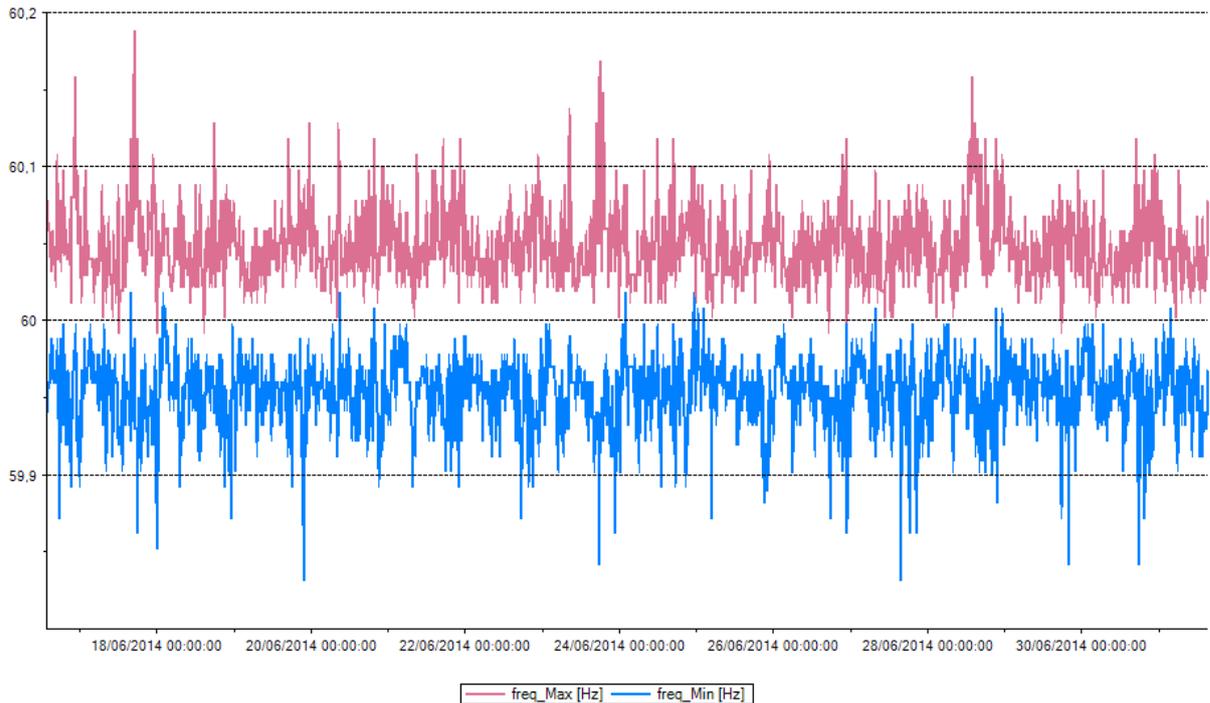


Figura 58 - Variações de frequência no transformador de 300 kVA.
Fonte: Da própria autora.

Verifica-se que os valores máximos e mínimos medidos pelo analisador de qualidade excederam os limites estabelecidos pelo PRODIST, em seu Módulo 8. Esse fato também foi constatado no transformador de 150 kVA, como pode ser visto na Figura 59.

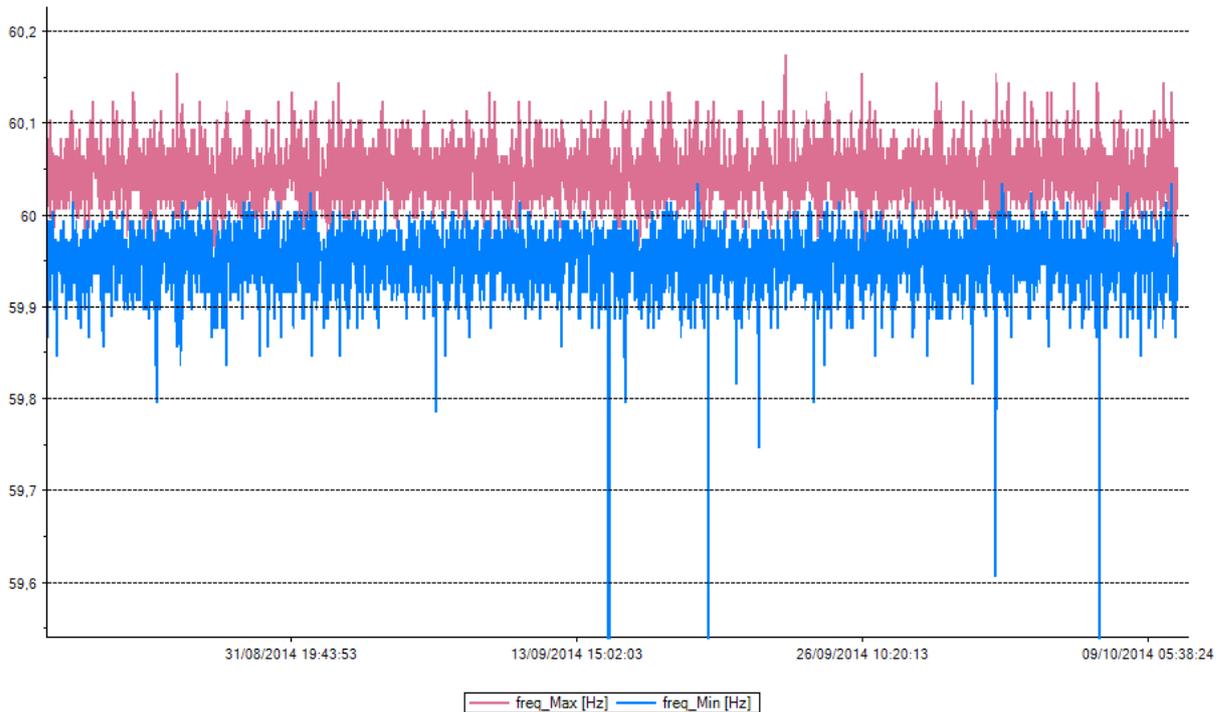


Figura 59 - Variações de frequência no transformador de 150 kVA.
Fonte: Da própria autora.

Pequenas variações podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração. As variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração (MALTA, 2011).

5.7 Afundamentos de tensão nas partidas dos motores

Atualmente, há duas definições aplicáveis a afundamentos de tensão. A primeira, estabelecida pelo *Institute of Electric and Electronics Engineers* (IEEE) e a segunda, pela *International Electrotechnical Commission* (IEC).

O IEEE, através da norma IEEE *Standard 1159* (IEEE, 1995), que trata da monitoração dos fenômenos da qualidade da energia elétrica, define afundamento de tensão como uma redução no valor RMS (*Root Mean Square*) da tensão dentro da faixa de 0,1 e 0,9 pu, durante um período de tempo compreendido entre 0,5 ciclo e 60 segundos. A intensidade do afundamento, segundo IEEE (1995), é definida pela

menor tensão remanescente durante a ocorrência do distúrbio. Um evento, cuja intensidade é inferior a 0,1 pu, é considerado como sendo uma interrupção.

A Figura 60 mostra um exemplo de afundamento de tensão.

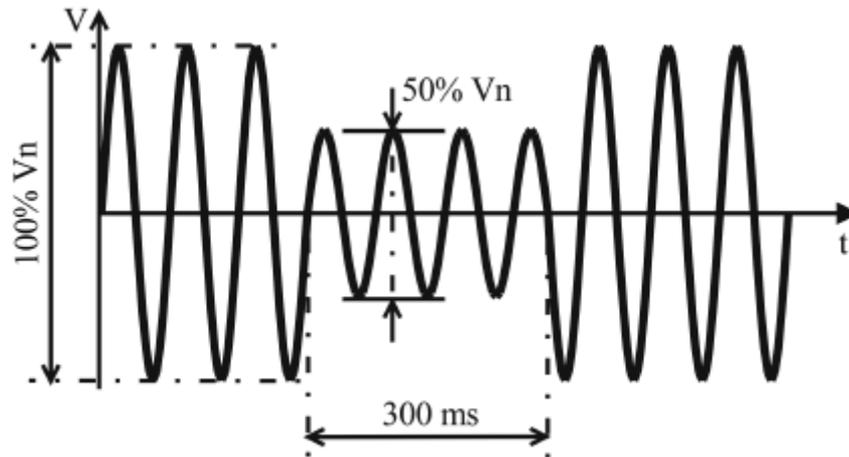


Figura 60 - Afundamento de tensão.
Fonte: PÉREZ; DONSIÓN, 2003.

A IEC, por meio da norma IEC *Standard* 61000 (IEC, 1995) classifica como afundamento, um evento onde ocorre uma queda do valor RMS da tensão entre 0,10 e 0,99 pu, durante um período de tempo compreendido entre 0,5 ciclo e alguns segundos. A IEC define a intensidade do afundamento de tensão como sendo a queda do valor RMS da tensão. Distúrbios com queda de tensão acima de 0,99 pu, o que equivale a tensões remanescentes abaixo de 0,01 pu, são considerados como interrupções (IEC, 1995).

A comunidade de qualidade da energia tem usado por muitos anos o termo *sag* para descrever a redução de tensão de curta duração. Já o termo utilizado pela IEC para este fenômeno é conhecido como *dip*. Os dois termos são considerados equivalentes, sendo *sag* preferido pela comunidade norte-americana de qualidade da energia (DUGAN, 2012).

Nesta monografia, a definição adotada para afundamento de tensão foi a da norma IEEE *Standard* 1159, uma vez que os limites inferior e superior estabelecidos pela ANEEL, no Módulo 8 do PRODIST, para os afundamentos de tensão estão de acordo com os valores definidos pelo IEEE.

A principal causa dos afundamentos de tensão abordada neste trabalho está associada a partida de motores. É importante ressaltar que os afundamentos também são provocados, na maioria das vezes, por chaveamentos de cargas pesadas e faltas em sistemas elétricos.

Para verificar os distúrbios, foram simuladas no Simulink as partidas direta, estrela-triângulo e com chave compensadora para cada transformador. Considerou-se as cargas em equilíbrio e cada transformador com carregamento máximo. Foram consideradas duas situações: a primeira, os motores partindo simultaneamente, e a segunda, os motores partindo de maneira sequencial.

5.7.1 Partida simultânea dos motores

A modelagem computacional desenvolvida para cada tipo de acionamento é a mesma para ambos os transformadores, a diferença consiste nos valores dos parâmetros elétricos tanto dos transformadores quanto dos motores. No entanto, o trabalho apresenta apenas as ilustrações dos diagramas esquemáticos do métodos de partida utilizando o transformador de 150 kVA, pois os diagramas são menores e permitem visualizar mais detalhes.

A Figura 61 mostra o diagrama de blocos da partida direta dos motores de 125 e 15 cv, alimentados pelo transformador trifásico de 150 kVA.

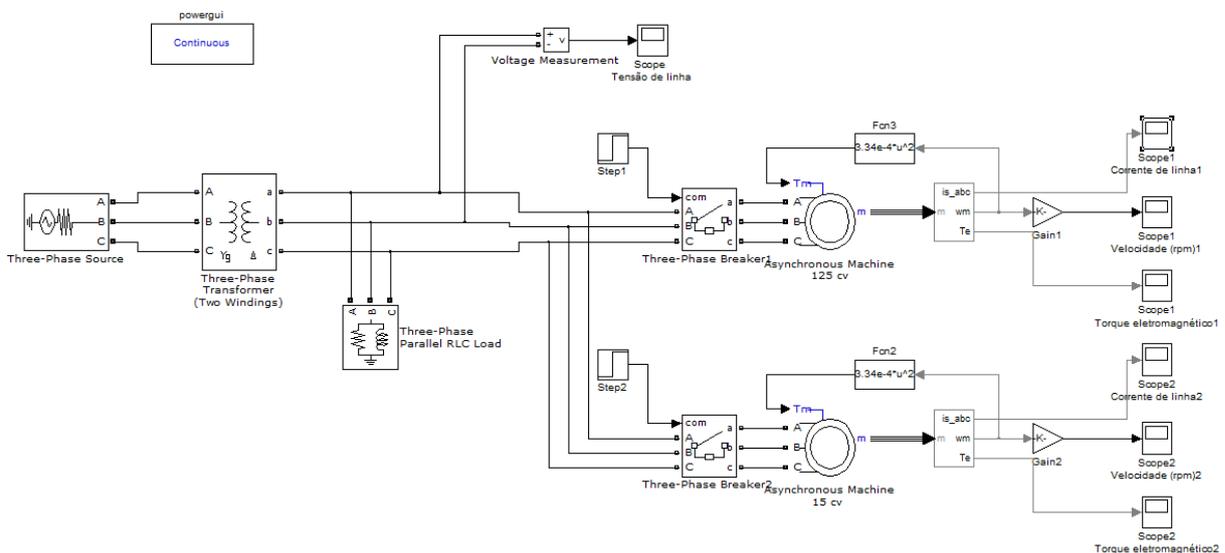


Figura 61 - Diagrama de blocos da partida direta com transformador de 150 kVA.
Fonte: Da própria autora.

No diagrama da Figura 61, o bloco *Three-Phase Source* foi especificado para uma tensão de linha eficaz de 13,8 kV, com uma resistência interna de 0,1 mΩ. O bloco *Three-Phase Breaker* representa a chave controlada que permitirá o funcionamento do motor, após receber o sinal com estado “1”, fornecido pelo bloco *Step*, no instante 0,1 s (BRITO, 2006).

O bloco *Three-Phase Breaker* possui um *snubber* resistivo (R_p) e/ou capacitivo (C_p) que deve ser colocado em paralelo com a chave (no diagrama, $R_p = 10 \text{ k}\Omega$ e $C_p = \text{inf}$). O símbolo inf significa infinito, isto é, a reatância capacitiva é nula ou o capacitor tem efeito nulo (BRITO, 2006).

O bloco *Machines Measurement Demux* permite que sejam enviados os sinais do motor, retirados da porta “m” (*measurement*) para blocos de medição. Os blocos do tipo *Scope* funcionam como um osciloscópio, medindo o sinal em função do tempo. Os sinais do motor, medidos pelos blocos do tipo *Scope*, são as correntes de linha, a velocidade e o torque eletromagnético (BRITO, 2006).

