



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

RAFAEL PEREIRA BURATTI

**REGULADORES DE TENSÃO EM REDES ELÉTRICAS COM ALTA
PENETRAÇÃO DE CARGAS NÃO LINEARES**

**Ilha Solteira
2016**

RAFAEL PEREIRA BURATTI

**REGULADORES DE TENSÃO EM REDES ELÉTRICAS COM
ALTA PENETRAÇÃO DE CARGAS NÃO LINEARES**

Prof. Dr. Luis Carlos Origa de Oliveira
Orientador

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área do Conhecimento: Automação.

**Ilha Solteira
2016**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Buratti, Rafael Pereira.

B945o Reguladores de tensão em redes elétricas com alta penetração de cargas não lineares / Rafael Pereira Buratti. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016

137 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia . Área de conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência, 2016

Orientador: Luis Carlos Origa de Oliveira

Inclui bibliografia

1. Reguladores de tensão. 2. Qualidade de energia.
3. Distorções harmônicas. 4. Sistemas de energia elétrica.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

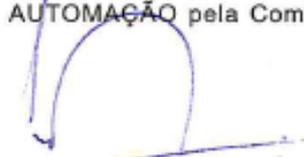
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Reguladores de tensão em redes elétricas com alta penetração de cargas não lineares

AUTOR: RAFAEL PEREIRA BURATTI

ORIENTADOR: LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. FERNANDO NUNES BELCHIOR
Faculdade de Ciência e Tecnologia / Universidade Federal de Goiás

Ilha Solteira, 30 de agosto de 2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me proporcionado à graça divina da vida e p tudo que ela nos proporciona. Sou imensamente grato ao Senhor!

Aquelas 2 pessoas que hoje são a razão do meu viver: minha amada esposa Elisa e minha pequena filha Rafaela. Nenhuma palavra pode descrever o amor que sinto por vocês.

Aos meus pais, Querino Buratti e Teresa Pereira Buratti. Apesar da distância, o pensamento sempre me faz sentir perto do aconchego da “velha morada” e dos seus braços. Cada feriado que passamos juntos me faz lembrar do quão importante vocês são na minha vida.

A meu irmão, Giovano Pereira Buratti. Apesar das diferenças, saibas que guardo um imenso amor por você. Guardo as melhores lembranças dos momentos da nossa infância em meu coração.

À RGE e ao grupo CPFL Energia, especialmente a minha colega de trabalho Danusia de Oliveira de Lima, pela confiança e pelo convite em participar de um projeto de pesquisa que resultou nesta dissertação de mestrado. De igual modo, aos colegas Plínio Nosaki e Eveline Dutra, a competência de vocês assumindo minhas atividades durante os períodos de ausência enquanto viajava contribuiu de maneira determinante para a realização deste trabalho.

Agradeço também, de forma especial, a prestimosa ajuda de meu orientador, Prof. Luís Carlos Origa, pela paciência e estima com que sempre me acolheu. Da mesma forma, agradeço muito aos professores Guilherme Melo, Júlio Borges, Carlos Alberto Canesin e Rodrigo Nunes, que além da troca de conhecimento foram grandes parceiros durante minhas estadas em Ilha Solteira.

Agradeço a todos os colegas e amigos que fiz ao longo do curso. Obrigado por compartilharem momentos de alegria e muito aprendizado.

A todos, **MUITO OBRIGADO!**

É difícil entender que a maior e melhor recompensa na vida é o amor que vem de Deus, que por sorte nossa é de graça. Basta aceitá-lo em nossas vidas.

RESUMO

Nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro como um todo, vem sofrendo uma série de mudanças provocadas por diversos fatores. Entre eles, destaca-se a utilização cada vez maior de cargas potencialmente perturbadoras em todas as classes de consumo e também o anseio dos consumidores em contar com uma energia de melhor qualidade e sem interrupções. Notadamente, o aumento da utilização destas cargas potencialmente perturbadoras tem provocado um aumento significativo das distorções harmônicas nas formas de onda das tensões e correntes ao longo dos alimentadores, gerando grandes desafios não somente no que diz respeito ao fornecimento de uma energia elétrica com qualidade e dentro de padrões normatizados, mas como também para a operação de equipamentos, como por exemplo, o regulador de tensão. Neste contexto, esta dissertação tem como objetivo principal avaliar a operação de reguladores de tensão em redes de distribuição de energia elétrica com elevados níveis de distorção harmônica de corrente, avaliando as implicações da penetração harmônica em seus módulos de controle, que, eventualmente, estão associadas a falhas de operação na comutação de tap's e consequentemente na ação de regulação de tensão.

Palavras Chave: Reguladores de tensão. Qualidade de energia. Distorções harmônicas. Sistemas de energia elétrica.

ABSTRACT

Within the last few years, the Brazilian electric sector as a whole has been experiencing a series of changes due to a wide range of factors. Between these factors two of them stand out, the use of more potentially disturbing charges in all of the consumer classes and the will of consumers to rely on an energy of better quality and without interruptions. Notably, the increase in the use of potentially disturbing charges has provoked a hike on the harmonic distortions on the shape of the waves of the current and the tension throughout the feeders, creating significant challenges, not only regarding the supply of a high quality and within the standardized patterns electric energy, but also for the operation of equipment such as the voltage regulator. Within this context, this paper aims to evaluate the operation of the voltage regulators on power supply transmission grids with a high levels of harmonic distortion on the current, evaluating the implications of the harmonic penetration in its control modules, which, eventually, are associated with operational failures on the tap's commutation and consequently on the action of Voltage regulators.

Keywords – Voltage regulators. Power quality. Harmonic distortions. Power supply systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixas de tensão em relação à referência	21
Figura 2 - Decomposição de uma forma de onda não senoidal	30
Figura 3 - Formas de onda de um sistema com cargas lineares puramente resistivas	31
Figura 4 - Formas de onda de um sistema com cargas lineares indutivas	31
Figura 5 - Dispositivo de controle de tensão e corrente tiristorizado	33
Figura 6 - Forma de onda de alimentação do circuito de controle tiristorizado	33
Figura 7 - Forma de onda da corrente drenada pelo circuito de controle tiristorizado	34
Figura 8 - Forma de onda da tensão no circuito de controle tiristorizado	34
Figura 9 - Formas de onda de tensão e corrente de fontes chaveadas	37
Figura 10 - Decomposição harmônica do sinal de corrente para uma fonte de tensão chaveada.	37
Figura 11 - Formas de onda de tensão e corrente de reatores eletrônicos para iluminação	38
Figura 12 - Decomposição harmônica do sinal de corrente de reatores eletrônicos para iluminação	39
Figura 13 - Forma de onda de corrente típica do inversor de frequência	40
Figura 14 - Decomposição harmônica do sinal de corrente de um inversor de frequência	40
Figura 15 - Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente	44
Figura 16 - Perdas elétricas adicionais nos motores frente a distorção harmônica de tensão de alimentação	45
Figura 17 - Princípio de funcionamento do relé de controle de tensão ou relé 90	48
Figura 18 - Localização típica de RT em redes de distribuição	53
Figura 19 - Autotransformador e enrolamento série com tap's	54
Figura 20 - Detalhes do funcionamento do comutador de tap's	55
Figura 21 - Vista superior dos terminais isoladores do RT	55
Figura 22 - Detalhes do comutador de tap	56
Figura 23 - Circuito e componentes do regulador de tensão	57
Figura 24 - Partes componentes do RT	58
Figura 25 - Detalhe da chave reversora de polaridade	59
Figura 26 - Detalhe do motor e mecanismo do comutador de tap's	59
Figura 27 - Detalhe do sistema de comutação de tap's do RT	60
Figura 28 - Elementos do sistema de comutação de tap's	60
Figura 29 - Incremento de tensão de tap a cada passo	61
Figura 30 - Detalhe do mecanismo comutador e tap's correspondentes	61
Figura 31 - Banco regulador de tensão instalado sob plataforma aérea	62
Figura 32 - Arranjo elétrico de RT trifásico conectado em estrela-aterrada	63
Figura 33 - Diagrama Esquemático da Ligação Estrela-Atterrada	63
Figura 34 - Diagrama Fasorial das Tensões Controladas - Conexão Estrela-Atterrada	64
Figura 35 - Arranjo elétrico de RT trifásico conectado em Delta-Fechado	65
Figura 36 - Diagrama esquemático da ligação Delta-Fechado	65
Figura 37 - Diagrama fasorial das tensões controladas para a conexão Delta-Fechado	66
Figura 38 - Arranjo elétrico de RT trifásico conectado em Delta-Aberto	67
Figura 39 - Arranjo elétrico de RT trifásico conectado em Delta-Aberto	67
Figura 40 - Diagrama fasorial das tensões controladas para a conexão Delta Aberto	68
Figura 41 - Circuito de Controle Convencional de um RT	68
Figura 42 - Faixa de Insensibilidade	70

Figura 43 - Proposta de ajustes para ação combinada de insensibilidade e temporização	72
Figura 44 - Circuito equivalente do compensador de queda de tensão na linha (LDC)	73
Figura 45 - Circuito equivalente do LDC em sistemas monofásicos	74
Figura 46 - Conexão física do RT monofásico	74
Figura 47 - Circuito equivalente do LDC em sistema monofásico aterrado	75
Figura 48 - Circuito equivalente do LDC para sistemas trifásicos com RT's conectados em estrela-aterrada	76
Figura 49 - Conexão física do RT conectado em estrela-aterrada	77
Figura 50 - Circuito equivalente do LDC para sistemas trifásicos com RT's conectados em Delta-Fechado	78
Figura 51 - Conexão física dos RT's conectados em Delta-Fechado	78
Figura 52 - Circuito equivalente do LDC para sistemas trifásicos com RT's conectados em Delta-Aberto	79
Figura 53 - Conexão física dos RT's conectados em Delta-Aberto	80
Figura 54 - Ajuste de faixa de tensão de um RT	82
Figura 55 - Diagrama físico da área atendida pelo AL01	86
Figura 56 - Localização das medições em clientes (CL) e no AL (MT)	89
Figura 57 - Medição de corrente no ponto MT1	89
Figura 58 - Medição de tensão no ponto MT1	90
Figura 59 - Forma de onda da tensão no ponto MT1 para o momento de maior distorção	91
Figura 60 - Forma de onda da corrente no ponto MT1 para o momento de maior distorção	91
Figura 61 - Decomposição harmônica do sinal de tensão no ponto MT1	92
Figura 62 - Decomposição Harmônica do Sinal de Corrente Medido no Ponto MT1	92
Figura 63 - Arranjo experimental	96
Figura 64 - Fotos da montagem experimental	97
Figura 65 - Configuração típica de instalação de Regulador de Tensão	99
Figura 66 - Diagramas fasoriais das condições de análise	100
Figura 67 - Resultados para os limiares de correntes para atuação do RT	103
Figura 68 - Excitação dos circuitos de corrente e tensão no controle do regulador	104
Figura 69 - Formas de onda e composição harmônica no ponto de instalação do RT	107
Figura 70 - Formas de onda para excitação dos circuitos de corrente e tensão (Grupo 1)	109
Figura 71 - Formas de onda para excitação dos circuitos de corrente e tensão (Grupo 2)	110
Figura 72 - Formas de onda para excitação dos circuitos de corrente e tensão (Grupo 3)	111
Figura 73 - Formas de onda para excitação dos circuitos de corrente e tensão (Grupo 4)	112
Figura 74 - Interface de controle do experimento	117
Figura 75 - Tensão e corrente senoidais - Caso Base	119
Figura 76 - Tensão senoidal e corrente com THD=26,3%	120
Figura 77 - Tensão senoidal e corrente com THD=31,7%	122
Figura 78 - Tensão senoidal, corrente com THD=26,3% com zero da corrente alterado	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de conexão em tensão nominal superior a 1kV e inferior a 69kV	22
Tabela 2 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (220/127)	22
Tabela 3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	26
Tabela 4 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão	26
Tabela 5 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas com tensão inferior a 69kV	28
Tabela 6 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas com tensão entre 69kV e 161kV	28
Tabela 7 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas de distribuição com tensão superior 161kV	28
Tabela 8 - Correspondência entre nomenclaturas de buchas ANSI e ABNT	56
Tabela 9 - Capacidade de condução de corrente.	83
Tabela 10 - Quantidade de clientes por classe de consumidor	85
Tabela 11 - Características dos RT's e BC's existentes no AL01.	86
Tabela 12 - Dados referidos à Média Tensão	101
Tabela 13 - Condições operacionais teóricas no circuito de MT	102
Tabela 14 - Parâmetros no circuito de controle	102
Tabela 15 - Condições operacionais teóricas no circuito de controle	102
Tabela 16 - Parametrização dos Reguladores de Tensão	105
Tabela 17 - Condições operacionais experimentais no circuito de controle	106
Tabela 18 - Comparação entre os limiares de corrente teóricos e experimentais	106
Tabela 19 - Valores de pico das componentes harmônicas de tensão	108
Tabela 20 - Valores de pico das componentes harmônicas de corrente	108
Tabela 21 - Resultados comparativos para o regulador de tensão RT-01	114
Tabela 22 - Resultados comparativos para o regulador de tensão RT-02	115
Tabela 23 - Resultados experimentais para o RT-01 nas condições ilustradas da Figura 75	119
Tabela 24 - Resultados experimentais para o RT-02 nas condições ilustradas da Figura 75	119
Tabela 25 - Resultados experimentais para o RT-01 nas condições ilustradas da Figura 76	121
Tabela 26 - Resultados experimentais para o RT-02 nas condições ilustradas da Figura 76	121
Tabela 27 - Resultados experimentais para o RT-01 nas condições ilustradas da Figura 77	122
Tabela 28 - Resultados experimentais para o RT-02 nas condições ilustradas da Figura 77	123
Tabela 29 - Resultados experimentais para o RT-01 nas condições ilustradas da Figura 78	124
Tabela 30 - Resultados experimentais para o RT-02 nas condições ilustradas da Figura 78	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
AVR	Automatic Voltage Relay
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
EUSD	Encargo de Uso do Sistema de Distribuição
RISE	Relatório de Impacto no Sistema Elétrico
LDC	Line Drop Compensation
<i>N_l</i>	Número de Amostras com Leitura de Tensão Precária
<i>N_p</i>	Número de Amostras com Leitura de Tensão Precária
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico
QEE	Qualidade de Energia
RD	Rede de Distribuição
RT	Regulador de Tensão
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TR	Tensão de referência
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REGULAMENTAÇÃO DE NÍVEIS DE TENSÃO E HARMÔNICAS	19
2.1	INTRODUÇÃO.....	19
2.2	REGULAMENTAÇÃO DE NÍVEIS DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.....	21
2.3	REGULAMENTAÇÃO DE HARMÔNICAS	25
2.3.1	Conceituação de harmônicas	29
2.3.2	Caracterização de cargas lineares	30
2.3.3	Caracterização de cargas não-lineares	32
2.3.4	Principais fontes de distorções harmônicas	35
2.3.4.1	<i>Sistemas de retificação e acionamentos CC.....</i>	35
2.3.4.2	<i>Fontes de alimentação monofásicas (fontes chaveadas).....</i>	36
2.3.4.3	<i>Reatores eletrônicos para iluminação.....</i>	37
2.3.4.4	<i>Conversores trifásicos e acionamentos CA.....</i>	39
2.3.4.5	<i>Dispositivos com princípio de funcionamento baseado em arco elétrico.....</i>	41
2.3.5	Efeitos e consequências das distorções harmônicas.....	41
2.3.5.1	<i>Aquecimentos excessivos.....</i>	42
2.3.5.2	<i>Ressonância</i>	42
2.3.5.3	<i>Efeitos sobre dispositivos de medição, proteção e controle</i>	43
2.3.5.4	<i>Efeitos sobre transformadores.....</i>	43
2.3.5.5	<i>Efeitos sobre motores.....</i>	44
2.3.5.6	<i>Efeitos sobre capacitores</i>	45
2.4	CONCLUSÕES.....	46
3	REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	48
3.1	INTRODUÇÃO.....	48
3.2	RELÉS DE CONTROLE DE TENSÃO (RELÉ 90).....	48
3.3	MANOBRAS DE CARGAS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	49

3.4	INSTALAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES	49
3.5	RECONDUTORAMENTO DE CABOS	51
3.6	INSTALAÇÃO DE BANCOS REGULADORES DE TENSÃO.....	51
3.7	CONCLUSÕES.....	52
4	REGULADORES DE TENSÃO	53
4.1	INTRODUÇÃO.....	53
4.2	UTILIZAÇÃO DOS REGULADORES DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	53
4.3	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	54
4.4	PARTES COMPONENTES	57
4.5	BANCOS REGULADORES TRIFÁSICOS.....	62
4.5.1	Reguladores de tensão conectados em Estrela-Aterrada	63
4.5.2	Reguladores de tensão conectados em Delta-Fechado.....	64
4.5.3	Reguladores de tensão conectados em Delta-Aberto.....	66
4.6	SISTEMAS DE CONTROLE.....	68
4.6.1	Tensão de referência.....	69
4.6.2	Insensibilidade (Largura de Faixa).....	69
4.6.3	Temporização.....	70
4.6.4	Compensador de Queda de Linha - LDC	72
4.6.4.1	<i>Ajuste do LDC em sistema Monofásico.....</i>	74
4.6.4.2	<i>Ajuste do LDC em sistema Monofásico Aterrado.....</i>	75
4.6.4.3	<i>Ajuste do LDC em sistema trifásico - conexão Estrela-Aterrada</i>	76
4.6.4.4	<i>Ajuste do LDC em sistema trifásico - conexão Delta-Fechado</i>	77
4.6.4.5	<i>Ajuste do LDC em sistema trifásico - conexão Delta-Aberto</i>	79
4.6.5	Limitador de tensão.....	81
4.6.6	Detector de fluxo inverso.....	81
4.7	CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE	82
4.8	CONCLUSÕES.....	83

5	REGULADORES DE TENSÃO EM REDES COM ELEVADOS ÍNDICES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA	85
5.1	INTRODUÇÃO	85
5.2	CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA REDE	87
5.3	CAMPANHA DE MEDIÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS	88
5.4	CONCLUSÕES	93
6	ANÁLISE EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO	95
6.1	INTRODUÇÃO	95
6.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	95
6.3	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	97
6.4	MODELAGEM TEÓRICA E ADERÊNCIA DO ARRANJO EXPERIMENTAL	99
6.4.1	Identificação teórica dos limiares de atuação do comutador de tap's	101
6.4.2	Identificação experimental dos limiares de atuação do Comutador de tap's	104
6.5	INFLUÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS SOBRE O LIMIAR DE ATUAÇÃO	106
6.6	INFLUÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM REGIME PERMANENTE	116
6.6.1	Condição de operação sob tensão e corrente senoidais.....	118
6.6.2	Condição de operação sob tensão senoidal e corrente com THD=26,3%	120
6.6.3	Condição de operação sob tensão senoidal e corrente com THD=31,7%	122
6.6.4	Condição de operação sob tensão senoidal, corrente com THD=26,3% e efeitos da defasagem angular da corrente	124
6.7	CONCLUSÕES	126
7	CONCLUSÃO GERAL	127
8	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	131

REFERÊNCIAS..... 133

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o setor elétrico brasileiro como um todo, vem sofrendo uma série de mudanças provocadas por diversos fatores. Entre eles, podemos destacar a utilização cada vez maior de cargas potencialmente perturbadoras em todas as classes de consumo e também o anseio dos consumidores em contar com uma energia de melhor qualidade e sem interrupções.

Atualmente, a regulamentação do setor tem exigido das concessionárias de distribuição de energia, uma maior eficiência tanto em termos de qualidade do serviço, como na qualidade do produto. No que se refere a qualidade do serviço, ou mais especificamente da continuidade do fornecimento, a forma de avaliação é realizada através de indicadores que mensuram a frequência e a duração das interrupções ocorridas nos consumidores. Já o termo qualidade do produto, ou conformidade do fornecimento em regime permanente, está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico, ou a qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda da tensão e/ou corrente elétrica, ou um desvio de frequência qualquer que influencie o normal funcionamento do próprio sistema ou de equipamentos a ele conectados.

Dentre os vários aspectos que compõem a qualidade do produto em regime permanente, destacam-se dois enfoques: a distorção harmônica e o nível de tensão eficaz.

A distorção harmônica, apesar de não expressar nenhum indicador de qualidade de energia propriamente dito, tem se tornando nos últimos anos um dos principais parâmetros de uma energia elétrica de qualidade. Com a utilização cada vez mais difundida da eletrônica de potência e, por conseguinte, uma maior utilização de equipamentos que podem provocar elevados níveis de distorções harmônicas nos mais variados setores da indústria e também em consumidores residenciais nos circuitos de Baixa Tensão (BT), o

nível de distorção harmônica de corrente registrado nos sistemas de distribuição de energia elétrica têm aumentando significativamente nos últimos anos, provocando grandes transtornos às concessionárias de todo o país, não somente pelos seus danos potenciais a equipamentos eletrônicos, mas também a extrema dificuldade para identificar a origem destes distúrbios.

O nível de tensão é responsável por expressar da forma mais simples a qualidade de energia de um determinado circuito ou do fornecimento de energia a uma certa região. No intuito de controlar e garantir níveis adequados na tensão de fornecimento, a utilização de Reguladores de Tensão (RT's) tem sido uma prática frequente há muitos anos. Nos circuitos de média tensão, quedas de tensão são causadas basicamente pela impedância da linha e pela carga instalada ao longo do alimentador. Quanto maior a impedância e quanto maior o valor da corrente (carga), mais acentuada é a queda de tensão.

Convém ressaltar que a operação das redes de distribuição de energia elétrica respeitando padrões adequados de qualidade, não só garante o bom funcionamento de equipamentos eletrônicos a ela conectados, como também preservam a sua vida útil. Sendo assim, o controle do perfil de tensão nas redes de distribuição torna-se uma tarefa rotineira e muito importante no dia-a-dia das concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a operação de reguladores de tensão em redes de distribuição de energia elétrica com elevados níveis de distorção harmônica de corrente, avaliando as implicações da penetração harmônica em seus módulos de controle, que, eventualmente, estão associadas a falhas de operação na comutação de tap's e conseqüentemente na ação de regulação de tensão. Para tanto, a estrutura do trabalho está dividida da seguinte maneira:

Neste atual capítulo introdutório, é feita uma apresentação geral do tema do trabalho mostrando o contexto no qual ele está inserido, bem como é relatada a organização do texto, realizando-se uma breve descrição do que será abordado em cada capítulo.

O segundo capítulo apresenta, de forma concisa, o marco regulatório, relembrando o início do surgimento do Módulo 8 do PRODIST– Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, desde a já extinta portaria de nº 047/78 do Departamento Nacional de Águas e Energia – DNAEE, até o atual modelo de regulação proposto pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Apresentam-se as faixas de tensão de fornecimento, classificando-as em adequadas, precárias e críticas, bem como a forma de apuração destes indicadores de qualidade do produto. Em seguida, é apresentada uma breve fundamentação sobre a atual legislação brasileira para harmônicas. Desta vez, a abordagem do Módulo 8 do PRODIST, é bastante restrita e trata apenas das harmônicas de tensão, estabelecendo valores de referência para o planejamento elétrico em termos de QEE, não fazendo nenhuma referência a harmônicas de corrente. Diante de uma recente regulamentação nacional um tanto omissa no que se refere a harmônicas de corrente, veremos que as concessionárias de distribuição de energia do Brasil buscam em normas e recomendações internacionais preencher esta lacuna. Finalizando este capítulo, apresenta-se uma visão geral as cargas geradoras de harmônicas, abordando o conceito de cargas lineares e não lineares, os efeitos e as consequências da circulação de harmônicas em equipamentos e nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O terceiro capítulo mostra os principais métodos de regulação de tensão nos sistemas de distribuição e utilizados atualmente pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica. São elencadas as melhores técnicas e opções para a regulação de tensão.

O quarto capítulo apresenta de forma mais abrangente o método de regulação de tensão através da instalação de reguladores de tensão. Aborda o princípio de funcionamento

deste equipamento, apresenta as principais partes componentes, mostrando como é realizado o sistema de controle, seus principais parâmetros de ajustes e também descreve os tipos de conexões usuais em sistemas trifásicos.

O quinto capítulo apresenta um caso real de uma rede de distribuição de energia de 23,1kV, onde um RT apresentou problemas de operação em virtude dos elevados níveis de distorção harmônica de corrente.

O sexto capítulo mostra a metodologia de ensaio adotada para realização dos testes em laboratório, bem como apresenta os resultados dos ensaios realizados a partir de um arranjo experimental onde procurou-se criar as condições em que houve a falha de operação dos sistemas de controle digitais utilizados em RT's.

No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões gerais sobre o assunto, descrevendo as principais contribuições deste estudo e também as particularidades da operação e comportamento dos sistemas de controle dos reguladores de tensão quando instalados em redes de distribuição de energia elétrica com elevados níveis de distorções harmônicas de corrente.

Por fim, no oitavo capítulo são apresentadas as propostas para trabalhos futuros.

2 REGULAMENTAÇÃO DE NÍVEIS DE TENSÃO E HARMÔNICAS

2.1 INTRODUÇÃO

A preocupação com os níveis de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica teve início em meados da década de 70. Neste período, o principal anseio da sociedade era desfrutar o bem estar que a energia elétrica proporcionava, preocupando-se apenas com a continuidade de fornecimento. Com o passar dos anos, não somente a demanda pelo serviço foi crescendo, mas também a exigência pela prestação de um serviço de melhor qualidade começou a existir. Tanto governo quanto consumidores, começaram a se preocupar com os índices de qualidade no fornecimento de energia elétrica. Nascia assim, em abril de 1978, através do já extinto DNAEE, a portaria de nº 047/78, que abordava os níveis de tensão de fornecimento e os limites das variações de tensões em geral, regulamentando, deste modo, às condições técnicas e a qualidade do serviço de energia elétrica (FELBER, 2010).

Dezoito anos depois, em 26 de dezembro de 1996, através da Lei 9.427, foi criada a ANEEL, que dentre outras obrigações foi instituída com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Neste momento, consolidava-se o atual sistema regulatório brasileiro para o setor de energia elétrica.

A ANEEL, no âmbito de suas atribuições, elaborou diversas consultas públicas e resoluções relativas à qualidade de energia elétrica, tanto para indicadores de qualidade de serviço, quanto para qualidade do produto. Em 01 de janeiro de 2010, como resultado deste trabalho, a ANEEL estipulou o PRODIST. Este conjunto de normas e procedimentos visa não somente disciplinar o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e

demais agentes consumidores e geradores conectados aos sistemas de distribuição e transmissão em tensões inferiores a 230kV, bem como busca padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O PRODIST contém 8 módulos distintos e abrange temas como planejamento da expansão do sistema de distribuição, acesso ao sistema de distribuição, procedimentos operativos, sistema de medição, informações requeridas e obrigações, cálculo de perdas na distribuição, qualidade da energia elétrica e ressarcimento de danos elétricos.

No que concerne a harmônicas, a atual regulamentação, assim como a regulamentação de níveis de tensão, também está presente no módulo 8 do PRODIST. Entretanto, as disposições relativas às harmônicas são um tanto restritas e contemplam apenas as harmônicas de tensão. Atualmente, a predisposição do PRODIST é estabelecer valores de referência para o planejamento elétrico em termos de QEE, apresentando limites operacionais para as concessionárias de distribuição de energia. Destaca-se que esta situação é momentânea, pois o PRODIST apenas aponta valores referenciais, situação que deverá mudar com posterior definição de limites e indicadores após o término da realização da campanha de medições e análise de resultados prevista pelo órgão regulador.

Atualmente, o termo qualidade de energia está hoje relacionado não só com continuidade de serviço, mas também a qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, que influencie o normal funcionamento do próprio sistema ou de equipamentos a ele conectados. Neste contexto, um dos principais parâmetros que expressam a qualidade de energia fornecida refere-se aos valores das distorções harmônicas de tensão e corrente.

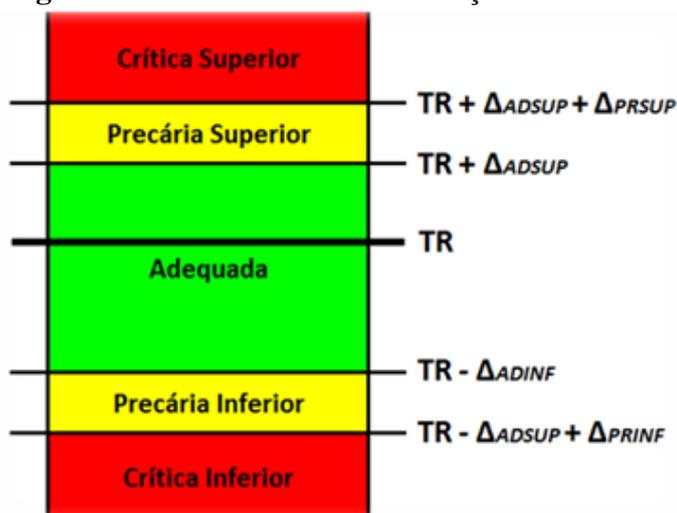
Nos últimos anos, o setor de energia elétrica tem passado por profundas mudanças, não somente devido a alteração do perfil das cargas consumidoras nos mais variados

setores da indústria e comércio, como também nos hábitos dos consumidores residenciais. Com a evolução da tecnologia dos dispositivos de eletrônica de potência, o acesso ao uso de cargas não lineares em todas as classes de consumo é cada vez maior, fazendo com que o estudo do fenômeno das harmônicas seja um processo cada vez presente nas concessionárias distribuidoras de energia.

2.2 REGULAMENTAÇÃO DE NÍVEIS DE TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Em relação aos níveis de tensão em regime permanente, o Módulo 8 do PRODIST é bastante amplo e abrange praticamente todos os requisitos para que a distribuição de energia elétrica mantenha padrões mínimos de qualidade. Notadamente, a contribuição primordial deste módulo no intuito de adequar os níveis de tensão, está relacionada ao item que indica os limites para os níveis de tensão em regime permanente, recomendando faixas de variações e classificando-as. A Figura 1 apresenta a classificação das faixas de tensão, que variam de acordo com a classe de tensão. A representação das cores verde, amarela e vermelha correspondem, respectivamente, às faixas de tensão adequada, precária e crítica.

Figura 1 - Faixas de tensão em relação à referência



Fonte: (PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL-PRODIST, 2016)

Onde:

TR - Tensão de Referência;

Δ_{ADSUP} - Variação da tensão da faixa adequada superior;

Δ_{PRSUP} - Variação da tensão da faixa precária superior;

Δ_{ADINF} - Variação da tensão da faixa adequada inferior;

Δ_{PRINF} - Variação da tensão da faixa precária inferior.

Os principais níveis de tensão abordados neste trabalho são apresentados de acordo com as tabelas a seguir. A Tabela 1 apresenta as faixas de tensão para conexões em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV, enquanto que a Tabela 2 apresenta as faixas de tensão para conexões em tensão nominal de 220V/127V.

Tabela 1 - Pontos de conexão em tensão nominal superior a 1kV e inferior a 69kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Fonte: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST (2016)

Tabela 2 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (220/127)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117$ ou $133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191$ ou $TL > 233) / (TL < 110$ ou $TL > 135)$

Fonte: PRODIST (2016)

Onde:

TL - Tensão de leitura ou tensão medida no ponto de entrega;

TR - Tensão de referência ou tensão contratada.

De acordo com o módulo 8 do PRODIST, o conjunto de leituras para apurar os indicadores individuais deverá compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada (PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL-PRODIST, 2016). Esta janela de medição compreende um período de 7 dias e permite uma análise diária do perfil de carga do cliente para os 7 dias da semana. Ainda em relação à medição, a mesma deve ser realizada por meio de equipamentos que possuam os seguintes requisitos mínimos:

- a) Taxa amostral: 16 amostras/ciclo;
- b) Conversor A/D (analógico/digital) de sinal de tensão: 12 bits;
- c) Precisão: até 1% da leitura.

O método de cálculo dos indicadores de tensão precária e crítica são realizados da seguinte forma:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (2)$$

Onde:

DRP – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária;

nlp – Número de amostras que tiveram leitura de tensão precária;

DRC – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica;

nlc – Número de amostras que tiveram leitura de tensão precária;

Os limites definidos pelo PRODIST para os indicadores de *DRP* e *DRC* são de 3% e 0,5%, respectivamente. Quantitativamente, considerando uma medição com 1008 leituras válidas, se tivermos 31 registros de tensão na faixa precária ou apenas 5 registros de tensão na faixa crítica, a concessionária terá que tomar as devidas providências para regularizar o

fornecimento de energia conforme a faixa considerada como adequada. Conforme legislação atual, observa-se que não existe prazo para adequação dos índices de DRP e DRC obtidos através de uma medição de nível tensão, entretanto, é obrigação da concessionária realizar uma compensação financeira ao cliente reclamante e a todos aqueles que estão no mesmo ponto de conexão, em virtude da prestação do serviço inadequado, a partir do momento em que for identificado fornecimento inadequado. Esta compensação deve ser calculada com base na seguinte equação:

$$Valor = \left[\left(\frac{DRP - DRP_M}{100} \right) \cdot k_1 + \left(\frac{DRC - DRC_M}{100} \right) \cdot k_2 \right] \cdot EUSD \quad (3)$$

Onde:

Valor - Compensação da transgressão de níveis de tensão – R\$;

DRC - valor do DRC expresso em %, apurado na última medição;

DRP - valor do DRP expresso em %, apurado na última medição;

DRP_M - 3 %;

DRC_M - 0,5 %;

$k_1 = 0$, se $DRP \leq DRP_M$;

$k_1 = 3$, se $DRP > DRP_M$;

$k_2 = 0$, se $DRC \leq DRC_M$;

$k_2 = 3$, para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão, $DRC > DRC_M$;

$k_2 = 5$, para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão, $DRC > DRC_M$;

$k_2 = 7$, para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão, se $DRC > DRC_M$;

EUSD - valor do encargo de uso do sistema de distribuição referente ao mês de referência da última medição.

Da Equação 3, nota-se que, para clientes em que é verificada a transgressão dos níveis de tensão, o valor da compensação é composto por 2 variáveis relacionadas aos

indicadores de DRP e DRC. Observa-se também a adoção de constantes “k” diferentes para clientes de cada classe de tensão, seja ela em baixa, média ou alta tensão. Verifica-se aqui uma preocupação do órgão regulador em tentar direcionar investimentos aos clientes que, de fato, estão sendo atendidos precariamente sob a forma de compensações pela má qualidade do serviço prestado. Frequentemente, multas pesadas são impostas em fiscalizações relativas ao processo de nível de tensão por falhas no procedimento e o não cumprimento de prazos, que muitas vezes se tornam inexequíveis, levando-se em conta todo o processo relativo a execução de uma obra, que compreende avaliação do local através levantamento de campo, realização de projeto, reserva de material, análise do impacto de clientes interrompidos durante o período da execução da obra, aviso de desligamento e a execução da obra.

2.3 REGULAMENTAÇÃO DE HARMÔNICAS

De acordo com o PRODIST, as distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

As expressões para o cálculo das grandezas da distorção harmônica total e individual de tensão são dadas por:

$$DHIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (4)$$

$$DHIT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (5)$$

Onde;

$DHIT_h$ % - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h;

$DHTT\%$ - Distorção harmônica total de tensão;

V_h - Tensão harmônica de ordem h ;

h - Ordem harmônica;

$h_{máx}$ - Ordem harmônica máxima;

V_1 - Tensão fundamental medida.

No sentido de manter a compatibilidade entre o fornecimento da energia e a operação da carga, os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão estabelecidos pelo PRODIST podem ser visualizados na Tabela 3, enquanto que os valores de referência para as distorções harmônicas individuais de tensão são mostrados na Tabela 4.

Tabela 3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

<i>Tensão nominal do Barramento</i>	<i>Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]</i>
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Fonte: (PRODIST, 2016)

Tabela 4 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
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: (PRODIST, 2016)

Sabendo-se que a atual proposta do PRODIST é apenas definir valores de referência para as distorções harmônicas de tensão, com possível posterior definição de limites para as harmônicas de corrente, as concessionárias de distribuição de energia do Brasil buscam em normas e recomendações internacionais preencher esta lacuna. Na maioria das vezes utilizando como referência para as harmônicas de corrente as recomendações da IEEE-519 de 2014.