O bloco *Gain* apresenta uma variável de saída que é igual ao produto da variável de entrada pelo valor numérico estabelecido para o bloco (BRITO, 2006). Na Figura 61, o bloco *Gain* apresenta o valor $60/2\pi$, que é o fator de conversão da velocidade em radianos por segundo (rad/s) para rotações por minuto (rpm).

O bloco *Fcn (Function)* modifica a variável de entrada (“u”), em função de uma expressão matemática estabelecida. No caso do diagrama da Figura 61, o bloco *Fcn* relaciona o torque mecânico (torque da carga) com a velocidade do eixo do motor. Considerando-se que a carga é do tipo bomba centrífuga, então o torque mecânico é proporcional ao quadrado da velocidade angular do motor, com mostra a Equação 1:

$$T = k\omega^2 \quad (1)$$

Onde:

T - torque mecânico (N.m)

k - constante de proporcionalidade

ω - velocidade angular (rad/s)

O torque mecânico do motor também pode ser obtido da através da Equação 2:

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (2)$$

Onde:

P_m - potência mecânica (W).

No entanto, devido a simplificações feitas nos modelos do Simulink, adotou-se para todos os métodos de partida, $T = 11,87 \text{ N.m}$.

Considerando que a velocidade do rotor é muito próxima da velocidade síncrona do campo girante do estator, estabelecida pelo número de polos (um motor de 4 polos possui velocidade síncrona de 1800 rpm ou 188,5 rad/s), logo, com base na Equação 1, tem-se $k = 3,34 \times 10^{-4}$ (BRITO, 2006).

Com o valor obtido para a constante de proporcionalidade k , a expressão matemática do bloco Fcn foi estabelecida.

Os bloco *Gain* e *Fcn* possuem a mesma configuração para todos os métodos de acionamento com ambos os transformadores. O bloco *Three-Phase Parallel RLC Load* foi utilizado com a finalidade de simular o carregamento máximo de cada transformador. Este bloco permite configurar os seguintes parâmetros: potência ativa (P), potência reativa indutiva (Q_L) e potência reativa capacitiva (Q_C). A Tabela 15 apresenta os valores utilizados, considerando um fator de potência (FP) igual a 0,8.

Tabela 15 - Valores de potência da carga trifásica.

Transformador (kVA)	P (W)	Q_L (kVAr)	Q_C (kVAr)
300	240	180	0
150	120	90	0

Fonte: Da própria autora.

No Simulink, o motor de indução trifásico, representado pelo bloco *Asynchronous Machine*, é, internamente, conectado em estrela. Logo, não é possível uma ligação em triângulo (BRITO, 2006). No entanto, é possível um estudo equivalente do comportamento eletrodinâmico do motor, ajustando a impedância da fonte a mesma do transformador. Assim, apesar de não ter a mesma dinâmica do transitório, para regime permanente e análise da queda de tensão é um resultado próximo para o transformador implementado na partida estrela-triângulo. A Figura 62 apresenta o diagrama de blocos da partida estrela-triângulo.

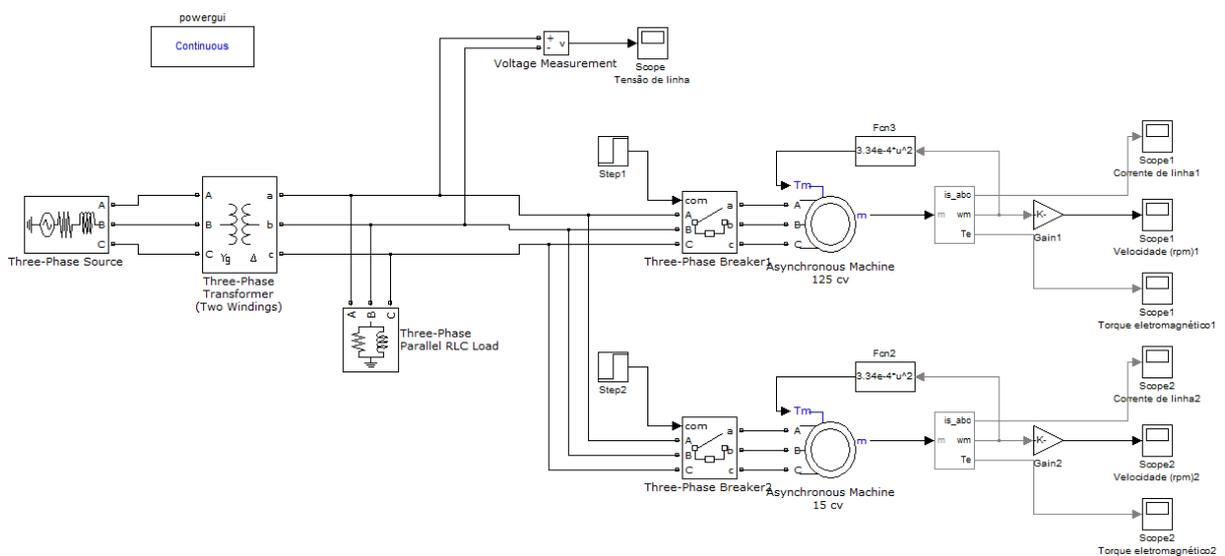


Figura 62 - Diagrama de blocos da partida estrela-triângulo com transformador de 150 kVA.

Fonte: Da própria autora.

O Simulink não apresenta um bloco para o autotransformador. Um transformador estrela-estrela (Y-Y) não aterrado foi utilizado para a modelagem da partida com chave compensadora, pois apresenta um comportamento, quanto às relações de tensão e corrente, semelhante ao autotransformador (SEN, 1997). A tensão no secundário do transformador Y-Y foi ajustada para 65% da tensão do primário, o que equivale ao valor de *tap* utilizado nos autotransformadores do SAAE.

A Figura 63 apresenta o diagrama de blocos utilizado para a simulação da chave compensadora. O bloco *Three-Phase Breaker* apresenta um *snubber* (na especificação, optou-se por um *snubber* resistivo de 100 Ω), pois o Simulink não permite a conexão de cargas indutivas (motores) a uma chave sem a utilização de um *snubber* (BRITO, 2006).

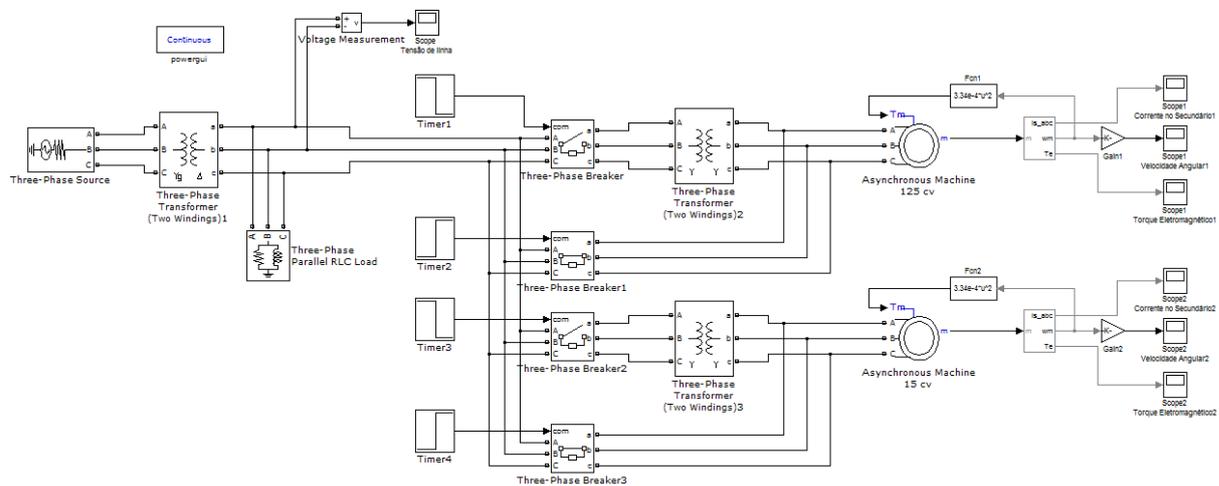


Figura 63 - Diagrama de blocos da partida compensadora com transformador de 150 kVA.

Fonte: Da própria autora.

Após as modelagens dos métodos de partida foram realizadas as simulações, com o objetivo de verificar os afundamentos de tensão durante o acionamento dos motores. A Tabela 16 apresenta os valores de tensão de pico (V_P) medidos pelo bloco *Scope* no secundário do transformador de 300 kVA. Os valores de tensão eficaz (V_{RMS}) foram calculados. Nesta simulação, todos os motores foram acionados em 0,1 s.

Tabela 16 - Valores de tensão no secundário do transformador de 300 kVA.

Método de partida	V _P (V) (antes da partida)	V _P (V) (após a partida)	V _{RMS} (V) (antes da partida)	V _{RMS} (V) (após a partida)
Direta	294,2	287,1	208,0	203,0
Estrela-triângulo	286,1	276,6	202,3	195,6
Compensadora	294,1	279,4	208,0	197,6

Fonte: Da própria autora.

A mesma simulação foi feita para o transformador de 150 kVA, e os valores de tensão medidos e calculados estão na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores de tensão no secundário do transformador de 150 kVA.

Método de partida	V _P (V) (antes da partida)	V _P (V) (após a partida)	V _{RMS} (V) (antes da partida)	V _{RMS} (V) (após a partida)
Direta	506,3	477,7	358,0	337,8
Estrela-triângulo	494,1	450	349,4	318,2
Compensadora	507,6	466,7	358,9	330,0

Fonte: Da própria autora.

A Figura 64 ilustra o afundamento de tensão registrado durante a partida direta com o transformador de 150 kVA.



Figura 64 - Afundamento de tensão na partida direta com transformador de 150 kVA.
Fonte: Da própria autora.

Verifica-se que nas duas simulações ocorreram quedas de tensão, mas é importante ressaltar que apenas os valores menores que 0,9 pu (198 V para o transformador de 300 kVA e 342 V para o transformador de 150 kVA) podem ser classificados como afundamentos de tensão.

Em todas as simulações da partida com chave compensadora, os valores de V_P apresentados para o instante após a partida dos motores são referentes ao momento em que os autotransformadores são desligados do circuito e os motores são ligados diretamente à rede, pois os decréscimos de tensão foram maiores.

5.7.2 Partida sequencial dos motores

A fim de verificar a severidade dos afundamentos de tensão, também foram realizadas simulações acionando primeiro os motores de maior potência e, à seguir, os motores restantes.

No transformador de 300 kVA, os dois motores de 100 cv foram acionados em 0,1 s. O ideal seria esperar esses motores entrarem em regime para depois realizar a partida dos motores de menor potência. No entanto, não foi possível simular essa condição no Simulink. Assim, os motores de 60, 40 e 20 cv foram acionados em 1,0 s. A Tabela 18 apresenta os valores obtidos.

Tabela 18 - Valores de tensão para a partida sequencial dos motores com transformador de 300 kVA.

Método de partida	V_P (V) (antes da partida)	V_P (V) (após 0,1 s)	V_P (V) (após 1,0 s)	V_{RMS} (V) (antes da partida)	V_{RMS} (V) (após 0,1 s)	V_{RMS} (V) (após 1,0 s)
Direta	294,2	289,3	287,2	208,0	204,6	203,1
Estrela-triângulo	286	279,3	276,2	202,2	197,5	195,3
Compensadora	294,2	285,1	282,7	208,0	201,6	199,9

Fonte: Da própria autora.

Na simulação realizada para o transformador de 150 kVA, o motor de 125 cv foi acionado em 0,1 s e o motor de 15 cv em 1,0 s. Os valores de tensão medidos e calculados são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores de tensão para a partida sequencial dos motores com transformador de 150 kVA.

Método de partida	V_P (V) (antes da partida)	V_P (V) (após 0,1 s)	V_P (V) (após 1,0 s)	V_{RMS} (V) (antes da partida)	V_{RMS} (V) (após 0,1 s)	V_{RMS} (V) (após 1,0 s)
Direta	509,3	480,5	477,1	360,1	339,8	337,4
Estrela-triângulo	494	456	448,7	349,3	322,4	317,3
Compensadora	506,1	479,3	477,8	473,5	338,9	334,8

Fonte: Da própria autora.

Assim como na partida simultânea, a partida sequencial também apresentou quedas de tensão antes mesmo do acionamento dos motores. Em alguns casos também foram registrados afundamentos de tensão.

Embora os motores de 125 e 15 cv do SAAE utilizem o método de partida com *soft-starter*, devido a limitações na modelagem não foi possível analisar os afundamentos de tensão neste tipo de acionamento.

5.8 Análise dos métodos de partida dos motores

Com o intuito de analisar o comportamento dinâmico dos métodos de partida, foram realizadas simulações para visualizar as curvas de corrente, velocidade e torque em regimes transitório e permanente. O objeto de estudo foi o motor de 15 cv, pelo fato de apresentar menor transitório e possibilitar melhor análise das curvas apresentadas.

Para a partida direta foi utilizado o diagrama de blocos mostrado na Figura 61, no entanto, a partida foi realizada apenas com o motor de 15 cv. A curva de corrente é ilustrada na Figura 65. Observa-se que o pico de corrente na partida é aproximadamente 7 vezes o valor de pico da corrente nominal.

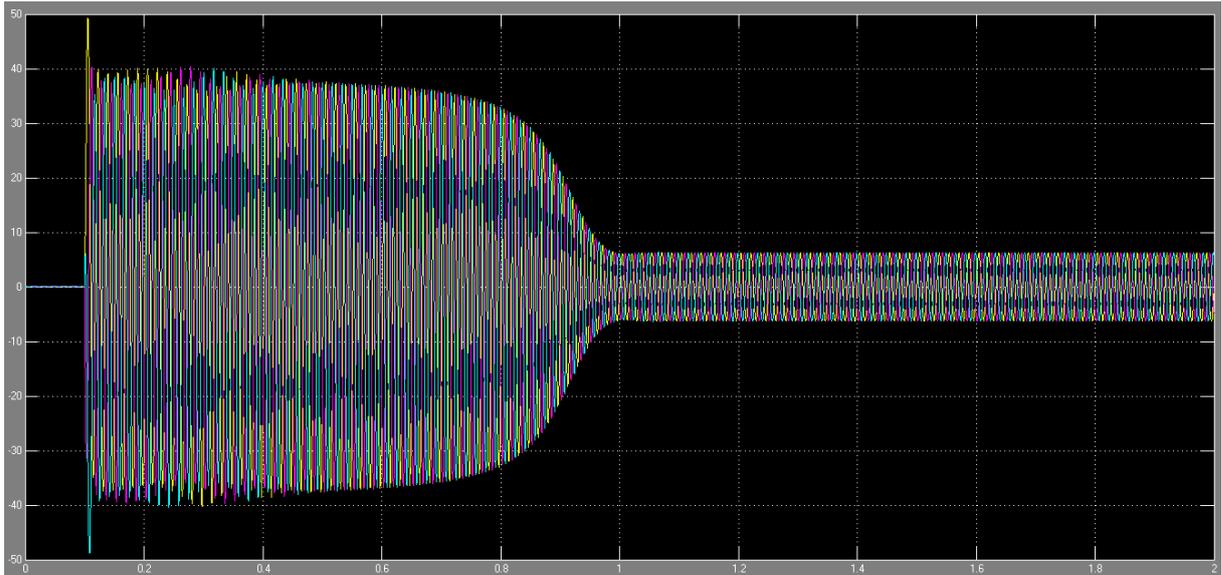


Figura 65 - Corrente no motor de 15 cv na partida direta.
Fonte: Da própria autora.

A curva de velocidade pode ser vista na Figura 66. O MIT precisou de apenas 0,9 s para funcionar nas condições nominais, considerando o intervalo entre o instante da partida em 0,1 s e o instante em que a velocidade nominal é alcançada, aproximadamente 1,0 s (BRITO, 2006).

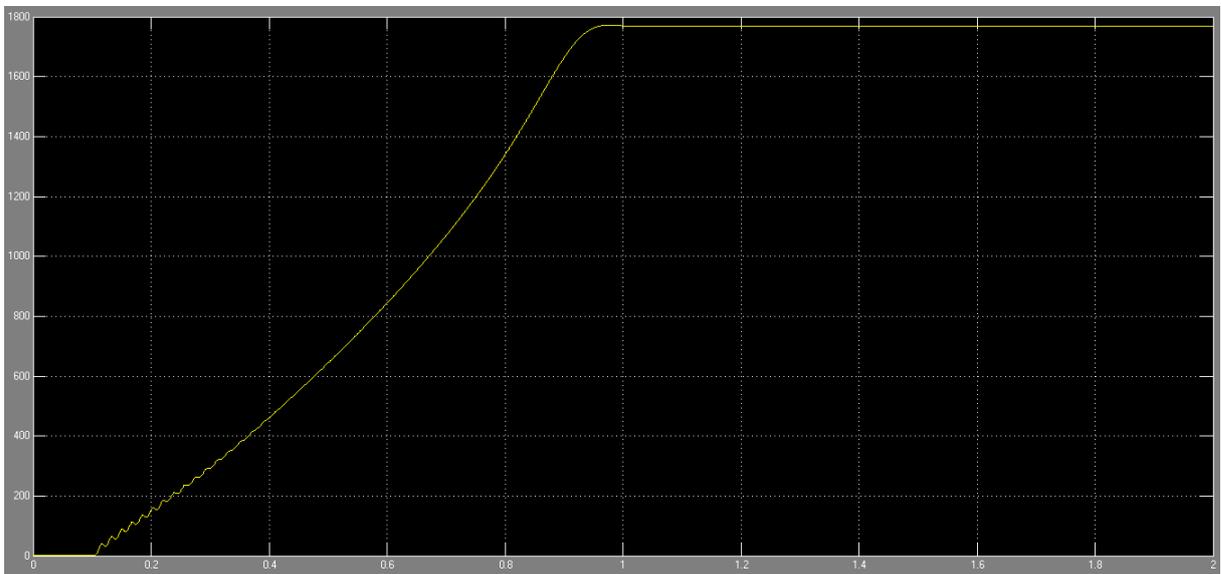


Figura 66 - Velocidade no motor de 15 cv na partida direta.
Fonte: Da própria autora.

O torque da partida direta é apresentado na Figura 67.

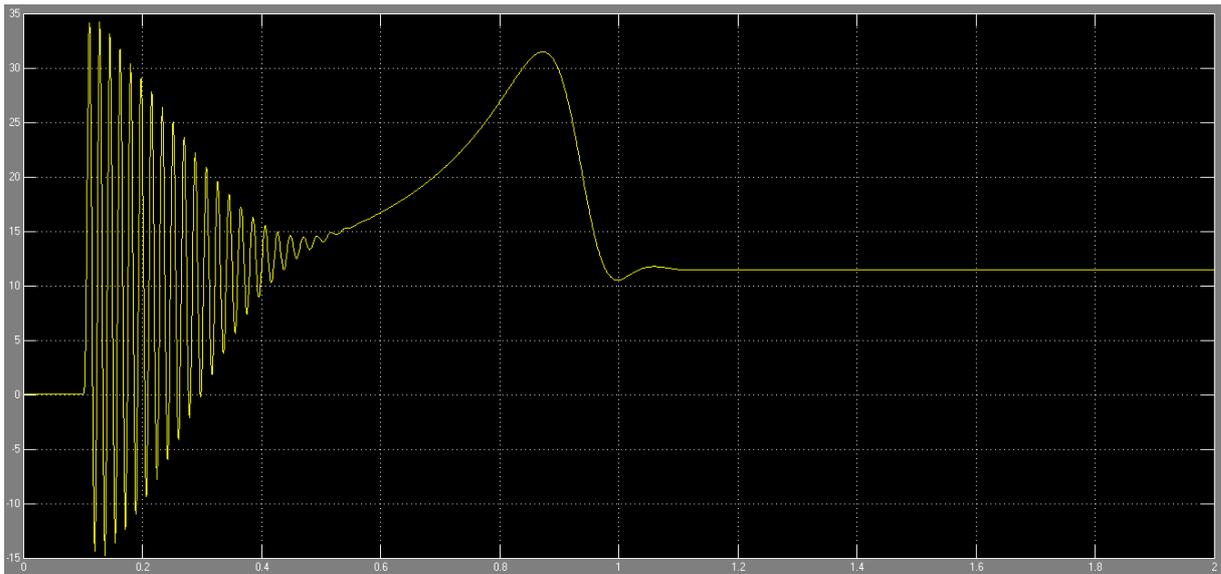


Figura 67 - Torque no motor de 15 cv na partida direta.

Fonte: Da própria autora.

O alto torque na partida é o responsável pela rápida aceleração do MIT. Esta é a grande vantagem da partida direta (BRITO, 2006).

A Figura 68 mostra o diagrama de blocos utilizado para simular a partida estrela-triângulo.

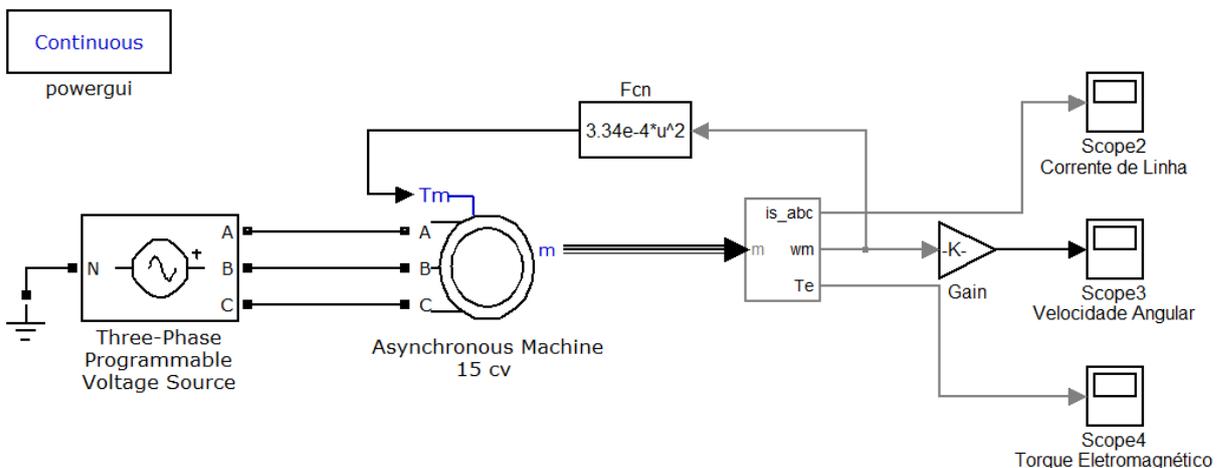


Figura 68 - Diagrama de blocos da partida estrela-triângulo.

Fonte: BRITO, 2006.

Na partida estrela-triângulo, a tensão de linha foi reduzida em um terço da tensão nominal do motor, para que a tensão de fase fosse reduzida na mesma proporção, uma vez que o bloco do motor (*Asynchronous Machine*) está internamente ligado em estrela (BRITO, 2006). O bloco *Three-Phase Programmable Voltage Source* foi utilizado para proporcionar a redução de 33,3% da tensão nominal, durante um intervalo de tempo de 4 s. A partir de 4s, a tensão assume seu valor nominal (380 V).

A Figura 69 mostra a corrente de partida do motor.

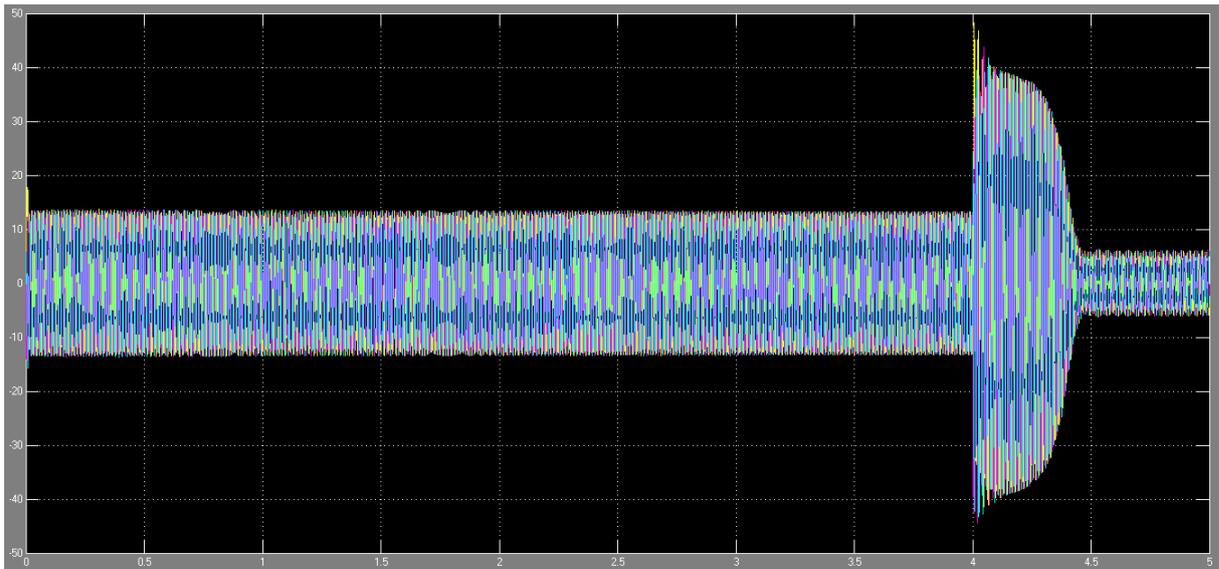


Figura 69 - Corrente no motor de 15 cv na partida estrela-triângulo.
Fonte: Da própria autora.

A corrente de partida do motor apresentou uma redução proporcional à redução da tensão por fase (um terço). Ao ser reajustada a tensão do motor para o valor nominal, no instante igual a 4 s, a corrente apresentou um novo aumento, entretanto igual ao máximo valor de corrente obtido na partida direta, pois o motor não atingiu uma velocidade próxima da nominal. Na prática, a passagem da conexão estrela para triângulo deve ser feita quando o motor está próximo de sua velocidade nominal, para que não ocorra uma elevação considerável da sua corrente de alimentação (BRITO, 2006).

A Figura 70 ilustra o comportamento da curva de velocidade na partida estrela-triângulo.

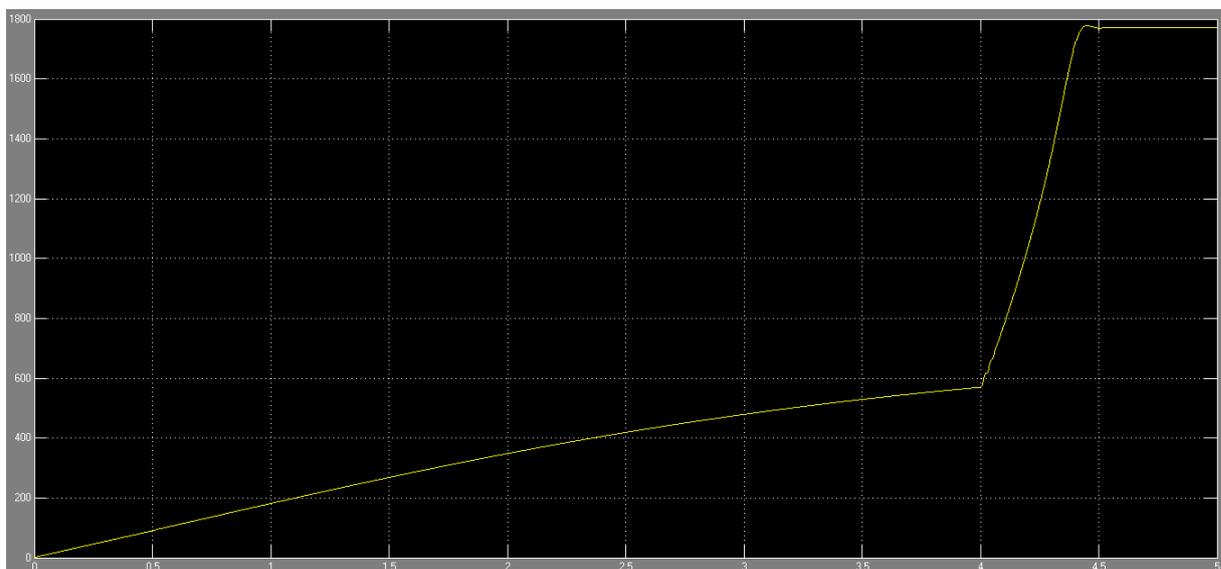


Figura 70 - Velocidade no motor de 15 cv na partida estrela-triângulo.
Fonte: Da própria autora.