A IEEE-519 de 2014 é uma prática recomendada pelo IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, utilizada principalmente por concessionárias de energia nos EUA. O aspecto fundamental e inovador da IEEE-519, que fez com que as concessionárias brasileiras utilizassem seus critérios e recomendações, é a divisão da responsabilidade do problema entre consumidores e concessionárias. Neste caso, os limites de distorções de tensão no ponto de ligação são de responsabilidade da concessionária, enquanto que os limites de distorção de corrente, neste mesmo ponto, são de responsabilidade dos consumidores.

Nesta recomendação, os limites das distorções harmônicas de corrente são determinados pela relação entre a máxima corrente de carga e a corrente de curto circuito no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Salienta-se que a máxima corrente de carga é relacionada para a condição de carregamento máximo da planta elétrica registrado para um período ente 15 e 30 minutos. As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os limites para as componentes harmônicas de corrente totais e individuais para sistemas de distribuição, subtransmissão e transmissão de energia conforme as classes de tensão abaixo.

Tabela 5 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas com tensão inferior a 69kV

Ordens Harmônicas Individuais (%) *						
ISC/IL	<11	11 ≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	DHTC
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

* Percentual em relação a harmônica fundamental

Fonte: (IEEE Std 519, 2014)

Tabela 6 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas com tensão entre 69kV e 161kV

Ordens Harmônicas Individuais (%) *						
I _{sc} /I _L	<11	11 ≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	DHTC
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

* Percentual em relação a harmônica fundamental

Fonte: (IEEE Std 519, 2014)

Tabela 7 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas de distribuição com tensão superior 161kV

Ordens Harmônicas Individuais (%) *						
I _{sc} /I _L	<11	11 ≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	DHTC
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

* Percentual em relação a harmônica fundamental

Fonte: (IEEE Std 519, 2014)

Onde:

I_{sc} - Corrente de curto circuito trifásica no PAC;

I_L - Corrente de carga máxima em um período compreendido entre 15 e 30 minutos;

DHTC% - Distorção Harmônica Total de Corrente.

Para efeito de aplicação dos critérios conforme a recomendação IEEE Std 519-2014, a distorção total de corrente (DHTC%) é usada como base e, portanto, é obtida pela seguinte expressão:

$$DHTC = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{L_L} \times 100 \quad (6)$$

2.3.1 Conceituação de harmônicas

Fundamentalmente, harmônicas são componentes senoidais de tensão ou corrente com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema elétrico. A distorção harmônica de corrente é resultado da característica não-linear da carga, enquanto que a distorção harmônica de tensão é um resultado da interação de correntes distorcidas com a impedância equivalente do sistema.

Assim sendo, o grau de distorção harmônica presente na tensão e/ou corrente pode ser quantificado matematicamente com base no estudo das ondas não senoidais periódicas, viabilizada por meio da série de Fourier.

O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta de uma expressão senoidal em frequência fundamental, de expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas) e de uma eventual componente contínua. Portanto, um sinal, seja ele de tensão ou corrente, periódico e não senoidal pode ser expresso por:

$$F(t) = F_o + F_1 \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} [F_h \times \text{sen}(h\omega t + \varphi_h)] \quad (7)$$

Onde:

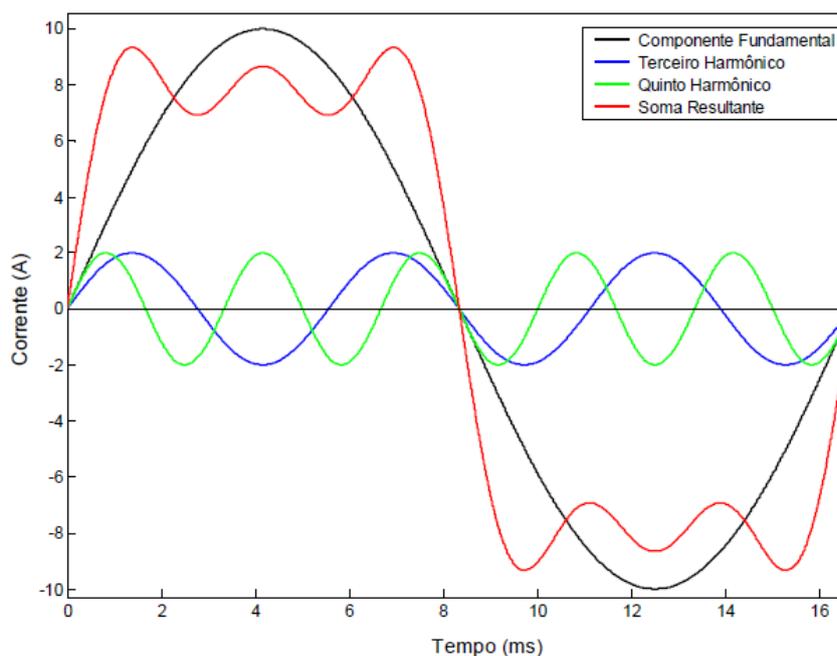
F_o = componente constante;

F_1 , φ_1 = amplitude e ângulo de fase do componente fundamental;

F_h , φ_h = amplitude e ângulo de fase da h-ésima componente harmônica;

Como exemplo, a Figura 2 apresenta a decomposição de uma forma de onda, com sua correspondente fundamental e suas componentes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

Figura 2 - Decomposição de uma forma de onda não senoidal



Fonte: Próprio Autor

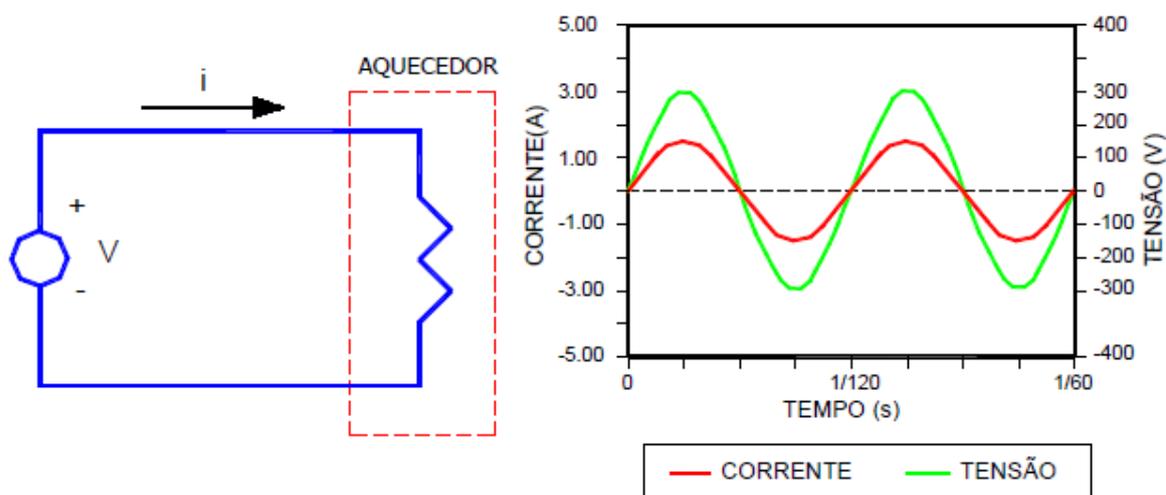
2.3.2 Caracterização de cargas lineares

Desde o início do século XX até algumas décadas atrás, as instalações elétricas em geral, supriam, quase que exclusivamente, cargas de natureza puramente linear, ou seja, cargas constituídas essencialmente por elementos resistivos, indutivos e capacitivos, perfazendo-se impedâncias consideradas constantes (RESENER, 2008).

As cargas lineares são aquelas que satisfazem à Lei do Ohm e caracterizam-se por drenar da rede elétrica correntes proporcionais à tensão a elas aplicada, mantendo as formas de onda de tensão e corrente sempre senoidais. Como exemplo de cargas lineares podemos citar as lâmpadas incandescentes, aquecedores resistivos (chuveiros, fornos elétricos

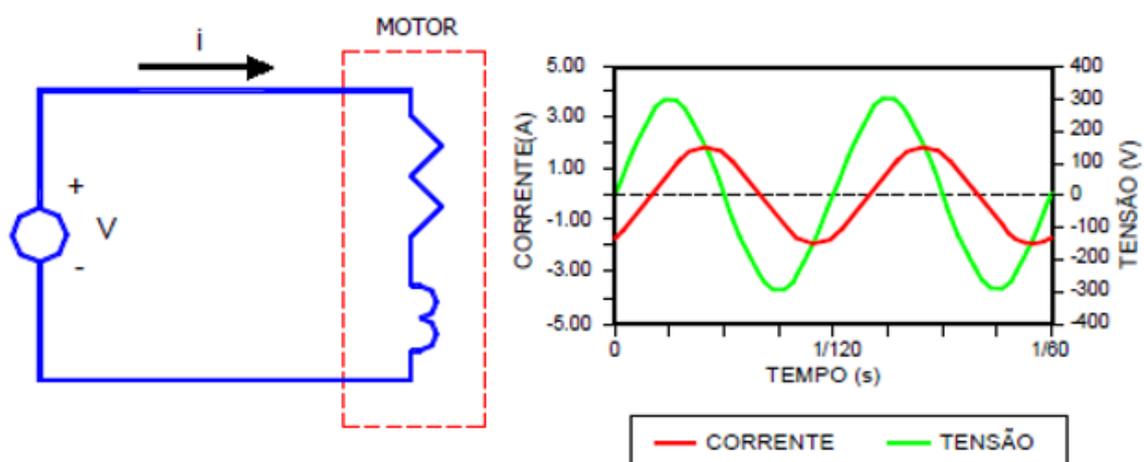
residenciais, ferro de passar roupas, secadores de cabelos, etc.) e motores sem dispositivos de controle de velocidade. As Figuras 3 e 4 indicam o comportamento das formas de onda para tensão e corrente de um sistema com cargas lineares puramente resistivas, onde a corrente está em fase com a tensão e uma carga indutiva, onde a tensão está atrasada em relação a corrente, respectivamente.

Figura 3 - Formas de onda de um sistema com cargas lineares puramente resistivas



Fonte: (PROCOBRE, 2001)

Figura 4 - Formas de onda de um sistema com cargas lineares indutivas



Fonte: (PROCOBRE, 2001)

2.3.3 Caracterização de cargas não-lineares

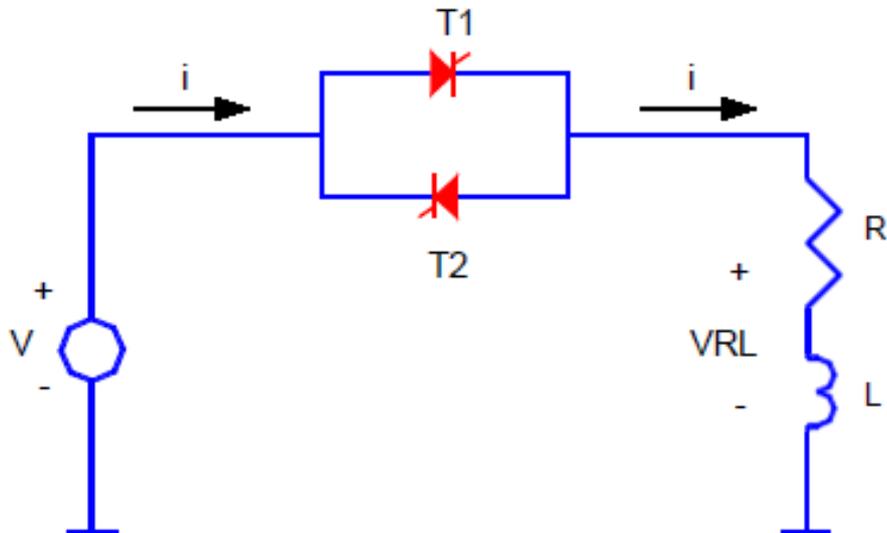
A geração de harmônicas no sistema de distribuição de energia elétrica não é de responsabilidade somente da concessionária (BALTASAR, 2007). As cargas ligadas ao sistema elétrico são as grandes responsáveis pela geração de formas de ondas não senoidais, ou formas de ondas distorcidas, sendo que, o grande responsável por estas distorções são os dispositivos eletrônicos conectados à rede, tanto nas indústrias do setor produtivo, quanto no setor residencial.

Com a modernização dos processos industriais e a utilização massiva de diversos processadores eletrônicos de energia elétrica (fontes chaveadas, controladores de velocidade de máquinas e motores elétricos, equipamentos de solda e demais conversores estáticos de potência), em conjunto com uma grande quantidade de dispositivos presentes nos setores comercial e residencial (computadores pessoais, dispositivos de entretenimento, reatores eletrônicos de reduzido fator de potência para iluminação, incluindo-se as lâmpadas fluorescentes compactas, dentre outros), tem-se observado um aumento significativo no nível de distorção harmônica de corrente e tensão nas redes de distribuição de energia elétrica (PROCOBRE, 2001).

Para exemplificar, a distorção na forma de onda de tensão e corrente cita-se os circuitos baseados em tiristores e que operam geralmente segundo 2 estados controlados de condução, em função da polaridade da rede: estado de condução, tal qual um interruptor fechado e estado de bloqueio, tal qual um interruptor aberto. Diversas aplicações utilizam-se desta possibilidade para controlar os instantes de condução (através dos ajustes de “gatilhamento” no circuito de disparos dos tiristores) e promover a variação de tensão nas cargas. Como resultado deste processo, temos uma tensão com forma de onda não senoidal na carga, gerada a partir da drenagem de uma corrente elétrica, também não senoidal, pela

carga. A Figura 5 apresenta um circuito típico incluindo um dispositivo de controle de tensão tiristorizado.

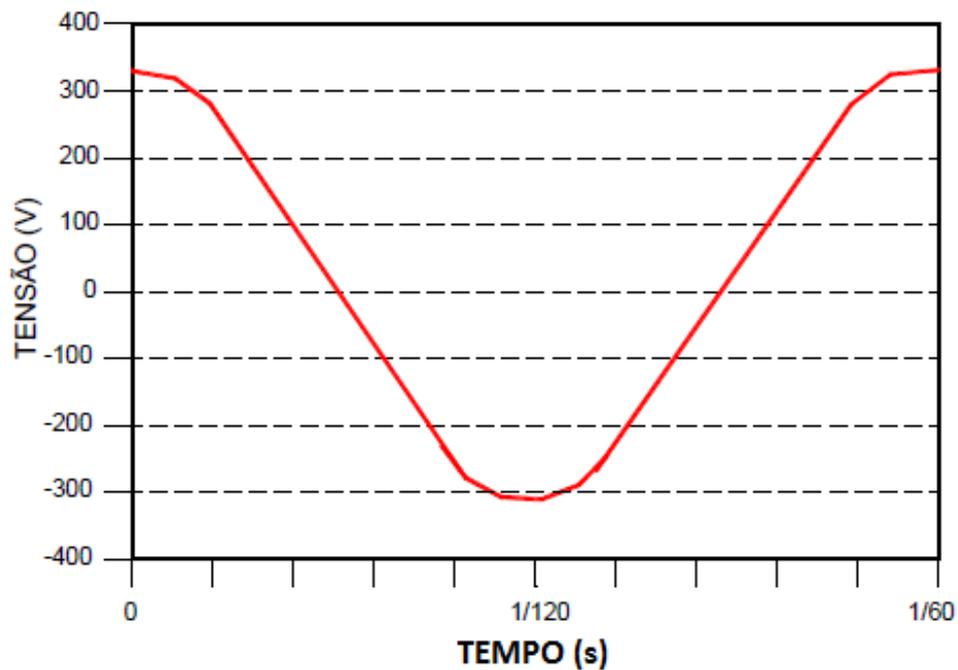
Figura 5 - Dispositivo de controle de tensão e corrente tiristorizado



Fonte: (PROCOBRE, 2001)

A Figura 6 apresenta a forma de onda da tensão de alimentação do circuito.

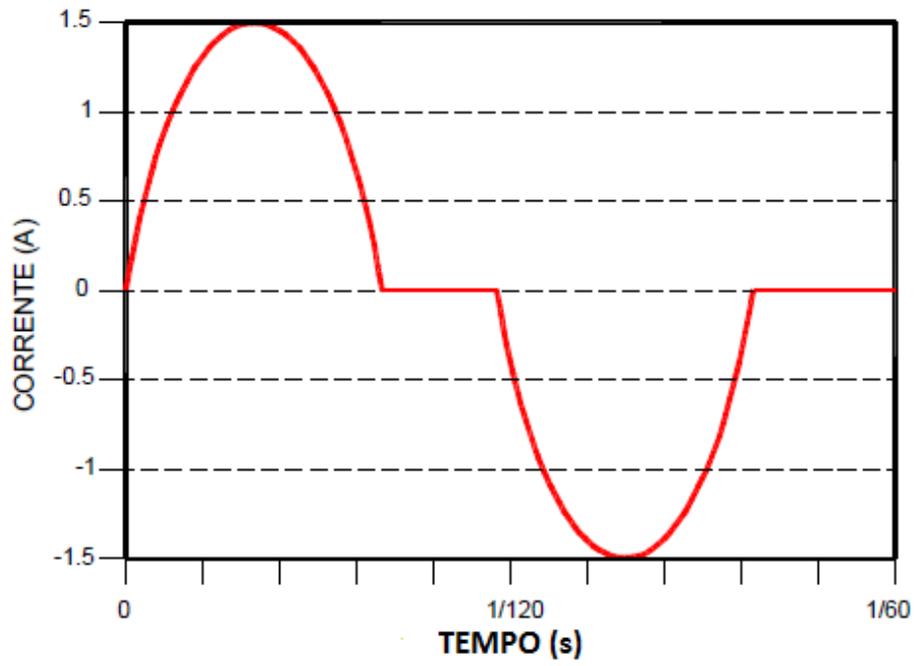
Figura 6 - Forma de onda de alimentação do circuito de controle tiristorizado



Fonte: (PROCOBRE, 2001)

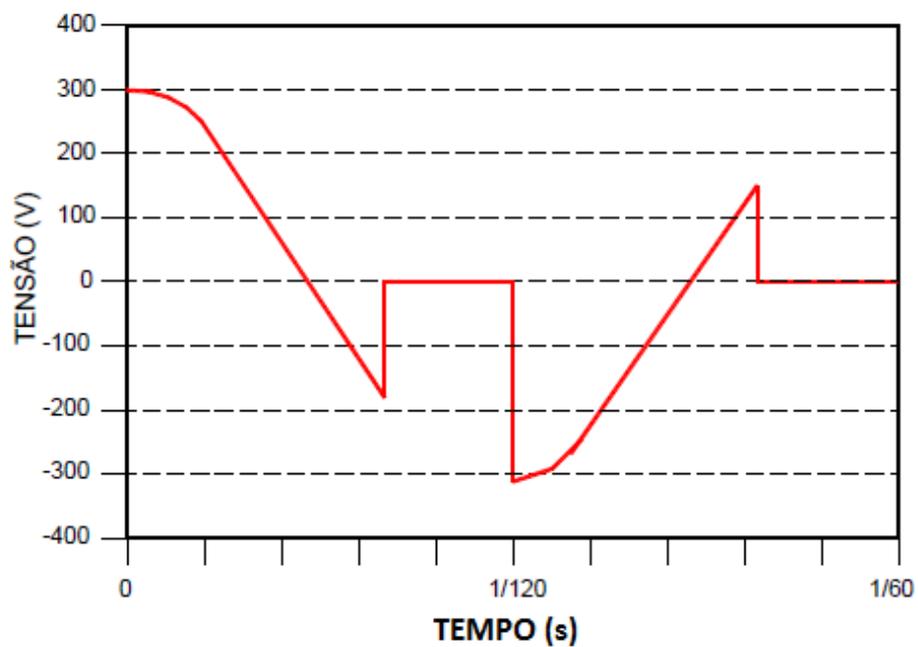
As Figuras 7 e 8 mostram as formas da corrente drenada pela carga e da tensão na carga, respectivamente.

Figura 7 - Forma de onda da corrente drenada pelo circuito de controle tiristorizado



Fonte: (PROCOBRE, 2001)

Figura 8 - Forma de onda da tensão no circuito de controle tiristorizado



Fonte: (PROCOBRE, 2001)

2.3.4 Principais fontes de distorções harmônicas

Na atualidade, as fontes harmônicas mais significativas provêm dos conversores estáticos de potência, representados, principalmente, pelos retificadores e inversores de frequência. São equipamentos que têm sido largamente disseminados a partir das últimas duas décadas, cuja utilização se intensificou, principalmente, no segmento industrial, tendendo a se acentuar ainda mais nos próximos anos. Existem conversores de diversos níveis de potência e dos mais variados portes, destinados a aplicações diversas e com ampla utilização em instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais (ISONI; ENGEPARC,2015).

A seguir, serão apresentadas as principais fontes de distorção harmônicas encontradas nas instalações elétricas.

2.3.4.1 *Sistemas de retificação e acionamentos CC*

No processo de retificação de uma onda alternada, o retificador “corta” a onda de corrente CA e permite que ela flua em apenas uma porção do ciclo da tensão de alimentação. O resultado é uma onda de corrente distorcida e normalmente rica em conteúdo harmônico. Os níveis de distorção e a configuração final da onda de corrente em cada fase da alimentação dependerão do número de pulsos utilizados para a retificação (o número de pulsos é igual ao número de diodos ou de tiristores utilizados na ponte retificadora) e do ajuste do ângulo de disparo, no caso dos tiristores.

Em um conversor as correntes harmônicas presentes são dadas por:

$$n = pk \pm 1 \quad (8)$$

Onde:

n = componente harmônica;

p = número de pulsos do conversor

Assim, para um retificador trifásico de 6 pulsos estarão presentes as harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª, 19ª ordem, etc. No setor industrial é bastante comum a utilização de retificadores de 6 pulsos para acionamentos de motores de corrente contínua. Acionamentos de motores de maior porte podem empregar retificadores de 12 pulsos, o que reduz os regimes de condução de corrente de cada tiristor individualmente e minimizam algumas das mais significativas e danosas correntes harmônicas, neste caso, a 5ª e a 7ª harmônicas (300hz e 420hz), fazendo-se presentes as harmônicas de ordem 11, 13, 23, 25, etc.

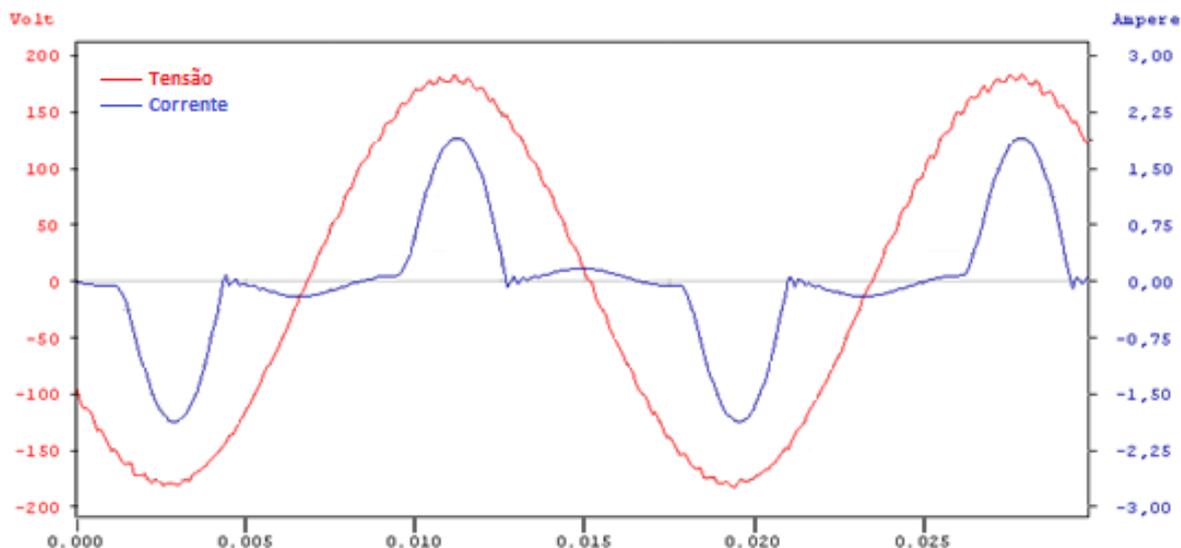
2.3.4.2 Fontes de alimentação monofásicas (fontes chaveadas)

Este tipo de carga é o mais utilizado nas instalações elétricas residenciais, uma vez que qualquer equipamento eletrônico possui sua própria fonte de alimentação. Estão presentes em microcomputadores, impressoras, televisores, carregadores de celulares e demais equipamentos baseados em microprocessadores que, em sua imensa maioria, empregam fontes chaveadas. Basicamente, uma fonte chaveada é uma sucessão de dispositivos situados à entrada destes equipamentos, sendo ligada diretamente à linha CA sem necessidade de transformador.

A maior desvantagem da utilização destes equipamentos é que a corrente no lado da alimentação flui em pulsos de curta duração, caracterizando uma onda periódica não senoidal e, portanto, com potencial conteúdo harmônico. Uma característica própria de uma fonte chaveada é a de provocar um significativo conteúdo harmônico de 3ª ordem na corrente drenada da rede elétrica.

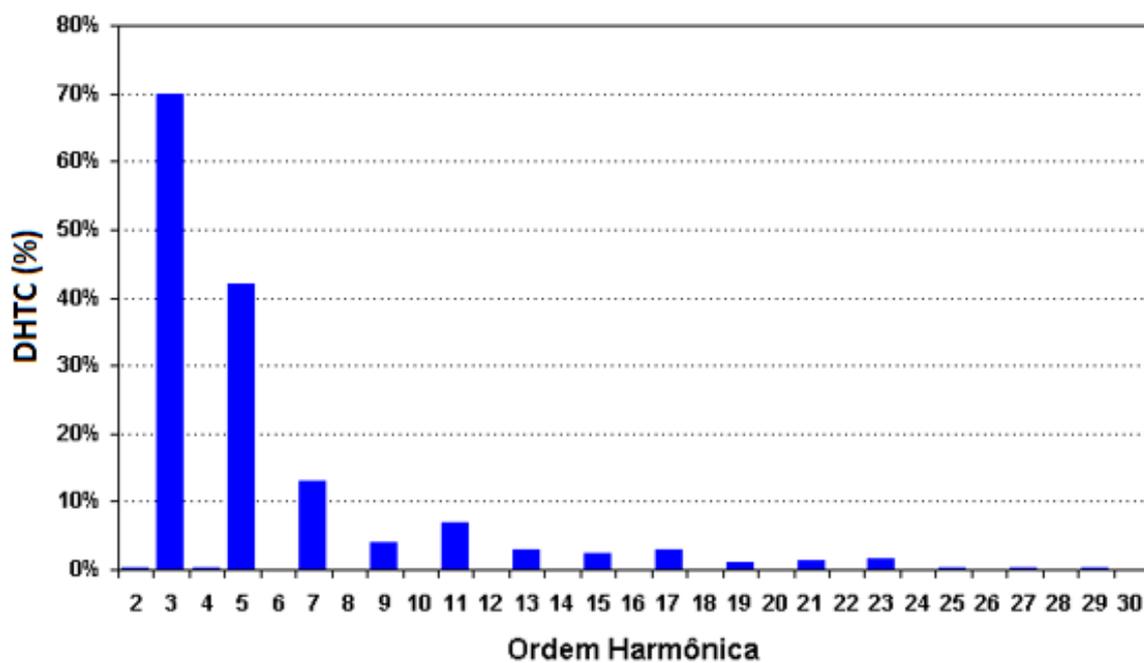
As Figuras 9 e 10 apresentam as formas de onda da tensão e da corrente enquanto que o histograma representa as harmônicas para uma fonte de tensão chaveada. Nesta situação típica, registra-se para este tipo de carga uma DHTV de 0,62% e uma DHTC de 167,7%.

Figura 9 - Formas de onda de tensão e corrente de fontes chaveadas



Fonte: Próprio Autor

Figura 10 - Decomposição harmônica do sinal de corrente para uma fonte de tensão chaveada.



Fonte: Próprio Autor

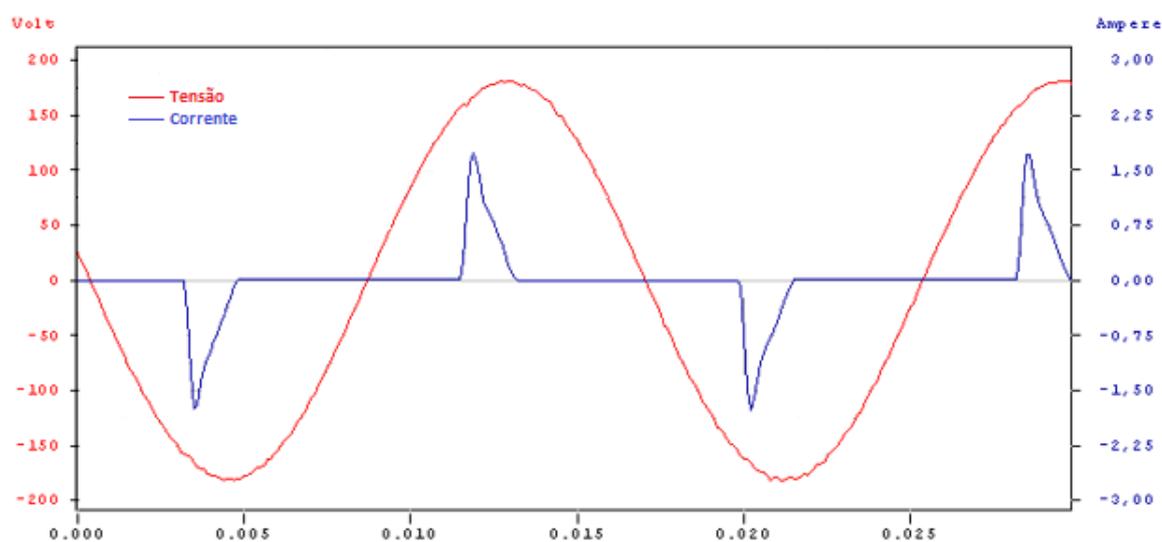
2.3.4.3 Reatores eletrônicos para iluminação

Os reatores eletrônicos para iluminação também são equipamentos que utilizam-se de fontes chaveadas e que geram harmônicas de corrente similares as geradas a partir dos

microcomputadores e demais equipamentos eletrônicos mencionados no item anterior. A tensão de saída para as lâmpadas é controlada e aplicada a altas frequências, o que torna-se possível por meio do emprego de inversores tiristorizados (ISONI; ENGEPARC, 2015). O resultado é uma maior eficiência do sistema de iluminação (lumens/watts), ausência do efeito estroboscópico nas lâmpadas e menor dissipação de calor do que nos sistemas baseados a reatores eletromagnéticos, dando a possibilidade de controle mais sofisticado, como no caso da utilização de dimmers.

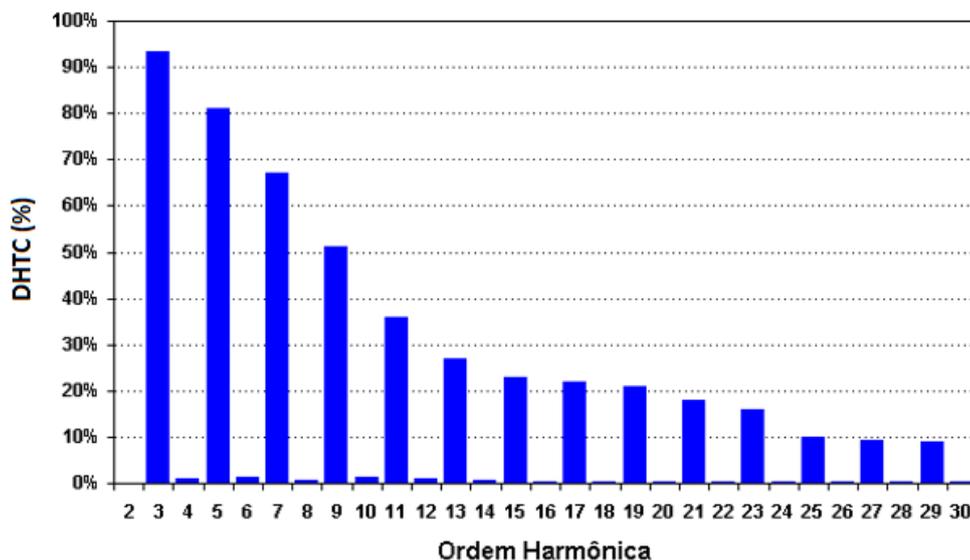
Com a aplicação dos reatores eletrônicos aos sistemas de iluminação de lâmpadas fluorescentes compactas e também pelo apelo de diversas campanhas promovendo o uso desta tecnologia visando um menor consumo de energia ativa e conseqüentemente uma fatura de energia menor, este tipo de carga ainda representa boa parcela do consumo total de energia do país. Embora o emprego deste tipo de iluminação acarrete uma economia em razão da diminuição do consumo de energia ativa (watts), a maioria dos fabricantes atuais fornecem reatores eletrônicos de baixo fator de potência e com taxas de distorção harmônicas extremamente altas, como podemos observar nas Figuras 11 e 12. Para este tipo de carga, observa-se uma DHTV de 0,69% e uma DHTC de 165,75%.

Figura 11 - Formas de onda de tensão e corrente de reatores eletrônicos para iluminação



Fonte: Próprio Autor

Figura 12 - Decomposição harmônica do sinal de corrente de reatores eletrônicos para iluminação



Fonte: Próprio Autor

2.3.4.4 *Conversores trifásicos e acionamentos CA*

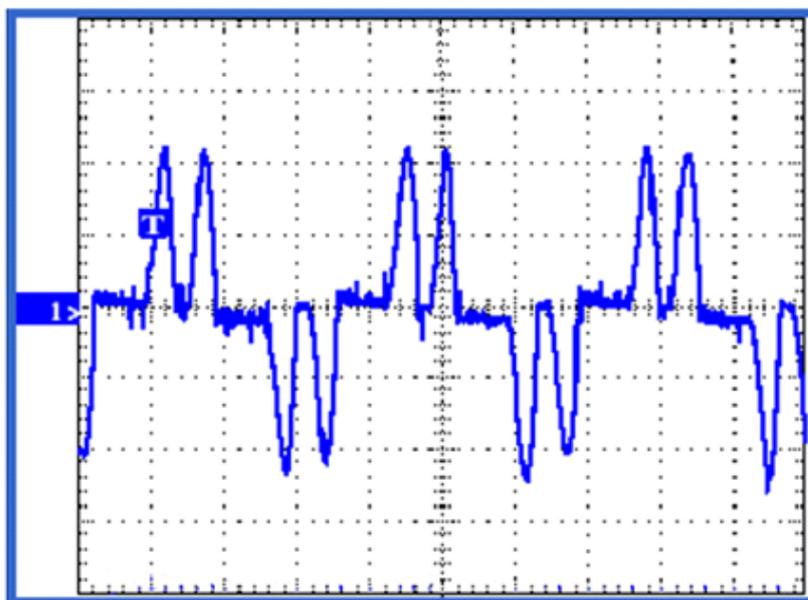
Os conversores estáticos de potência são equipamentos bastante significativos sob a ótica da geração de distorções harmônicas, principalmente nos setores industriais e comerciais de maior porte. Destaca-se nesta categoria de cargas potencialmente perturbadoras os inversores de frequência, que são utilizados para o controle de velocidade dos motores elétricos de indução e os UPS – *Uninterruptible Power Systems* ou “No-breaks”.

Em um acionamento com inversores de frequência, a tensão de alimentação em 60Hz é retificada e posteriormente invertida, produzindo-se uma tensão alternada de frequência variável a ser aplicada ao motor elétrico com o objetivo de se controlar a velocidade de giro do motor e manter a configuração da curva de torque. Usualmente, esse tipo de acionamento utiliza uma ponte inversora que emprega técnicas de PWM – *Pulse Width Modulation*, ou modulação por largura de pulso, que permite transformar uma tensão CC gerada no módulo retificador em sequências de grupos de pulsos CC positivos e

negativos com a mesma amplitude de tensão CC original e com tempos de ocorrência variável, sendo o valor eficaz resultante simulando uma senóide (ISONI; ENGEPARC, 2015).