A partida estrela-triângulo apresenta um inconveniente: o torque de partida é muito baixo, se comparado a uma partida direta, como pode ser visto na Figura 71. Por isso, a partida estrela-triângulo somente é recomendada para motores que partem com carga reduzida, de preferência a vazio. Como consequência do baixo torque, a velocidade do motor apresenta um comportamento lento (BRITO, 2006).

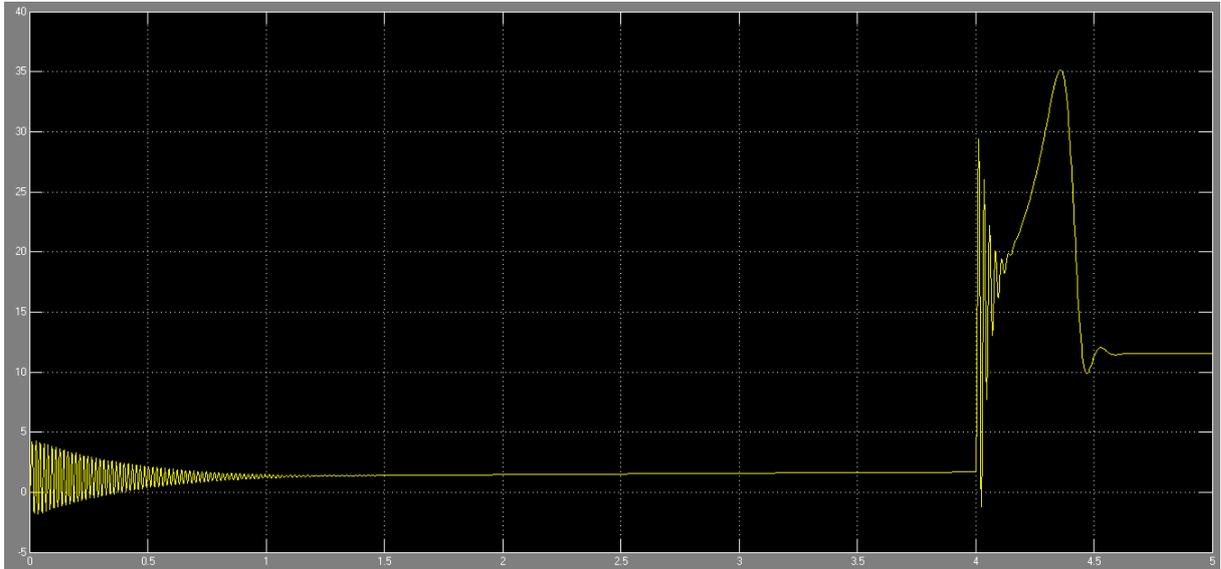


Figura 71 - Torque no motor de 15 cv na partida estrela-triângulo.

Fonte: Da própria autora.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 63 foi utilizado para simular a partida com chave compensadora do motor de 15 cv.

Os autotransformadores do SAAE estão ligados no *tap* de 65%, logo, o ideal seria que a corrente de partida fosse 42% do valor da partida direta. No entanto, na simulação, a corrente atingiu 57,5% do valor da corrente da partida direta, como mostra a Figura 72.

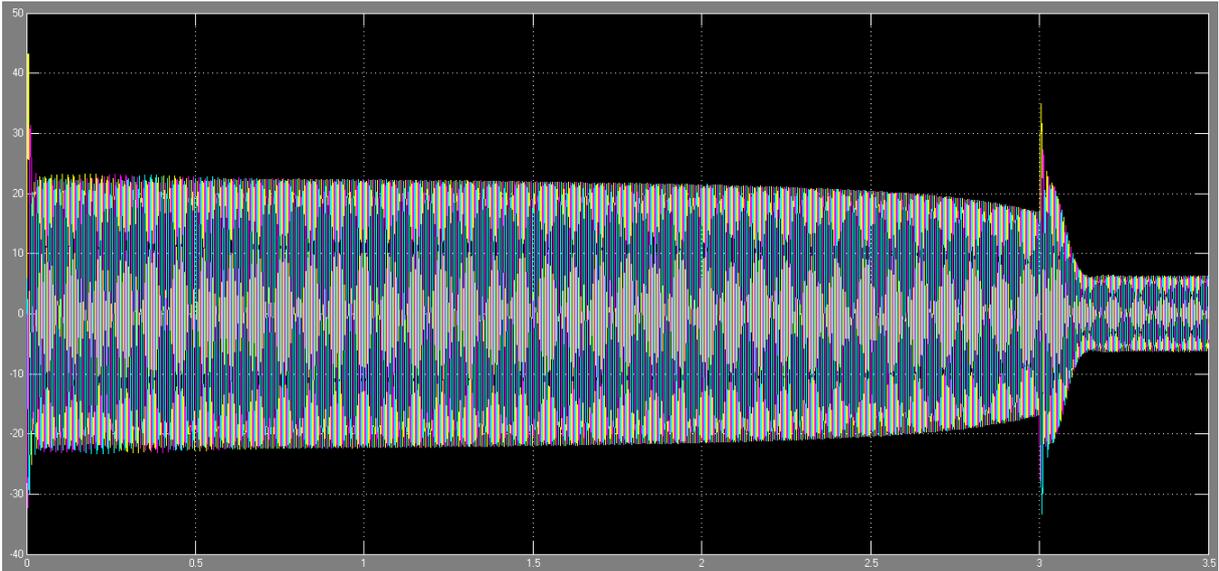


Figura 72 - Corrente no motor de 15 cv na partida com chave compensadora.
Fonte: Da própria autora.

Da mesma forma que na partida estrela-triângulo, no método de partida com chave compensadora, a elevação da tensão ao seu valor nominal deve ocorrer após o motor atingir uma maior velocidade próxima da nominal (BRITO, 2006). Nesta simulação, o MIT atingiu aproximadamente 86% da velocidade nominal quando foi feita a ligação à plena tensão, por isso, o pico de corrente nesse instante não foi tão alto. A Figura 73 mostra o comportamento da velocidade para o motor de 15 cv.

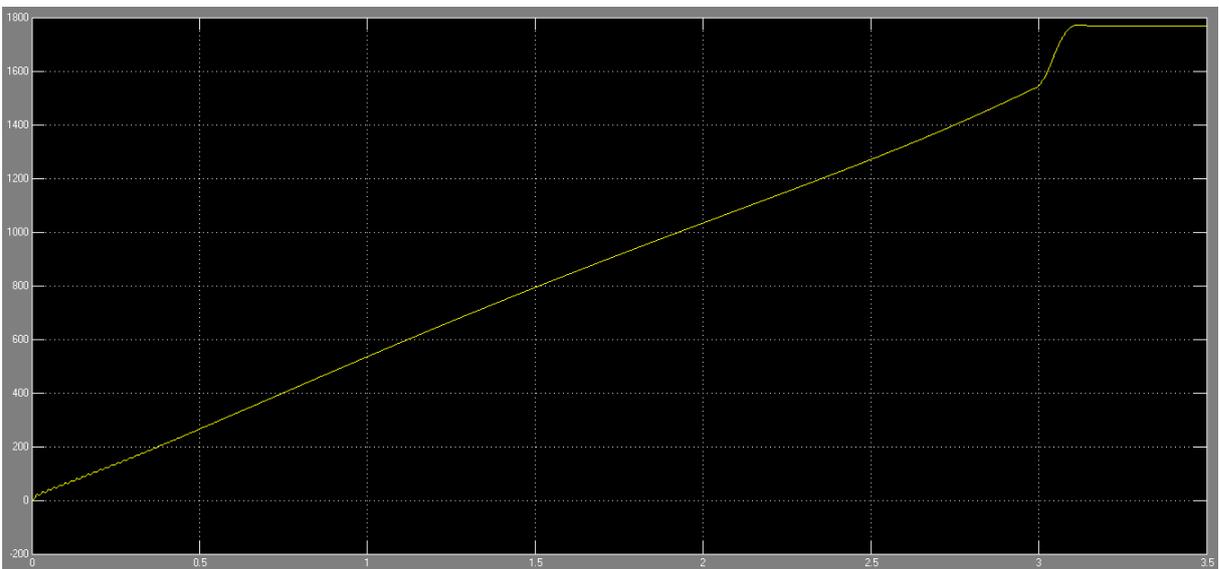


Figura 73 - Velocidade no motor de 15 cv na partida com chave compensadora.
Fonte: Da própria autora.

A partida com chave compensadora, por permitir um maior valor de tensão por fase, apresenta maior torque do que a partida estrela-triângulo. A curva de torque é mostrada na Figura 74.

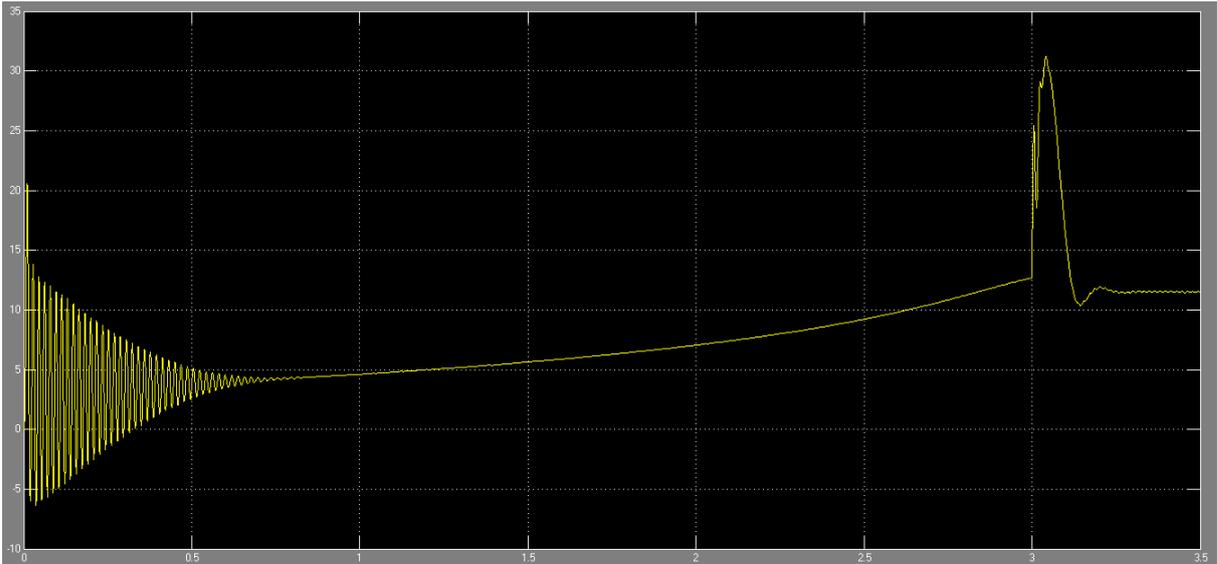


Figura 74 - Torque no motor de 15 cv na partida com chave compensadora.
Fonte: Da própria.

Para modelar a partida com *soft-starter* foram feitas algumas simplificações no modelo, pois o objetivo é observar o comportamento do motor, e fornecer a ele um sinal de saída que possa representar, com mais precisão, o sinal gerado por uma chave *soft-starter*. O diagrama de blocos, mostrado na Figura 75, foi utilizado para representar a partida em rampa do motor, para que o seu comportamento eletrodinâmico esteja mais próximo do encontrado na prática (BRITO, 2006).

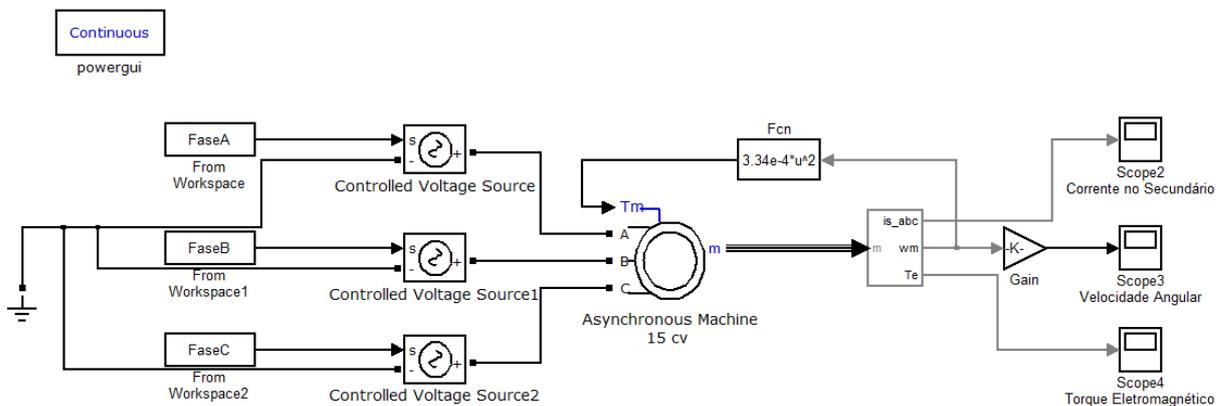


Figura 75 - Diagrama de blocos da partida com *soft-starter*.
Fonte: BRITO, 2006.

Os blocos do tipo *From Workspace* têm a finalidade de resgatar dados gerados por um determinado programa e colocados à disposição no ambiente de trabalho do MATLAB® (*Workspace*). O sinal formado por esses dados é um sinal de controle, o qual é convertido em sinal de potência, para alimentar o MIT, por meio da utilização de três blocos *Controlled Voltage Source*, os quais formam uma fonte em estrela aterrada (BRITO, 2006).

O programa desenvolvido, para criar a forma de tensão em rampa necessária para acionar o motor, consta no ANEXO K. Não foram consideradas as distorções existentes nas formas de onda das tensões, em função do chaveamento dos pares de tiristores. No entanto, o comportamento em rampa, considerando a tensão eficaz, é equivalente ao obtido com a chave de partida *soft-starter* (BRITO, 2006).

Pode ser observado, na Figura 76, que a corrente de partida é reduzida de forma proporcional à tensão inicial, em relação à partida direta.