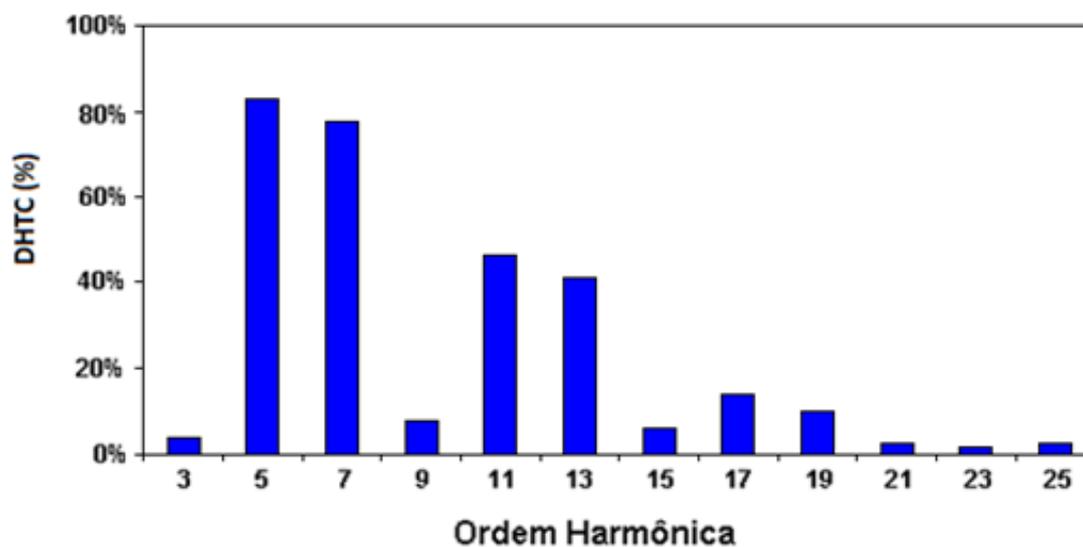
As Figuras 13 e 14 apresentam a forma de onda de corrente drenada pelo inversor e a decomposição harmônica do mesmo sinal.

Figura 13 - Forma de onda de corrente típica do inversor de frequência



Fonte: Próprio Autor

Figura 14 - Decomposição harmônica do sinal de corrente de um inversor de frequência



Fonte: Próprio Autor

2.3.4.5 Dispositivos com princípio de funcionamento baseado em arco elétrico

Lâmpadas de descarga operando com reatores eletromagnéticos ou eletrônicos, como por exemplo, lâmpadas fluorescentes, a vapor de mercúrio, a vapor de sódio, e a vapores metálicos, fornos a arco e equipamentos de solda a arco são cargas elétricas geradoras de distorções harmônicas uma vez que a tensão e corrente dos arcos elétricos apresentam características não lineares (ISONI; ENGEPARC, 2015). Ainda de acordo com DA SILVA (2008), a partir do instante da ignição (início do surgimento do arco) a tensão de arco decresce a medida que a corrente do arco aumenta, situação que tende a um curto circuito. Na maioria das vezes, o comportamento do arco é aleatório e imprevisível, como no caso dos fornos e soldas a arco.

No caso das lâmpadas de descarga, os reatores operam como impedâncias externas limitadoras de corrente de forma que haja estabilização do arco de acordo com as capacidades termomecânicas dos bulbos.

Na operação de fornos industriais a arco, as correntes envolvidas nos eletrodos de um forno são da ordem de 50kA e o conteúdo harmônico gerado é aleatório e amplamente variável em função de uma série de fatores, que vão desde as características da carga a ser fundida e as condições de fusão, a posição dos eletrodos e, principalmente, as variações imprevisíveis no comportamento do arco elétrico entre tais eletrodos. Geralmente, estes fornos possuem potências elevadas de dezenas de MW, por este motivo são considerados cargas problemáticas para a operação de sistemas elétricos e que contribuem para a perda de QEE.

2.3.5 Efeitos e consequências das distorções harmônicas

Existem vários efeitos provocados pelas harmônicas. Alguns podem ser notados visualmente, outros podem ser ouvidos, outros são registrados por medidores de

temperatura e ainda há outros casos que necessitam de utilização de equipamentos especiais para detectá-los. Os principais defeitos observados em instalações e componentes submetidos a presença de harmônicas são: aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, ressonância, vibrações de acoplamentos, aumento da queda de tensão e redução do fator de potência da instalação, etc. Basicamente, podemos dividir estes efeitos em três grupos:

- i. Efeitos relacionados ao isolamento, causado pelos elevados índices de distorção harmônica de tensão;
- ii. Efeitos térmicos, devido a circulação de elevados índices de correntes harmônicas;
- iii. Efeito sobre a operação de equipamentos elétricos.

É no último caso que estariam enquadrados os problemas dos mais variados tipos envolvendo o sistema de distribuição de energia, os quais serão abordados a seguir

2.3.5.1 *Aquecimentos excessivos*

O aquecimento é um dos efeitos mais indesejáveis em sistemas que possuem altas taxas de distorção harmônica de corrente. Está presente em fios e cabos das instalações elétricas, nos enrolamentos dos transformadores, motores e geradores, etc. Devido ao “efeito skin”, ou efeito pelicular, as harmônicas de corrente de ordens mais altas, portanto em frequências mais altas, tendem a circular pela periferia do condutor, o que significa um aumento de sua resistência elétrica e, por conseguinte, aumento das perdas por efeito Joule.

2.3.5.2 *Ressonância*

Um capacitor em paralelo com uma indutância forma um circuito ressonante capaz de amplificar os sinais de uma dada frequência (PROCOBRE, 2001). Quando instalamos um banco de capacitores em uma instalação elétrica, estamos formando um circuito ressonante, uma vez que colocamos em paralelo os capacitores e a instalação elétrica que é

de natureza indutiva. Esta ação pode fazer com que certas harmônicas sejam amplificadas, provocando danos principalmente nos capacitores, levando-os à queima ou explosões.

2.3.5.3 Efeitos sobre dispositivos de medição, proteção e controle

Os dispositivos de proteção, medição e controle também são afetados pelas distorções harmônicas de corrente. Os equipamentos de proteção e medição que operam com base no disco de indução, tal como a maioria dos medidores de kWh residenciais e relés de sobrecorrentes eletromecânicos, são projetados para operarem com correntes fundamentais apenas. Desta forma, as correntes harmônicas produzidas pelas cargas não lineares e/ou os desequilíbrios causados pelas distorções harmônicas podem levar estes instrumentos e dispositivos a funcionarem erroneamente.

Já os RT's utilizados para a regulação de tensão, possuem um painel de controle que verifica a tensão do sistema e realiza o comando para aumento ou redução de tap conforme parametrização de ajustes específica. Estes equipamentos também são sensíveis as distorções harmônicas e podem apresentar mal funcionamento, conforme abordaremos com maiores detalhes nos capítulos 5 e 6.

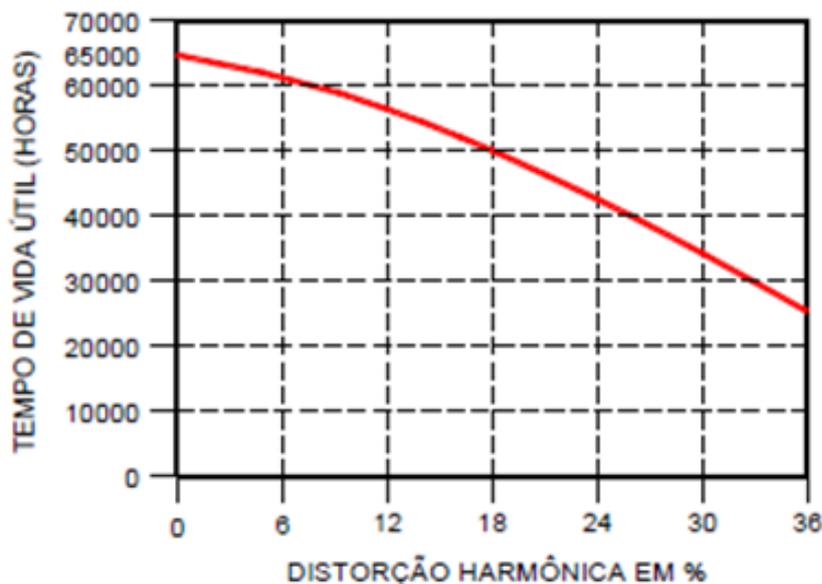
2.3.5.4 Efeitos sobre transformadores

Os efeitos das harmônicas nos transformadores podem ser classificados em:

- i. Perdas no cobre, devido à circulação de corrente harmônica no enrolamento, bem como perdas envolvendo fluxos de dispersão;
- ii. Maiores solicitações no isolamento e possíveis ressonâncias (para frequências harmônicas) entre os enrolamentos do transformador e as capacitâncias das linhas;
- iii. Existência de componente contínua no transformador acarretando uma magnetização assimétrica (saturação) e os seus subsequentes efeitos.

A principal consequência da distorção harmônica de corrente para os transformadores é a redução da vida útil. Conforme mostra a Figura 15, um transformador a plena carga pode ter uma redução da vida útil de cerca de 8% se submetido a distorção harmônica de corrente total de 6%.

Figura 15 - Vida útil de um transformador em função da distorção harmônica de corrente



Fonte: (PROCOBRE, 2001)

2.3.5.5 *Efeitos sobre motores*

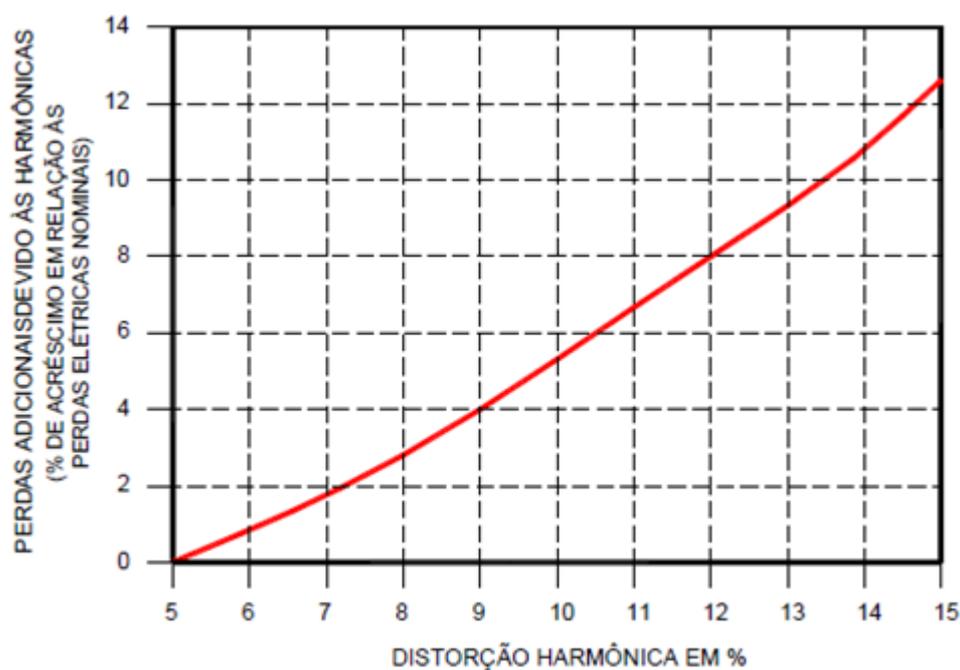
A presença de conteúdo harmônico na tensão de alimentação dos motores, gera a absorção de correntes harmônicas, provocando a elevação de perdas no cobre e no ferro e torques oscilatórios devido à interação de correntes harmônicas e campo magnético com a componente fundamental, efeito extremamente prejudicial, tanto para a eficiência, como para a preservação da vida útil do equipamento.

O fenômeno de torque oscilatório está associado a operação de motores em ambientes com a circulação de correntes harmônicas de sequência negativa, fundamentalmente a de ordem 5. As harmônicas de sequência negativa geram torques em sentido oposto ao gerado pela onda fundamental, tendendo a reduzir a capacidade para

acionamento de carga mecânica acoplada ao eixo girante, já que o seu efeito é parecido ao da ação de frear o rotor.

A Figura 16 apresenta a variação típica das perdas nos motores de indução em função da distorção total da tensão de alimentação.

Figura 16 - Perdas elétricas adicionais nos motores frente a distorção harmônica de tensão de alimentação



Fonte: (PROCOBRE, 2001)

2.3.5.6 *Efeitos sobre capacitores*

Os bancos de capacitores são fontes de energia reativa. O objetivo de sua aplicação em sistemas de distribuição de energia elétrica é a compensação de energias reativas produzidas por cargas indutivas. Quando adequadamente utilizado, permite a obtenção de um conjunto de benefícios que incluem a redução de perdas de energia, correção dos perfis de tensões, controle do fluxo de potência, melhoria do fator de potência e aumento da capacidade dos sistemas.

Segundo ISONI (ENGEPARC, 2015), há um conceito errôneo de que os capacitores são causadores de distorções harmônicas. Na realidade eles não geram distorções harmônicas, porém, podem agravar os potenciais problemas resultantes da existência de distorções harmônicas em uma instalação industrial. Existem casos que indústrias venham a ter conhecimento dos problemas relacionados a harmônicos em sua planta a partir do momento em que se utilizam capacitores para correção do fator de potência. Perante a presença de harmônicas de frequências mais elevadas, os capacitores podem ser submetidos a grandes esforços térmicos com a possibilidade real de queimas prematuras, uma vez que a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência. Desta forma, as correntes harmônicas encontrarão um caminho de menor impedância através dos capacitores, elevando suas perdas ôhmicas, gerando sobreaquecimentos que reduzirão sua vida útil e que poderão, inclusive, provocar explosões.

2.4 CONCLUSÕES

Primeiramente, neste capítulo foi apresentado um apanhado geral sobre a regulamentação de níveis de tensão em vigor no Brasil, as quais estão descritas no módulo 8 do PRODIST. Estas diretrizes impostas pelo órgão regulador, ANEEL, devem ser cumpridas pelas concessionárias de todo o território brasileiro sob pena de pagamentos de compensações e multas. O não cumprimento de prazos e as falhas no processo e procedimentos adotados pelas concessionárias no tratamento das reclamações de nível de tensão geram despesas extras com o pagamento de compensações pela prestação de serviço inadequado. Além disso, o não cumprimento destas diretrizes podem deixar as concessionárias expostas ao pagamento de multas pesadas, resultado de fiscalizações de órgãos governamentais. Portanto, a otimização da QEE em sistemas de distribuição de

energia é um processo fundamental para que todos os clientes usufruam de uma energia de boa qualidade e ao mesmo tempo, configura um grande desafio para as concessionárias de distribuição de energia.

No que tange a regulamentação das distorções harmônicas, apesar de uma regulamentação nacional ainda um tanto omissa no que se refere a aplicação de penalidades para clientes com altas taxas de distorções harmônicas e também quanto a determinação de valores de referência ou limites para harmônicas de corrente, é compreensível que as concessionárias de distribuição de energia do Brasil busquem em normas e recomendações internacionais preencher esta lacuna. Até o momento, as recomendações da IEEE Std 519 – 2014 possuem uma maior aceitação, pois esta recomendação atribui responsabilidades não somente às concessionárias, mas também aos clientes que devem corrigir suas distorções de corrente conforme critérios específicos. Embora isto traga, em um primeiro momento, um desgaste natural da relação cliente e concessionaria, a médio prazo, a visão dos clientes tende a convergir a uma aceitação, pois estes, quando realizam as melhorias solicitadas, invariavelmente percebem melhorias em sua planta industrial, tanto de operação de equipamentos, com relação a taxas de falhas menores, quanto de faturamento, resultando na melhoria de perdas e maior produtividade.

3 REGULAÇÃO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

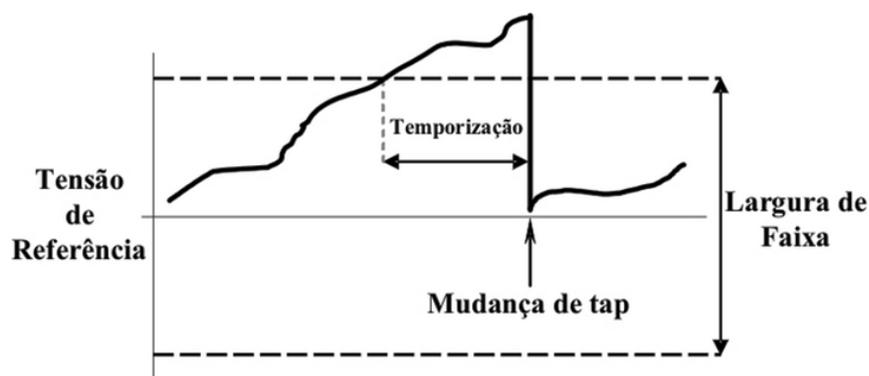
3.1 INTRODUÇÃO

O processo de regulação de tensão em regime permanente envolve diversas áreas das concessionárias de energia. O principal setor responsável pelo gerenciamento das ações dirigidas no intuito de regular a tensão para índices dentro do estabelecido pelo módulo 8 do PRODIST é a área de planejamento e engenharia. Neste capítulo são apresentadas as técnicas mais comuns realizadas para a correção dos níveis de tensão:

3.2 RELÉS DE CONTROLE DE TENSÃO (RELÉ 90)

O controle de tensão em barras de média tensão das subestações é realizado através de relés de controles eletrônicos ou digitais, normalmente chamados de relé 90 ou relé regulador de tensão - AVR (*Automatic Voltage Relay*). Nas subestações, este equipamento é aplicável em transformadores de potência dotados de chave comutadora sob carga. Sua funcionalidade é realizar a troca do tap do transformador assim que a tensão de operação medida ultrapassar o ajuste da referência, podendo realizar a troca do tap do TR tanto para elevação de tensão, como para diminuição da tensão. A Figura 17 exemplifica o seu princípio de funcionamento.

Figura 17 - Princípio de funcionamento do relé de controle de tensão ou relé 90



Fonte: Próprio Autor

3.3 MANOBRAS DE CARGAS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Apesar de não podermos considerar este procedimento como uma ação de regulação de tensão propriamente dita, as manobras de cargas entre os alimentadores da distribuição proporcionam um enorme leque de possibilidades para adequação dos níveis de tensão e também para aliviar o carregamento de determinados trechos de alimentadores que apresentam sobrecarga.

Este procedimento, também é muito utilizado para subestações onde o transformador de força encontra-se em sobrecarga. Neste caso, alimentadores de subestações diferentes e que possuam pontos de interligação entre eles, são manobrados, de forma que o alimentador do TR em sobrecarga transfira carga para outro alimentador, oriundo de outro transformador ou outra subestação. Obviamente, o conjunto alimentador/transformador/subestação que receberá esta carga, deverá possuir níveis de carregamento e queda de tensão adequados e capazes de receber o montante de carga transferido sem que comprometa a qualidade do fornecimento.

Ressalta-se que o procedimento para manobras de cargas pode ser realizado em prazos estritamente curtos e, na maioria das vezes, não requerem nenhum investimento para a realização, o que torna esta prática muito utilizada.

3.4 INSTALAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores são, basicamente, fontes de energia reativa. O objetivo de sua aplicação em sistemas de distribuição de energia elétrica é a compensação de energia reativa produzida por cargas indutivas. Quando adequadamente utilizado, permite a obtenção de um conjunto de benefícios que incluem a redução de perdas de energia,

correção dos perfis de tensões, controle do fluxo de potência, melhoria do fator de potência e aumento da capacidade dos sistemas.

Para a atuação nos sistemas de distribuição, os capacitores normalmente são instalados em paralelo (shunt), fornecendo energia reativa capacitiva ao sistema (MAURÍCIO, 2008). Já os capacitores conectados em série compensam a reatância indutiva da linha proporcionando uma elevação da tensão instantânea com o aumento da carga, (DE LIMA, 2014), características ideais para utilização em regiões com grande carga predominante de motores de potências elevadas.

No que diz respeito ao sistema de controle, eles podem ser utilizados da forma fixa, semi-automática ou automática

Na forma fixa, os bancos capacitores não possuem nenhum tipo de controle e permanecem ligados ao sistema independentemente das condições da carga, injetando energia reativa de forma fixa e contínua. Tem como principais características: baixo custo, impossibilidade de controle e conseqüentemente possibilidades de sobretensões, devido à sobre-compensações em período de baixa carga.

Considerando a forma semi-automática, o banco de capacitores é controlado por timer ou pelo valor da demanda de corrente do sistema. Geralmente, quando acionados por timer, permanecem ligados nos momentos de demanda alta e desligados no momento de baixa demanda. Proporciona um controle menos preciso que o banco automático, porém mais eficiente que o banco fixo.

Já nos bancos de capacitores que possuem controladores automáticos, a inserção ou a retirada dos capacitores do sistema acontece de forma automatizada e de acordo com a variação do fator de potência do sistema. Caso as cargas utilizadas em um dado momento estão fazendo com que o fator de potência fique abaixo do valor de referência, o

controlador irá aumentar a compensação automaticamente, ligando mais células do banco de capacitores.

3.5 RECONDUTORAMENTO DE CABOS

O recondutoramento dos cabos que compõem o sistema de distribuição visa proporcionar uma maior capacidade de condução de corrente, permitindo assim que uma maior capacidade de carga seja conectada a este sistema. Essa alteração também propicia um ganho nos níveis de tensão, uma vez que com a utilização de cabos de bitolas maiores tem-se uma diminuição das perdas e, principalmente, da impedância do sistema, contribuindo assim para uma menor queda de tensão.

Entretanto, essa alternativa requer investimentos pesados, tanto em materiais quando em serviços, uma vez que o cabo existente deverá ser retirado para que o outro cabo possa ser instalado. Em muitas situações, é necessária a troca de estruturas e substituição de postes, o que acaba por onerar ainda mais a realização deste tipo de serviço. Soma-se a isto o impacto indesejado de desligamentos programados para execução da obra, os quais podem comprometer os indicadores de continuidade do conjunto, gerando a possibilidade de pagamento de compensações.

3.6 INSTALAÇÃO DE BANCOS REGULADORES DE TENSÃO

O banco regulador de tensão é um equipamento que atua quando há uma variação de tensão fora dos limites especificados em uma rede de distribuição de energia elétrica. Seu objetivo é corrigir a tensão a um determinado nível pré-definido. Sua robustez, eficiência e fácil utilização faz com que este dispositivo seja amplamente utilizado em sistemas de distribuição de energia elétrica nos quais se deseja a regulação da tensão em

regime permanente. Assim sendo, devido a sua importância neste tema e principalmente por motivar este estudo, trataremos deste equipamento de forma especial no próximo capítulo.

3.7 CONCLUSÕES

A otimização dos níveis de tensão de fornecimento em sistemas de distribuição de energia é um processo fundamental para que clientes usufruam de energia de boa qualidade e, ao mesmo tempo, é um grande desafio para as concessionárias de distribuição de energia. Conforme abordado ao longo deste capítulo, existem diversas alternativas para manter a regulação dos níveis de tensão de acordo com os padrões exigidos pelo PRODIST e fornecer uma energia de qualidade a todos os clientes. Cada uma das alternativas apresentadas possui características específicas e devem ser muito bem estudadas antes da execução em campo, pois, dependendo das condições de carregamento, do tipo de cabo utilizado e demais características da rede (tipo e números de clientes, extensão da rede sob análise, se a rede é urbana ou rural, etc.), a opção ideal pode ser a combinação de 2 ou mais alternativas.

4 REGULADORES DE TENSÃO

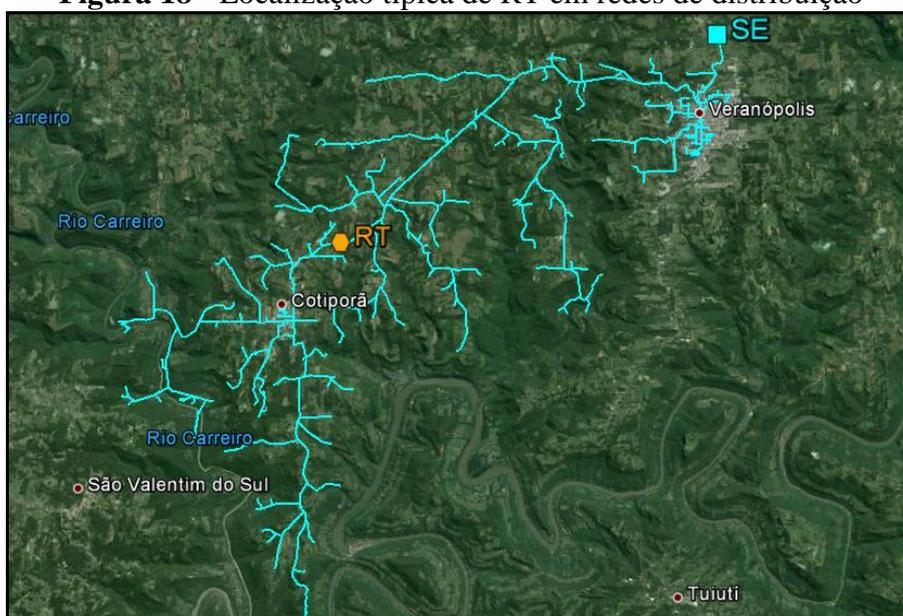
4.1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios das concessionárias de energia elétrica na atualidade é atender os consumidores com níveis de tensão adequados. Neste contexto, a utilização dos reguladores de tensão se torna cada vez mais importante e fundamental para que se garantam os níveis de qualidade de fornecimentos determinados pelo PRODIST.

4.2 UTILIZAÇÃO DOS REGULADORES DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A instalação de RT's se faz necessária nos casos em que os alimentadores atendem regiões com densidade de carga média e situadas a grandes distâncias dos centros de consumo ou da subestação, como pode ser observado na Figura 18. Neste caso, o RT está localizado a 18,6km da subestação, atendendo aproximadamente 79km de rede na tensão de 23,1kV e com 5MVA de carga instalada na região do município de Cotiporã. No total, este RT atende 1314 clientes, em sua maioria, residenciais de características rurais.

Figura 18 - Localização típica de RT em redes de distribuição

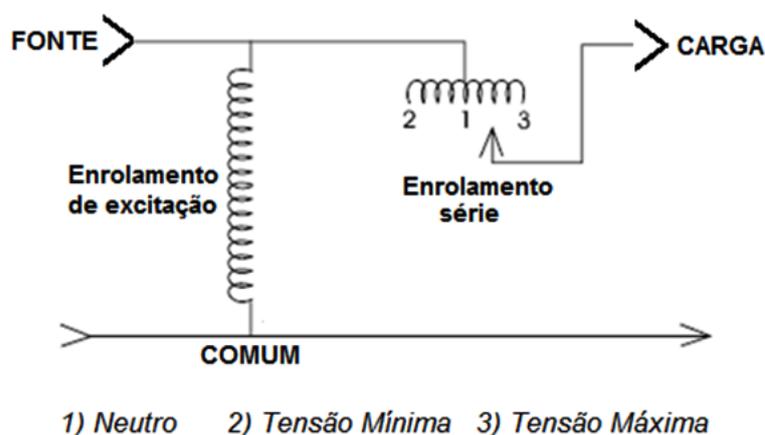


Fonte: Próprio Autor

4.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um RT é um autotransformador, normalmente com 32 posições de tap, podendo operar tanto na configuração de elevar a tensão, como na condição de diminuir a tensão. Fisicamente, é composto por um enrolamento de excitação, ligado em paralelo com a linha, o qual induz no enrolamento série uma tensão que pode ser adicionada ou subtraída do lado da fonte, através da alteração de tap's intermediários, conforme é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Autotransformador e enrolamento série com tap's



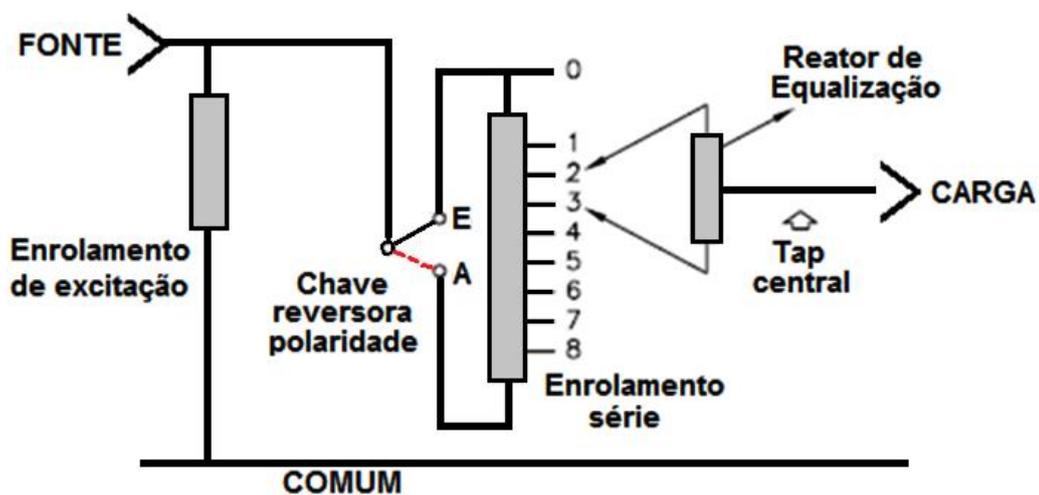
Fonte: Próprio Autor

Normalmente, os equipamentos disponíveis no mercado possuem ajuste automático de tap sob carga e operam em uma faixa de -10% até +10% de ganho, em 32 degraus de tap. Portanto, cada degrau equivale a um acréscimo ou decréscimo de 0,625% na tensão do lado secundário.

A funcionalidade como abaixador ou elevador de tensão é determinada pela polaridade da bobina série. Para isto existe uma chave inversora de polaridade no circuito, que determina a operação do regulador com a função de elevar ou diminuir a tensão. A comutação de tap sob carga é realizada com o auxílio de um reator que tem a finalidade de evitar a interrupção do circuito durante o processo de comutação. Este mecanismo garante a vida útil dos contatos, evitando sobreaquecimento devido à formação de arcos elétricos e

limitando a corrente durante a comutação. A Figura 20 mostra o detalhamento e as partes componentes do sistema de comutador de tap's.

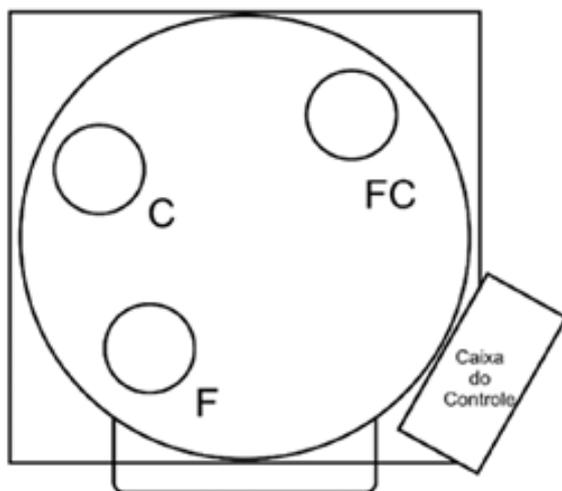
Figura 20 - Detalhes do funcionamento do comutador de tap's



Fonte: Próprio Autor

A Figura 21 e a Tabela 8 mostram como os terminais dos reguladores são identificados conforme a recomendação da ANSI ou ABNT, respectivamente.

Figura 21 - Vista superior dos terminais isoladores do RT



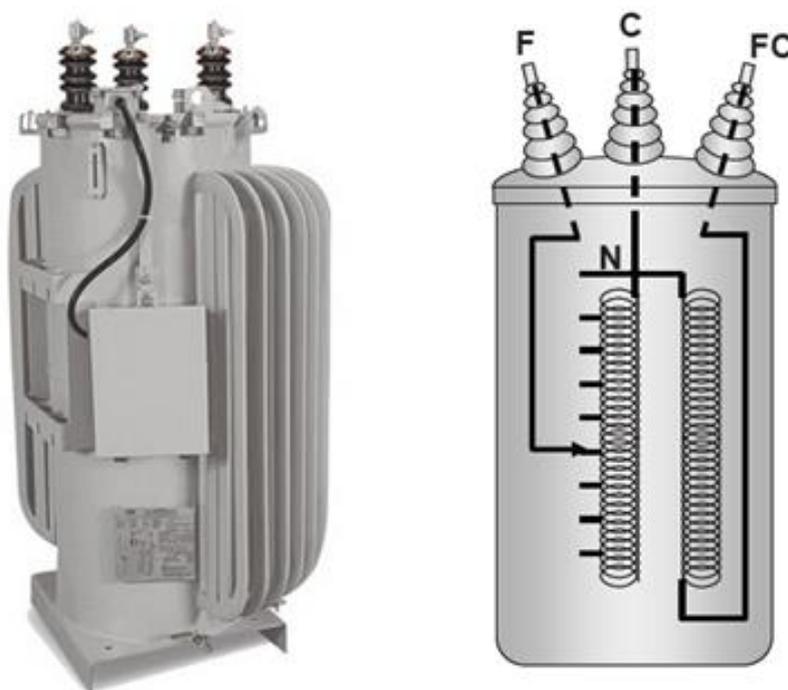
Fonte: (ITB, 2008)

Tabela 8 - Correspondência entre nomenclaturas de buchas ANSI e ABNT

ISOLADORES	NOMENCLATURA	
	ABNT	ANSI
FONTE	"F"	"S"
CARGA	"C"	"L"
NEUTRO	"FC"	"SL"

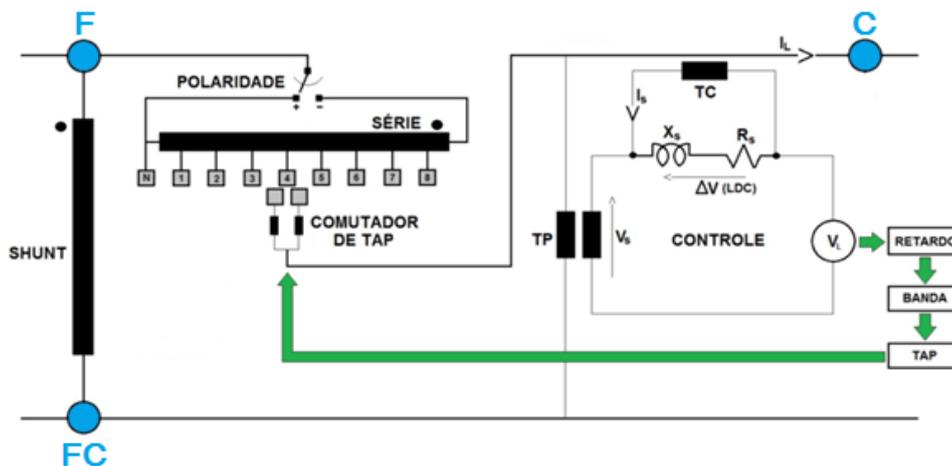
Fonte: (ITB, 2008)

As Figuras 22 e 23 mostram o aspecto físico de um RT convencional e também o circuito de controle presente nos painéis dos RT's, respectivamente.

Figura 22 - Detalhes do comutador de tap

Fonte: Próprio Autor

Figura 23 - Circuito e componentes do regulador de tensão



Fonte: (DE LIMA, 2014)

4.4 PARTES COMPONENTES

De acordo com o princípio de funcionamento, as principais partes que compõem um RT e suas respectivas funcionalidades estão listadas a seguir.

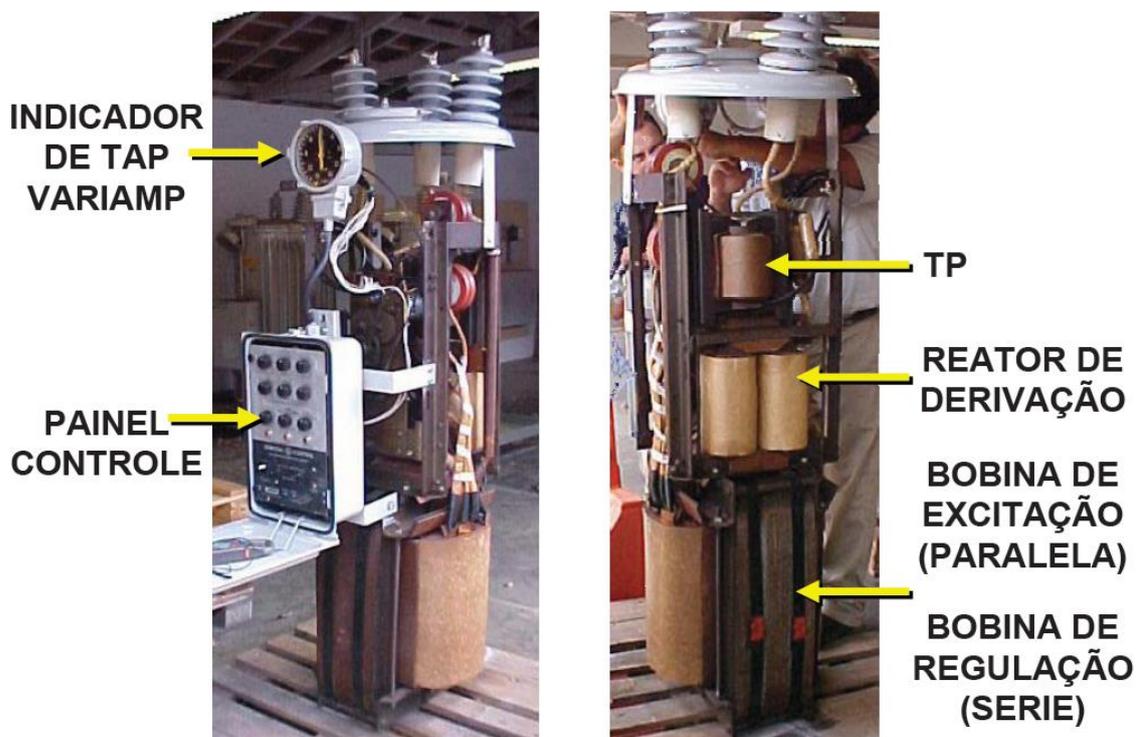
- a) Bobina de Excitação Paralela ou Enrolamento comum: são responsáveis por gerar um fluxo magnético para excitação do enrolamento de regulação e terciários de TP's;
- b) Bobina de Regulação Série ou Enrolamento Série com Derivações: Suportar a corrente passante e receber a excitação do enrolamento de regulação, aumentando ou diminuindo a tensão na saída;
- c) Enrolamento de Regulação: Permitir a variação do número de espiras existentes no circuito através de derivações uniformemente distribuída e consequentemente, regular à tensão de saída;

d) Enrolamento de Equalização: Gerar uma tensão induzida contrária e de valor igual à metade da tensão de degrau, proporcionando uma equalização no desgaste dos contatos fixos e móveis de derivação.

Ressalta-se que a Bobina de Excitação Paralela e a Bobina de Regulação Série formam, basicamente, o autotransformador principal que compõe o RT. Já o Enrolamento de Regulação e o Enrolamento de Equalização, compõem o Autotransformador Preventivo ou Reator de Comutação, cuja finalidade é evitar a interrupção do circuito durante a comutação e limitar a corrente circulante entre duas derivações do enrolamento de regulação.

Além destes, outros componentes fazem parte do RT, como por exemplo, TP's, TC's, chaves, contatos, painéis indicadores, etc. As Figuras 24, 25, 26 e 27, mostram alguns destes componentes.

Figura 24 - Partes componentes do RT



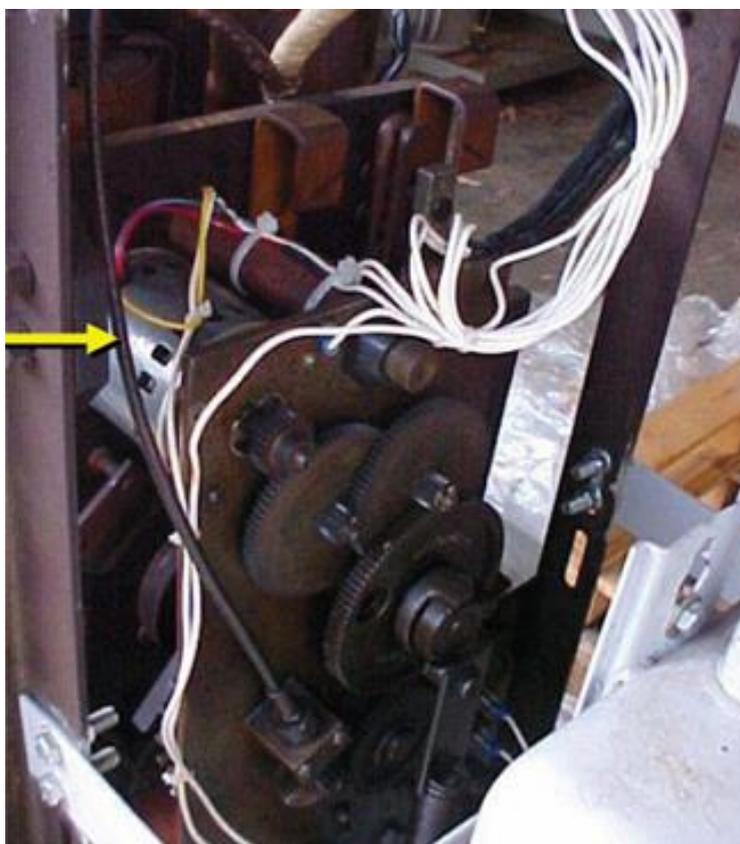
Fonte: Próprio Autor

Figura 25 - Detalhe da chave reversora de polaridade



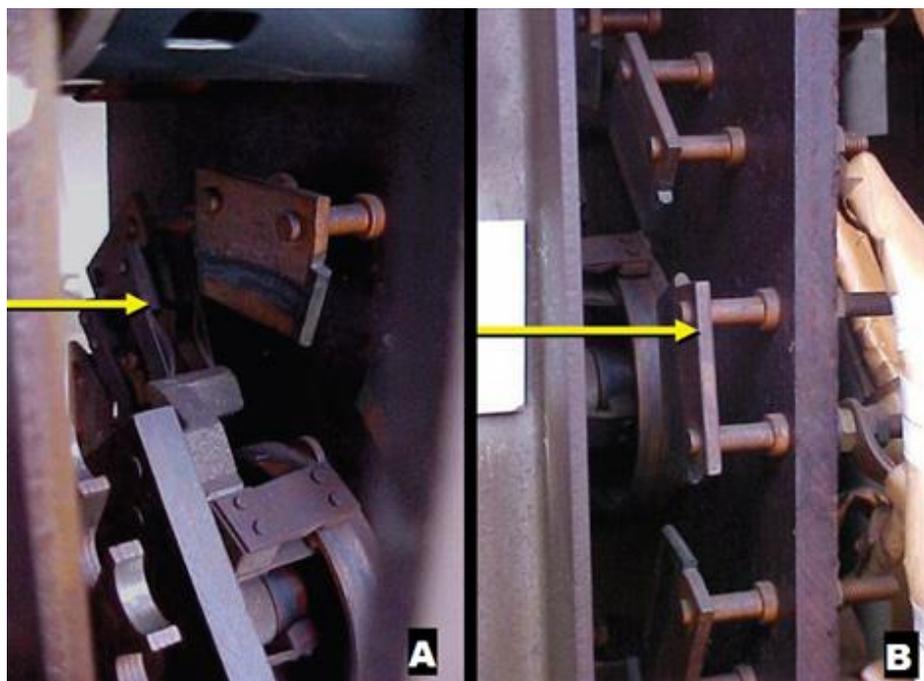
Fonte: Próprio Autor

Figura 26 - Detalhe do motor e mecanismo do comutador de tap's



Fonte: Próprio Autor

Figura 27 - Detalhe do sistema de comutação de tap's do RT

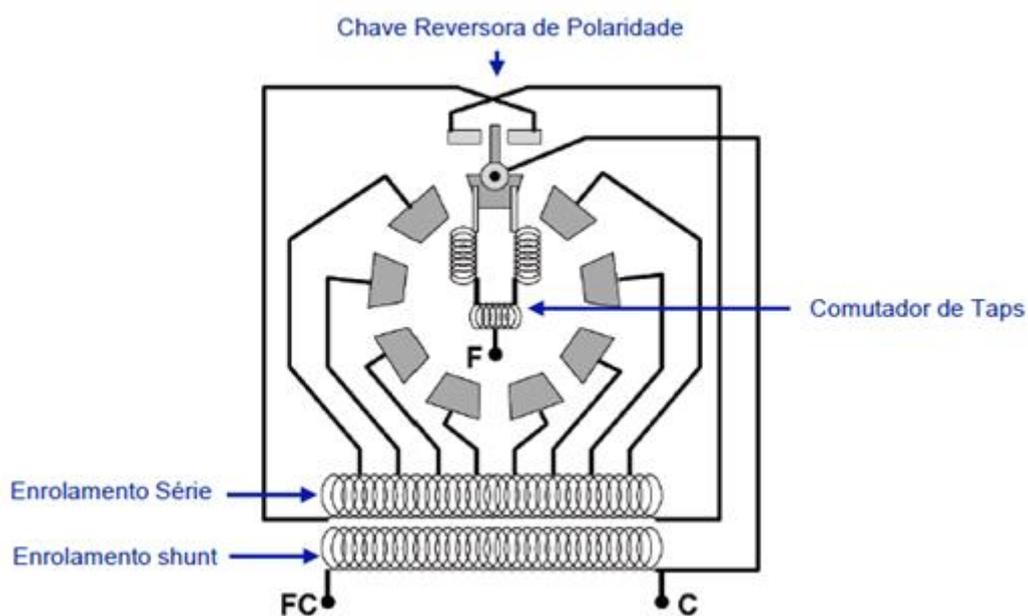


A) Contato móvel do comutador B) Contatos fixos dos terminais dos tap's

Fonte: Próprio Autor

A Figura 28 representa o conjunto chave reversora de polaridade, comutador de tap's, enrolamento série e enrolamento shunt.

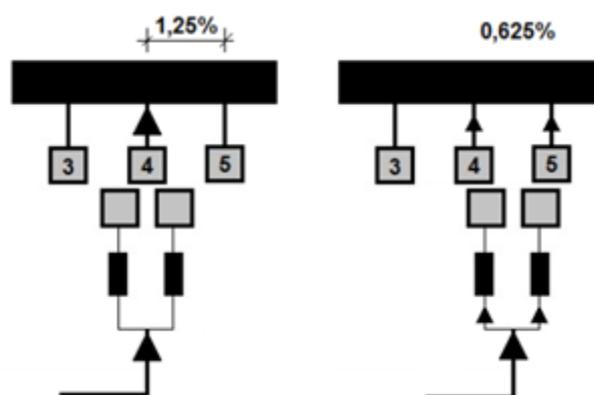
Figura 28 - Elementos do sistema de comutação de tap's



Fonte: Próprio Autor

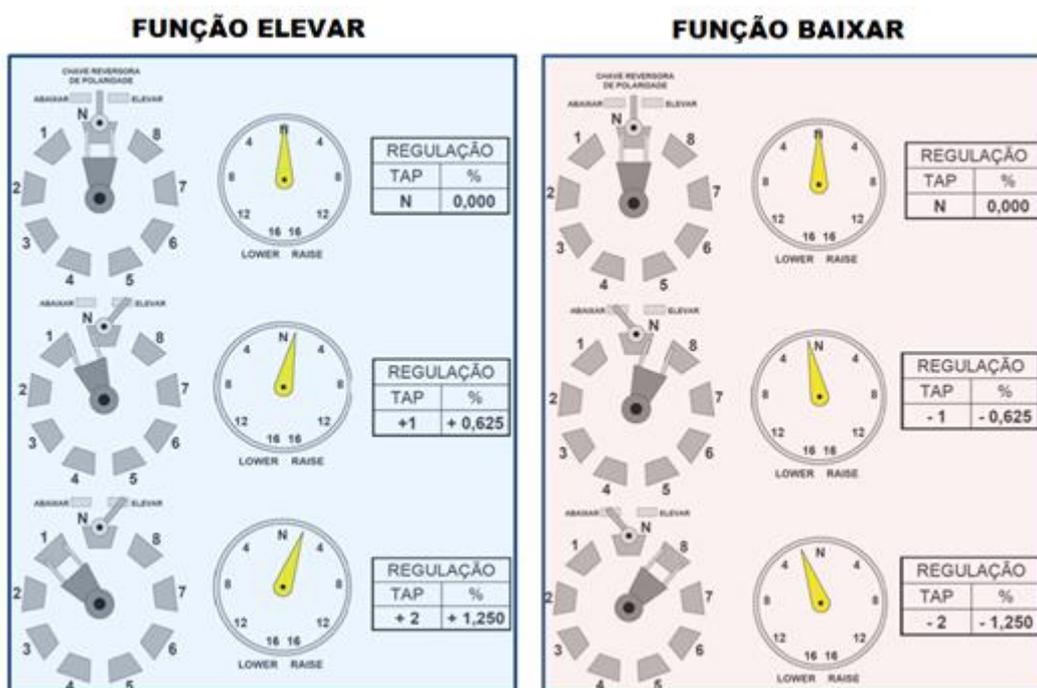
As Figuras 29 e 30 apresentam o funcionamento do mecanismo comutador de tap. Inicialmente na posição “0” e precisando elevar a tensão, o comutador irá mover-se no sentido anti-horário para a função de elevar e no sentido horário para a função de abaixar a tensão. O comutador possui 8 posições, sendo que as trocas de tap acontecem em posições intermediárias, conforme a Figura 29, possibilitando uma regulação com passos de 0,625% a cada troca de tap, como mostrado na Figura 30.

Figura 29 - Incremento de tensão de tap a cada passo



Fonte: Próprio Autor

Figura 30 - Detalhe do mecanismo comutador e tap's correspondentes



Fonte: Próprio Autor

4.5 BANCOS REGULADORES TRIFÁSICOS

A principal forma de instalação de RT's em sistemas de distribuição de energia é sob a forma de banco de reguladores de tensão trifásicos, montados a partir de RT's monofásicos. Nesta configuração, cada regulador possui seu próprio circuito compensador, e as comutações ocorrem de modo independente para cada fase. A escolha da ligação a ser utilizada deve ser feita com base na tensão nominal da rede, por exemplo, um regulador com um TP de relação 14400/120V deve ser ligado em Delta-fechado em uma rede de 13,8kV (tensão de linha), ou em Estrela-Aterrada em uma rede de 23,1kV (tensão de linha) (RESENER, 2008). Geralmente são instalados em plataformas ou diretamente nos postes e em locais que existam boas condições de acesso para eventuais manutenções, inspeções e/ou substituição do equipamento. A Figura 31 mostra um RT instalado em plataforma, forma mais usual de instalação.

Figura 31 - Banco regulador de tensão instalado sob plataforma aérea

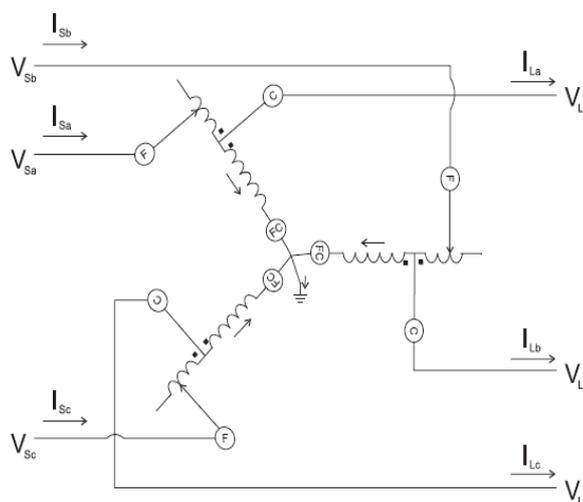


Fonte: Próprio Autor

4.5.1 Reguladores de tensão conectados em Estrela-Aterrada

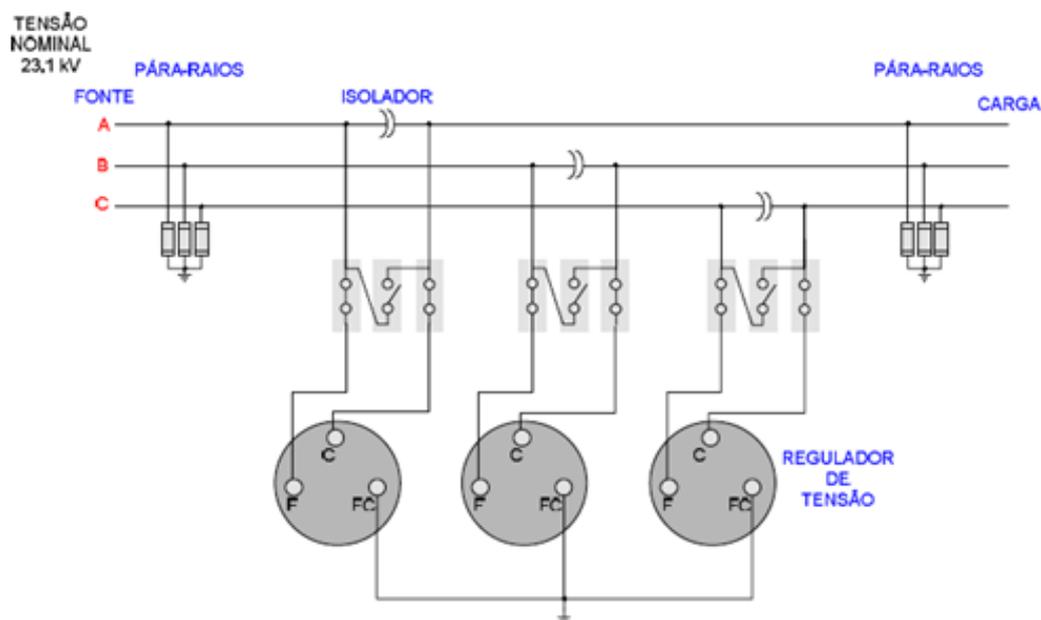
Um banco de reguladores de tensão conectados em Estrela-Aterrada é mostrado nas Figuras 32 e 33. Cada regulador age independentemente, baseado nas condições de carregamento e valores de impedância de cada fase. Neste tipo de ligação, a faixa de regulação chega a $\pm 10\%$ da tensão de fase.

Figura 32 - Arranjo elétrico de RT trifásico conectado em estrela-aterrada



Fonte: Próprio Autor

Figura 33 - Diagrama Esquemático da Ligação Estrela-Aterrada

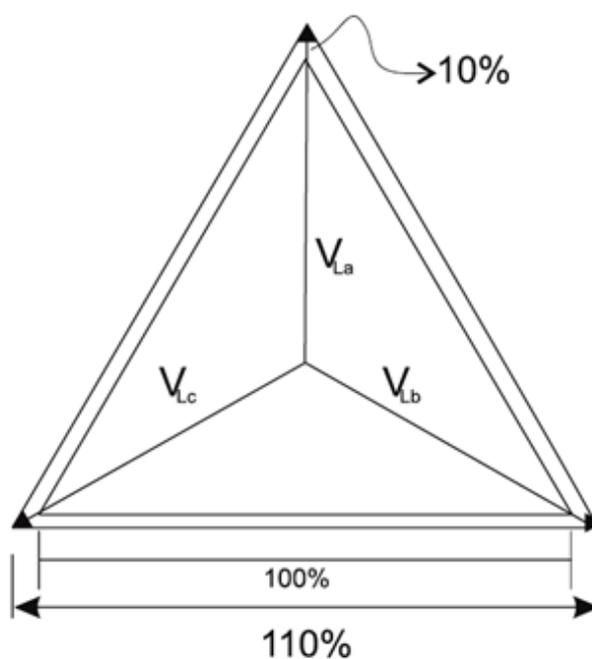


Fonte: Próprio Autor

Recomenda-se que o banco de reguladores conectado em estrela seja instalado em sistemas onde a fonte tenha a mesma ligação, para que a corrente de neutro, devido a possíveis desequilíbrios de carga do banco, tenha caminho fechado para a terra e, portanto, para a fonte (RESENER, 2008).

Neste tipo de conexão o controle do regulador mede a tensão de fase no lado da carga, e o TC mede a corrente de carga total. O diagrama fasorial de tensões, supondo os reguladores elevando em 10% a tensão, é apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Diagrama Fasorial das Tensões Controladas - Conexão Estrela-Aterrada

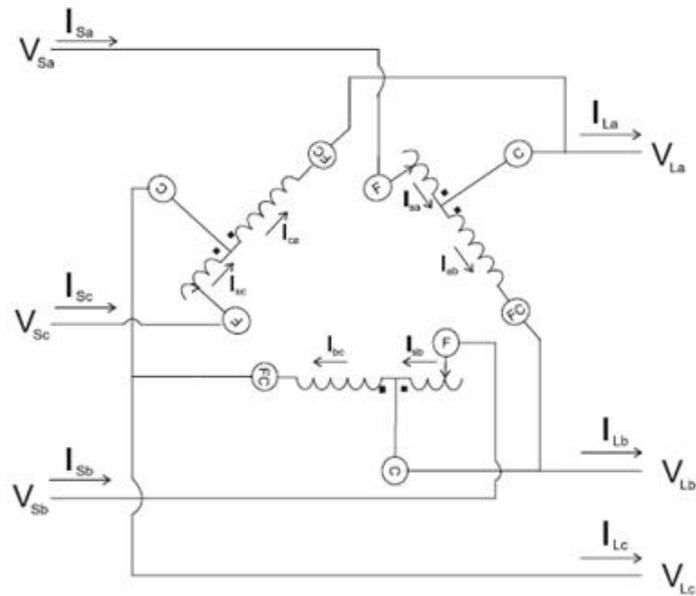


Fonte: Próprio Autor

4.5.2 Reguladores de tensão conectados em Delta-Fechado

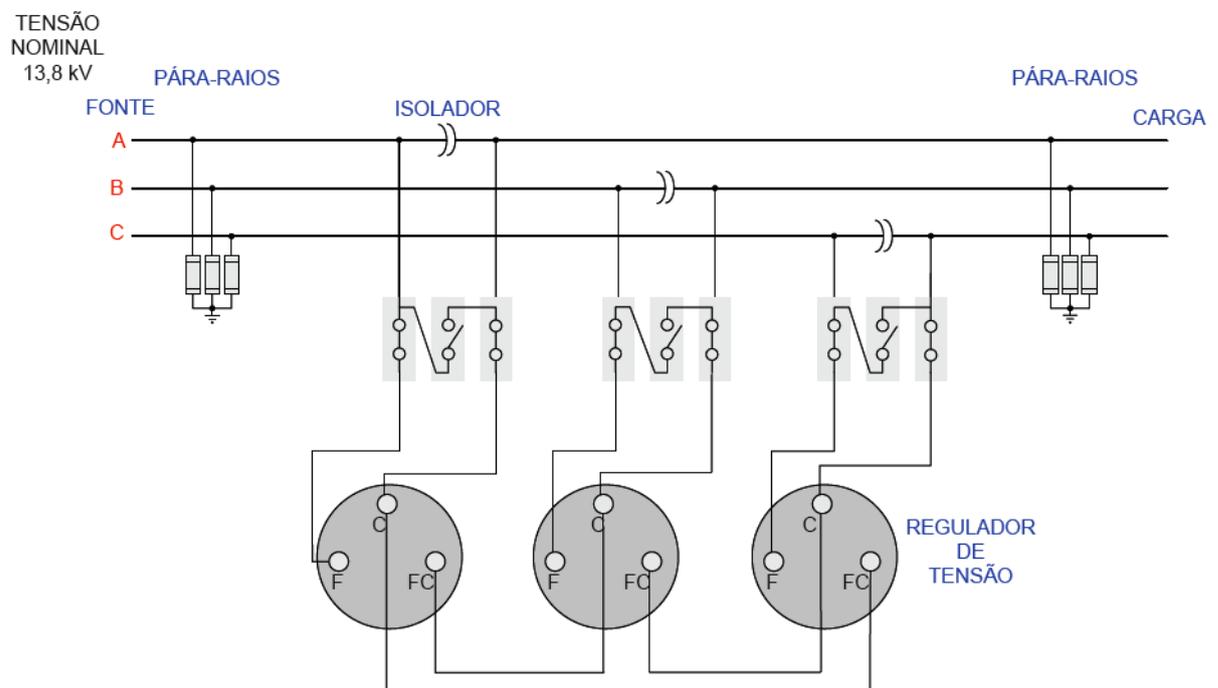
A ligação de reguladores em Delta fechado é apresentada nas Figuras 35 e 36. Nesta ligação, o terminal fonte-carga (*FC*) de um regulador está ligado ao terminal carga (*C*) da unidade adjacente.

Figura 35 - Arranjo elétrico de RT trifásico conectado em Delta-Fechado



Fonte: Próprio Autor

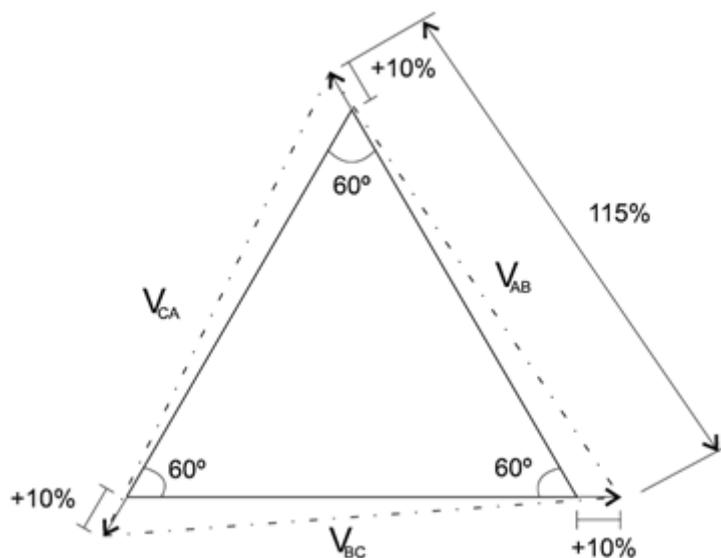
Figura 36 - Diagrama esquemático da ligação Delta-Fechado



Fonte: Próprio Autor

A regulação do banco ligado em Delta fechado é de $\pm 15\%$. O diagrama fasorial das tensões é apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Diagrama fasorial das tensões controladas para a conexão Delta-Fechado



Fonte: Próprio Autor

Para esta configuração, a corrente que circula pelo TC não é a corrente total da carga, uma vez que a corrente adicional vinda do regulador adjacente não passa pelo TC. O erro na medida da corrente é de aproximadamente 5,3% quando o regulador está operando com seu máximo ganho.

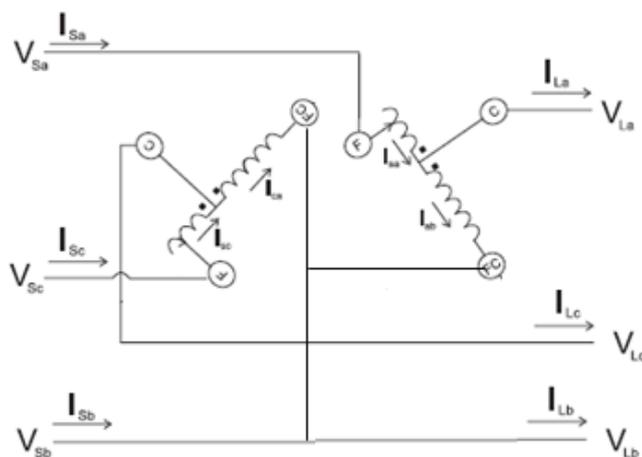
No caso da ligação Delta, deve-se atentar para os ajustes do compensador de queda na linha, pois os TP's monitoram as tensões de linha. No caso de um fator de potência unitário da carga, a corrente lida pelo TC estará 30° defasada em relação à tensão de linha (RESENER, 2008). A direção da defasagem depende das conexões dos reguladores, ou seja, depende da polaridade das bobinas. No caso da ligação Delta-Fechado, as relações de fase para os três reguladores do banco serão as mesmas, ou seja, ou todos estarão em atraso ou avanço de fase. Se os reguladores estiverem ligados em avanço de fase, a corrente está 30° adiantada em relação à tensão. Logo, deve-se subtrair 30° dos ajustes do compensador.

4.5.3 Reguladores de tensão conectados em Delta-Aberto

A conexão em Delta-Aberto utiliza apenas 2 reguladores monofásicos. Esse tipo de conexão é normalmente aplicado em alimentadores com 3 condutores ligados em Delta.

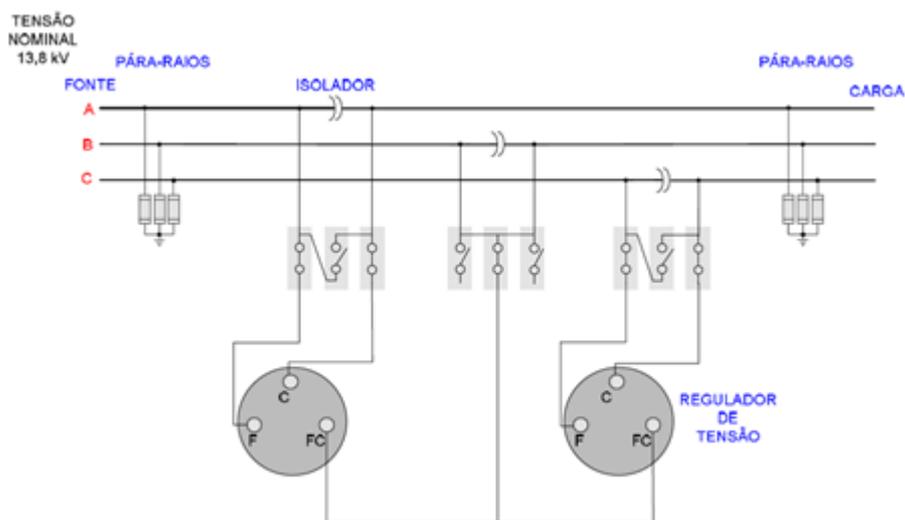
Nota-se que os TP's monitoram as tensões de linha e os TC's as correntes de linha. A Figura 38 mostra os reguladores conectados entre as fases AB e CB, enquanto que a Figura 39 apresenta o diagrama esquemático para a ligação Delta-Aberto.

Figura 38 - Arranjo elétrico de RT trifásico conectado em Delta-Aberto



Fonte: Próprio Autor

Figura 39 - Arranjo elétrico de RT trifásico conectado em Delta-Aberto

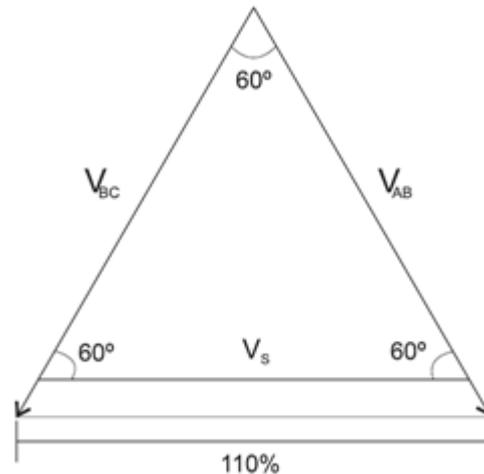


Fonte: Próprio Autor

A regulação do banco ligado em Delta-Aberto é de $\pm 10\%$. O diagrama fasorial é apresentado na Figura 40. Na ligação em Delta-Aberto, um dos reguladores está conectado em atraso e o outro em avanço de fase. Para o ajuste dos compensadores é necessário que

seja considerada essa defasagem, da mesma maneira como feito na conexão em Delta-Fechado.

Figura 40 - Diagrama fasorial das tensões controladas para a conexão Delta Aberto

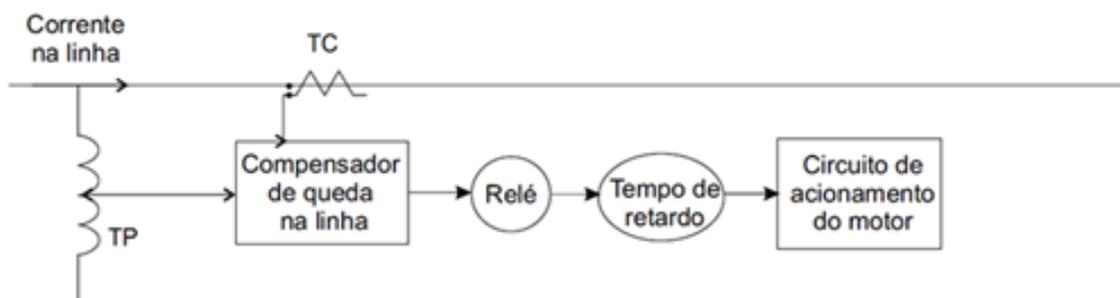


Fonte: Próprio Autor

4.6 SISTEMAS DE CONTROLE

O sistema de controle das comutações de RT's por degraus é feito através do circuito representado pela Figura 41.

Figura 41 - Circuito de Controle Convencional de um RT



Fonte: Próprio Autor

A partir de agora serão apresentados os principais ajustes disponíveis em um RT.

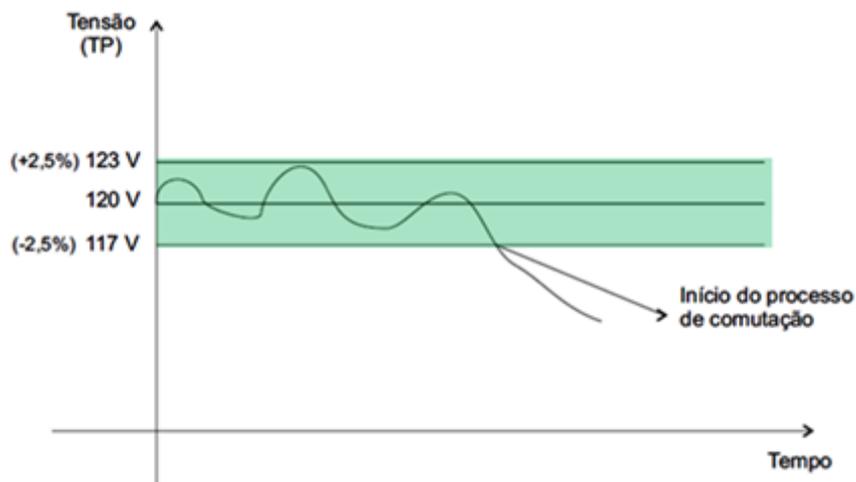
4.6.1 Tensão de referência

O RT possui um relé regulador de tensão, que percebe o momento para aumentar ou diminuir a tensão de alimentação. Quem irá produzir esta condição para o relé atuar ou não é o transformador de Potencial – TP, instalado no lado da carga e fornecendo uma amostra da tensão medida no ponto de instalação do RT, do lado da carga. Normalmente, o valor da tensão no secundário do TP é 120 V e o sensor do relé regulador tem a finalidade de comparar a tensão fornecida pelo TP com a tensão de referência ajustada. Hipoteticamente, admitindo-se que a referência seja 120 V, se houver uma alteração, para mais ou para menos, da tensão fornecida pelo TP, o relé comandará o comutador de forma a ajustar a tensão no lado da carga até que se tenha novamente 120 V no secundário do TP, e conseqüentemente tensão nominal no lado da carga.

Alguns fabricantes fornecem o regulador com possibilidade de funcionamento em tensões diferentes da nominal, bastando para isso modificar ligações no controle ou atuar em chaves específicas, entre outros (RESENER, 2008).

4.6.2 Insensibilidade (Largura de Faixa)

O ajuste da insensibilidade, ou largura de faixa como também é conhecida, determina uma faixa de tolerância para a tensão de referência, ou seja, se a tensão que está sendo medida pelo TP estiver dentro da faixa de referência do ajuste e considerando o valor da insensibilidade, para mais ou para menos, o RT não altera o seu tap. A Figura 42 mostra a medição no RT em que a tensão de saída violou a tensão referência + o valor da insensibilidade, que neste caso estava ajustada em 2,5% para mais ou para menos, iniciando assim o processo de comutação do tap.