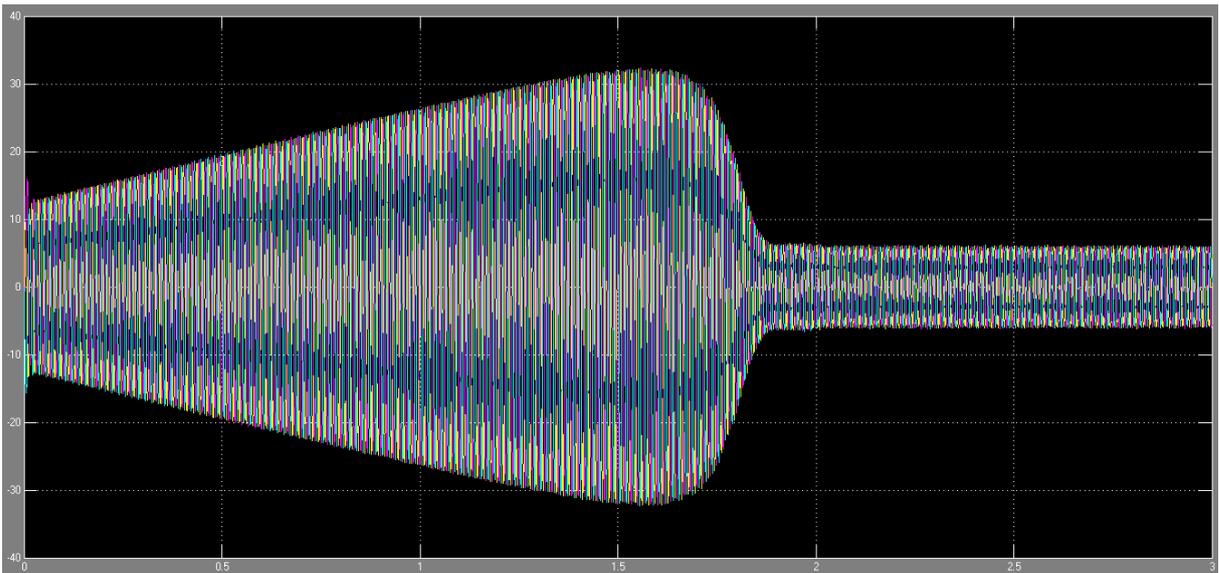


Figura 76 - Corrente no motor de 15 cv na partida com *soft-starter*.
Fonte: Da própria autora.

O comportamento da curva de velocidade e de torque pode ser visto na Figura 77 e na Figura 78, respectivamente.

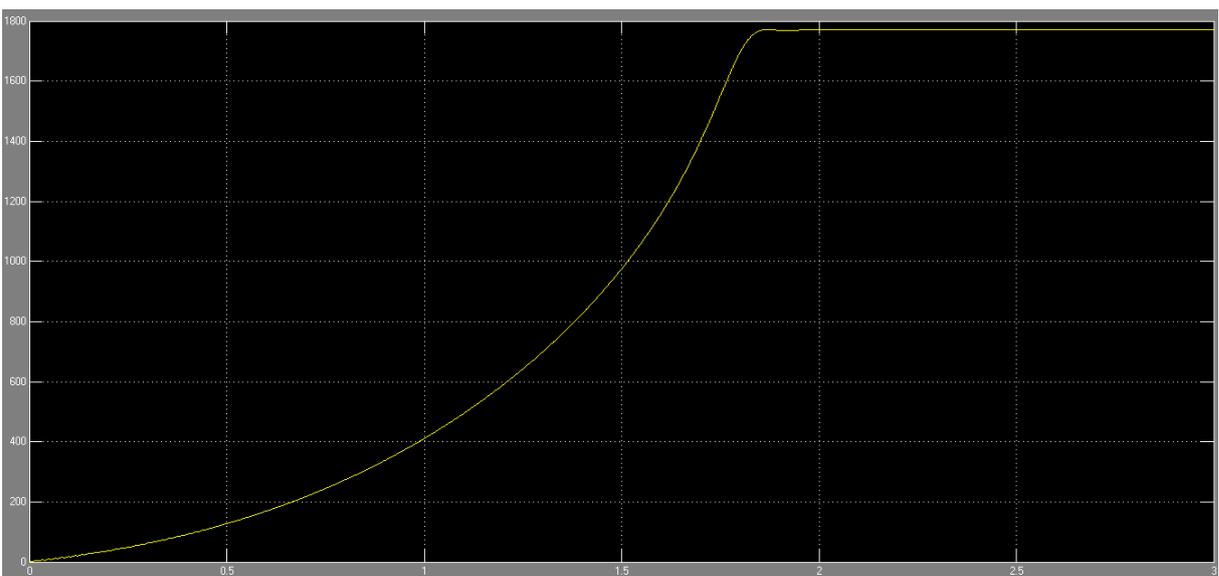


Figura 77 - Velocidade no motor de 15 cv na partida com *soft-starter*.
Fonte: Da própria autora.

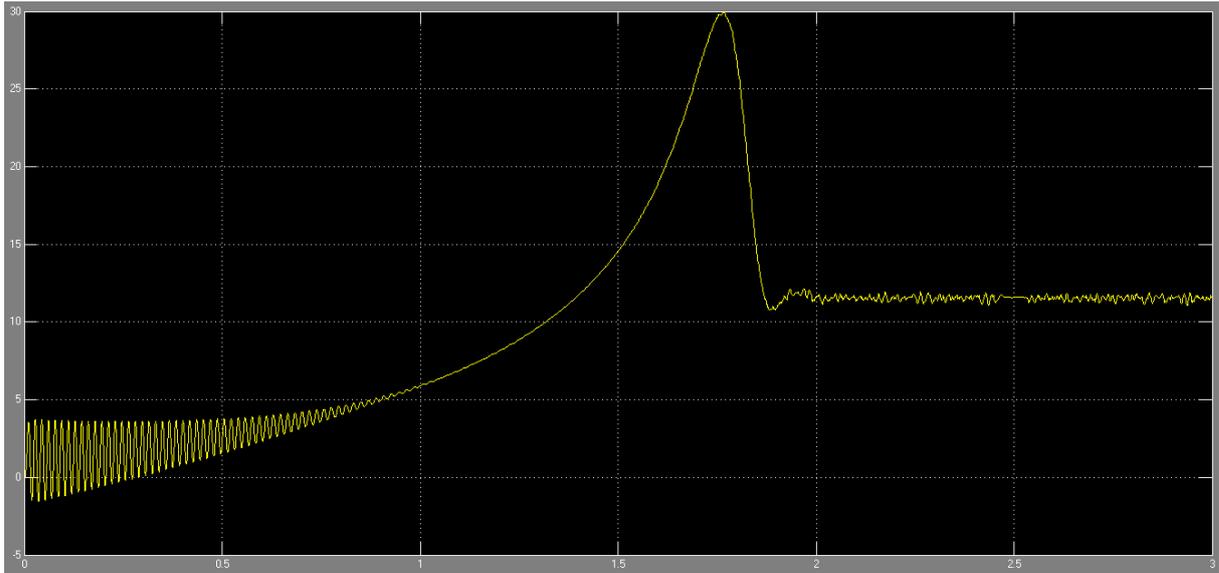


Figura 78 - Torque no motor de 15 cv na partida com *soft-starter*.
Fonte: Da própria autora.

Observa-se que ambas as curvas apresentam um comportamento mais suave em comparação aos outros métodos de partida.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um estudo que objetiva a identificação dos principais problemas relacionados a QEE presentes na principal instalação do SAAE da cidade de Formiga/MG.

Para maior confiabilidade dos resultados, realizou-se inspeções com a câmera termográfica, medições com o analisador de qualidade e modelagem e simulação computacional no *software* MATLAB®.

A inspeção com a câmera termográfica permitiu sanar o problema do aquecimento excessivo de um dos motores do SAAE. O efeito prático da solução deste problema, é a economia da autarquia com a retífica de motores que custava R\$ 1500 o reparo, além de sensível economia com o consumo de energia elétrica, visto a expressiva redução da corrente de cada fase. O capital que deixa de ser aplicado na manutenção de equipamentos pode ser investido na melhoria da prestação do serviço de abastecimento e tratamento de água.

As medições com o analisador de qualidade mostraram que os transformadores operam em sobrecarga, o que pode provocar além de redução na vida útil do equipamento, falhas na isolação, aumento da pressão interna, expansão do óleo, entre outros danos.

Os dados obtidos com o analisador e simulados no MATLAB® possibilitou analisar o perfil de tensão no secundário dos transformadores de 300 e 150 kVA. Os resultados mostraram que em ambos os transformadores há valores de tensão que excederam os limites de tensão considerados adequados pela ANEEL.

O estudo também revelou os harmônicos de tensão e corrente predominantes na instalação. Os valores de distorção harmônica da tensão medidos estão dentro dos limites estabelecidos por norma. No entanto, as simulações mostraram que os limites de distorção harmônica de corrente foram excedidos, atingindo valores elevados principalmente no transformador de 150 kVA, devido ao fato da partidas dos motores serem realizadas com *soft-starter*, que é uma carga não linear.

Cabe ressaltar que nos transformadores, os harmônicos na corrente elevam as perdas no cobre. Além disso, os efeitos das reatâncias de dispersão ficam ampliados e tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas. Os problemas não ocorrem apenas em transformadores, mas também em motores. O maior efeito em

motores é o aumento do aquecimento devido a perdas no cobre e no ferro. Os harmônicos de sequência negativa provocam alterações no acionamento dos motores, produzindo componentes de torque que atuam no sentido contrário ao da fundamental.

As variações de frequência registradas não apresentam graves problemas de QEE para a autarquia.

A análise dos afundamentos de tensão permitiu verificar que há quedas de tensão em todos os métodos de partida. Em alguns casos, os decréscimos de tensão apresentados foram classificados como afundamentos e constituem um problema na qualidade de energia elétrica do sistema. Apesar dos valores de tensão medidos nas partidas simultânea e sequencial dos motores terem sido bastante próximos, o impacto no sistema causado pela partida sequencial tende a ser menor, provocando menor estresse térmico e mecânico dos equipamentos e componentes.

Ao verificar o comportamento em regime transitório e permanente dos principais métodos de partida dos motores, conclui-se que os tipos de acionamento empregados no SAAE atendem parcialmente os requisitos para plena operação dos MITs empregados na instalação.

Recomenda-se a renovação dos MITs para modelos mais eficientes, por meio de planejamento a médio e longo prazo, em que o investimento retornará em economia de gastos com energia.

Apesar de relativamente mais baratos quando comparados ao custo de *soft-starters* ou inversores de frequência, as chaves compensadoras submetem a instalação a maiores transitórios, semelhantes a partida direta e estrela-triângulo. O fato de os motores serem acionados dezenas de vezes ao dia, de acordo com a disponibilidade de água nos reservatórios, indicam a utilização de métodos de acionamento mais suaves, como os já citados, *soft-starters* e inversores de frequência.

6.1 Continuação do trabalho

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- A obtenção dos parâmetros elétricos dos transformadores e motores por meio dos fabricantes, para que os modelos simulados apresentem as mesmas características dos sistemas reais.
- Refinamento da modelagem das partidas estrela-triângulo e com *soft-starter*, a fim de permitir uma análise mais detalhada dos afundamentos de tensão.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. P. et al. Reflexões sobre Qualidade da Energia Elétrica. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 1., 1996, Uberlândia. **Anais do I SBQEE**. Uberlândia, 1996.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_24032006_SRD.pdf>. Acesso em: 24 Ago. 2014.
- _____. **Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica**. Brasília, 2005.
- ANNUNCIACÃO, L. **Estudo do impacto do sistema de acionamento de um motor de indução trifásico na eficiência energética e na qualidade da energia elétrica: um estudo de caso – elevador de Canecas**. [Dissertação]. 126 p. Cuiabá. Universidade Federal de Mato Grosso, 2011.
- ASSUNÇÃO, J. T.; ASSUNÇÃO T. C. B. N. Determinação dos Parâmetros do Circuito Equivalente do MIT através de Dados de Catálogos de Fabricante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 36., 2008, São Paulo. **Anais do XXXVI COBENGE**. São João del Rei: UFSJ, 2008.
- BONATTO, D. et al. Eletrônica de potência e qualidade da energia elétrica: pesquisas cooperativas Elektro, COPPE/UFRJ e UBC. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 1., 2001, Brasília. **Anais do I CITELE**. Brasília: ANEEL, 2001.
- BRITO, C.M.C. Utilização do Simulink/MATLAB no Ensino Experimental de Eletrônica Industrial. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 1., 2006, Natal. **Anais do I CONNEPI**. Natal: CEFET/RN. 1 CD-ROM.
- BRUSTOLINI, E. J. L. **Estudo da eficiência energética da estação elevatória de água bruta do Ribeirão São Bartolomeu – SAAE de Viçosa**. [Monografia]. 69 p. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- BULGARELLI, R. **Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais**. [Mestrado]. 136 p. São Paulo. Universidade de São Paulo, 2006.
- DEBNEY, J. B.; HARMAN, T. L. **Mastering Simulink: Dynamic Simulation for MATLAB**. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.
- DECKMANN, S, M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. Campinas: UNICAMP, 2010.
- DEL VECCHIO, R. M., et al. **Transformer Design Principles**. Boca Raton: CRC Press, 2002.

DREHER, J. R. **Chaves de partida suave soft-starter e inversor de frequência.** Chapecó: CEFET/SC, 2009.

DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality.** 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

FLIR. **FLIR i3 / i5 / i7.** Disponível em: <<http://www.flir.com/cs/emea/en/view/?id=41392>>. Acesso em 21 ago. 2014.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos.** São Paulo: Érica, 2007.

GHANDEHARI, R.; JALILIAN, A. Economical impacts of power quality in power systems. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 39., 2004. **Anais do XXXIX UPEC.** IEEE, v. 2, p. 893-897, 2004.

GIBELLI, G. B. **Resposta dinâmica dos motores de indução trifásicos a afundamentos de tensão na rede de alimentação.** [Dissertação]. 87 p. São Carlos. Universidade de São Paulo, 2009.

GODEC, Z.; SARUNAC, R. Steady-State Temperature Rises of ONAN/ONAF/OFAF Transformers. In: **IEEE Proceedings-C**, v.139, n. 5, 1992.

GOMES, H. P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos.** 2. ed. João Pessoa: UFPB, 2009.

GONÇALVES, F. R. **Análise da Partida do Motor de Indução Trifásico pelo Método dos Elementos Finitos.** [Monografia]. 70 p. Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRIC AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std 1159 – 1995:** Recommended practice for monitoring electric power quality. 1995.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **IEC Std 61000:** Electromagnetic Compatibility (EMC). 1996.

_____. **IEC 61000-3-4:** Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A. 1998.

IVANOV, A. V. **Máquinas Elétricas.** v. 2. Moscou: Mir Publishers, 1984.