Figura 42 - Faixa de Insensibilidade

Fonte: Próprio Autor

Nota-se que o ajuste da insensibilidade é muito importante para termos a correta operação dos RT's. Um valor de ajuste muito pequeno proporcionará ganho na correção dos níveis de tensão, entretanto, provocará um aumento no número de comutações do RT, acelerando o desgaste mecânico deste componente e diminuindo a vida útil do equipamento, pois pequenas variações já são suficientes para iniciar a temporização/comutação do tap.

4.6.3 Temporização

A temporização deve ser ajustada com um tempo de resposta tal que, para qualquer sobretensão transitória e de curta duração não ocasione comutações no RT, mas também deve ser suficientemente rápida para que, em caso de subtensões, os clientes não fiquem expostos por muito tempo a esta condição, evitando assim falhas e mau funcionamento de aparelhos e reclamações de consumidores. Deseja-se que a mudança de tap somente ocorra para variações de tensão que estejam fora dos valores ajustados pela tensão de referência mais a largura de faixa e por período maior que o determinado neste ajuste de temporização.

Para este parâmetro, pode-se selecionar entre dois tipos de temporização:

a) Linear: onde o tempo para se iniciar uma operação do comutador sob carga, após a detecção de um desvio de tensão maior que a insensibilidade, é sempre igual ao valor ajustado no parâmetro insensibilidade.

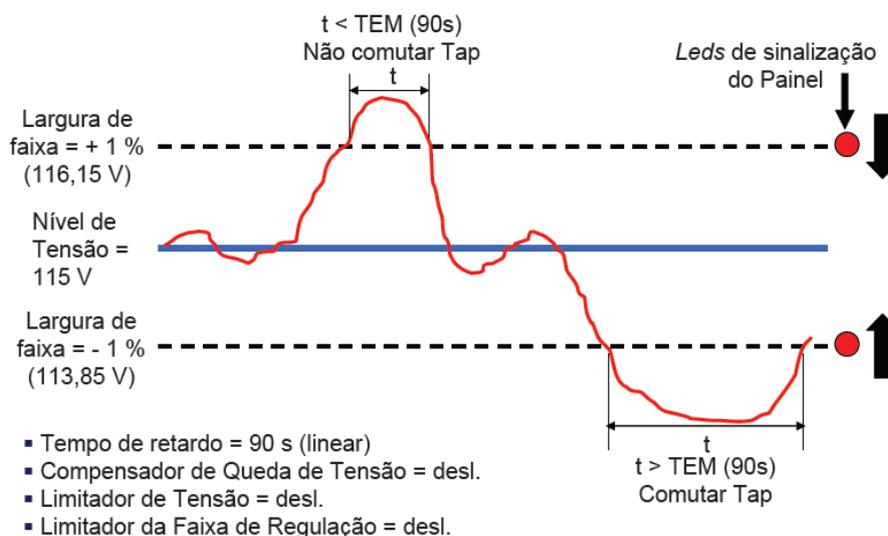
b) Inversa: O tempo para se iniciar uma operação do comutador sob carga varia de forma inversamente proporcional ao desvio da tensão medida em relação à tensão nominal, ou seja, quanto maior a diferença entre a tensão medida e a tensão de referência, menor será o tempo para operação do comutador sob carga. É utilizada para uma regulação de tensão mais rápida em caso de grandes desvios da tensão.

Normalmente os RT's possuem Temporização ajustável em uma faixa contínua que varia de 30 a 90 segundos, sendo que, tipicamente, usa-se 30 segundos de Temporização para reguladores que não estejam em série (SZUVOVIVSKI, 2008).

No caso de vários reguladores em série ao longo do alimentador, ajustes na temporização são importantes para coordenar a operação dos equipamentos. Quanto mais distante da fonte estiver o regulador, maior deve ser o seu ajuste de atraso de tempo. Tal regra se justifica pelo fato de que mudanças de tap nos reguladores mais distantes podem não serem vistas pelos reguladores a montante, entretanto, as comutações no regulador mais próximo da fonte afetam todos os reguladores à jusante deste. Desta forma, o regulador mais próximo à fonte deve responder mais rápido às variações de tensão para se evitar um número de operações excessivas dos demais reguladores. Normalmente, o RT mais próximo da fonte tem a temporização ajustada em 30s e os demais em 45s, em incrementos de 15s para cada banco em cascata.

A Figura 43 propõem ajustes para o funcionamento combinado dos controles de insensibilidade e temporização.

Figura 43 - Proposta de ajustes para ação combinada de insensibilidade e temporização



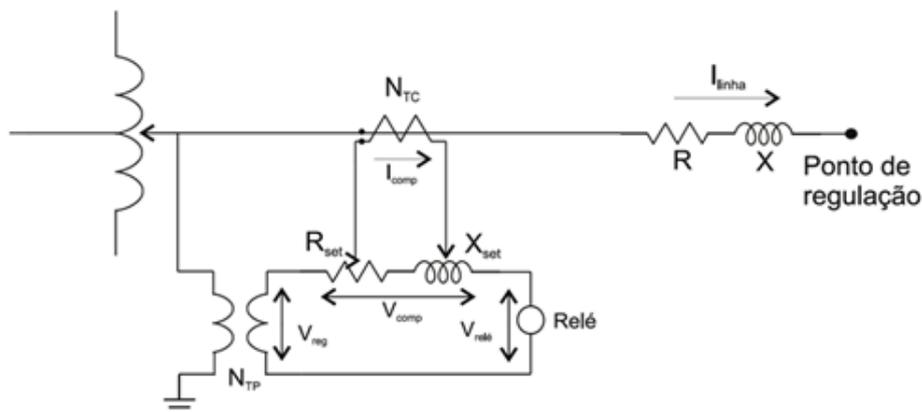
Fonte: (DE LIMA, 2014)

4.6.4 Compensador de Queda de Linha - LDC

A compensação de queda na linha, ou *Line Drop Compensation - LDC* é um ajuste que simula a impedância da linha desde o RT até o ponto onde se deseja que a tensão seja regulada. Através de um circuito eletrônico, uma imagem da queda de tensão é inserida no circuito de controle. A partir do sinal de corrente captado pelo TC, as quedas de tensão existentes na linha são simuladas por meio de um modelo interno da impedância da rede de distribuição, cujos parâmetros são inseridos manualmente. Desta forma, ao compensar o nível de tensão através do sinal fornecido pelo TP o regulador impõe, através do controle de tap, a tensão de referência em um ponto remoto.

Como as cargas em um sistema de distribuição podem ser concentradas e/ou distribuídas ao longo do alimentador, a resistência (R_{Set}) e a reatância (X_{Set}) são escolhidos de forma que o máximo ganho de tensão do regulador seja obtido durante o período de carga máxima e uma dada tensão seja mantida durante carregamento leve (RESENER, 2008). A Figura 44 mostra o circuito equivalente compensador de queda de tensão na linha.

Figura 44 - Circuito equivalente do compensador de queda de tensão na linha (LDC)



Fonte: Próprio Autor

Os principais métodos para ajuste da impedância do Compensador de queda de tensão são:

- a) Método centro de carga: os ajustes são feitos para regular a tensão em um determinado ponto à jusante do regulador;
- b) Método faixa de tensão: os ajustes de R e X da impedância equivalente são escolhidos de forma que a tensão seja mantida dentro de uma faixa pré-determinada, entre carga leve e carga pesada.

A maioria dos reguladores em operação nas diversas concessionárias brasileiras é ajustada sem considerar o compensador de queda de linha. Esta situação deve-se ao fato de que este modo de parametrização é a maneira mais fácil e menos suscetível a erros, mas por outro lado, pode não utilizar toda a capacidade do equipamento. Por exemplo, se somente utilizarmos o ajuste de tensão de referência em 120V para um determinado regulador, é provável que seja necessário instalar mais reguladores para corrigir o perfil de tensão ao longo do alimentador. Ajustando-se para uma tensão de referência maior, por exemplo, 126V, reduz-se o número de reguladores necessários, mas é provável que se tenha tensões muito elevadas durante o período de carga leve. Utilizando-se os ajustes do compensador de queda de linha, pode-se aumentar ao máximo a tensão somente durante o período de

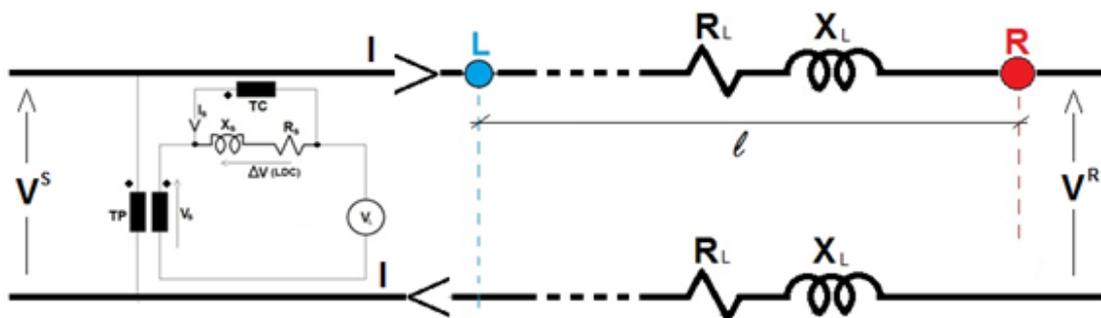
carga máxima, resultando num menor número de comutação e obtendo-se variações menores de tensão nos consumidores durante o dia.

O ajuste do compensador de queda de linha depende do tipo de sistema elétrico e da forma de conexão dos reguladores e variam se o regulador estiver instalado em um sistema monofásico, monofásico aterrado, se a conexão for Estrela-Aterrada, Delta-fechado ou Delta-Aberto em sistemas trifásicos.

4.6.4.1 Ajuste do LDC em sistema Monofásico

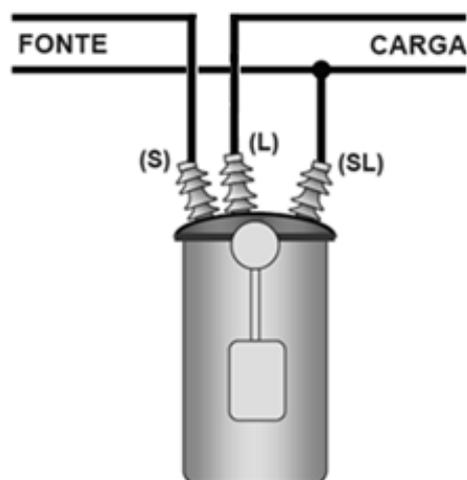
As Figuras 45 e 46 mostram o circuito equivalente e a conexão física dos RT's instalados no sistema monofásico, respectivamente.

Figura 45 - Circuito equivalente do LDC em sistemas monofásicos



Fonte: Próprio Autor

Figura 46 - Conexão física do RT monofásico



Fonte: Próprio Autor

Para cada seguimento de linha tem-se;

$$V_s - V_L = I_s(R_s + jX_s) \quad (9)$$

$$RTC = \frac{I}{I_s} \quad (10)$$

$$RTP = \frac{V^S}{V_s} \quad (11)$$

Refletindo para o circuito de controle;

$$V^S - V^R = \frac{RTP}{RTC} (R_s + jX_s) . I \quad (12)$$

$$RTP(V_s - V_L) = \frac{RTP}{RTC} (R_s + jX_s) . I \quad (13)$$

Os ajustes das resistências e reatâncias no circuito de controle, incluindo-se o efeito do condutor de retorno, são dados por:

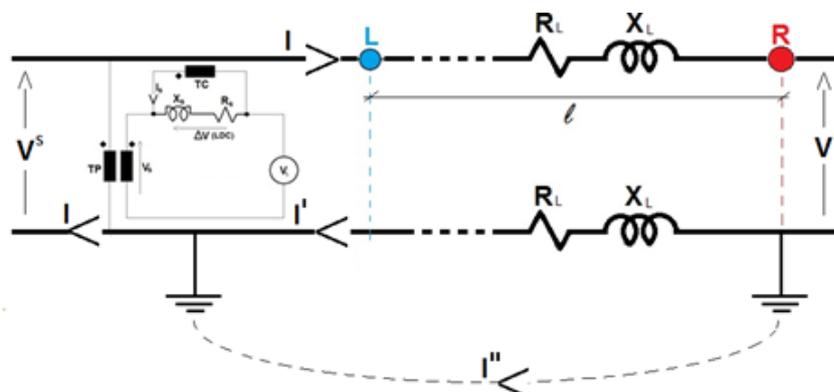
$$X_s = 2.l.x_l \cdot \frac{RTC}{RTP} \quad (14)$$

$$R_s = 2.l.r_l \cdot \frac{RTC}{RTP} \quad (15)$$

4.6.4.2 Ajuste do LDC em sistema Monofásico Aterrado

A Figura 47 apresenta o circuito equivalente e dos RT's instalados no sistema monofásico aterrado.

Figura 47 - Circuito equivalente do LDC em sistema monofásico aterrado



Fonte: Próprio Autor

A representação de cada seguimento de linha no circuito de controle é dada por:

$$V^S - V^R = \frac{RTP}{RTC} (R_s + jX_s) \cdot I \quad (16)$$

Considerando-se o efeito do aterramento;

$$V^S - V^R = 1,67 \cdot l \cdot (r_l + jx_l) \quad (17)$$

Portanto, nestas condições os ajustes de resistência e reatância equivalente da linha são dados por;

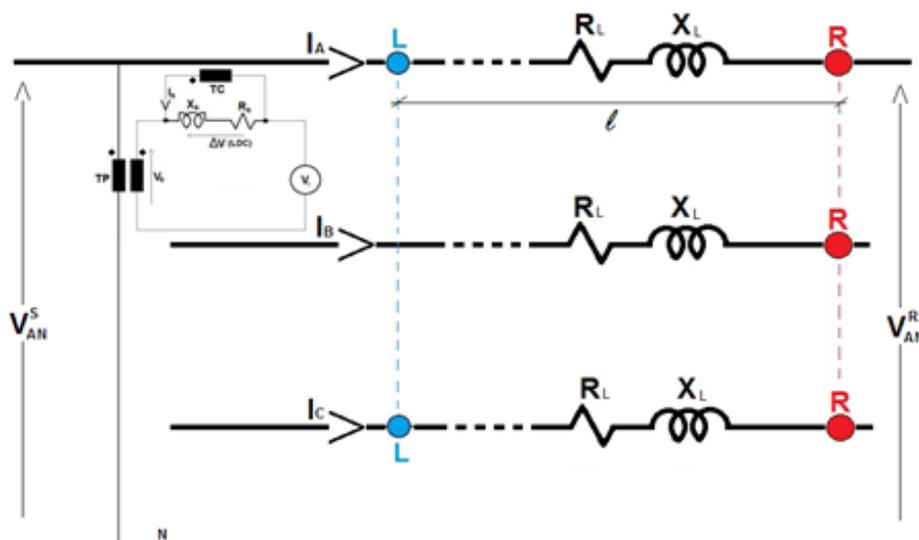
$$X_s = 1,67 \cdot l \cdot x_l \cdot \frac{RTC}{RTP} \quad (18)$$

$$R_s = 1,67 \cdot l \cdot r_l \cdot \frac{RTC}{RTP} \quad (19)$$

4.6.4.3 Ajuste do LDC em sistema trifásico - conexão Estrela-Aterrada

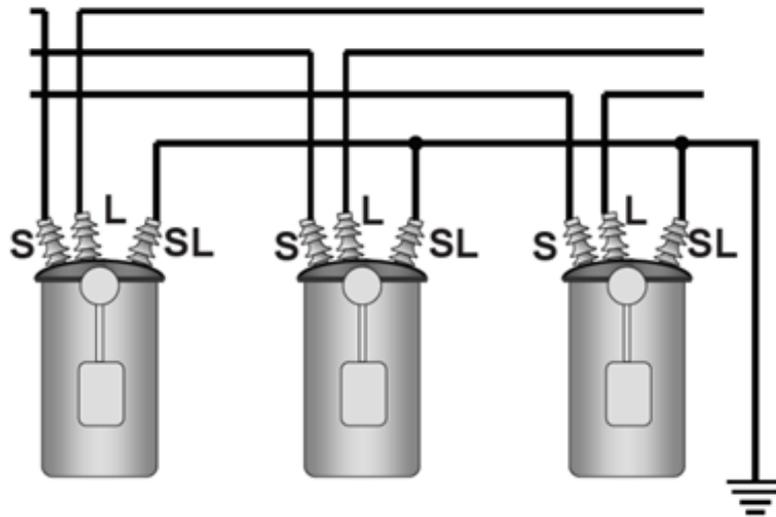
As Figuras 48 e 49 mostram o circuito equivalente e a conexão física dos RT's monofásicos instalados em um sistema trifásico e conectados em Estrela-Aterrada.

Figura 48 - Circuito equivalente do LDC para sistemas trifásicos com RT's conectados em estrela-aterrada



Fonte: Próprio Autor

Figura 49 - Conexão física do RT conectado em estrela-aterrada



Fonte: Próprio Autor

Para instalações trifásicas com reguladores conectados em estrela-aterrada, os circuitos podem ser tratados individualmente por fase. Nestas condições, para a fase A no circuito de controle tem-se;

$$V_{AN}^S - V_{AN}^R = \frac{RTP}{RTC} (R_s + jX_s) . I_A \quad (20)$$

Em função da resistência e reatância por unidade de comprimento da linha, tem-se;

$$V_{AN}^S - V_{AN}^R = I . \ell . (r_\ell + jx_\ell) \quad (21)$$

Portanto, os respectivos ajustes no circuito de controle são dados, por;

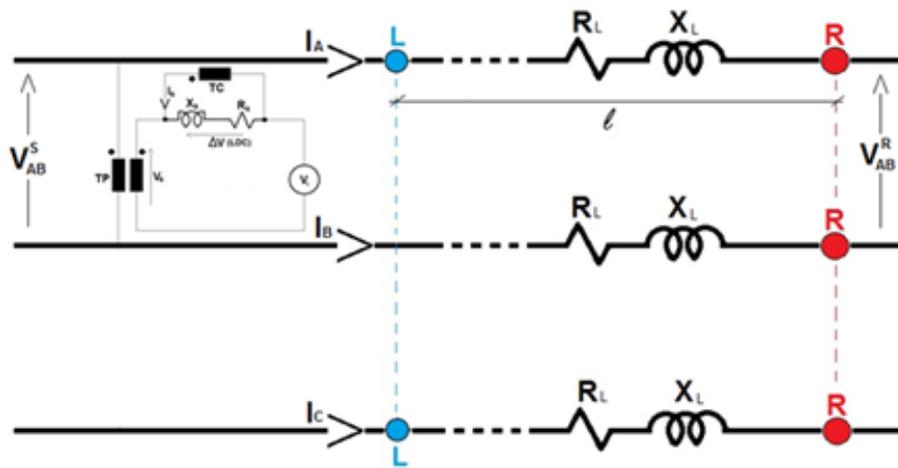
$$R_s = \ell . r_\ell . \frac{RTC}{RTP} \quad (22)$$

$$X_s = \ell . x_\ell . \frac{RTC}{RTP} \quad (23)$$

4.6.4.4 Ajuste do LDC em sistema trifásico - conexão Delta-Fechado

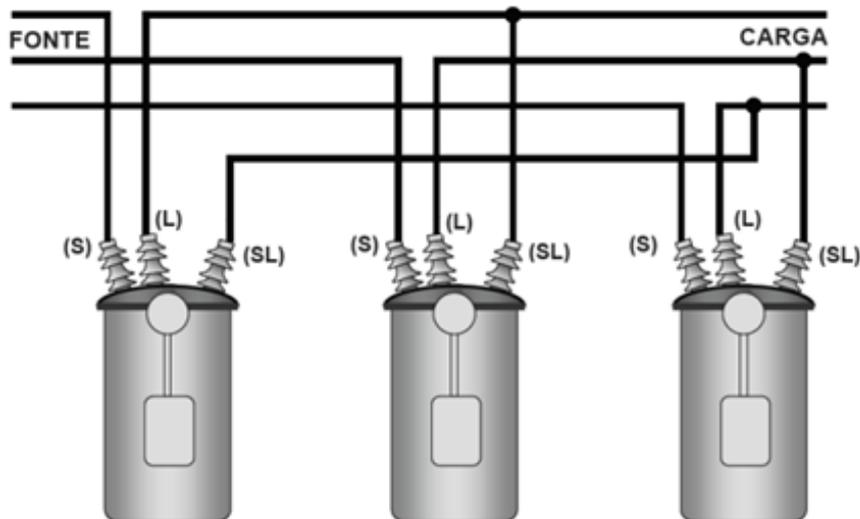
As Figuras 50 e 51 mostram o circuito equivalente e a conexão física dos RT's monofásicos instalados em um sistema trifásico e conectados em Delta-Fechado.

Figura 50 - Circuito equivalente do LDC para sistemas trifásicos com RT's conectados em Delta-Fechado



Fonte: Próprio Autor

Figura 51 - Conexão física dos RT's conectados em Delta-Fechado



Fonte: Próprio Autor

Para reguladores conectados em Delta-Fechado é necessário considerar os ângulos de defasagem entre as tensões e correntes. Nestas condições, para o circuito principal, tem-se;

$$V_{AB}^S - V_{AB}^R = I_A \cdot l \cdot (r_l + jx_l) - I_B \cdot l \cdot (r_l + jx_l) = \sqrt{3} I_A \angle 30^\circ \cdot l \cdot (r_l + jx_l) \quad (24)$$

Ou seja;

$$V_{AB}^S - V_{AB}^R = \sqrt{3}I_A(0,866 + j0,5).(r_l + jx_l).\ell \quad (25)$$

Refletindo-se os valores obtidos para o circuito de controle, obtêm-se os parâmetros de ajuste, ou seja, a resistência e reatância equivalentes.

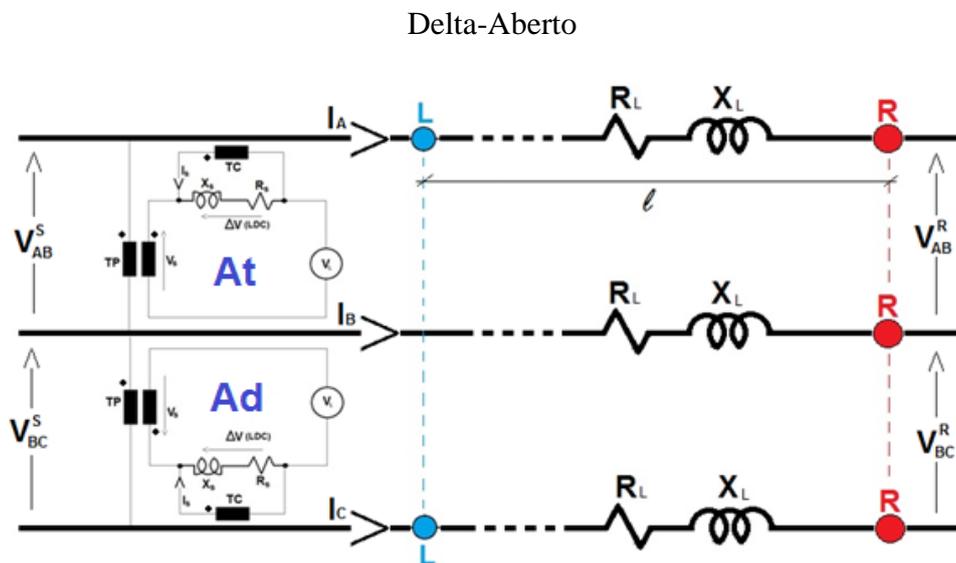
$$R_s = \sqrt{3}.\ell.\frac{RTC}{RTP}(0,866r_l - 0,5x_l) \quad (26)$$

$$X_s = \sqrt{3}.\ell.\frac{RTC}{RTP}(0,5r_l + 0,866x_l) \quad (27)$$

4.6.4.5 Ajuste do LDC em sistema trifásico - conexão Delta-Aberto

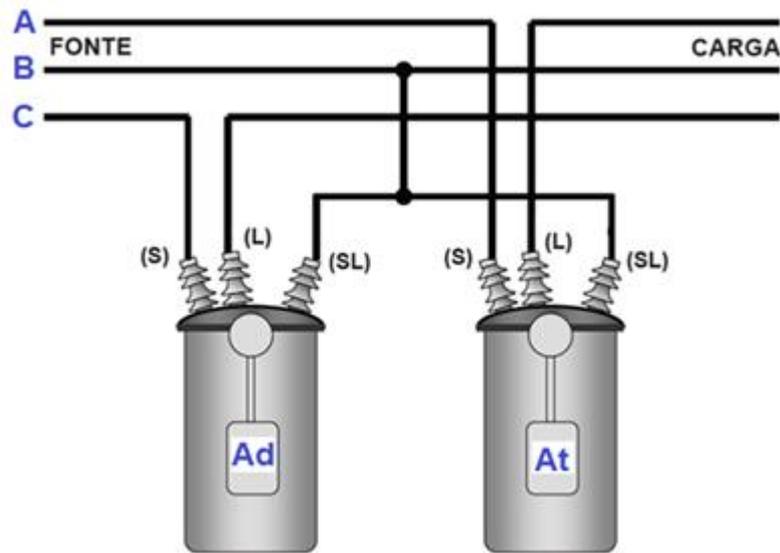
As Figuras 52 e 53 mostram o circuito equivalente e a conexão física dos RT's monofásicos instalados em um sistema trifásico e conectados em Delta-Aberto.

Figura 52 - Circuito equivalente do LDC para sistemas trifásicos com RT's conectados em



Fonte: Próprio Autor

Figura 53 - Conexão física dos RT's conectados em Delta-Aberto



Fonte: Próprio Autor

Para os reguladores instalados em Delta-Aberto, consideram-se também os efeitos das conexões dos TP's e TC's. Para tanto, é necessário identificar os reguladores com corrente adiantada e atrasada, respectivamente.

Para o regulador Atrasado (At), tem-se:

$$V_{AB}^S - V_{AB}^R = \frac{RTP}{RTC} (R_s + jX_s) . I_A \quad (28)$$

$$V_{AB}^S - V_{AB}^R = I_A . \ell . (r_\ell + jx_\ell) - I_B . \ell . (r_\ell + jx_\ell) = \sqrt{3} I_A \angle 30^\circ . \ell . (r_\ell + jx_\ell) \quad (29)$$

Para este caso, os ajustes são dados por;

$$R_s = \sqrt{3} . \ell . \frac{RTC}{RTP} (0,866r_\ell - 0,5x_\ell) \quad (30)$$

$$X_s = \sqrt{3} . \ell . \frac{RTC}{RTP} (0,5r_\ell + 0,866x_\ell) \quad (31)$$

Para o regulador Adiantado (Ad), tem-se:

$$V_{BC}^S - V_{BC}^R = -\frac{RTP}{RTC} (R_s + jX_s) . I_C \quad (32)$$

$$V_{BC}^S - V_{BC}^R = I_B . \ell . (r_\ell + jx_\ell) - I_C . \ell . (r_\ell + jx_\ell) = \sqrt{3} I_C \angle 150^\circ . \ell . (r_\ell + jx_\ell) \quad (33)$$

A resistência e reatância de ajuste para o compensador de queda de linha na conexão Delta-Aberto são, portanto, definidas por:

$$R_s = \sqrt{3} \cdot l \cdot \frac{RTC}{RTP} (0,866r_l + 0,5x_l) \quad (34)$$

$$X_s = \sqrt{3} \cdot l \cdot \frac{RTC}{RTP} (-0,5r_l + 0,866x_l) \quad (35)$$

4.6.5 Limitador de tensão

Quando se utiliza o compensador de queda de tensão, as cargas imediatamente após o regulador de tensão podem ser submetidas a tensões inadequadas. Para evitar a ocorrência de sobretensões é possível acionar a atuação de um limitador de tensão, que restringe o nível de tensão máxima a ser imposta na saída do regulador de forma a não comprometer os consumidores próximos à instalação do RT.

4.6.6 Detector de fluxo inverso

A maioria dos reguladores de tensão são bidirecionais e podem regular em qualquer direção de fluxo de potência. Um regulador bidirecional mede a tensão no lado fonte utilizando outro TP ou estima a tensão através da corrente. Se o RT detectar fluxo de potência inverso, ele passa automaticamente a regular o lado fonte (RESENER, 2008).

Sem o detector de fluxo inverso de potência, o regulador terá um comportamento inadequado, podendo causar sobretensões ou subtensões no circuito ligado ao terminal fonte do regulador. Para prevenir tais efeitos, o regulador possui um detector de fluxo inverso de potência, capaz de identificar a inversão do fluxo e reconfigurar o funcionamento do regulador, de acordo com os seguintes procedimentos:

- a) Inversão no sentido de rotação do motor do comutador sob carga;
- b) Conexão do relé regulador ao TP instalado no lado da fonte do regulador ou utilizar os sinais do TC para simular a tensão no lado da fonte;
- c) Inversão da polaridade do compensador de queda de tensão.

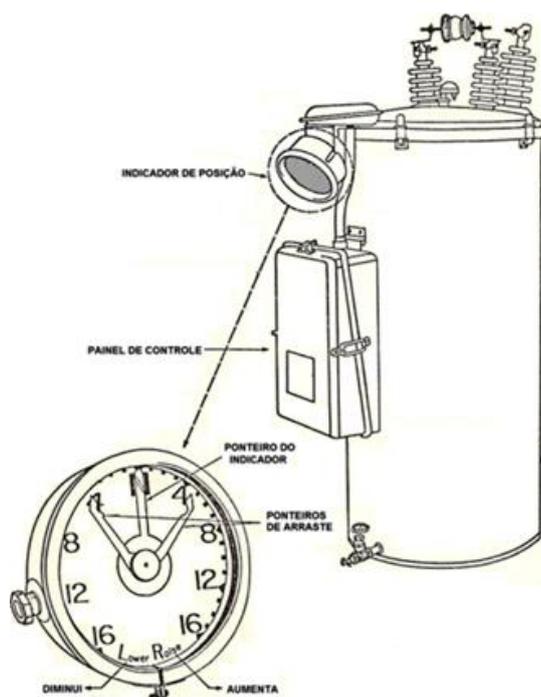
4.7 CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE

Como toda a energia dissipada em um RT está concentrada na bobina série, esta é tomada como referência no dimensionamento do sistema de refrigeração do regulador para uso a plena carga e a plena regulação. Desta forma, se for reduzida a faixa de regulação, é possível aumentar a capacidade de corrente de linha (RESENER, 2008).

A faixa de regulação máxima normalizada é de $\pm 10\%$, porém existem no regulador ajustes capazes de limitar esta faixa nos seguintes pontos: $\pm 10\%$, $\pm 8,75\%$, $\pm 7,5\%$, $\pm 6,25\%$ e $\pm 5\%$, que podem ser utilizados para adequar as condições de funcionamento sem ultrapassar os limites operacionais.

A atuação deste controle faz com que o comutador seja bloqueado automaticamente ao atingir a tensão da faixa de regulação ajustada. A Figura 54 apresenta o limitador de faixa de tensão de um regulador, enquanto que a Tabela 9 apresenta o aumento de corrente em relação à faixa de regulação da tensão conforme a norma NBR 11809/1192.

Figura 54 - Ajuste de faixa de tensão de um RT



Fonte: Próprio Autor

Tabela 9 - Capacidade de condução de corrente.

Faixa de Regulação da Tensão (%)	Corrente Suplementar (%) da corrente Nominal
10	100
8,75	110
7,5	120
6,25	135
5	160

Fonte: Próprio Autor

4.8 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou o equipamento regulador de tensão, o qual exerce um papel fundamental, tanto para consumidores em geral, quanto às concessionárias de energia. No que tange aos consumidores, o RT é amplamente empregado para correção dos níveis da tensão de fornecimento. Quanto às concessionárias, o equipamento é de fácil utilização, robusto e permite a regulação de tensão a custos reduzidos se comparadas as outras técnicas de regulação de tensão.

Quanto ao tipo de conexão dos reguladores monofásicos em bancos trifásicos, e podem ser conectados em Estrela-Aterrada, Delta-Fechado e Delta-Aberto. Normalmente, a conexão Estrela-Aterrada é utilizada em sistemas de 23,1kV e a conexão Delta-Fechado em redes de 13,8kV. A conexão Delta-Aberto, possui a particularidade de regular a tensão de linha das 3 fases, ou seja, regula a tensão medida entre as fases. A fase sem regulador instalado não possui regulação para a tensão de fase, medida entre a fase e o neutro, e, portanto, não possui regulação da tensão. Esta particularidade inviabiliza totalmente a instalação dos RT's em Delta-Aberto nas distribuidoras que possuem extensos ramais

monofásicos, pois a sua utilização pode provocar severas condições de queda de tensão nestes ramais conectados a fase sem regulação.

Dentre as técnicas de ajustes existentes para o regulador de tensão, destaca-se a técnica de Compensação de Queda na Linha, ou LDC - Line Drop Compensation. Esta técnica possibilita obter tensão mais próxima dos níveis estabelecidos pelo PRODIST em um ponto distante do RT, ou seja, o ponto de regulação está ao longo da linha e não no ponto de instalação do RT. O principal benefício desta técnica consiste no aumento máximo da tensão para períodos de carga máxima, resultando num menor número de comutações e desta forma obtendo-se variações menores de tensão nos consumidores durante o dia. Apesar deste conjunto de benefícios, convém ressaltarmos que a maioria dos reguladores em operação nas diversas concessionárias brasileiras é ajustada sem considerar o compensador de queda de linha. Este método de parametrização é difícil de ser implementado e bastante suscetível a erros, sobretudo em redes com altos níveis de distorção harmônica de corrente. Outros fatores que corroboram para a não utilização deste método é a possibilidade de sobretensões de grande amplitude nos clientes instalados nas proximidades do RT e também a dificuldade em se realizar manobras de cargas para trechos atendidos pelo regulador, uma vez que estas podem alterar o traçado da rede, fazendo com que o ponto de regulação simulado no controle seja alterado.

5 REGULADORES DE TENSÃO EM REDES COM ELEVADOS ÍNDICES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

5.1 INTRODUÇÃO

No ano de 2011 uma das grandes concessionárias de distribuição de energia elétrica do Sul do Brasil, enfrentou sérios problemas relativos a QEE em um de seus alimentadores de uma subestação localizada na área de transição entre a região serrana e o planalto médio do estado do Rio Grande do Sul. Este alimentador, que iremos chamar de AL01, atende uma grande área rural, que circundam as cidades de Casca, Paraí, Guabijú, São Jorge e São Sebastião. Na época, este alimentador possuía cerca de 404km de rede de distribuição primária em 23,1kV, atendendo 5182 clientes. No total, são 30,87MVA de potência instalada e demanda próxima a 8MVA. A Tabela 10 apresenta a quantidade de clientes do alimentador AL01 classificadas por classe de consumidor.

Tabela 10 - Quantidade de clientes por classe de consumidor

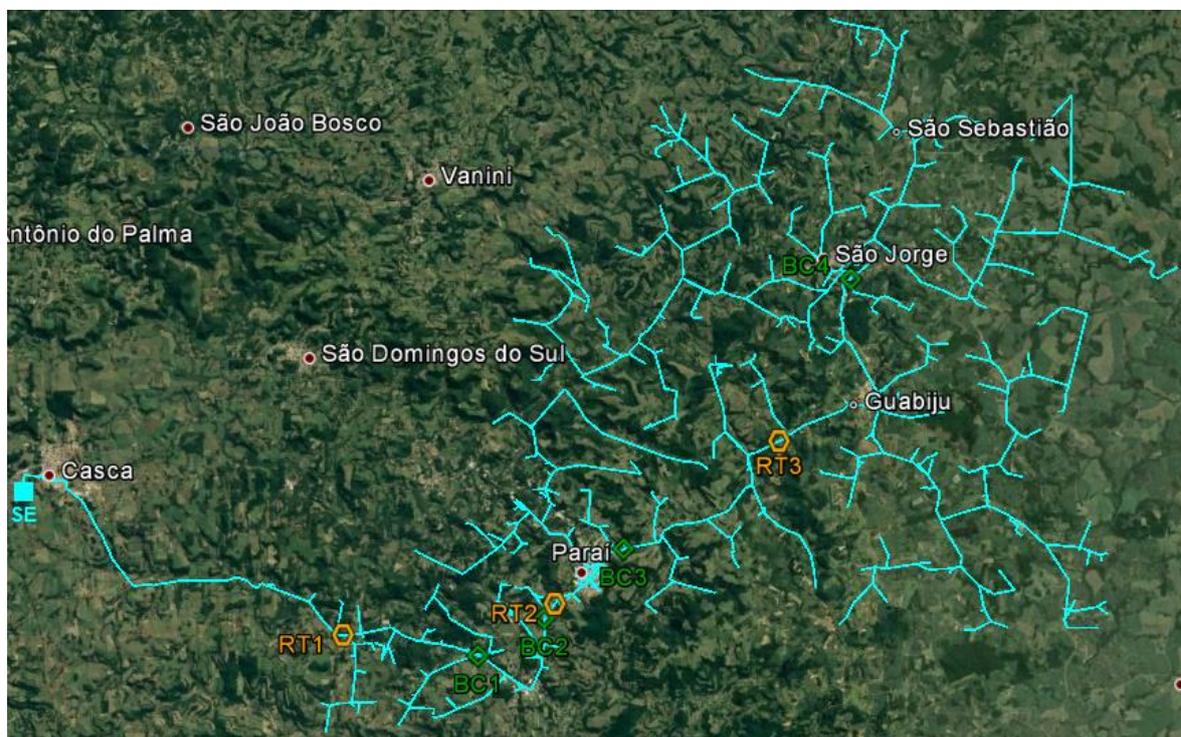
Classe de Consumo	Quantidade de Clientes
Residencial	2786
Comercial	460
Industrial	160
Rural	1670
Outros	106
Total	5182

Fonte: Próprio Autor

Como este alimentador possui uma troncal muito extensa, próxima de 60km, o método para regulação de tensão consistiu na instalação de três bancos reguladores de tensão em conjunto com outros quatro bancos de capacitores, distribuídos em cascata conforme a Figura 55. Esta figura mostra através de um diagrama físico, toda a região que o

AL01 atende, desde a subestação até o ponto mais distante, neste caso, a cidade de São Sebastião.

Figura 55 - Diagrama físico da área atendida pelo AL01



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 11 apresenta as características dos RT's e BC's - Bancos de Capacitores instalados ao longo do AL01.

Tabela 11 - Características dos RT's e BC's existentes no AL01.

Equipamento	Identificação	Potência (kVAr)	Tipo de Controle
Regulador de Tensão	RT1	-	-
	RT2	-	-
	RT3	-	-
Banco de Capacitor	BC1	600	Fixo
	BC2	600	By-Pass
	BC3	Projetado	Projetado
	BC4	600	Fixo

Fonte: Próprio Autor

5.2 CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA REDE

Desde o início do ano de 2010 o AL01 já vinha dando sinais de que a QEE era um problema persistente e que precisaria ser avaliada de forma mais criteriosa. Neste mesmo ano, diversas reclamações de níveis de tensão e solicitações de ressarcimentos por avarias em equipamentos foram recebidas. A principal queixa dos consumidores estava associada a sobretensões na região próxima ao RT1, nas proximidades da cidade de Paraí. Este RT é o mais próximo da subestação e está instalado a 14,77km do início do alimentador, atendendo a 4770 clientes.

Entre as principais reclamações recebidas, destacam-se 4 reclamações realizadas por consumidores industriais de média tensão de setores de produção distintos: produção de ração, indústria de basalto, fabricação de móveis e reciclagem de plásticos. Em comum, destaca-se que as indústrias mencionadas empregam em seu processo produtivo o uso de motores com controladores de velocidade, que conforme descrito no capítulo 2, são cargas com características potencialmente perturbadoras.

Com o número de reclamações de nível de tensão aumentando, surgiu a hipótese de que pudesse haver um problema com o RT1. Assim, uma equipe especializada em equipamentos especiais foi deslocada até o equipamento para realizar uma inspeção. Na vistoria foi constatado que o RT1 estava “travado” com o tap na regulação máxima, ocasionando sobretensão na região onde estavam concentradas as reclamações de nível de tensão e os pedidos de ressarcimentos.

Uma vez constatada a operação irregular do RT1 foram avaliadas, as hipóteses operativas e os procedimentos usuais a serem executados, os quais são descritos a seguir.

- 1) By-pass dos bancos de capacitores BC1 e BC2: com a suspeita de possível ressonância no trecho, foi solicitado, primeiramente, o by-pass dos bancos de capacitores instalados próximo a região do RT1;
- 2) Inibição do controle LDC: foi incluída a inibição do controle LDC para que não houvesse a comutação de tap do regulador, conseqüentemente, o RT não iria aumentar a tensão acima dos limites recomendados pela ANEEL, no período em que a carga deste alimentador fosse reduzida significativamente;
- 3) Inibição de indicação de fluxo reverso: Ocasionado pelo comportamento indevido do regulador de tensão, o qual estava acusando fluxo inverso;
- 4) Fixação de tap: Com a constatação de permanência de sobretensão na região do RT1, foi fixado o tap do regulador, entretanto, esta ação também não resolveu o problema com a sobretensão nos clientes reclamantes.

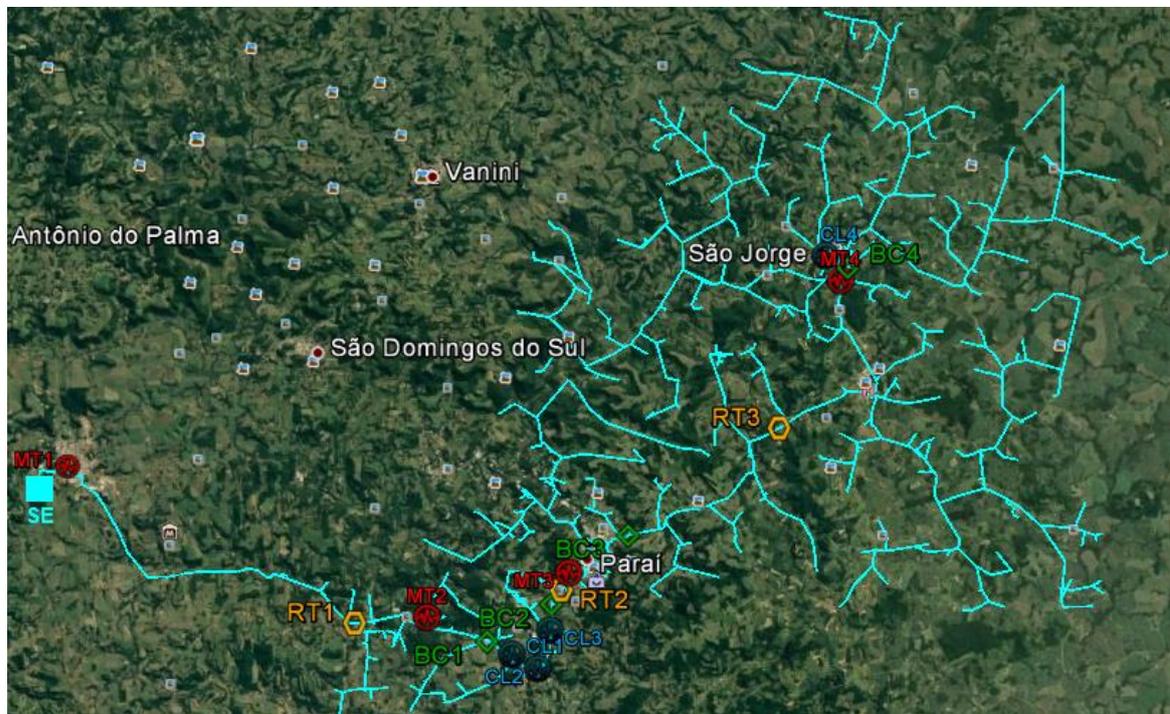
Constatado que o problema que ocasionou a sobretensão na cidade de Paraí foi devido travamento do RT1 no tap 16 (máximo) e que não era possível resolver o problema realizando as ações usuais descritas acima, decidiu-se realizar uma campanha de medições em vários pontos do alimentador e também nos clientes mais expressivos para verificar o nível de distorção harmônica de tensão e corrente circulando no AL01 e assim obter maiores informações para posterior avaliação.

5.3 CAMPANHA DE MEDIÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

A campanha de medições, elaborada para analisar o problema ocorrido com o RT1, envolveu a instalação de 8 equipamentos de medição, sendo 4 alocados em pontos de média tensão e os outros 4 instalados em clientes que efetuaram reclamações de nível de tensão. Estes clientes foram escolhidos por serem os mais expressivos em termos de potência instalada, ramo de atividade desenvolvida e potencial perturbador em relação aos outros

consumidores. A Figura 56 identifica a localização dos clientes analisados (CL1, CL2, CL3 e CL4) e também dos pontos de medição em MT (MT1, MT2, MT3 e MT4).

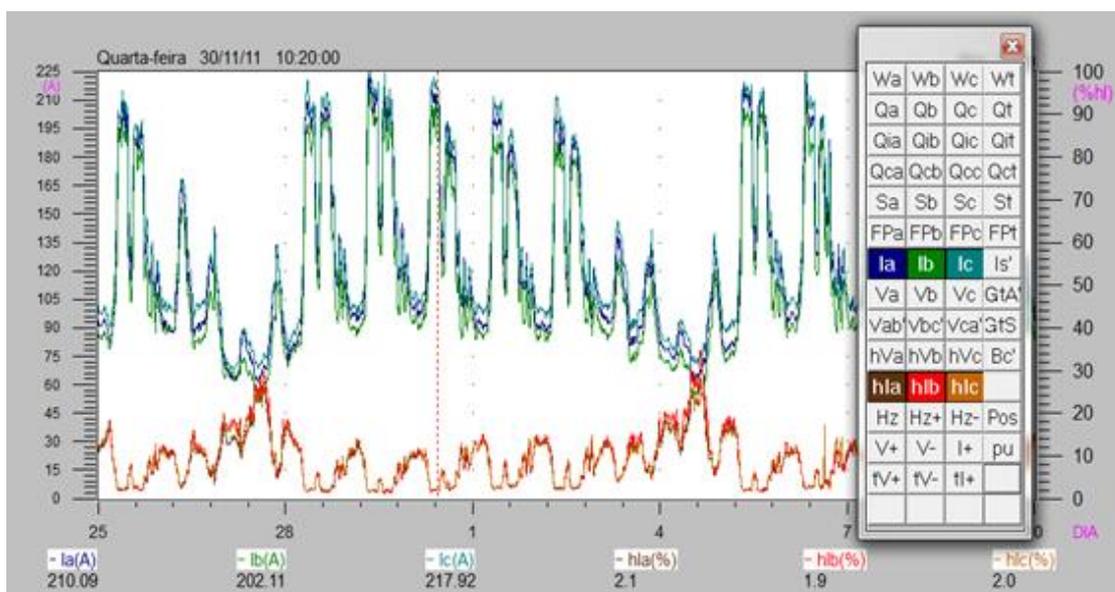
Figura 56 - Localização das medições em clientes (CL) e no AL (MT)



Fonte: Próprio Autor

O resultado da medição de corrente realizada no ponto MT1 pode ser visualizado na Figura 57.

Figura 57 - Medição de corrente no ponto MT1

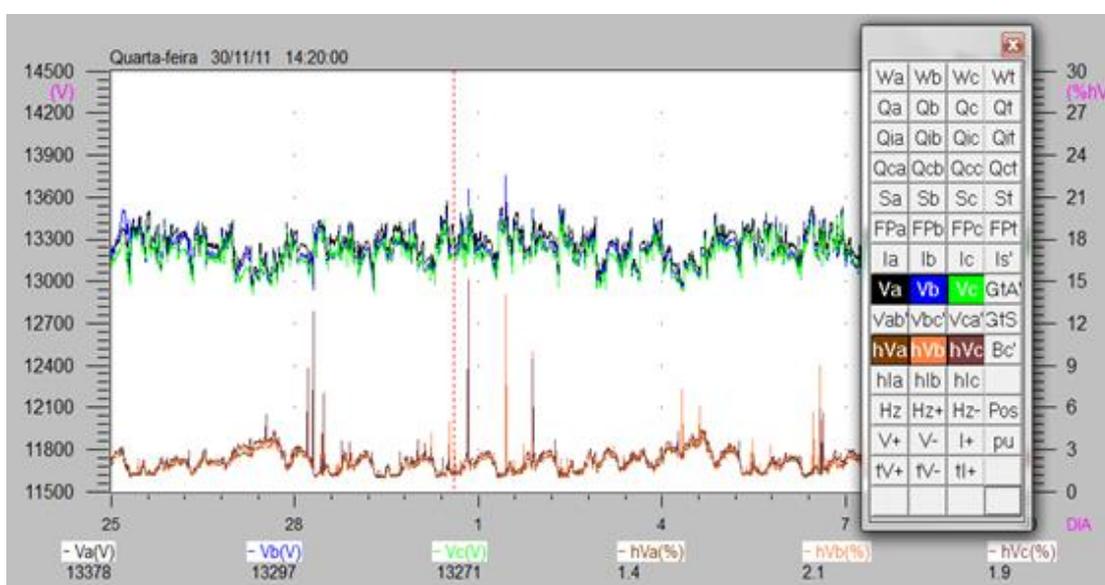


Fonte: (DE LIMA, 2014).

De acordo com a Figura 57, observa-se que para uma corrente de carga máxima, que está em torno de 220A, a DHTC é relativamente baixa, ficando em torno de 2%. A medida que o valor da corrente de carga diminui próximo a 60A, acontece uma elevação do valor da DHTC em valores extremamente altos, próximos de 30%.

O resultado da medição de tensão realizada no ponto MT1 pode ser visualizado na Figura 58.

Figura 58 - Medição de tensão no ponto MT1



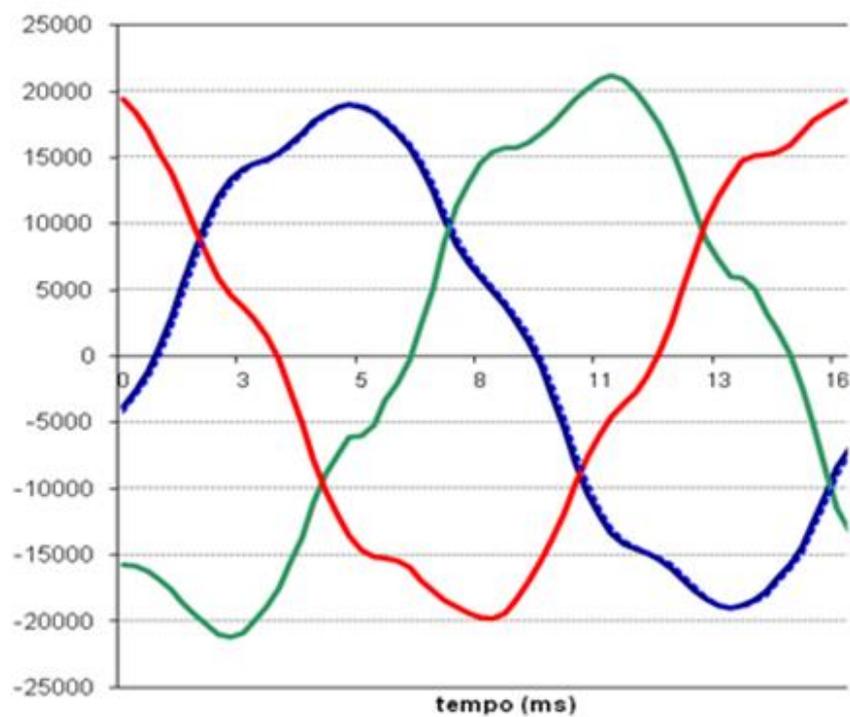
Fonte: (DE LIMA, 2014).

Observa-se na figura 58 que a DHTV não sofreu muitas variações ao longo do período de medição, apresentando valores próximos de 3% no período de carga máxima.

As medições dos pontos MT2, MT3 e MT4 mantêm o mesmo padrão de distorções verificadas no ponto MT1, ou seja, em períodos de carga elevada, as distorções de corrente e tensão são menores e quando acontece uma redução de carga, o valor de DHTC tem um aumento significativo.

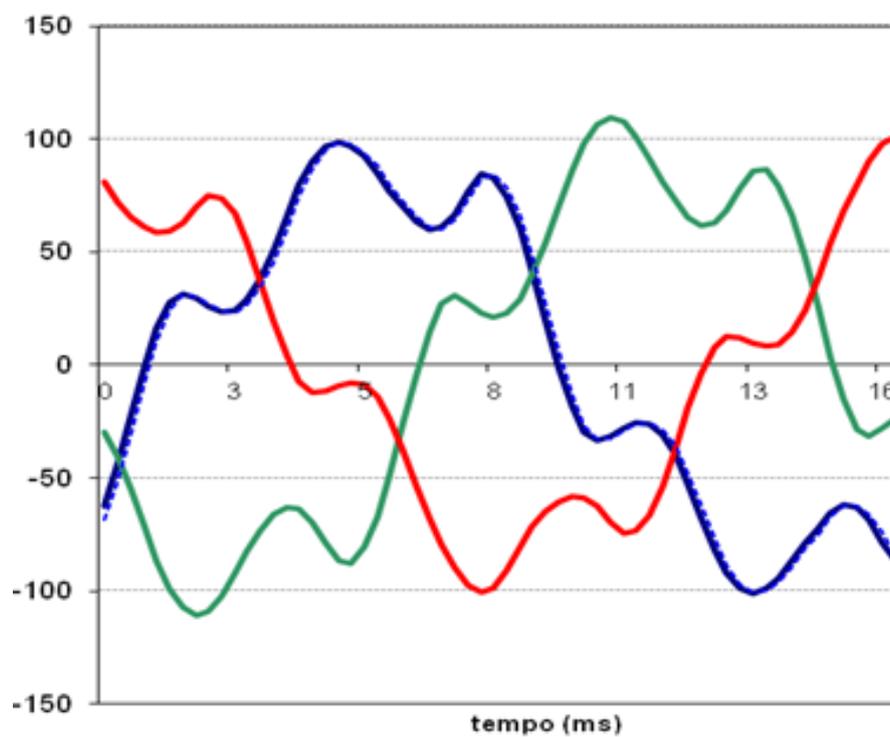
As formas de ondas de tensão e corrente para o momento de maior distorção no ponto MT1 podem ser verificadas nas Figuras 59 e 60, respectivamente.

Figura 59 - Forma de onda da tensão no ponto MT1 para o momento de maior distorção



Fonte: Próprio Autor

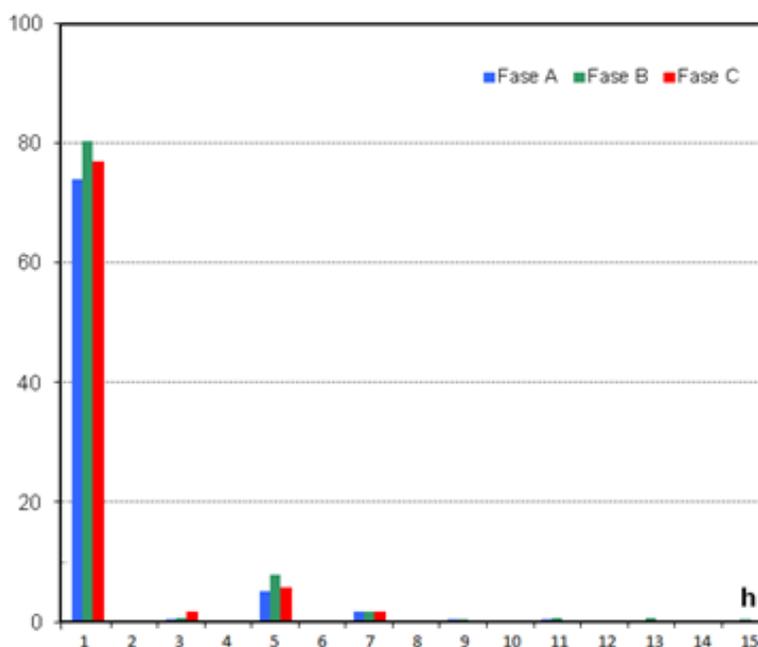
Figura 60 - Forma de onda da corrente no ponto MT1 para o momento de maior distorção



Fonte: Próprio Autor

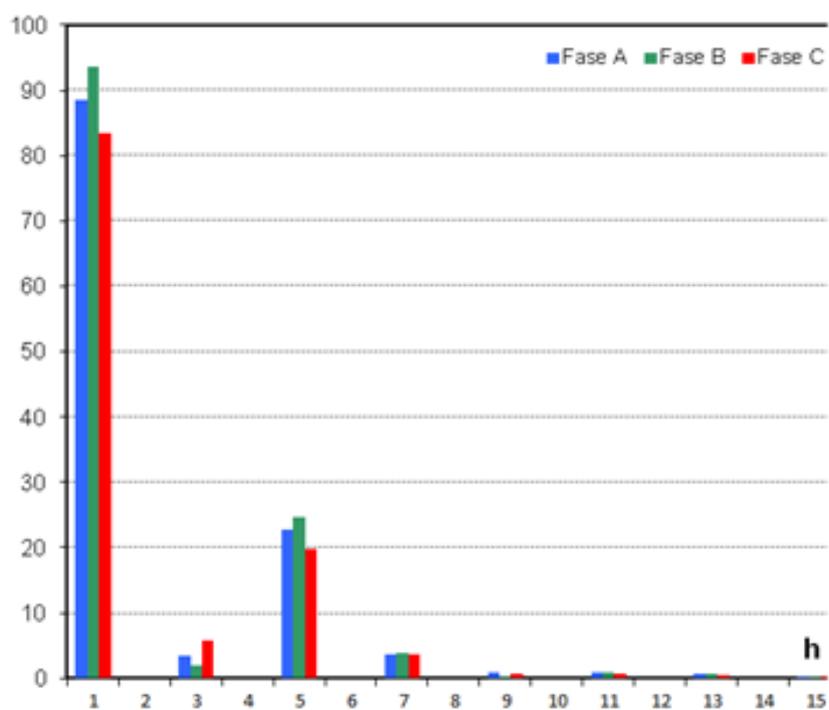
As Figuras 61 e 62 mostram os sinais de tensão e corrente decompostos, evidenciando que a principal componente harmônica presente no sistema é a de 5ª ordem.

Figura 61 - Decomposição harmônica do sinal de tensão no ponto MT1



Fonte: Próprio Autor

Figura 62 - Decomposição Harmônica do Sinal de Corrente Medido no Ponto MT1



Fonte: Próprio Autor

O resultado da análise das medições revelou que a harmônica de corrente é bastante significativa, principalmente nos clientes instalados próximos ao RT1. Das medições de corrente realizadas, tanto nos clientes, quanto no alimentador em média tensão, destaca-se o fato de que a componente harmônica de quinta ordem (componente de sequência negativa) é a que possui maior amplitude.

Ainda de acordo com o resultado das medições realizadas, é notável um aumento da distorção harmônica de tensão no período noturno e em finais de semana, ou seja, em períodos onde a demanda é reduzida. Para minimizar este problema, foi necessário automatizar o BC4, que até o momento estava em modo fixo e com suspeitas de estar amplificando as harmônicas de corrente, conforme exposto anteriormente no capítulo 2. Além desta ação, os consumidores relacionados nesta campanha de medição foram notificados por não manter a QEE dentro dos parâmetros recomendados pela IEEE-519, em relação a harmônicas de corrente. Após notificados, estes clientes tiveram um prazo de 90 dias para apresentar um RISE - Relatório de Impacto no Sistema Elétrico, comprovando que foram corrigidos os desvios relacionados a harmônicas verificados nas medições de tensão e corrente.

5.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentado o alimentador de uma subestação localizada na área de transição entre a região serrana e o planalto médio do estado do Rio Grande do Sul que em meados de 2011 apresentou problemas na operação de um regulador de tensão. Constatada a operação irregular do equipamento, medidas operativas foram realizadas, porém as mesmas não surtiram o efeito desejado, sendo então necessária a realização de

uma campanha de medições nos principais clientes e em pontos específicos deste alimentador.

A análise dos clientes envolvidos mostrou que os mesmos possuem em seus processos produtivos cargas que representam um forte carregamento não linear, gerando assim dificuldades técnicas de suprimento e elevadas distorções harmônicas de corrente, conforme constatado através das medições.

Com os resultados expostos neste capítulo, vislumbrou-se a possibilidade de que as falhas na operação dos reguladores estariam relacionadas aos níveis de distorção harmônica de corrente registrados através das medições. De acordo com esta hipótese, foram realizados estudos em laboratório que avaliaram a operação dos painéis de controle dos reguladores de tensão em ambientes com elevados níveis de distorção harmônica de corrente. Os resultados desse estudo serão apresentados no próximo capítulo.

6 ANÁLISE EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO

6.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de identificar a causa que originou o problema de sobretensão gerado pelas ações de acionamento indevidas dos tap's do RT1, foi proposto a realização em laboratório de um arranjo experimental onde procurou-se reproduzir as condições do momento da falha de operação dos sistemas de controle digitais utilizados no RT1 apresentado no capítulo anterior.

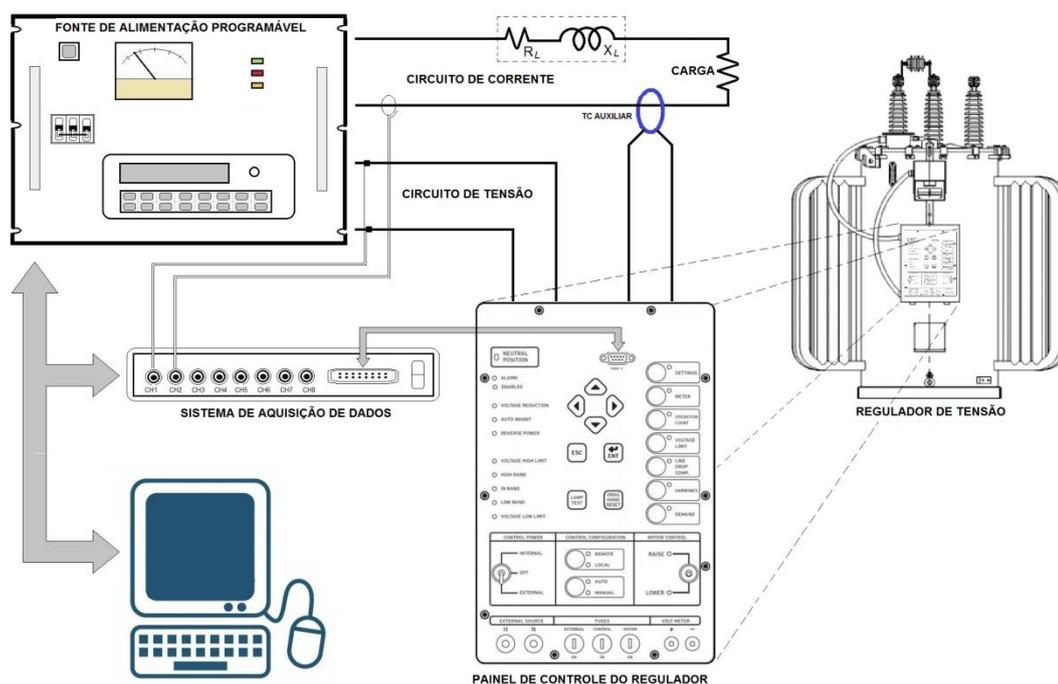
Considerando as configurações típicas do circuito de controle dos RT's, o comando para alteração de tap's depende fundamentalmente dos sinais de tensão e corrente captados pelos respectivos transformadores de potencial (TP's) e transformadores de corrente (TC's). O processamento e condicionamento dos sinais captados pelos transdutores são procedimentos fundamentais na definição das ações de controle da regulação de tensão por meio da comutação de tap's.

Neste capítulo apresenta-se a análise do comportamento do sistema de controle de RT's mediante condições operacionais com distorções harmônicas nas tensões e correntes na rede a ser regulada.

6.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Com o objetivo de investigar a atuação do sistema de controle dos reguladores de tensão operando em redes com elevados índices de distorções harmônicas de corrente e tensão, foi montado o arranjo experimental apresentado na Figura 63.

Figura 63 - Arranjo experimental



Fonte: Próprio Autor

A montagem dos ensaios foi composta pelos seguintes materiais e equipamentos:

- a) Fonte de alimentação trifásica programável, California Instruments modelo 6000L, controlada por um gerador e analisador de harmônicas (HGA). Possui potência nominal de 6 kVA, frequência base ajustável entre 47 e 66 Hz e variação da tensão terminal de 0 a 240V (RMS). Através desta fonte é possível configurar tensões trifásicas com diferentes formas de onda, fixando-se individualmente as amplitudes e respectivos ângulos de fase de cada componente harmônica do sinal em cada fase e de forma independente;
- b) Sistema de aquisição de dados modelo Wavebook-Iotech com 8 entradas analógicas com conversão digital em 16 bits à 1.0 Msample e 5 entradas digitais;
- c) Aplicativo computacional da California Instruments utilizado no controle da fonte de alimentação e do sistema de aquisição de dados;
- d) Medidor de potência digital, modelo WT230, Yokogawa;
- e) Osciloscópio digital Tektronix, modelo TDS 420A;
- f) Transformador de corrente auxiliar, Yokogawa, modelo 2242, classe 0,2%;

- g) Analisador de harmônicas Fluke, 41B;
- h) Controle digital dos reguladores ITB, mod. CTR-2 e TOSHIBA, mod. TB-R1000.

O experimento foi montado nas dependências do Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica (LQEE/FEIS/UNESP) e pode ser visualizado nas fotos apresentadas na Figura 64.

Figura 64 - Fotos da montagem experimental



(a) *Vista geral da montagem experimental*



(b) *Detalhes das caixas de controle dos RT's*

Fonte: Próprio Autor

6.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

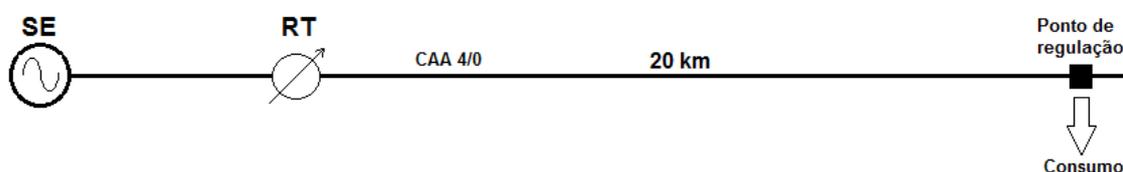
Os ensaios foram conduzidos no sentido de identificar possíveis desvios operacionais do sistema de controle sob condições não senoidais de operação, considerando-se duas etapas: A primeira refere-se à identificação dos limiares de correntes e tensões necessárias para o acionamento do comutador de tap's. Na segunda etapa os ensaios foram realizados no sentido de obter as posições finais do comutador de tap's em regime permanente. Para tanto, foram adotados os seguintes procedimentos teóricos e experimentais:

- a) Estudos teóricos e experimentais pressupondo a existência de um trecho de alimentador onde se encontra instalado um banco de regulador trifásico constituído de três unidades monofásicas conectadas em estrela;
- b) Modelo teórico baseado na metodologia convencional de controle de tap's dos reguladores de tensão é utilizado para simular a rede a ser regulada e determinar os valores dos parâmetros de ajuste dos reguladores ensaiados;
- c) Avaliação da aderência do modelo teórico aos resultados experimentais;
- d) Circuitos de corrente e tensão independentes, com o objetivo de viabilizar a imposição individual das formas de ondas desejadas, seja de tensão ou corrente;
- e) A tensão do secundário do TP do regulador é imposta através da tensão da Fase A da fonte de alimentação trifásica, diretamente conectada aos terminais de tensão da caixa de controle;
- f) O circuito de corrente foi criado a partir da tensão da Fase B da fonte de alimentação trifásica, alimentando-se um banco de resistências de carga. Desta forma, as distorções harmônicas das correntes e seus respectivos valores RMS são reproduzidos como uma imagem da tensão aplicada. Esta saída da fonte programável é conectada aos terminais de corrente da caixa de controle do RT por meio de um transformador de corrente auxiliar no sentido de atender as limitações impostas pelo fabricante.
- g) As principais respostas do sistema de controle aos diferentes estímulos de tensão e corrente são observadas diretamente no painel da caixa de controle do RT, notadamente: valores RMS da tensão e corrente, limiares para o acionamento do comutador de tap's, posições finais em regime permanente do comutador de tap's e indicação de fluxo reverso.

6.4 MODELAGEM TEÓRICA E ADERÊNCIA DO ARRANJO EXPERIMENTAL

Adotou-se como referência para análise teórica e experimental um trecho de alimentador fictício com tensão nominal de 23,1 kV na subestação, 25 km de extensão total e cabeamento CAA 4/0. O banco de reguladores se encontra instalado a 20 km do ponto remoto de regulação, como ilustrado a Figura 65.

Figura 65 - Configuração típica de instalação de Regulador de Tensão



Fonte: Próprio Autor

Considerando-se a utilização das unidades monofásicas conectadas em estrela, as análises teóricas e experimentais foram realizadas de forma monofásica.

Para o ajuste dos parâmetros do compensador de queda na linha (LDC), com um único ponto de concentração de carga coincidente com o ponto de regulação, considerou-se a resistência (R_ℓ) e a reatância total (X_ℓ) do trecho da linha compreendida entre o ponto de instalação do RT até o ponto de regulação. Os parâmetros de ajuste, dvr e dvx , foram calculados segundo as equações (36) e (37)

$$dvr = R_\ell \cdot \frac{RTC}{RTP} \quad (\Omega) \quad (36)$$

$$dvx = X_\ell \cdot \frac{RTC}{RTP} \quad (\Omega) \quad (37)$$

Onde;

dvr = queda de tensão nos elementos resistivos;

dvx = queda de tensão nos elementos indutivos;

A determinação teórica da queda de tensão total ΔVT é feita conforme recomendação clássica, ou seja, a partir das projeções dos fasores representativos das quedas de tensão efetivas no elemento indutivo ΔVX e resistivo ΔVR do cabo, tomando-se como referência a tensão no ponto remoto, V_R .

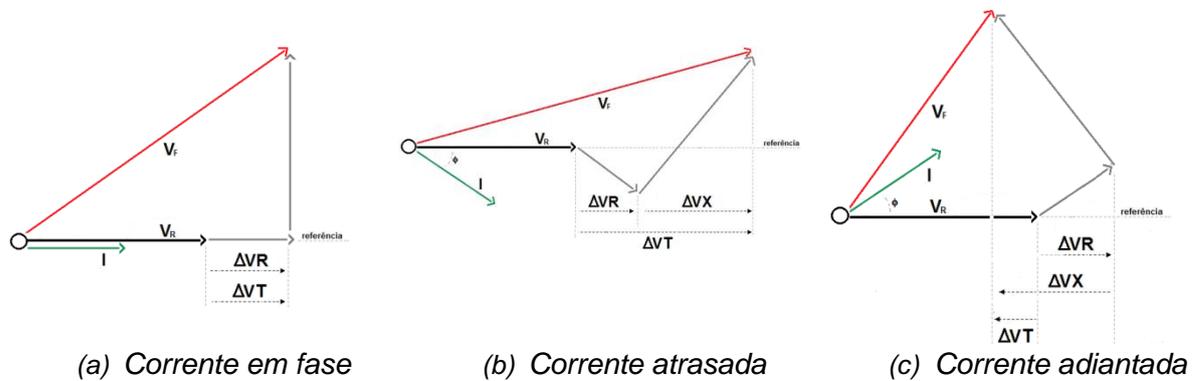
$$\Delta VT = \Delta VR + \Delta VX \quad (38)$$

$$\Delta VR = dvr.I.\cos\phi \quad (39)$$

$$\Delta VX = dvx.I.\sen\phi \quad (40)$$

A título de ilustração, apresenta-se na Figura 66 o comportamento teórico das contribuições das quedas de tensão em fase e em quadratura com a corrente, considerando-se três situações distintas a saber: corrente em fase com a tensão remota, corrente atrasada em relação a tensão remota e corrente adiantada em relação a tensão remota.