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica.** São Paulo: Blucher, 2009.

KOSOV, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores.** Porto Alegre: Globo, 1982.

LEIRIA, A. et al. Induction motor response to voltage dips. **Electric Power Systems Research**, v. 76, n. 8, p. 676 – 680, 2006.

LOBOSCO, O. S.; DIAS, J. L. P. C. **Seleção e aplicação de motores elétricos**. v. 1. São Paulo: McGraw-Hill/Siemens S.A., 1988.

MALTA, P. L. **Estudo da qualidade de energia no acionamento de máquinas elétricas no SAAE de Viçosa**. [Monografia]. 47 p. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 2011.

MEDEIROS, S. **Medição de Energia Elétrica**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

MINIPA. **Manual de Instruções: Analisador de Qualidade de Energia**. São Paulo: MINIPA, 2013.

_____. **Produtos: Analisadores ET-5061C**. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/Produtos/ProdutoInterna?idCategoria=11&idSubCategoria=62&idProduto=328>>. Acesso em: 21 Ago. 2014.

MONIZ, O. V. **Perda de Vida Útil Técnica e Perda de Vida Útil Econômica dos Transformadores de Distribuição**. [Dissertação]. 174 p. Itajubá. Universidade Federal de Itajubá, 2007.

MORAIS, V; VIEIRA, C. **MATLAB®: Curso Completo**. Lisboa: FCA, 2013.

MORENO, H. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**. São Paulo: Procobre, 2001.

PÉREZ, L. N.; DONSIÓN M. P. Technical Methods for the Prevention and Correction of Voltage Sags and Short Interruptions inside the Industrial Plants and in the Distribution Networks. INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY AND POWER QUALITY, 3., 2003, Vigo. **Anais do III ICREPQ**. Vigo: Vigo University Lagoas – Marcosende, 2003.

RAMOS, M. C. E. S. **Metodologia para avaliação de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais**. [Tese]. 246 p. São Paulo. Universidade de São Paulo, 2009.

RODRIGUES, W. **Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água**. [Tese]. 208 p. Campinas. Universidade Estadual de Campinas, 2007.

ROOD, R. E. Method for estimating the thermal life expectancy of distribution transformers. In: **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 82, n. 69, p. 1015-1018, 1963.

SAAE-FORMIGA. **A água que abastece Formiga: antes e depois do SAAE**. Disponível em <<http://www.saaeformiga.com.br/institucional/nossa-historia>>. Acesso em: 25 Jul. 2014.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. 3. ed. Itajubá: Eletrobrás/PROCEL, 2006.

SEN, P.C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. 2. ed. New York: Wiley, 1997.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

_____. **Abastecimento de Água**. 2. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM). **Introdução ao MATLAB**. Santa Maria, 2010.

WEG. **Automação**: Guia de Seleção de Partidas. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-selecao-de-partidas-50037327-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 30 Jul. 2014a.

_____. **Catálogo geral de motores elétricos**: características, especificações, instalações e manutenções. Jaraguá do Sul: WEG, 2004.

_____. **Manual de motores elétricos**: linha de produtos, características, especificações, instalação e manutenção. Jaraguá do Sul: WEG, 2006.

_____. **Motor Elétrico Trifásico**: linha W22. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-brasil-50023622-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 14 Nov. 2014b.

_____. **Motores Elétricos**. Disponível em: <<http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-eletricos-baixatensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 30 Jul. 2014c.

_____. **Motores Elétricos**: guia de especificação. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 20 Out. 2014d.


```
Vs2 = 380;  
  
%% Potência aparente (VA)  
Sbase2 = 150e3;  
  
%% Relação X/R  
XR = 20;  
  
%% Frequência do transformador (Hz)  
f = 60;  
  
%% Impedância de base (Ohm)  
Zbase2 = (Vbase^2) / Sbase2  
  
%% Impedância do primário (Ohm)  
Zp2 = Zbase2 * Zpu  
  
%% Resistência do primário (Ohm)  
Rp2 = sqrt((Zp2^2) / (1 + (XR^2)))  
  
%% Reatância do primário (H)  
Xp2 = (XR*Rp2) / (2*pi*f)
```

Fonte: Da própria autora.


```
%% Relatório
```

```
fprintf('\n-----\n-----')  
fprintf('\nRelatório SAAE - Período da medição: 16/06/14 à 01/07/14')  
fprintf('\n-----\n-----')  
fprintf('\n\nSobrecarga do Transformador de 300 kVA - Global\n\n')  
fprintf('Curva média: %.2f\n\n', a)  
fprintf('Curva máxima: %.2f\n', b)  
fprintf('\n-----\n-----\n-----')
```

Fonte: Da própria autora.


```
%% Relatório
```

```
fprintf('\n-----  
-----')  
fprintf('\nRelatório SAAE - Período da medição: 20/08/14 à 10/10/14')  
fprintf('\n-----  
-----')  
fprintf('\n\nSobrecarga do Transformador de 300 kVA - Global\n\n')  
fprintf('Curva média: %.2f\n\n', a)  
fprintf('Curva máxima: %.2f\n', b)  
fprintf('\n-----  
-----')  
-----')
```

Fonte: Da própria autora.


```

xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Fase (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

% Fase C
figure (3)
plot(V(:,1), V(:,7), V(:,1), V(:,8), V(:,1), tfase_adeq_sup, V(:,1),
tfase_adeq_inf, V(:,1),...
      tfase_crit_sup, V(:,1), tfase_crit_inf, V(:,1), tensao_fase_ref)
title ('Tensões da Fase C')
xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Fase (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

%% Limites de tensão estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST

tensao_linha_ref = 220;           % tensão de linha de referência
tlinha_adeq_sup = 231;           % faixa adequada de tensão de linha: limite
superior
tlinha_adeq_inf = 201;           % faixa adequada de tensão de fase: limite
inferior
tlinha_crit_sup = 233;           % faixa crítica de tensão de fase: limite
superior
tlinha_crit_inf = 189;           % faixa crítica de tensão de fase: limite
inferior

%% Gráficos das tensões de linha

% Fase AB
figure (4)
plot(V(:,1), V(:,9), V(:,1), V(:,10), V(:,1), tlinha_adeq_sup, V(:,1),
tlinha_adeq_inf, V(:,1),...
      tlinha_crit_sup, V(:,1), tlinha_crit_inf, V(:,1), tensao_linha_ref)
title ('Tensões de Linha AB')
xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Linha (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

% Fase BC
figure (5)
plot(V(:,1), V(:,11), V(:,1), V(:,12), V(:,1), tlinha_adeq_sup, V(:,1),
tlinha_adeq_inf, V(:,1),...
      tlinha_crit_sup, V(:,1), tlinha_crit_inf, V(:,1), tensao_linha_ref)
title ('Tensões de Linha BC')
xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Linha (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

% Fase CA
figure (6)
plot(V(:,1), V(:,13), V(:,1), V(:,14), V(:,1), tlinha_adeq_sup, V(:,1),
tlinha_adeq_inf, V(:,1),...
      tlinha_crit_sup, V(:,1), tlinha_crit_inf, V(:,1), tensao_linha_ref)
title ('Tensões de Linha CA')
xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Linha (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

clc

```

```

%% Relatório
fprintf('\n-----
-----')
fprintf('\nRelatório SAAE - Transformador 13800V/220 V - Período: 16/06/14
à 01/07/14')
fprintf('\n-----
-----')
fprintf('\n\nFase A\n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:1;
    if (((V(i,3) > tfase_adeq_sup & V(i,3) < tfase_crit_sup) || ((V(i,4)
< tfase_adeq_inf & V(i,4) > tfase_crit_inf))))
        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:1;
    for j = 3:4
        if (((V(i,j) > tfase_adeq_sup & V(i,j) < tfase_crit_sup) ||
((V(i,j) < tfase_adeq_inf & V(i,j) > tfase_crit_inf))))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
            posicao_data1(cont1) = i;
        end
    end
end

fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
if cont1 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont1
        dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor1)
end

cont2 = 0;
for i = 1:1;
    if (((V(i,j) > tfase_crit_sup) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))
        cont2 = cont2 + 1;
    end
end

valor2 = zeros(1,cont2);
tempo2 = zeros(1,cont2);
cont2 = 0;
posicao_data2 = zeros(1,cont2);
for i = 1:1;
    for j = 3:4
        if (((V(i,j) > tfase_crit_sup) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))

```

```

        cont2 = cont2 + 1;
        tempo2(cont2) = i;
        valor2(cont2) = V(i,j);
        posicao_data2(cont2) = i;
    end
end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor2)
end

%% Fase B

fprintf('\n-----\n-----\n-----')
fprintf('\n\nFase B \n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,5) > tfase_adeq_sup & V(i,5) < tfase_crit_sup) || ((V(i,6)
< tfase_adeq_inf & V(i,6) > tfase_crit_inf))))
        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:l;
    for j = 5:6
        if (((V(i,j) > tfase_adeq_sup & V(i,j) < tfase_crit_sup) ||
((V(i,j) < tfase_adeq_inf & V(i,j) > tfase_crit_inf))))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
            posicao_data1(cont1) = i;
        end
    end
end

fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
if cont1 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont1
        dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor1)
end

```

```

cont2 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,j) > tfase_crit_sup )) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))
        cont2 = cont2 + 1;
    end
end

valor2 = zeros(1,cont2);
tempo2 = zeros(1,cont2);
cont2 = 0;
posicao_data2 = zeros(1,cont2);
for i = 1:l;
    for j = 5:6
        if (((V(i,j) > tfase_crit_sup )) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))
            cont2 = cont2 + 1;
            tempo2(cont2) = i;
            valor2(cont2) = V(i,j);
            posicao_data2(cont2) = i;
        end
    end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n',cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor2)
end

%% Fase C

fprintf('\n-----
-----')
fprintf('\n\nFase C \n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,7) > tfase_adeq_sup & V(i,7) < tfase_crit_sup)) || ((V(i,8)
< tfase_adeq_inf & V(i,8) > tfase_crit_inf))))
        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:l;
    for j = 7:8
        if (((V(i,j) > tfase_adeq_sup & V(i,j) < tfase_crit_sup)) ||
((V(i,j) < tfase_adeq_inf & V(i,j) > tfase_crit_inf))))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
            posicao_data1(cont1) = i;
        end
    end
end

```



```

        end
    end

    valor1 = zeros(1,cont1);
    tempo1 = zeros(1,cont1);
    cont1 = 0;
    posicao_data1 = zeros(1,cont1);
    for i = 1:1;
        for j = 9:10
            if (((V(i,j) > tlinha_adeq_sup & V(i,j) < tlinha_crit_sup) ||
                ((V(i,j) < tlinha_adeq_inf & V(i,j) > tlinha_crit_inf))))
                cont1 = cont1 + 1;
                tempo1(cont1) = i;
                valor1(cont1) = V(i,j);
                posicao_data1(cont1) = i;
            end
        end
    end

    fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
    if cont1 > 0
        fprintf('Data e hora: \n\n\t')
        for i = 1:cont1
            dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
            fprintf('%s\t\n\t', dateString)
        end
        fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
        fprintf('%0.4f\t\n\t',valor1)
    end

    cont2 = 0;
    for i = 1:1;
        if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
            cont2 = cont2 + 1;
        end
    end

    valor2 = zeros(1,cont2);
    tempo2 = zeros(1,cont2);
    cont2 = 0;
    posicao_data2 = zeros(1,cont2);
    for i = 1:1;
        for j = 9:10
            if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
                cont2 = cont2 + 1;
                tempo2(cont2) = i;
                valor2(cont2) = V(i,j);
                posicao_data2(cont2) = i;
            end
        end
    end

    fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
    if cont2 > 0
        fprintf('Data e hora: \n\n\t')
        for i = 1:cont2
            dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
            fprintf('%s\t\n\t', dateString)
        end
    end

```



```

        cont2 = cont2 + 1;
        tempo2(cont2) = i;
        valor2(cont2) = V(i,j);
        posicao_data2(cont2) = i;
    end
end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t', valor2)
end

%% Fase CA

fprintf('\n-----\n-----\n-----')
fprintf('\n\nTensão de Linha CA\n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,13) > tlinha_adeq_sup & V(i,13) < tlinha_crit_sup)) ||
        ((V(i,14) < tlinha_adeq_inf & V(i,14) > tlinha_crit_inf)))
        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:l;
    for j = 13:14
        if (((V(i,j) > tlinha_adeq_sup & V(i,j) < tlinha_crit_sup)) ||
            ((V(i,j) < tlinha_adeq_inf & V(i,j) > tlinha_crit_inf)))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
            posicao_data1(cont1) = i;
        end
    end
end

fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
if cont1 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont1
        dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t', valor1)
end

```

```

cont2 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
        cont2 = cont2 + 1;
    end
end

valor2 = zeros(1,cont2);
tempo2 = zeros(1,cont2);
cont2 = 0;
posicao_data2 = zeros(1,cont2);
for i = 1:l;
    for j = 13:14
        if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
            cont2 = cont2 + 1;
            tempo2(cont2) = i;
            valor2(cont2) = V(i,j);
            posicao_data2(cont2) = i;
        end
    end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor2)
end

```

Fonte: Da própria autora.


```

xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Fase (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

% Fase C
figure (3)
plot(V(:,1), V(:,7), V(:,1), V(:,8), V(:,1), tfase_adeq_sup, V(:,1),
tfase_adeq_inf, V(:,1),...
      tfase_crit_sup, V(:,1), tfase_crit_inf, V(:,1), tensao_fase_ref)
title ('Tensões da Fase C')
xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Fase (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

%% Limites de tensão estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST

tensao_linha_ref = 380;           % tensão de linha de referência
tlinha_adeq_sup = 396;           % faixa adequada de tensão de linha: limite
superior
tlinha_adeq_inf = 348;           % faixa adequada de tensão de fase: limite
inferior
tlinha_crit_sup = 403;           % faixa crítica de tensão de fase: limite
superior
tlinha_crit_inf = 327;           % faixa crítica de tensão de fase: limite
inferior

%% Gráficos das tensões de linha

% Fase AB
figure (4)
plot(V(:,1), V(:,9), V(:,1), V(:,10), V(:,1), tlinha_adeq_sup, V(:,1),
tlinha_adeq_inf, V(:,1),...
      tlinha_crit_sup, V(:,1), tlinha_crit_inf, V(:,1), tensao_linha_ref)
title ('Tensões de Linha AB')
xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Linha (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

% Fase BC
figure (5)
plot(V(:,1), V(:,11), V(:,1), V(:,12), V(:,1), tlinha_adeq_sup, V(:,1),
tlinha_adeq_inf, V(:,1),...
      tlinha_crit_sup, V(:,1), tlinha_crit_inf, V(:,1), tensao_linha_ref)
title ('Tensões de Linha BC')
xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Linha (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

% Fase CA
figure (6)
plot(V(:,1), V(:,13), V(:,1), V(:,14), V(:,1), tlinha_adeq_sup, V(:,1),
tlinha_adeq_inf, V(:,1),...
      tlinha_crit_sup, V(:,1), tlinha_crit_inf, V(:,1), tensao_linha_ref)
title ('Tensões de Linha CA')
xlabel ('Número da Amostra')
ylabel ('Tensão de Linha (V)')
legend ('Tensão Máxima', 'Tensão Mínima')

clc