Figura 66 - Diagramas fasoriais das condições de análise



Fonte: Próprio Autor

Como este processo de cálculo simplificado é também utilizado pelo sistema de controle do regulador, os resultados obtidos teoricamente são também utilizados para assegurar a consistência dos resultados produzidos pela ação do controle de tap's do regulador nos testes experimentais.

6.4.1 Identificação teórica dos limiares de atuação do comutador de tap's

Inicialmente os estudos teóricos foram conduzidos com vistas à determinação teórica dos valores eficazes das correntes associadas aos limites superiores, inferiores e de referência da tensão no ponto remoto regulado. Primeiramente considerou-se a rede elétrica sem distorções harmônicas com o objetivo de avaliar a consistência dos resultados teóricos e experimentais em condições ideais de operação.

Com objetivo de explicitar detalhadamente a influência do LDC, foram investigadas três condições operacionais distintas admitindo-se a corrente em fase, adiantada e atrasada com relação a tensão aplicada. Os testes de consistência foram realizados tomando-se por base apenas os indicativos de limiares para alteração de tap's.

Nas Tabelas 12 e 13 apresentam-se os resultados teóricos obtidos para as grandezas no circuito de Média Tensão (MT). A resistência e a reatância do cabo foram determinadas a partir das especificações do cabo 4/0 CAA e do seu comprimento medido entre o ponto de instalação do regulador até o ponto de regulagem, no caso, 20 km.

Tabela 12 - Dados referidos à Média Tensão

Parâmetro	Valor
Resistência total do cabo até o ponto regulado	7,68 Ω
Reatância total do cabo até o ponto regulado	6,89 Ω
Tensão de saída na subestação	13200V
Tensão regulada no ponto de regulação	12756V
Limite superior de tensão	12880V
Limite inferior de tensão	12650V

Fonte: Próprio Autor

Tabela 13 - Condições operacionais teóricas no circuito de MT

LIMIARES ATUAÇÃO	Corrente (Observações)	QUEDAS DE TENSÃO			Corrente Limiar		TENSÃO REMOTA (V)
		DVR(%)	DVX(%)	DVT(%)	Ip(A)	Fase (°)	
ABAIXAR	Em fase	1,83	0	1,83	31,5	0	12880
NEUTRO	Em fase	2,70	0	2,70	46,5	0	12765
ELEVAR	Em fase	3,58	0	3,58	61,5	0	12650
ELEVAR	Atrasada	2,36	-1,22	3,58	46,8	-30	12650
ELEVAR	Adiantada	4,25	0,67	3,58	74,2	10	12650

Fonte: Próprio Autor

Nas Tabelas 14 e 15 apresentam-se os resultados teóricos obtidos para as grandezas no circuito de controle. Os resultados foram obtidos conforme estabelecido nas equações de (36) a (40). Como esperado as quedas de tensão em quadratura dvx resultam nulas para os casos onde a corrente se encontra em fase com a tensão. Nestas condições evidencia-se apenas o efeito do ajuste de dvr no sistema de controle.

Tabela 14 - Parâmetros no circuito de controle

Parâmetro	Valor
Tensão no ponto de instalação do RT	114,1V
Nível de tensão no ponto de regulação	111,0V
Limite superior de tensão	112,0V
Limite inferior de tensão	110,0V
Ajuste LDC (dvr)	8,68 Ω
Ajuste LDC (dvx)	7,79 Ω

Fonte: Próprio Autor

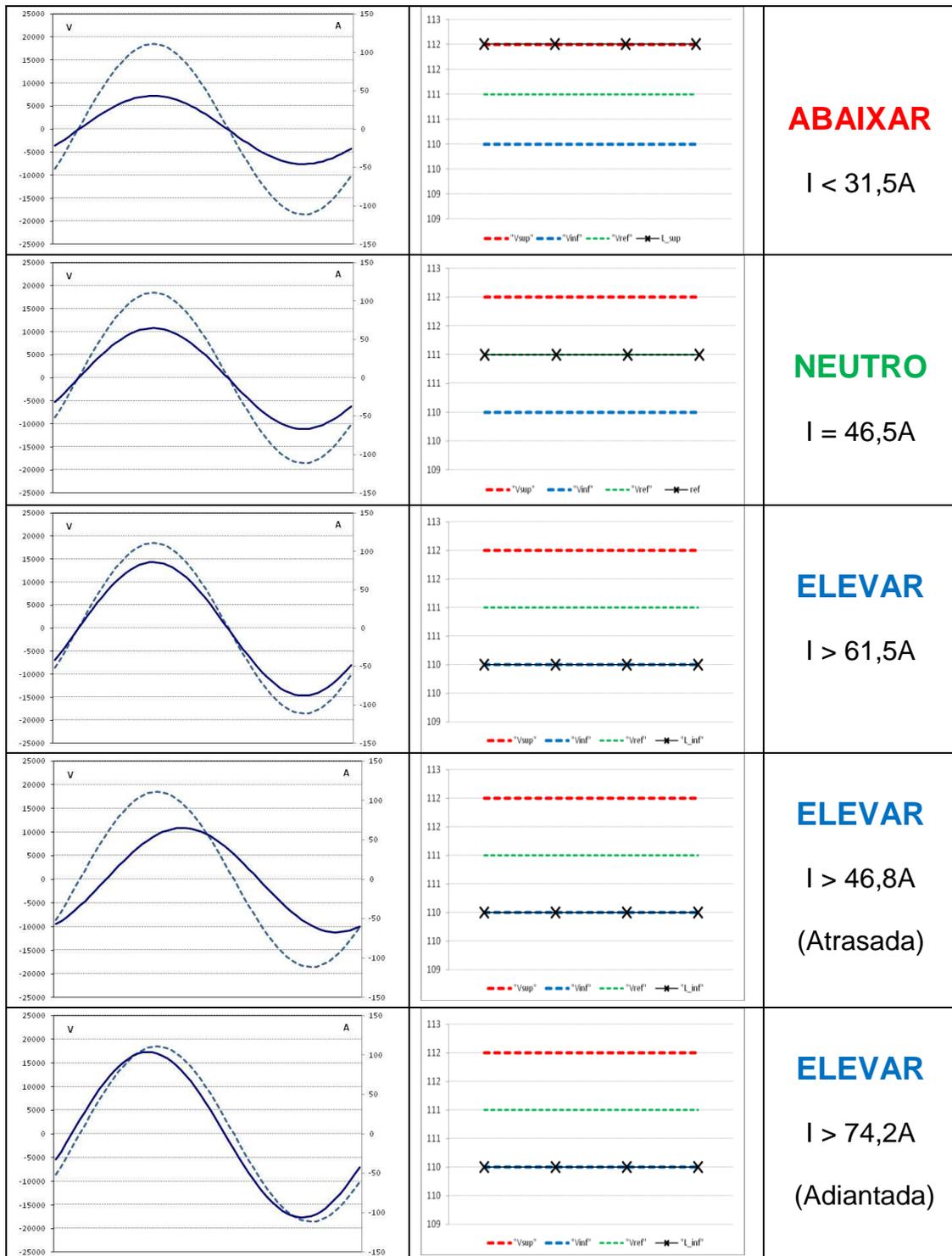
Tabela 15 - Condições operacionais teóricas no circuito de controle

LIMIARES ATUAÇÃO	Corrente (Observações)	QUEDAS DE TENSÃO			Corrente Limiar		TENSÃO REMOTA (V)
		DVR(V)	DVX(V)	DVT(V)	Ic(A)	Fase (°)	
ABAIXAR	Em fase	1,83	0	1,83	0,242	0	112
NEUTRO	Em fase	2,70	0	2,70	0,357	0	111
ELEVAR	Em fase	3,58	0	3,58	0,473	0	110
ELEVAR	Atrasada	2,36	-1,22	3,58	0,36	-30	110
ELEVAR	Adiantada	4,25	0,67	3,58	0,571	10	110

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 67 são ilustradas as condições operacionais investigadas, bem como os resultados teóricos obtidos para os diferentes limiares.

Figura 67 - Resultados para os limiares de correntes para atuação do RT



Fonte: Próprio Autor

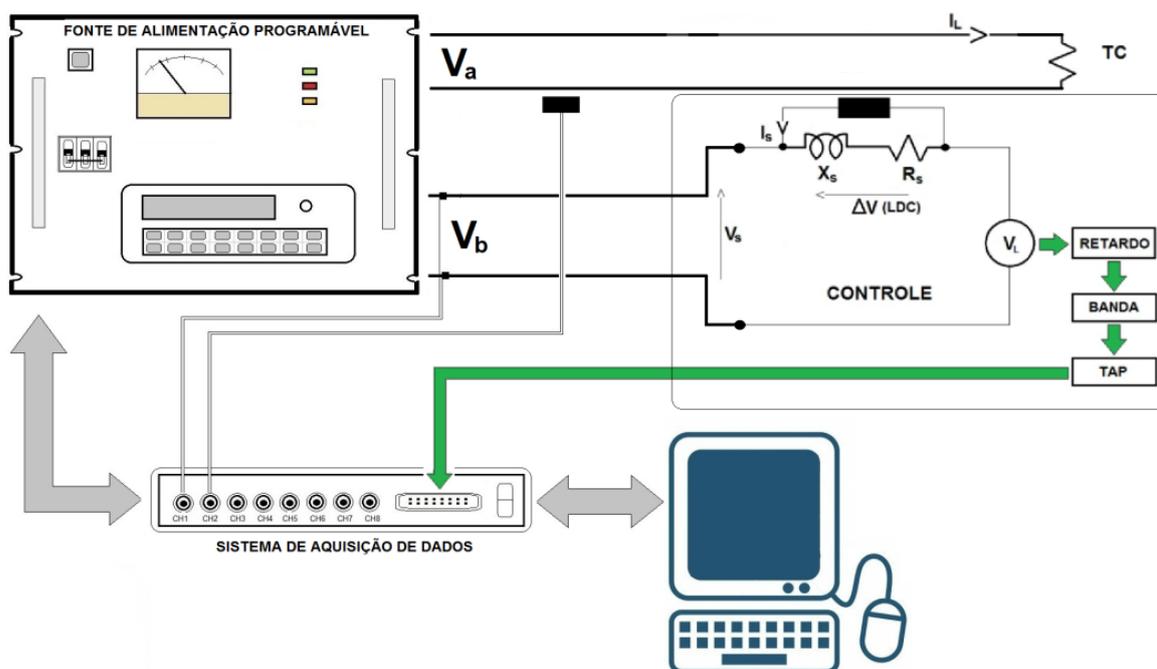
Uma vez obtidos os valores dos limiares de correntes para atuação do comutador de tap's em um contexto teórico, procedeu-se uma série de experimentos no sentido de

investigar a aderência da metodologia a ser adotada nos demais procedimentos experimentais.

6.4.2 Identificação experimental dos limiares de atuação do Comutador de tap's

Os procedimentos experimentais seguem a metodologia proposta anteriormente. A corrente medida pelo RT foi reproduzida através de um circuito isolado a qual foi introduzida diretamente no circuito de controle por meio de um transformador de corrente auxiliar. Apresenta-se na Figura 68, de forma simplificada, os detalhes das conexões utilizadas para impor as condições operacionais desejadas no circuito de controle do regulador.

Figura 68 - Excitação dos circuitos de corrente e tensão no controle do regulador



Fonte: Próprio Autor

Os resultados colhidos no experimento foram inicialmente utilizados para verificar a aderência do modelo teórico adotado quanto à metodologia efetivamente implementada no

sistema de controle do regulador, no que se refere especificamente ao procedimento de cálculo das quedas de tensão.

Para tanto, foram selecionados dois painéis de controle de reguladores de tensão de 32 degraus de diferentes fabricantes, nomeados neste trabalho como RT-01 e RT-02. Os parâmetros adotados nos cálculos teóricos foram também utilizados para parametrizar ambos RT's, conforme ilustrado na Tabela 16. Destaca-se, entretanto, que os seletores de ajustes para o dvr e dvx disponíveis nos painéis de controle dos reguladores não comportam números fracionários tais como utilizados no modelo teórico, portanto, os valores efetivamente fixados foram, 9V e 8V, por ampere, respectivamente.

Tabela 16 - Parametrização dos Reguladores de Tensão

Parâmetro	Valor
Tensão de Referência (V)	111 V
Largura de faixa (V)	± 1
Tempo de retardo (s)	5
Relação do TP	115
Relação do TC	130
DVR (V/A)	9
DVX(V/A)	8

Fonte: Próprio Autor

O procedimento experimental adotado consiste da elevação ou redução sistemática da amplitude das correntes, até que o sinalizador de alteração de tap's seja acionado. Nestas condições registra-se o valor eficaz da corrente para este limiar de atuação, seja para elevação ou redução do tap.

Os resultados apresentados na Tabela 17 referem-se ao comportamento de um dos painéis dos reguladores ensaiados, o qual, sob o ponto de vista da aderência ao modelo teórico, foi o que apresentou os piores resultados.

Tabela 17 - Condições operacionais experimentais no circuito de controle

LIMIARES ATUAÇÃO	Corrente limiar		Quedas de Tensão (V)			Quedas de Tensão (%)			TENSÃO REMOTA (V)
	Is(A)	Fase (°)	DVR	DVX	DVT	DVR	DVX	DVT	
ABAIXAR	0,245	0	2,18	0	2,18	1,90	0	1,90	111,9
NEUTRO	0,362	0	3,22	0	3,22	2,80	0	2,80	110,9
ELEVAR	0,468	0	4,26	0	4,26	3,71	0	3,71	109,8
ELEVAR	0,355	-30	2,81	-1,44	4,25	2,44	-1,25	3,7	109,9
ELEVAR	0,550	10	5,06	0,79	4,27	4,41	0,69	3,72	109,8

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 18 ilustra a comparação dos resultados teóricos e experimentais, referidos à média tensão. Os desvios podem ser justificados principalmente pela impossibilidade de se efetuar ajustes fracionários para dvr e dvx , ou seja, 8,68V e 7,79V respectivamente, no arranjo experimental.

Tabela 18 - Comparação entre os limiares de corrente teóricos e experimentais

LIMIARES ATUAÇÃO	Corrente (Observações)	IL(A) Teórica	IL(A) Experimental	DESVIO (%)
		($dvr=8,68V$ e $dvx=7,79V$)	($dvr=9V$ e $dvx=8V$)	
ABAIXAR	Em fase	31,5	31,8	-0,9
NEUTRO	Em fase	46,5	47,1	-1,3
ELEVAR	Em fase	61,5	60,8	1,2
ELEVAR	Atrasada	46,8	46,2	1,3
ELEVAR	Adiantada	74,2	71,5	3,8

Fonte: Próprio Autor

A boa aderência dos resultados permite concluir que a metodologia de cálculo digital das quedas de tensão pelo circuito de controle é compatível com as equações (36), (37) e (38) e também mostra que os procedimentos experimentais adotados são coerentes, podendo, portanto, serem adotados nas demais investigações de natureza experimental que se seguem.

6.5 INFLUÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS SOBRE O LIMAR DE ATUAÇÃO

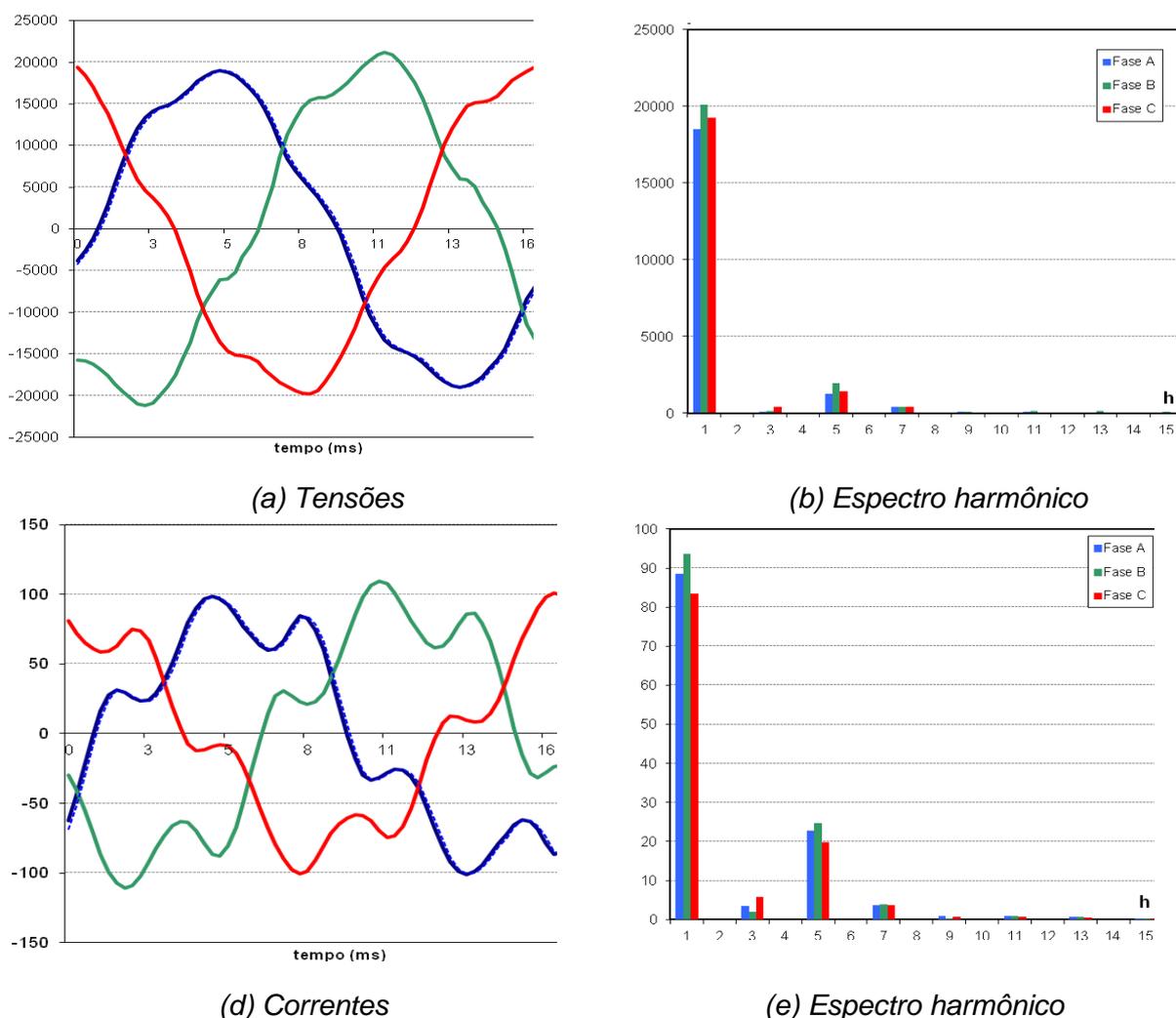
Uma vez verificada a consistência teórica e experimental com relação aos procedimentos experimentais adotados no que se refere à forma de excitação do circuito de

controle, procedeu-se a investigação do comportamento dos limiares de corrente de atuação em condições não senoidais.

Os experimentos foram conduzidos tomando por base medições de tensão e correntes realizadas conforme descrito no capítulo 5. Tal medida tem por objetivo a criação de um cenário que possa ser futuramente utilizado para estabelecer umnexo causal entre as ocorrências de mau funcionamento de RT's considerando sistemas de fornecimento reais.

Os resultados das medições de tensão e correntes, bem como suas respectivas composições harmônicas são apresentados na Figura 69 e Tabelas 19 e 20.

Figura 69 - Formas de onda e composição harmônica no ponto de instalação do RT



Fonte: Próprio Autor

Tabela 19 - Valores de pico das componentes harmônicas de tensão

h	FASE A			FASE B			FASE C		
	V _a (V)	(%)	φ _a °	V _b (V)	(%)	φ _b °	V _c (V)	(%)	φ _c °
1	18510,60	100,00	-12,40	20103,80	100,00	228,40	19242,80	100,00	110,00
3	76,30	0,40	135,10	149,10	0,70	115,40	401,70	2,10	55,70
5	1242,90	6,70	202,70	1943,60	9,70	-30,50	1429,60	7,40	84,10
7	428,20	2,30	146,40	432,00	2,10	44,70	433,80	2,30	-83,40
9	80,60	0,40	-79,40	71,20	0,40	-66,00	50,50	0,30	130,60
11	74,00	0,40	-41,00	162,50	0,80	79,20	66,00	0,30	219,20
13	60,70	0,30	7,00	138,40	0,70	222,60	62,30	0,30	124,80
15	18,10	0,10	47,40	88,30	0,40	-69,10	17,50	0,10	-35,00
17	18,50	0,10	89,60	49,00	0,20	31,10	25,70	0,10	20,50
19	10,10	0,10	94,20	32,00	0,20	241,70	11,80	0,10	260,90
21	15,40	0,10	-19,90	85,30	0,40	-39,50	14,90	0,10	71,30
23	18,40	0,10	173,00	84,30	0,40	71,40	15,80	0,10	156,80
25	11,60	0,10	184,60	69,80	0,30	195,80	9,10	0,00	-67,50
RMS (V)	13122,4			14286,9			13650,8		
DHT(%)	7,1			10			8,1		

Fonte: Próprio Autor

Tabela 20 - Valores de pico das componentes harmônicas de corrente

h	FASE A			FASE B			FASE C		
	I _a (V)	(%)	φ _a °	I _b (V)	(%)	φ _b °	I _c (V)	(%)	φ _c °
1	88,60	100,00	-29,70	93,58	100,00	211,20	83,36	100,00	85,50
3	3,52	3,98	-50,00	1,90	2,03	239,70	5,77	6,92	148,50
5	22,66	25,58	-56,40	24,67	26,36	71,40	19,68	23,61	186,80
7	3,72	4,19	-82,80	3,77	4,03	166,80	3,66	4,39	45,90
9	0,90	1,01	16,90	0,11	0,12	238,80	0,75	0,90	228,00
11	0,85	0,96	84,10	0,83	0,89	220,10	0,70	0,84	-14,80
13	0,56	0,64	90,30	0,73	0,78	-25,00	0,53	0,64	219,10
15	0,23	0,26	156,10	0,09	0,09	-28,20	0,08	0,10	66,60
17	0,17	0,19	195,30	0,17	0,19	4,10	0,09	0,11	110,30
19	0,17	0,19	182,00	0,28	0,30	87,20	0,11	0,13	-45,20
21	0,21	0,24	183,60	0,15	0,16	211,30	0,13	0,15	211,20
23	0,14	0,15	-69,20	0,01	0,01	56,00	0,02	0,02	-27,60
25	0,12	0,13	-4,10	0,09	0,10	25,00	0,05	0,06	35,90
RMS (A)	64,8			68,5			60,8		
DHT(%)	26,3			26,8			25,0		

Fonte: Próprio Autor

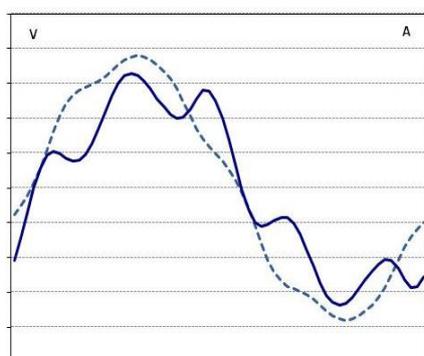
Particularmente, visando a análise mais detalhada do compensador de queda na linha (LDC), no tocante aos ajustes de dvr e dvx admitiu-se, para cada ensaio, três condições distintas relacionadas aos ângulos de fase das componentes fundamentais das correntes pelos RT's: em fase, atrasada de -30° e adiantada de $+10^\circ$ com relação à tensão no ponto de instalação dos mesmos.

Considerando-se os resultados das medições reais, os experimentos para identificação dos limiares de corrente foram realizados com base nas grandezas associadas a Fase A, mantendo-se o padrão de distorções harmônicas na tensão.

Admitiu-se também diferentes combinações entre as formas de onda de tensão e corrente, formando-se quatro grupos. Para cada grupo identificou-se experimentalmente os limiares relacionados aos valores RMS das correntes necessárias para disparar as sinalizações de “ABAIXAR” ou “ELEVAR” tap’s, disponíveis nos painéis de controle dos RT’s.

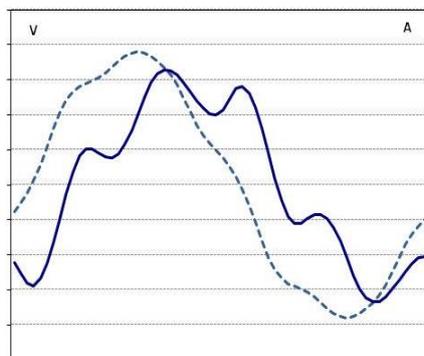
Na Figura 70 são ilustradas as condições operacionais para as correntes em fase, atrasada e adiantada em relação a tensão, respectivamente. Este conjunto de formas de onda foi identificado como Grupo 1 e representam os padrões de distorções harmônicas mais próximos àqueles observados na medição realizada no alimentador real.

Figura 70 - Formas de onda para excitação dos circuitos de corrente e tensão (Grupo 1)



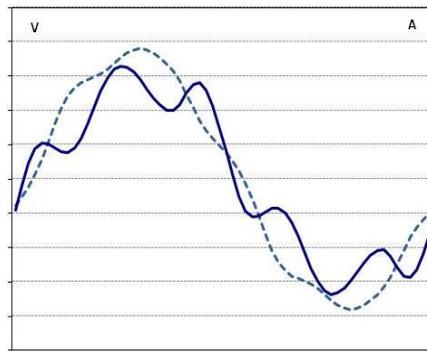
(a) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente em fase)

h	V(%)	Φ°	I(%)	Φ°
1	100,0	167,6	100,0	-29,7
3	0,4	-44,9	4,0	-50,0
5	6,7	22,7	25,6	-56,4
7	2,3	-33,6	4,2	-82,8
9	0,4	100,6	1,0	16,9
11	0,4	139,0	1,0	84,1
13	0,3	187,0	0,6	90,3
15	0,1	227,4	0,3	156,1
DHT(%)	7,1		26,3	



(b) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente atrasada)

h	V(%)	Φ°	I(%)	Φ°
1	100,0	167,6	100,0	-59,7
3	0,4	-44,9	4,0	-140,0
5	6,7	22,7	25,6	-206,4
7	2,3	-33,6	4,2	-292,8
9	0,4	100,6	1,0	-253,1
11	0,4	139,0	1,0	-245,9
13	0,3	187,0	0,6	-299,7
15	0,1	227,4	0,3	-293,9
DHT(%)	7,1		26,3	



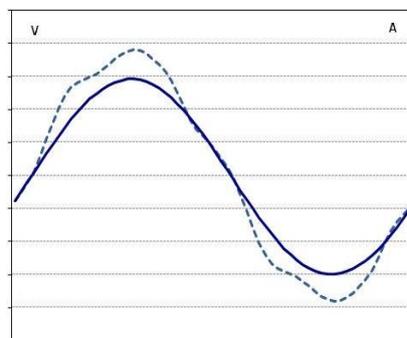
h	V(%)	Φ°	I(%)	Φ°
1	100,0	167,6	100,0	-19,7
3	0,4	-44,9	4,0	-20,0
5	6,7	22,7	25,6	-6,4
7	2,3	-33,6	4,2	-12,8
9	0,4	100,6	1,0	106,9
11	0,4	139,0	1,0	194,1
13	0,3	187,0	0,6	220,3
15	0,1	227,4	0,3	306,1
DHT(%)	7,1		26,3	

(c) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente adiantada)

Fonte: Próprio Autor

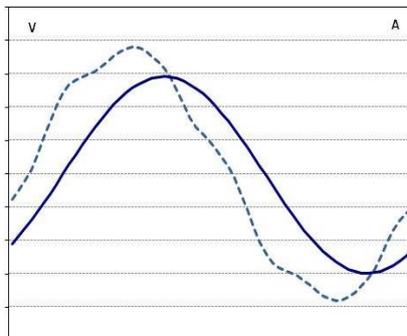
Com o objetivo de isolar a influência das distorções harmônicas da corrente sobre a atuação do compensador de queda na linha, criou-se um novo grupo de formas de onda denominado Grupo 2 onde as formas de onda das tensões aplicadas foram mantidas conforme medição original e a corrente foi considerada perfeitamente senoidal, conforme mostra a Figura 71.

Figura 71 - Formas de onda para excitação dos circuitos de corrente e tensão (Grupo 2)



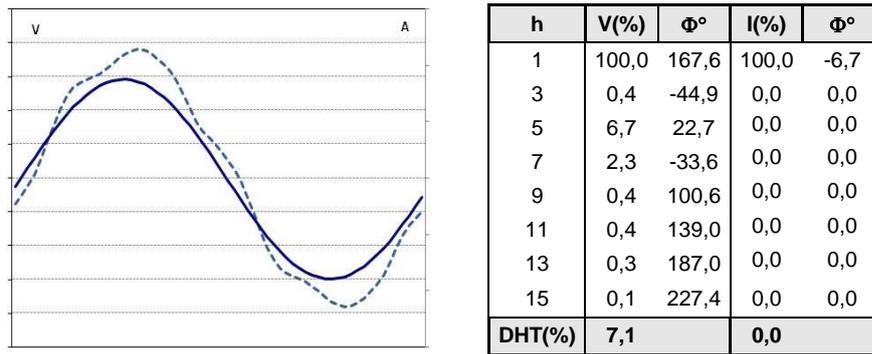
h	V(%)	Φ°	I(%)	Φ°
1	100,0	167,6	-16,7	100
3	0,4	-44,9	0,0	0,0
5	6,7	22,7	0,0	0,0
7	2,3	-33,6	0,0	0,0
9	0,4	100,6	0,0	0,0
11	0,4	139,0	0,0	0,0
13	0,3	187,0	0,0	0,0
15	0,1	227,4	0,0	0,0
DHT(%)	7,1		0,0	

(a) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente em fase)



h	V(%)	Φ°	I(%)	Φ°
1	100,0	167,6	100,0	-46,7
3	0,4	-44,9	0,0	0,0
5	6,7	22,7	0,0	0,0
7	2,3	-33,6	0,0	0,0
9	0,4	100,6	0,0	0,0
11	0,4	139,0	0,0	0,0
13	0,3	187,0	0,0	0,0
15	0,1	227,4	0,0	0,0
DHT(%)	7,1		0,0	

(b) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente atrasada)

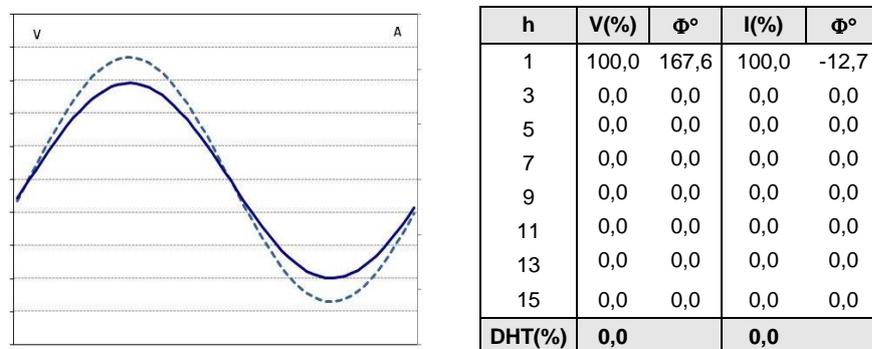


(c) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente adiantada)

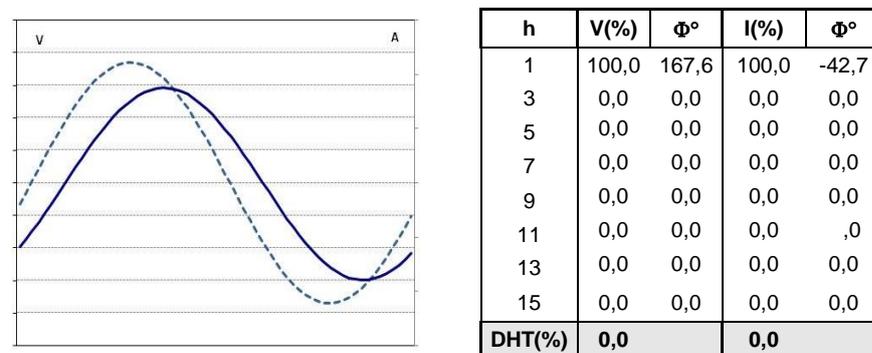
Fonte: Próprio Autor

As formas de onda adotadas no Grupo 3, são ilustradas na Figura 72. Este grupo é composto pelo padrão puramente senoidal tanto para as tensões como para as correntes. No contexto deste trabalho este grupo representa um referencial operacional para os RT's em condições ideais, as quais, normalmente, são admitidas como premissas nos procedimentos de projeto e ajustes dos sistemas de controle por parte dos fabricantes e usuários.

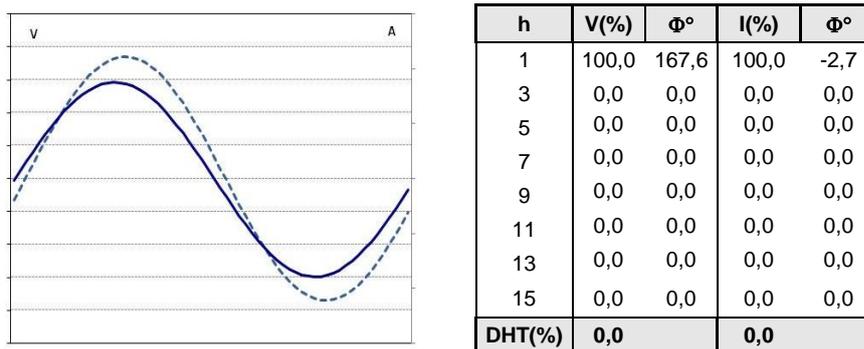
Figura 72 - Formas de onda para excitação dos circuitos de corrente e tensão (Grupo 3)



(a) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente em fase)



(b) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente atrasada)

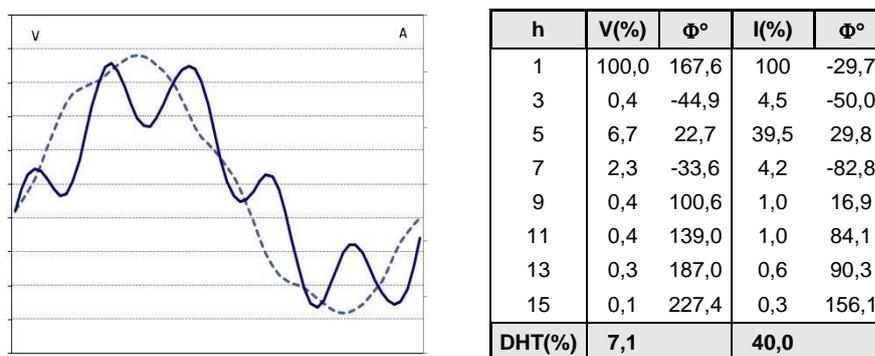


(c) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente adiantada)

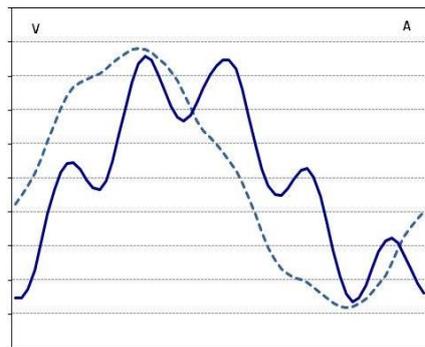
Fonte: Próprio Autor

Diante das suspeitas de operação indevida em situações operacionais com altas distorções harmônicas de corrente, criou-se um quarto grupo de formas de onda, onde as distorções harmônicas de tensão seguem àquelas estabelecidas no grupo 1, impondo-se agora um aumento de 65% sobre as taxas de distorções harmônicas das correntes. Com este grupo, denominado Grupo 4, tem-se por objetivo investigar o comportamento do sistema de medição do circuito de controle, no que se refere particularmente à determinação dos ângulos de fase das correntes. Considerando-se a equação (38) utilizada para a emulação da queda de tensão no circuito de controle, vislumbra-se por meio da análise dos resultados avaliar o desempenho do método empregado na determinação dos ângulos de fase da corrente, quando da ocorrência de mais de três cruzamentos por zero em um ciclo da forma de onda da corrente. As formas de onda adotadas no Grupo 4 são ilustradas na Figura 73.