```

```

%% Relatório
fprintf('\n-----
-----')
fprintf('\nRelatório SAAE - Transformador 13800V/380 V - Período: 20/08/14
à 10/10/14')
fprintf('\n-----
-----')
fprintf('\n\nFase A\n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:1;
    if (((V(i,3) > tfase_adeq_sup & V(i,3) < tfase_crit_sup) || ((V(i,4)
< tfase_adeq_inf & V(i,4) > tfase_crit_inf))))
        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:1;
    for j = 3:4
        if (((V(i,j) > tfase_adeq_sup & V(i,j) < tfase_crit_sup) ||
((V(i,j) < tfase_adeq_inf & V(i,j) > tfase_crit_inf))))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
            posicao_data1(cont1) = i;
        end
    end
end

fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
if cont1 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont1
        dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor1)
end

cont2 = 0;
for i = 1:1;
    if (((V(i,j) > tfase_crit_sup) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))
        cont2 = cont2 + 1;
    end
end

valor2 = zeros(1,cont2);
tempo2 = zeros(1,cont2);
cont2 = 0;
posicao_data2 = zeros(1,cont2);
for i = 1:1;
    for j = 3:4
        if (((V(i,j) > tfase_crit_sup) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))

```

```

        cont2 = cont2 + 1;
        tempo2(cont2) = i;
        valor2(cont2) = V(i,j);
        posicao_data2(cont2) = i;
    end
end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor2)
end

%% Fase B

fprintf('\n-----\n-----\n-----')
fprintf('\n\nFase B \n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,5) > tfase_adeq_sup & V(i,5) < tfase_crit_sup) || ((V(i,6)
< tfase_adeq_inf & V(i,6) > tfase_crit_inf))))
        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:l;
    for j = 5:6
        if (((V(i,j) > tfase_adeq_sup & V(i,j) < tfase_crit_sup) ||
((V(i,j) < tfase_adeq_inf & V(i,j) > tfase_crit_inf))))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
            posicao_data1(cont1) = i;
        end
    end
end

fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
if cont1 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont1
        dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor1)
end

```

```

cont2 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,j) > tfase_crit_sup )) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))
        cont2 = cont2 + 1;
    end
end

valor2 = zeros(1,cont2);
tempo2 = zeros(1,cont2);
cont2 = 0;
posicao_data2 = zeros(1,cont2);
for i = 1:l;
    for j = 5:6
        if (((V(i,j) > tfase_crit_sup )) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))
            cont2 = cont2 + 1;
            tempo2(cont2) = i;
            valor2(cont2) = V(i,j);
            posicao_data2(cont2) = i;
        end
    end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: \n\n')
disp(cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor2)
end

%% Fase C

fprintf('\n-----\n-----\n-----')
fprintf('\n\nFase C \n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,7) > tfase_adeq_sup & V(i,7) < tfase_crit_sup)) || ((V(i,8)
< tfase_adeq_inf & V(i,8) > tfase_crit_inf))))
        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:l;
    for j = 7:8
        if (((V(i,j) > tfase_adeq_sup & V(i,j) < tfase_crit_sup)) ||
((V(i,j) < tfase_adeq_inf & V(i,j) > tfase_crit_inf))))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
        end
    end
end

```

```

        posicao_data1(cont1) = i;
    end
end
end

fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
if cont1 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont1
        dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t', valor1)
end

cont2 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,j) > tfase_crit_sup) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))
        cont2 = cont2 + 1;
    end
end

valor2 = zeros(1,cont2);
tempo2 = zeros(1,cont2);
cont2 = 0;
posicao_data2 = zeros(1,cont2);
for i = 1:l;
    for j = 7:8
        if (((V(i,j) > tfase_crit_sup) || ((V(i,j) < tfase_crit_inf))))
            cont2 = cont2 + 1;
            tempo2(cont2) = i;
            valor2(cont2) = V(i,j);
            posicao_data2(cont2) = i;
        end
    end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t', valor2)
end

%% Fase AB

fprintf('\n-----\n-----\n-----')
fprintf('\n\nTensão de Linha AB\n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,9) > tlinha_adeq_sup & V(i,9) < tlinha_crit_sup) ||
        ((V(i,10) < tlinha_adeq_inf & V(i,10) > tlinha_crit_inf))))

```

```

        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:1;
    for j = 9:10
        if (((V(i,j) > tlinha_adeq_sup & V(i,j) < tlinha_crit_sup) ||
            ((V(i,j) < tlinha_adeq_inf & V(i,j) > tlinha_crit_inf))))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
            posicao_data1(cont1) = i;
        end
    end
end

fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
if cont1 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont1
        dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t',valor1)
end

cont2 = 0;
for i = 1:1;
    if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
        cont2 = cont2 + 1;
    end
end

valor2 = zeros(1,cont2);
tempo2 = zeros(1,cont2);
cont2 = 0;
posicao_data2 = zeros(1,cont2);
for i = 1:1;
    for j = 9:10
        if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
            cont2 = cont2 + 1;
            tempo2(cont2) = i;
            valor2(cont2) = V(i,j);
            posicao_data2(cont2) = i;
        end
    end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
end

```



```

        if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
            cont2 = cont2 + 1;
            tempo2(cont2) = i;
            valor2(cont2) = V(i,j);
            posicao_data2(cont2) = i;
        end
    end
end

fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
if cont2 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont2
        dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t', valor2)
end

%% Fase CA

fprintf('\n-----\n-----\n-----')
fprintf('\n\nTensão de Linha CA\n\n')
cont1 = 0;
for i = 1:l;
    if (((V(i,13) > tlinha_adeq_sup & V(i,13) < tlinha_crit_sup) ||
        ((V(i,14) < tlinha_adeq_inf & V(i,14) > tlinha_crit_inf))))
        cont1 = cont1 + 1;
    end
end

valor1 = zeros(1,cont1);
tempo1 = zeros(1,cont1);
cont1 = 0;
posicao_data1 = zeros(1,cont1);
for i = 1:l;
    for j = 13:14
        if (((V(i,j) > tlinha_adeq_sup & V(i,j) < tlinha_crit_sup) ||
            ((V(i,j) < tlinha_adeq_inf & V(i,j) > tlinha_crit_inf))))
            cont1 = cont1 + 1;
            tempo1(cont1) = i;
            valor1(cont1) = V(i,j);
            posicao_data1(cont1) = i;
        end
    end
end

fprintf('Número de amostras na faixa precária de tensão: %g\n\n', cont1)
if cont1 > 0
    fprintf('Data e hora: \n\n\t')
    for i = 1:cont1
        dateString = datestr(datevec(posicao_data1(i)));
        fprintf('%s\t\n\t', dateString)
    end
    fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
    fprintf('%.4f\t\n\t', valor1)
end

```

```

    cont2 = 0;
    for i = 1:l;
        if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
            cont2 = cont2 + 1;
        end
    end

    valor2 = zeros(1,cont2);
    tempo2 = zeros(1,cont2);
    cont2 = 0;
    posicao_data2 = zeros(1,cont2);
    for i = 1:l;
        for j = 13:14
            if (((V(i,j) > tlinha_crit_sup) || ((V(i,j) < tlinha_crit_inf))))
                cont2 = cont2 + 1;
                tempo2(cont2) = i;
                valor2(cont2) = V(i,j);
                posicao_data2(cont2) = i;
            end
        end
    end

    fprintf('\nNúmero de amostras na faixa crítica de tensão: %g\n\n', cont2)
    if cont2 > 0
        fprintf('Data e hora: \n\n\t')
        for i = 1:cont2
            dateString = datestr(datevec(posicao_data2(i)));
            fprintf('%s\t\n\t', dateString)
        end
        fprintf('\nNível de tensão (V): \n\n\t')
        fprintf('%.4f\t\n\t',valor2)
    end
end

```

Fonte: Da própria autora.


```

end

t = 1:l;

figure(1)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har08,
t,har09, t,har10, t,har11)
title('Harmônicos da Tensão na Fase A - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (V)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on

figure(2)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har08_perc, t,har09_perc, t,har10_perc, t,har11_perc)
title('Harmônicos da Tensão na Fase A - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on
a=har05_perc;

figure(3)
plot(DHTv_a)
title('DTHv da Fase A')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTv (%)')
grid on

%% Fase B

% Harmônicos da Tensão em Valor Absoluto
for i= 1:l
    fund(i) = V(i,18);
    har02(i) = V(i,19);
    har03(i) = V(i,20);
    har04(i) = V(i,21);
    har05(i) = V(i,22);
    har06(i) = V(i,23);
    har07(i) = V(i,24);
    har08(i) = V(i,25);
    har09(i) = V(i,26);
    har10(i) = V(i,27);
    har11(i) = V(i,28);

% Harmônicos da Tensão em Valor Percentual
    har02_perc(i) = (har02(i) / fund(i)) * 100;
    har03_perc(i) = (har03(i) / fund(i)) * 100;
    har04_perc(i) = (har04(i) / fund(i)) * 100;
    har05_perc(i) = (har05(i) / fund(i)) * 100;
    har06_perc(i) = (har06(i) / fund(i)) * 100;
    har07_perc(i) = (har07(i) / fund(i)) * 100;
    har08_perc(i) = (har08(i) / fund(i)) * 100;
    har09_perc(i) = (har09(i) / fund(i)) * 100;
    har10_perc(i) = (har10(i) / fund(i)) * 100;
    har11_perc(i) = (har11(i) / fund(i)) * 100;
end

```

```

% DHTv - Distorção Harmônica Total da Tensão
for i=2:1
    for j = 19:28
        B(i,j) = V(i,j)^2;
    end
end

sum2 = sum(B,2);

for i = 2:1
    DHTv_b(i) = ((sqrt(sum2(i))) / V(i,18)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(4)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har08,
t,har09, t,har10, t,har11)
title('Harmônicos da Tensão na Fase B - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (V)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on

figure(5)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har08_perc, t,har09_perc, t,har10_perc, t,har11_perc)
title('Harmônicos da Tensão na Fase B - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on
b= har05_perc;

figure(6)
plot(DHTv_b)
title('DTHv da Fase B')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTv (%)')
grid on

%% Fase C

% Harmônicos da Tensão em Valor Absoluto
for i= 1:1
    fund(i) = V(i,31);
    har02(i) = V(i,32);
    har03(i) = V(i,33);
    har04(i) = V(i,34);
    har05(i) = V(i,35);
    har06(i) = V(i,36);
    har07(i) = V(i,37);
    har08(i) = V(i,38);
    har09(i) = V(i,39);
    har10(i) = V(i,40);
    har11(i) = V(i,41);
% Harmônicos da Tensão em Valor Percentual

```

```

har02_perc(i) = (har02(i) / fund(i)) * 100;
har03_perc(i) = (har03(i) / fund(i)) * 100;
har04_perc(i) = (har04(i) / fund(i)) * 100;
har05_perc(i) = (har05(i) / fund(i)) * 100;
har06_perc(i) = (har06(i) / fund(i)) * 100;
har07_perc(i) = (har07(i) / fund(i)) * 100;
har08_perc(i) = (har08(i) / fund(i)) * 100;
har09_perc(i) = (har09(i) / fund(i)) * 100;
har10_perc(i) = (har10(i) / fund(i)) * 100;
har11_perc(i) = (har11(i) / fund(i)) * 100;
end

% DHTv - Distorção Harmônica Total da Tensão
for i=2:1
    for j = 32:41
        C(i,j) = V(i,j)^2;
    end
end

sum3 = sum(C,2);

for i = 2:1
    DHTv_c(i) = ((sqrt(sum3(i))) / V(i,31)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(7)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har08,
t,har09, t,har10, t,har11)
title('Harmônicos da Tensão na Fase C - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (V)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on

figure(8)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har08_perc, t,har09_perc, t,har10_perc, t,har11_perc)
title('Harmônicos da Tensão na Fase C - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on
c = har05_perc;

figure(9)
plot(DHTv_c)
title('DTHv da Fase C')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTv (%)')
grid on

figure(10)
plot(t,DHTv_a, t,DHTv_b, t,DHTv_c)
title('DTHv das Fases A, B e C')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTv (%)')

```

```
grid on  
legend('Fase A', 'Fase B', 'Fase C')
```

Fonte: Da própria autora.


```

end

t = 1:l;

figure(1)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har08,
t,har09, t,har10, t,har11)
title('Harmônicos da Tensão na Fase A - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (V)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on

figure(2)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har08_perc, t,har09_perc, t,har10_perc, t,har11_perc)
title('Harmônicos da Tensão na Fase A - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on
a=har05_perc;

figure(3)
plot(DHTv_a)
title('DTHv da Fase A')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTv (%)')
grid on

%% Fase B

% Harmônicos da Tensão em Valor Absoluto
for i= 1:l
    fund(i) = V(i,18);
    har02(i) = V(i,19);
    har03(i) = V(i,20);
    har04(i) = V(i,21);
    har05(i) = V(i,22);
    har06(i) = V(i,23);
    har07(i) = V(i,24);
    har08(i) = V(i,25);
    har09(i) = V(i,26);
    har10(i) = V(i,27);
    har11(i) = V(i,28);

% Harmônicos da Tensão em Valor Percentual
    har02_perc(i) = (har02(i) / fund(i)) * 100;
    har03_perc(i) = (har03(i) / fund(i)) * 100;
    har04_perc(i) = (har04(i) / fund(i)) * 100;
    har05_perc(i) = (har05(i) / fund(i)) * 100;
    har06_perc(i) = (har06(i) / fund(i)) * 100;
    har07_perc(i) = (har07(i) / fund(i)) * 100;
    har08_perc(i) = (har08(i) / fund(i)) * 100;
    har09_perc(i) = (har09(i) / fund(i)) * 100;
    har10_perc(i) = (har10(i) / fund(i)) * 100;
    har11_perc(i) = (har11(i) / fund(i)) * 100;
end

```

```

% DHTv - Distorção Harmônica Total da Tensão
for i=2:1
    for j = 19:28
        B(i,j) = V(i,j)^2;
    end
end

sum2 = sum(B,2);

for i = 2:1
    DHTv_b(i) = ((sqrt(sum2(i))) / V(i,18)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(4)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har08,
t,har09, t,har10, t,har11)
title('Harmônicos da Tensão na Fase B - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (V)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on

figure(5)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har08_perc, t,har09_perc, t,har10_perc, t,har11_perc)
title('Harmônicos da Tensão na Fase B - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on
b= har05_perc;

figure(6)
plot(DHTv_b)
title('DHTv da Fase B')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTv (%)')
grid on

%% Fase C

% Harmônicos da Tensão em Valor Absoluto
for i= 1:1
    fund(i) = V(i,31);
    har02(i) = V(i,32);
    har03(i) = V(i,33);
    har04(i) = V(i,34);
    har05(i) = V(i,35);
    har06(i) = V(i,36);
    har07(i) = V(i,37);
    har08(i) = V(i,38);
    har09(i) = V(i,39);
    har10(i) = V(i,40);
    har11(i) = V(i,41);
% Harmônicos da Tensão em Valor Percentual

```

```

har02_perc(i) = (har02(i) / fund(i)) * 100;
har03_perc(i) = (har03(i) / fund(i)) * 100;
har04_perc(i) = (har04(i) / fund(i)) * 100;
har05_perc(i) = (har05(i) / fund(i)) * 100;
har06_perc(i) = (har06(i) / fund(i)) * 100;
har07_perc(i) = (har07(i) / fund(i)) * 100;
har08_perc(i) = (har08(i) / fund(i)) * 100;
har09_perc(i) = (har09(i) / fund(i)) * 100;
har10_perc(i) = (har10(i) / fund(i)) * 100;
har11_perc(i) = (har11(i) / fund(i)) * 100;
end

% DHTv - Distorção Harmônica Total da Tensão
for i=2:1
    for j = 32:41
        C(i,j) = V(i,j)^2;
    end
end

sum3 = sum(C,2);

for i = 2:1
    DHTv_c(i) = ((sqrt(sum3(i))) / V(i,31)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(7)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har08,
t,har09, t,har10, t,har11)
title('Harmônicos da Tensão na Fase C - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (V)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on

figure(8)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har08_perc, t,har09_perc, t,har10_perc, t,har11_perc)
title('Harmônicos da Tensão na Fase C - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Tensão (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','8° harm.','9° harm.','10° harm.','11° harm.')
grid on
c = har05_perc;

figure(9)
plot(DHTv_c)
title('DTHv da Fase C')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTv (%)')
grid on

figure(10)
plot(t,DHTv_a, t,DHTv_b, t,DHTv_c)
title('DTHv das Fases A, B e C')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTv (%)')

```

```
grid on  
legend('Fase A', 'Fase B', 'Fase C')
```

Fonte: Da própria autora.


```

    for i = 2:1
        DHTi_a(i) = ((sqrt(sum1(i))) / I(i,5)) * 100;
    end

t = 1:1;

figure(1)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har09,
t,har11, t,har13, t,har15)
title('Harmônicos da Corrente na Fase A - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (A)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','9° harm.','11° harm.','13° harm.','15° harm.')
grid on

figure(2)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har09_perc, t,har11_perc, t,har13_perc, t,har15_perc)
title('Harmônicos da Corrente na Fase A - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','9° harm.','11° harm.','13° harm.','15° harm.')
grid on

figure(3)
plot(DHTi_a)
title('DTHi da Fase A')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTi (%)')
grid on

%% Fase B

% Harmônicos da Corrente em Valor Absoluto
for i= 1:1
    har01(i) = I(i,56);
    har02(i) = I(i,57);
    har03(i) = I(i,58);
    har04(i) = I(i,59);
    har05(i) = I(i,60);
    har06(i) = I(i,61);
    har07(i) = I(i,62);
    har09(i) = I(i,64);
    har11(i) = I(i,66);
    har13(i) = I(i,68);
    har15(i) = I(i,70);

% Harmônicos da Corrente em Valor Percentual
    har02_perc(i) = (har02(i) / fund(i)) * 100;
    har03_perc(i) = (har03(i) / fund(i)) * 100;
    har04_perc(i) = (har04(i) / fund(i)) * 100;
    har05_perc(i) = (har05(i) / fund(i)) * 100;
    har06_perc(i) = (har06(i) / fund(i)) * 100;
    har07_perc(i) = (har07(i) / fund(i)) * 100;
    har09_perc(i) = (har09(i) / fund(i)) * 100;
    har11_perc(i) = (har11(i) / fund(i)) * 100;
    har13_perc(i) = (har13(i) / fund(i)) * 100;
    har15_perc(i) = (har15(i) / fund(i)) * 100;

```

```

end

% DHTi - Distorção Harmônica Total da Corrente
for i=2:1
    for j = 57:70
        if j~=63 && j~=65 && j~=67 && j~=69
            B(i,j) = I(i,j)^2;
        end
    end
end

sum2 = sum(B,2);

for i = 2:1
    DHTi_b(i) = ((sqrt(sum2(i))) / I(i,56)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(4)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har09,
t,har11, t,har13, t,har15)
title('Harmônicos da Corrente na Fase B - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (A)')
legend('2° harm.', '3° harm.', '4° harm.', '5° harm.', '6° harm.', '7°
harm.', '9° harm.', '11° harm.', '13° harm.', '15° harm.')
grid on

figure(5)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har09_perc, t,har11_perc, t,har13_perc, t,har15_perc)
title('Harmônicos da Corrente na Fase B - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (%)')
legend('2° harm.', '3° harm.', '4° harm.', '5° harm.', '6° harm.', '7°
harm.', '9° harm.', '11° harm.', '13° harm.', '15° harm.')
grid on

figure(6)
plot(DHTi_b)
title('DTHi da Fase B')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTi (%)')
grid on

%% Fase C

% Harmônicos da Corrente em Valor Absoluto
for i= 1:1
    fund(i) = I(i,107);
    har02(i) = I(i,108);
    har03(i) = I(i,109);
    har04(i) = I(i,110);
    har05(i) = I(i,111);
    har06(i) = I(i,112);
    har07(i) = I(i,113);
    har09(i) = I(i,115);
    har11(i) = I(i,117);
    har13(i) = I(i,119);

```

```

har15(i) = I(i,121);

% Harmônicos da Corrente em Valor Percentual
har02_perc(i) = (har02(i) / fund(i)) * 100;
har03_perc(i) = (har03(i) / fund(i)) * 100;
har04_perc(i) = (har04(i) / fund(i)) * 100;
har05_perc(i) = (har05(i) / fund(i)) * 100;
har06_perc(i) = (har06(i) / fund(i)) * 100;
har07_perc(i) = (har07(i) / fund(i)) * 100;
har09_perc(i) = (har09(i) / fund(i)) * 100;
har11_perc(i) = (har11(i) / fund(i)) * 100;
har13_perc(i) = (har13(i) / fund(i)) * 100;
har15_perc(i) = (har15(i) / fund(i)) * 100;
end

% DHTi - Distorção Harmônica Total da Corrente
for i=2:1
    for j = 108:121
        if j~=114 && j~=116 && j~=118 && j~=120
            C(i,j) = I(i,j)^2;
        end
    end
end

sum3 = sum(C,2);

for i = 2:1
    DHTi_c(i) = ((sqrt(sum3(i))) / I(i,107)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(7)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har09,
t,har11, t,har13, t,har15)
title('Harmônicos da Corrente na Fase C - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (A)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','9° harm.','11° harm.','13° harm.','15° harm.')
grid on

figure(8)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har09_perc, t,har11_perc, t,har13_perc, t,har15_perc)
title('Harmônicos da Corrente na Fase C - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','9° harm.','11° harm.','13° harm.','15° harm.')
grid on

figure(9)
plot(DHTi_c)
title('DHTi da Fase C')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTi (%)')
grid on

figure(10)

```

```
plot(t,DHTi_a, t,DHTi_b, t,DHTi_c)
title('DTHi das Fases A, B e C')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTi (%)')
grid on
legend('Fase A', 'Fase B', 'Fase C')
```

Fonte: Da própria autora.


```

for i = 2:1
    DHTi_a(i) = ((sqrt(sum1(i)))) / I(i,5)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(1)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har09,
t,har11, t,har13, t,har15)
title('Harmônicos da Corrente na Fase A - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (A)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','9° harm.','11° harm.','13° harm.','15° harm.')
grid on

figure(2)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har09_perc, t,har11_perc, t,har13_perc, t,har15_perc)
title('Harmônicos da Corrente na Fase A - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','9° harm.','11° harm.','13° harm.','15° harm.')
grid on

figure(3)
plot(DHTi_a)
title('DHTi da Fase A')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTi (%)')
grid on

%% Fase B

% Harmônicos da Corrente em Valor Absoluto
for i= 1:1
    har01(i) = I(i,56);
    har02(i) = I(i,57);
    har03(i) = I(i,58);
    har04(i) = I(i,59);
    har05(i) = I(i,60);
    har06(i) = I(i,61);
    har07(i) = I(i,62);
    har09(i) = I(i,64);
    har11(i) = I(i,66);
    har13(i) = I(i,68);
    har15(i) = I(i,70);

% Harmônicos da Corrente em Valor Percentual
    har02_perc(i) = (har02(i) / fund(i)) * 100;
    har03_perc(i) = (har03(i) / fund(i)) * 100;
    har04_perc(i) = (har04(i) / fund(i)) * 100;
    har05_perc(i) = (har05(i) / fund(i)) * 100;
    har06_perc(i) = (har06(i) / fund(i)) * 100;
    har07_perc(i) = (har07(i) / fund(i)) * 100;
    har09_perc(i) = (har09(i) / fund(i)) * 100;
    har11_perc(i) = (har11(i) / fund(i)) * 100;
    har13_perc(i) = (har13(i) / fund(i)) * 100;

```

```

    har15_perc(i) = (har15(i) / fund(i)) * 100;
end

% DHTi - Distorção Harmônica Total da Corrente
for i=2:1
    for j = 57:70
        if j~=63 && j~=65 && j~=67 && j~=69
            B(i,j) = I(i,j)^2;
        end
    end
end

sum2 = sum(B,2);

for i = 2:1
    DHTi_b(i) = ((sqrt(sum2(i))) / I(i,56)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(4)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har09,
t,har11, t,har13, t,har15)
title('Harmônicos da Corrente na Fase B - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (A)')
legend('2° harm.', '3° harm.', '4° harm.', '5° harm.', '6° harm.', '7°
harm.', '9° harm.', '11° harm.', '13° harm.', '15° harm.')
grid on

figure(5)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har09_perc, t,har11_perc, t,har13_perc, t,har15_perc)
title('Harmônicos da Corrente na Fase B - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (%)')
legend('2° harm.', '3° harm.', '4° harm.', '5° harm.', '6° harm.', '7°
harm.', '9° harm.', '11° harm.', '13° harm.', '15° harm.')
grid on

figure(6)
plot(DHTi_b)
title('DTHi da Fase B')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTi (%)')
grid on

%% Fase C

% Harmônicos da Corrente em Valor Absoluto
for i= 1:1
    fund(i) = I(i,107);
    har02(i) = I(i,108);
    har03(i) = I(i,109);
    har04(i) = I(i,110);
    har05(i) = I(i,111);
    har06(i) = I(i,112);
    har07(i) = I(i,113);
    har09(i) = I(i,115);
    har11(i) = I(i,117);

```

```

har13(i) = I(i,119);
har15(i) = I(i,121);

% Harmônicos da Corrente em Valor Percentual
har02_perc(i) = (har02(i) / fund(i)) * 100;
har03_perc(i) = (har03(i) / fund(i)) * 100;
har04_perc(i) = (har04(i) / fund(i)) * 100;
har05_perc(i) = (har05(i) / fund(i)) * 100;
har06_perc(i) = (har06(i) / fund(i)) * 100;
har07_perc(i) = (har07(i) / fund(i)) * 100;
har09_perc(i) = (har09(i) / fund(i)) * 100;
har11_perc(i) = (har11(i) / fund(i)) * 100;
har13_perc(i) = (har13(i) / fund(i)) * 100;
har15_perc(i) = (har15(i) / fund(i)) * 100;
end

% DHTi - Distorção Harmônica Total da Corrente
for i=2:1
    for j = 108:121
        if j~=114 && j~=116 && j~=118 && j~=120
            C(i,j) = I(i,j)^2;
        end
    end
end

sum3 = sum(C,2);

for i = 2:1
    DHTi_c(i) = ((sqrt(sum3(i))) / I(i,107)) * 100;
end

t = 1:1;

figure(7)
plot(t,har02, t,har03, t,har04, t,har05, t,har06, t,har07, t,har09,
t,har11, t,har13, t,har15)
title('Harmônicos da Corrente na Fase C - Valor Absoluto')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (A)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','9° harm.','11° harm.','13° harm.','15° harm.')
grid on

figure(8)
plot(t,har02_perc, t,har03_perc, t,har04_perc, t,har05_perc, t,har06_perc,
t,har07_perc, t,har09_perc, t,har11_perc, t,har13_perc, t,har15_perc)
title('Harmônicos da Corrente na Fase C - Valor Percentual')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('Corrente (%)')
legend('2° harm.','3° harm.','4° harm.','5° harm.','6° harm.','7°
harm.','9° harm.','11° harm.','13° harm.','15° harm.')
grid on

figure(9)
plot(DHTi_c)
title('DHTi da Fase C')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTi (%)')
grid on
figure(10)

```

```
plot(t,DHTi_a, t,DHTi_b, t,DHTi_c)
title('DHTi das Fases A, B e C')
xlabel('Número da Amostra')
ylabel('DHTi (%)')
grid on
legend('Fase A', 'Fase B', 'Fase C')
```

Fonte: Da própria autora.