Figura 73 - Formas de onda para excitação dos circuitos de corrente e tensão (Grupo 4)

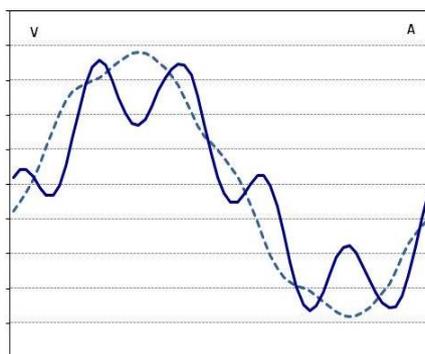


(a) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente em fase)



(b) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente atrasada)

h	V(%)	Φ°	I(%)	Φ°
1	100,0	167,6	100,0	-59,7
3	0,4	-44,9	4,5	-140,0
5	6,7	22,7	39,5	-120,2
7	2,3	-33,6	4,2	-292,8
9	0,4	100,6	1,0	-253,1
11	0,4	139,0	1,0	-245,9
13	0,3	187,0	0,6	-299,7
15	0,1	227,4	0,3	-293,9
DHT(%)	7,1		40,0	



(c) Sinais originais e conteúdo harmônico (corrente adiantada)

h	V(%)	Φ°	I(%)	Φ°
1	100,0	167,6	100,0	-19,7
3	0,4	-44,9	4,5	-20,0
5	6,7	22,7	39,5	79,8
7	2,3	-33,6	4,2	-12,8
9	0,4	100,6	1,0	106,9
11	0,4	139,0	1,0	194,1
13	0,3	187,0	0,6	220,3
15	0,1	227,4	0,3	306,1
DHT(%)	7,1		40,0	

Fonte: Próprio Autor

Nas análises experimentais que se seguem, adotou-se o mesmo procedimento descrito em itens anteriores, porém, neste caso, foram fixados os padrões de distorções harmônicas previstas nos diferentes grupos de formas de onda, por meio da fonte de alimentação programada. O valor RMS da tensão é mantido constante na entrada no circuito de controle e, simultaneamente, o valor RMS da corrente é alterado sistematicamente até que os sinalizadores de alteração de tap's dos reguladores “ABAIXAR” ou “ELEVAR” sejam acionados. Nestas condições são registrados os diferentes limiares de corrente, para as diferentes condições operacionais investigadas.

Uma vez identificados os limiares de atuação para as condições operacionais relacionadas aos Grupos 1, 2 e 4, estas são comparadas com os respectivos limiares de correntes obtidos para o Grupo 3 (condições ideais), determinando-se suas variações em relação ao mesmo.

Os resultados referentes ao comportamento do sistema de controle do regulador de tensão RT-01 são ilustrados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados comparativos para o regulador de tensão RT-01

LIMIARES DE ATUAÇÃO	GRUPO 1		GRUPO 2		GRUPO 3		GRUPO 4	
	Ireg(A)	Fluxo	Ireg(A)	Fluxo	Ireg(A)	Fluxo	Ireg(A)	Fluxo
ABAIXAR (corrente em fase)	30,7	DIR	29,7	DIR	31,8	DIR	39,1	DIR
ELEVAR (corrente em fase)	60,1	DIR	56,3	DIR	60,8	DIR	75	DIR
ELEVAR (corrente atrasada)	46,1	DIR	45,7	DIR	46,2	DIR	>130	INV
ELEVAR (corrente adiantada)	71,3	DIR	64,5	DIR	71,5	DIR	112,2	DIR

Fonte: Próprio Autor

Através da Tabela 21 pode-se observar um comportamento adequado do sistema de controle nos dois limiares para corrente em fase, ou seja, considerando apenas o efeito de *dvr*, para os Grupos 1, 2 e 3. O desvio máximo em relação ao Grupo 3 (condição senoidal) foi de 7,4%. Este percentual não representa nenhuma alteração de tap adicional, considerando-se que os limites discretos de atuação do comutador de tap's são de $\pm 0,625\%$. Entretanto o desvio observado para formas de onda do Grupo 4 foi relativamente elevado, 23%, o que pode representar um erro de atuação de pelo menos um tap na condição operacional "ELEVAR".

Para a condição operacional com corrente atrasada registrou-se também uma condição operacional satisfatória do sistema de controle nas condições estabelecidas para os Grupos 1, 2 e 3. Neste caso o desvio máximo observado foi de 1,1%, bem abaixo do limiar de alteração adicional de tap's. Por outro lado, identificou-se uma ação totalmente equivocada do sistema de controle para os padrões de formas de onda impostas no Grupo 4, particularmente na condição operacional "ELEVAR". Neste caso, o indicador de fluxo reverso foi acionado e a corrente de limiar ficou acima dos limites nominais do TC do regulador (130A) sendo, portanto, impossível prever através deste experimento, a operação em regime permanente do regulador.

Na condição de corrente adiantada observou-se um desvio de no máximo 9,8% entre os resultados obtidos para os Grupos 1, 2 e 3, também considerado aceitável, pois assim como nos casos anteriores não provoca nenhuma alteração adicional de tap. Entretanto, novamente foi possível constatar a ação equivocada do circuito de controle para os padrões do Grupo 4. Para a condição operacional de “ELEVAR”, embora o indicador tenha retornado a condição de fluxo direto, o valor de limiar da corrente ficou substancialmente alterado, com desvio de 57%, o que deve provocar nesta condição operacionais desvios de no mínimo quatro tap’s com relação ao padrão representado pelo Grupo 3.

O resumo dos ensaios realizados no sistema de controle do regulador RT-02, é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados comparativos para o regulador de tensão RT-02

LIMIARES DE ATUAÇÃO	GRUPO 1		GRUPO 2		GRUPO 3		GRUPO 4	
	Ireg(A)	Fluxo	Ireg(A)	Fluxo	Ireg(A)	Fluxo	Ireg(A)	Fluxo
ABAIXAR (corrente em fase)	27	DIR	30	DIR	31	DIR	51	DIR
ELEVAR (corrente em fase)	51	DIR	60	DIR	59	DIR	97	DIR
ELEVAR (corrente atrasada)	45	DIR	46	DIR	45	DIR	46	DIR
ELEVAR (corrente adiantada)	74	DIR	72	DIR	72	DIR	114	DIR

Fonte: Próprio Autor

Os resultados dos ensaios realizados com o regulador RT-02 mostram um comportamento semelhante ao RT-01. Para as condições operacionais impostas nos padrões dos Grupos 1, 2 e 3, não foram observados desvios expressivos, entretanto, foram registrados valores máximos superiores aqueles observados no ensaio do regulador RT-01 de cerca de 14% para a corrente de limiar.

Para os padrões de formas de ondas do Grupo 4, os resultados são tão comprometedores quanto aqueles observados nos ensaios do regulador RT-01. O regulador RT-02, mesmo operando com correntes em fase com a tensão apresentou desvios superiores a 64%. Não foram observados desvios na condição de corrente atrasada e tampouco a indicação de fluxo reverso. Considerando, entretanto, os resultados anteriores

com erros de até 64%, é razoável admitir que este caso específico se trata apenas de uma condição operacional particular. Para corrente adiantada, novamente observa-se uma substancial discrepância de 58%.

6.6 INFLUÊNCIA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM REGIME PERMANENTE

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos em testes envolvendo a identificação da posição final dos tap's em regime permanente, quando se impõe correntes com elevado conteúdo harmônico no circuito de controle e acima dos limiares de atuação previamente identificados, mantendo-se a tensão idealmente senoidal.

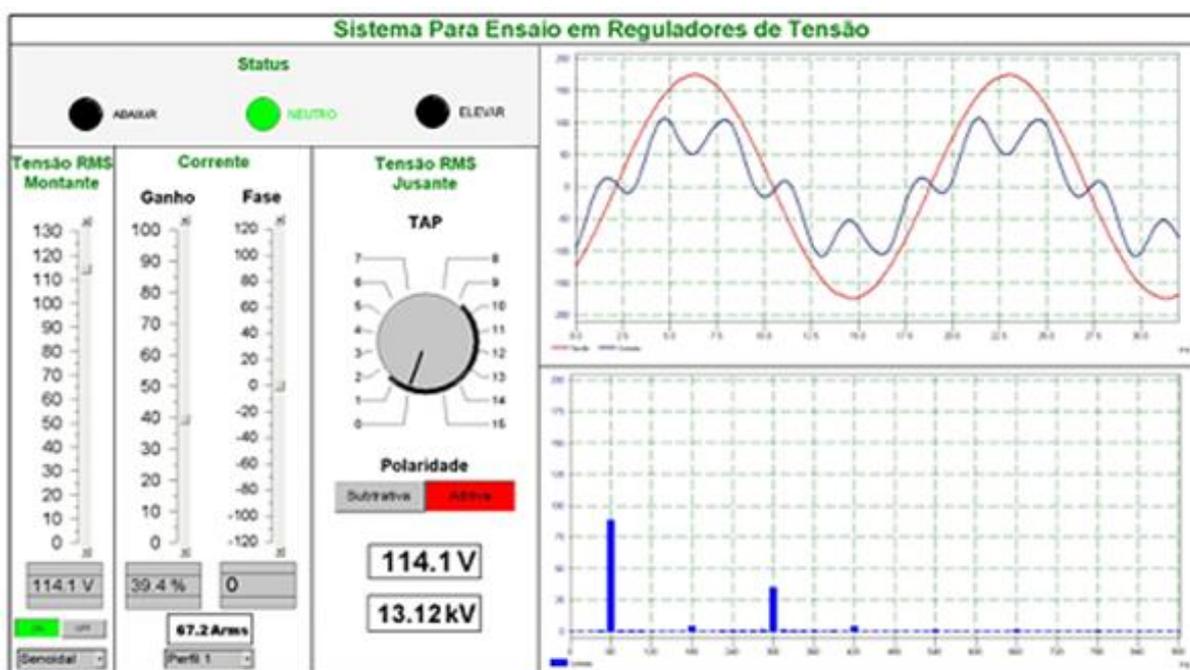
Este procedimento foi adotado visando-se dois objetivos principais: obter resultados experimentais frente a condições operacionais mais frequentes nas redes de distribuição de energia, quais sejam, tensões com distorções harmônicas desprezíveis e também, através de novos ensaios nestas condições operacionais, complementar os resultados obtidos anteriormente, os quais foram realizados para um alto nível de distorção harmônica de tensão, no caso, 7,1%.

Como visto anteriormente, para qualquer corrente acima do limiar de atuação, já considerando a largura de faixa ajustada e as limitações impostas pelo ajuste de tempo de retardo, o sistema de controle deve enviar comandos para elevação ou redução de tap's. Desta forma, para efetiva confirmação do atuador de mudança de tap's, as correntes impostas são mantidas por um tempo superior ao tempo de retardo, o qual foi previamente ajustado para 5 segundos.

O procedimento experimental consiste basicamente de duas etapas interativas. A primeira refere-se à observação do estado do sinalizador de alteração de tap's no painel do regulador, indicando que o atuador deverá ser acionado seja para condição de “ABAIXAR”

ou “ELEVAR”, mediante a corrente imposta. Uma vez confirmado o estado do sinalizador, um tap é acionado, o que representa efetivamente a alteração do nível de tensão na saída do RT em $\pm 0,625\%$. Para efeito de análise apenas do desempenho do circuito de controle, esta alteração da tensão é realizada manualmente, ativando-se uma posição no controlador de tap's por meio da uma interface de controle do regulador desenvolvida neste trabalho, conforme mostrado na Figura 74. Os tap's são assim acionados sistematicamente até que, em regime permanente, o indicador de atuação seja desligado.

Figura 74 - Interface de controle do experimento



Fonte: Próprio Autor

Embora se reconheça que, para o sistema elétrico real, cada alteração de tap tem influência, no mínimo, sobre os valores RMS da corrente imposta, tal efeito não foi reproduzido nestes ensaios. As razões para esta simplificação se apoiam no fato de que a forma de variação da corrente frente às alterações de tap's são naturalmente dependentes do tipo da carga, ou composição das cargas, a jusante do RT. Assim, a expansão destes experimentos para atender estas particularidades envolveria necessariamente um panorama

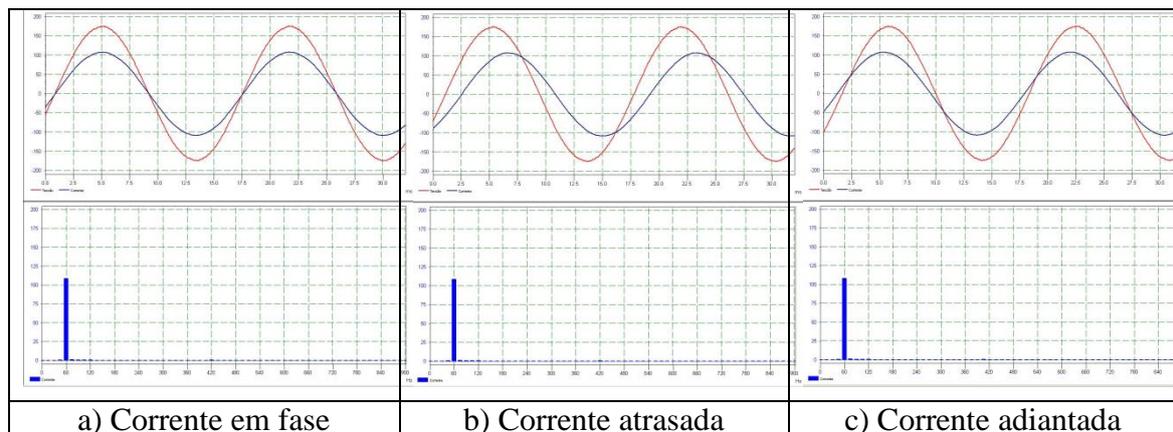
experimental muito mais abrangente contemplando diferentes tipos de cargas compostas, com diferentes predominâncias, pautadas por características tradicionalmente representadas como impedância constante ou como potência constante. Por outro lado, ainda mais complexa seria a inclusão das características não lineares do conjunto de cargas, responsáveis pelas alterações na composição harmônica da corrente dependentes da tensão, o que poderia alterar substancialmente as particularidades e propósitos específicos desta investigação e, notadamente, a manutenção dos padrões de forma de onda previamente fixadas.

Diante das considerações expostas, os experimentos foram realizados dentro das limitações citadas, ou seja, mantendo-se corrente constante até que o número de tap's necessários em regime permanente final seja atingido, ou ainda, que a tensão emulada pelo circuito de controle para o ponto remoto fique dentro dos limites operacionais ajustados.

Para todos os casos investigados admitiu-se três condições operacionais distintas: corrente em fase com a tensão, corrente atrasada e corrente adiantada. Em cada um dos casos citados foram impostas correntes com valores eficazes abaixo do limite para "ABAIXAR" tap, no valor de 20A, com o objetivo de avaliar o número de tap's acionados. Por outro lado, para avaliação do número de tap's em regime permanente na condição de "ELEVAR" tap adotou-se um valor RMS de 120A.

6.6.1 Condição de operação sob tensão e corrente senoidais

As condições operacionais ideais investigadas (THD%=0), tomadas como referência comparativa, são apresentadas simplificadaamente na Figura 75.

Figura 75 - Tensão e corrente senoidais - Caso Base

Fonte: Próprio Autor

Nas Tabelas 23 e 24 são apresentados os resultados experimentais obtidos para as duas amostras de painéis de regulador de tensão ensaiadas, RT-01 e RT-02, respectivamente.

Tabela 23 - Resultados experimentais para o RT-01 nas condições ilustradas da Figura 75

REGULADOR RT-01	LIMIARES	FONTE		REGULADOR		ERRO DE MEDIDA		NÚMERO DE TAPS		VARIAÇÃO
		V(V)	I(A)	V _m (V)	I _m (A)	ε% (V)	ε% (I)	I=20A	I=120A	ΔV (%)
Corrente em fase	Abaixar	114,1	37,4	114,6	38,1	0,44	1,87	2		-1,250
	THD = 0%	Elevar	114,1	65,7	114,6	66,5	0,44	1,22		6
Corrente atrasada	Abaixar	114,1	28,3	114,6	28,9	0,44	2,12	2		-1,250
	THD = 0%	Elevar	114,1	50,1	114,6	51,1	0,44	2		10
Corrente adiantada	Abaixar	114,1	44,7	114,6	45,5	0,44	1,79	3		-1,875
	THD = 0%	Elevar	114,1	80,1	114,6	80,7	0,44	0,75		4

Fonte: Próprio Autor

Tabela 24 - Resultados experimentais para o RT-02 nas condições ilustradas da Figura 75

REGULADOR RT-02	LIMIARES	FONTE		REGULADOR		ERRO DE MEDIDA		NÚMERO DE TAPS		VARIAÇÃO
		V(V)	I(A)	V _m (V)	I _m (A)	ε% (V)	ε% (I)	I=20A	I=120A	ΔV (%)
Corrente em fase	Abaixar	114,1	31,9	114,1	31	0	2,82	2		-1,250
	THD = 0%	Elevar	114,1	61,4	114,1	60	0	2,28		6
Corrente atrasada	Abaixar	114,1	24,9	114,1	24	0	3,61	1		-0,625
	THD = 0%	Elevar	114,1	46,8	114,1	46	0	1,71		10
Corrente adiantada	Abaixar	114,1	38,8	114,1	38	0	2,06	2		-1,250
	THD = 0%	Elevar	114,1	74,5	114,1	73	0	2,01		4

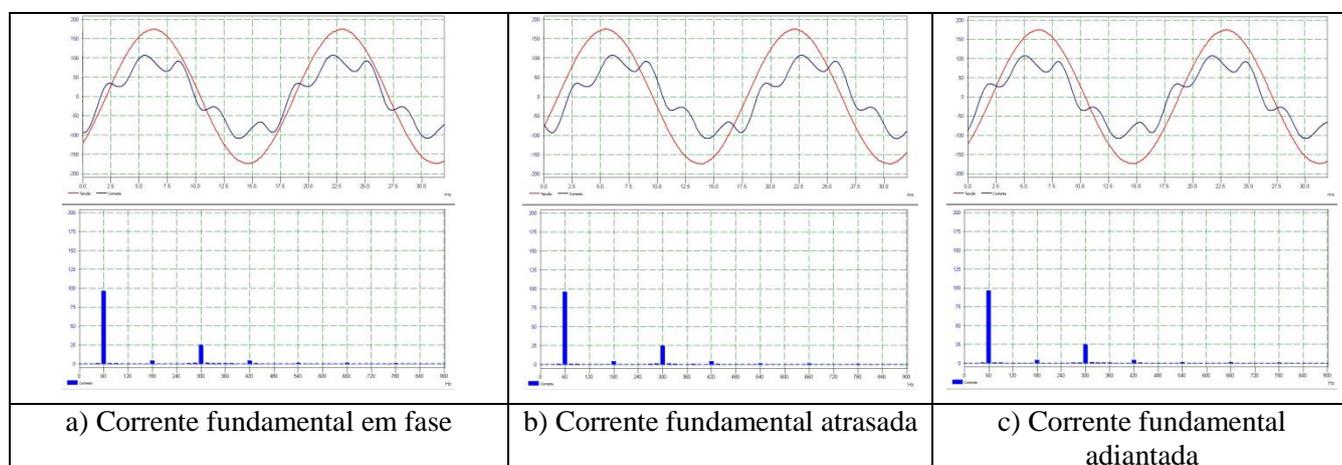
Fonte: Próprio Autor

Observa-se que, apesar das diferenças entre os erros percentuais na medida dos parâmetros de controle, tensões e correntes, os resultados finais relacionados a atuação dos tap's nos reguladores RT-01 e RT-02 foram compatíveis e convergiram para a maioria dos casos. Verifica-se apenas a variação de uma posição de tap para o caso de correntes atrasada e adiantada na condição de corrente abaixo do limiar de atuação de “ABAIXAR”.

6.6.2 Condição de operação sob tensão senoidal e corrente com THD=26,3%

Na Figura 76, as condições operacionais investigadas referem-se a uma corrente com taxa de distorção harmônica de 26,3%. Para a composição dos três cenários de defasagem da corrente admitiu-se os deslocamentos angulares impostos considerando-se as componentes fundamentais dos sinais como referências.

Figura 76 - Tensão senoidal e corrente com THD=26,3%



Fonte: Próprio Autor

Nas Tabelas 25 e 26 pode-se observar sensíveis discrepâncias entre as posições finais de tap's para os reguladores RT-01 e RT-02.

Tabela 25 - Resultados experimentais para o RT-01 nas condições ilustradas da Figura 76

REGULADOR RT-01	LIMIARES	FONTE		REGULADOR		ERRO DE MEDIDA		NÚMERO DE TAPS		VARIAÇÃO
		V(V)	I(A)	V _m (V)	I _m (A)	ε% (V)	ε% (I)	I=20A	I=120A	ΔV (%)
Corrente em fase THD = 26,3%	Abaixar	114,1	46,1	114,6	46,9	0,44	1,74	3		-1,875
	Elevar	114,1	81,3	114,6	82,1	0,44	0,98			4
Corrente atrasada THD = 26,3%	Abaixar	114,1	30,9	114,6	31,5	0,44	1,94	2		-1,250
	Elevar	114,1	53,7	114,6	54,7	0,44	1,86			9
Corrente adiantada THD = 26,3%	Abaixar	114,1	60,3	114,6	61,3	0,44	1,66	3		-1,875
	Elevar	114,1	108,7	114,6	108,8	0,44	0,09			1

Fonte: Próprio Autor

Tabela 26 - Resultados experimentais para o RT-02 nas condições ilustradas da Figura 76

REGULADOR RT-02	LIMIARES	FONTE		REGULADOR		ERRO DE MEDIDA		NUMERO DE TAPS		VARIAÇÃO
		V(V)	I(A)	V _m (V)	I _m (A)	ε% (V)	ε% (I)	I=20A	I=120A	ΔV (%)
Corrente em fase THD = 26,3%	Abaixar	114,1	44	114,1	43	0	2,27	2		-1,250
	Elevar	114,1	82,1	114,1	81	0	1,34			3
Corrente atrasada THD = 26,3%	Abaixar	114,1	24,8	114,1	24	0	3,23	1		-0,625
	Elevar	114,1	46,9	114,1	46	0	1,92			10
Corrente adiantada THD = 26,3%	Abaixar	114,1	48,7	114,1	48	0	1,44	2		-1,250
	Elevar	114,1	92	114,1	90	0	2,17			2

Fonte: Próprio Autor

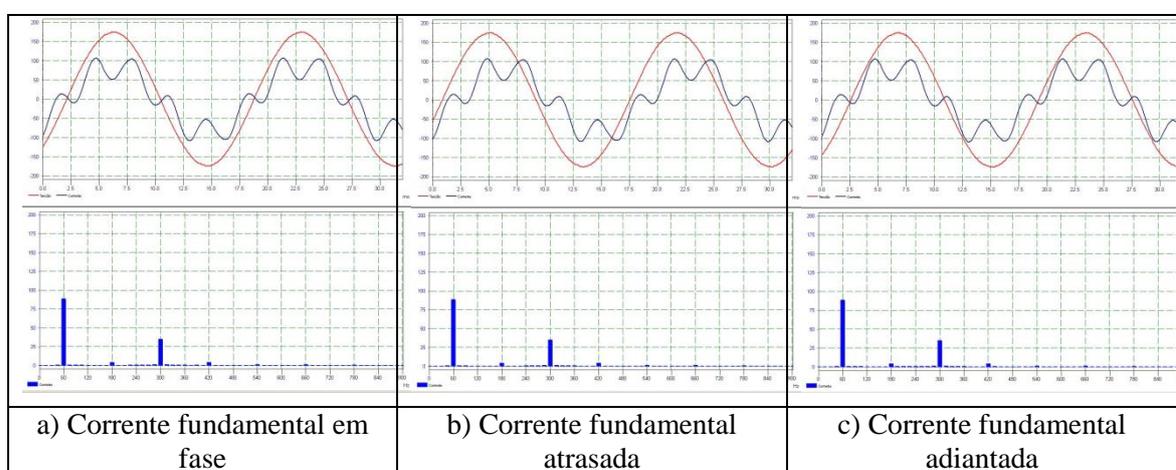
Comparando-se os resultados obtidos no RT-01 com relação ao seu comportamento em condições apresentadas na Tabela 23, constata-se um erro de até três tap's, na condição de "ELEVAR" para corrente adiantada. Tal ocorrência está vinculada às discrepâncias entre as correntes de limiares de atuação no circuito de controle do regulador, quais sejam, 80,7mA para THD=0% e 108mA para THD=26,3%. Neste caso, uma vez que a largura de faixa já foi considerada, provavelmente implicaria em um regime de operação em subtensão no ponto de tensão controlada quando THD=26,3%.

Os resultados comparativos para o RT-02 em relação ao respectivo caso de referência ilustrado na Tabela 24 também apresentam a discrepância de até três tap's. Entretanto neste caso a ocorrência se deu para corrente em fase na condição de "ELEVAR", o que, pelas razões já expostas anteriormente, poderia levar a rede principal a operar em condições de subtensão no ponto de tensão controlada.

6.6.3 Condição de operação sob tensão senoidal e corrente com THD=31,7%

As condições operacionais investigadas para a situação de alta distorção harmônica da corrente, notadamente THD=31,7%, são apresentadas na Figura 77. A composição dos cenários de defasagem angular segue os procedimentos descritos para o caso ilustrado na Figura 76 e é mostrada na Figura 77.

Figura 77 - Tensão senoidal e corrente com THD=31,7%



Fonte: Próprio Autor

Os resultados obtidos para esta condição operacional são ilustrados nas Tabelas 27 e 28, onde comparativamente se observa comportamentos totalmente conflitantes.

Tabela 27 - Resultados experimentais para o RT-01 nas condições ilustradas da Figura 77

REGULADOR RT-01	LIMIARES	FONTE		REGULADOR		ERRO DE MEDIDA		NUMERO DE TAPS		VARIAÇÃO
		V(V)	I(A)	Vm(V)	Im(A)	$\epsilon\%$ (V)	$\epsilon\%$ (I)	I=20A	I=120A	ΔV (%)
Corrente em fase	Abaixar	114,1	61,1	114,6	62,1	0,44	1,64	3		-1,875
	Elevar	114,1	109,7	114,6	109,5	0,44	-0,18		1	+0,625
Corrente atrasada	Abaixar	114,1	-	114,6	-	0,44	-	-		-
	Elevar	114,1	-	114,6	-	0,44	-		-	-
Corrente adiantada	Abaixar	114,1	96,5	114,6	96,7	0,44	0,21	4		+2,500
	Elevar	114,1	-	114,6	-	0,44	-		-	-

Fonte: Próprio Autor

Tabela 28 - Resultados experimentais para o RT-02 nas condições ilustradas da Figura 77

REGULADOR RT-02	LIMIARES	FONTE		REGULADOR		ERRO DE MEDIDA		NUMERO DE TAPS		VARIAÇÃO
		V(V)	I(A)	V _m (V)	I _m (A)	ε% (V)	ε% (I)	I=20A	I=120A	ΔV (%)
Corrente em fase	Abaixar	114,1	54,4	114,1	53	0	2,57	2		-1,250
THD = 31,7%	Elevar	114,1	102,1	114,1	101	0	1,08		2	+1,250
Corrente atrasada	Abaixar	114,1	24,8	114,1	24	0	3,23	1		-0,625
THD = 31,7%	Elevar	114,1	46,7	114,1	46	0	1,5		10	+6,250
Corrente adiantada	Abaixar	114,1	110,9	114,1	109	0	1,71	3		-1,875
THD = 31,7%	Elevar	114,1	112,4	114,1	111	0	1,25		1	+0,625

Fonte: Próprio Autor

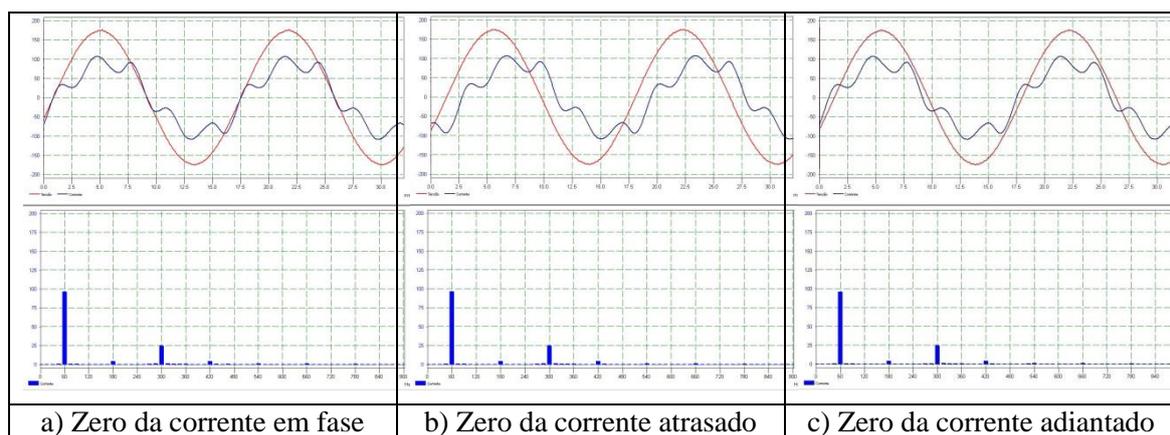
Para o RT-01, os resultados obtidos nesta condição operacional demonstram total discrepância com relação a condição de referência apresentada na Tabela 23. Estas discrepâncias são evidentes na comparação entre o número de tap's para corrente em fase, na condição "ELEVAR" e, sobretudo, para as demais condições de defasagem da corrente onde os limiares de atuação tampouco foram identificados pelo circuito de controle. Deste modo, pode-se concluir que, particularmente, para a condição de corrente atrasada o regulador fica praticamente inoperante, o que, certamente, compromete totalmente o controle da regulação de tensão no ponto de remoto.

O RT-02 também apresenta resultados discrepantes quando comparados com a sua referência operacional apresentada na Tabela 24. Verifica-se desvios de até quatro tap's para corrente em fase na condição de "ELEVAR", e três tap's para corrente adiantada também na condição "ELEVAR", podendo, portanto, em ambos os casos, impactar a qualidade da regulação de tensão como descrito anteriormente. Entretanto, apesar dos desvios operacionais observados, o equipamento permanece em operação, ainda que em condições precárias que poderiam resultar em subtensões no ponto de tensão regulada.

6.6.4 Condição de operação sob tensão senoidal, corrente com THD=26,3% e efeitos da defasagem angular da corrente

Com o objetivo de observar as particularidades relacionadas à detecção da defasagem angular da corrente distorcida pelo circuito de controle, retomou-se para um novo ensaio, conforme corrente ilustrada na Figura 76 e com THD de 26,3%. Neste caso, entretanto, admitiu-se o mesmo cenário para a composição das defasagens angulares, atribuindo-se agora os ângulos de fase relativos ao zero natural da corrente distorcida, como ilustrado na Figura 78.

Figura 78 - Tensão senoidal, corrente com THD=26,3% com zero da corrente alterado



Fonte: Próprio Autor

Apresenta-se nas Tabelas 29 e 30 os resultados para os reguladores RT-01 e RT-02, respectivamente.

Tabela 29 - Resultados experimentais para o RT-01 nas condições ilustradas da Figura 78

REGULADOR RT-01	LIMIARES	FONTE		REGULADOR		ERRO DE MEDIDA		NÚMERO DE TAPS		VARIÇÃO ΔV (%)
		V(V)	I(A)	V _m (V)	I _m (A)	$\epsilon\%$ (V)	$\epsilon\%$ (I)	I=20A	I=120A	
Corrente em fase THD = 26,3%	Abaixar	114,1	37,5	114,6	38,4	0,44	2,4	3		-1,875
	Elevar	114,1	67,3	114,6	68,2	0,44	1,34		6	+3,750
Corrente atrasada THD = 26,3%	Abaixar	114,1	29,0	114,6	29,7	0,44	2,41	2		-1,250
	Elevar	114,1	50,6	114,6	51,8	0,44	2,37		10	+6,250
Corrente adiantada THD = 26,3%	Abaixar	114,1	44,9	114,6	45,8	0,44	2,00	3		-1,875
	Elevar	114,1	82,5	114,6	83,3	0,44	0,97		4	+2,500

Fonte: Próprio Autor

Tabela 30 - Resultados experimentais para o RT-02 nas condições ilustradas da Figura 78

REGULADOR RT-02	LIMIARES	FONTE		REGULADOR		ERRO DE MEDIDA		NUMERO DE TAPS		VARIAÇÃO
		V(V)	I(A)	V _m (V)	I _m (A)	ε% (V)	ε% (I)	I=20A	I=120A	ΔV (%)
Corrente em fase THD = 26,3%	Abaixar	114,1	42,5	114,1	41	0	-3,53	2		-1,250
	Elevar	114,1	86,3	114,1	85	0	-1,51		3	+1,875
Corrente atrasada THD = 26,3%	Abaixar	114,1	23,8	114,1	23	0	-3,36	1		-0,625
	Elevar	114,1	46,1	114,1	45	0	-2,39		10	+6,250
Corrente adiantada THD = 26,3%	Abaixar	114,1	42,1	114,1	41	0	-2,61	2		-1,250
	Elevar	114,1	81,7	114,1	80	0	-2,08		3	+1,875

Fonte: Próprio Autor

Nestas condições operacionais, assim como nos casos anteriores, as discrepâncias entre as posições finais dos tap's novamente foram observadas. Destaca-se que, para o caso das correntes em fase observa-se uma discrepância mais acentuada para a condição de "ELEVAR", chegando a três tap's de desvio. No caso anterior e com a mesma THD de corrente, as diferenças observadas limitaram-se à 1 tap, para qualquer condição de defasagem da corrente, conforme Tabelas 25 e 26.

Neste caso, o resultado comparativo do RT-01 com sua condição de referência, ilustrada na Tabela 23, revela uma boa aderência para praticamente todas as situações investigadas. Destaca-se apenas desvio de um tap para corrente em fase na condição de "ABAIXAR". Este desvio, praticamente não compromete o desempenho de regulação de tensão no ponto remoto, uma vez que a variação de tensão produzida pela ação de apenas um tap pode ainda resultar em um nível de tensão do circuito principal dentro da faixa de regulação admissível.

A discrepância entre os resultados obtidos para esta condição operacional e aquela reproduzida na Tabela 25, ambos com a mesma taxa de distorção THD 26,3%, porém com diferentes formas de deslocamento dos zeros naturais da corrente, implicam em diferentes resultados práticos, com desvios de até três tap's. Esta ocorrência comprova de forma inequívoca a sensível influência do sistema de detecção de defasagem angular sobre o comportamento do compensador de queda na linha (LDC).

6.7 CONCLUSÕES

Os estudos realizados em laboratório comprovaram que a operação de reguladores de tensão em redes de distribuição com elevados níveis de distorção harmônica de corrente pode apresentar comportamentos totalmente indesejados e intempestivos. De acordo com a análise realizada, quando o fluxo harmônico é composto por distorções de corrente que resultem em formas de ondas com três cruzamentos por zero em um ciclo da forma de onda da corrente, o resultado pode ser incongruente, levando o painel de controle do regulador a solicitar posições de tap totalmente equivocadas em regime permanente.

Através das simulações realizadas neste capítulo, constatou-se também que as preocupações já existentes nas concessionárias, com respeito à vulnerabilidade dos sistemas digitais de controle para RT's, operando em redes com distorções harmônicas elevadas, são procedentes, resultando em um alerta adicional para uma maior observação a estes fenômenos e aos equipamentos que nelas deverão operar.

7 CONCLUSÃO GERAL

A otimização da QEE em sistemas de distribuição de energia é um processo fundamental para que todos os clientes usufruam de uma energia de boa qualidade e ao mesmo tempo, configura um grande desafio para as concessionárias de distribuição de energia.

O cenário nacional quanto a operação dos sistemas de distribuição, sugere um alto padrão de regulação e níveis de tensão extremamente restritos, obrigando o investimento de recursos financeiros de grande monta e abrangentes em todo o setor de distribuição de energia. Aliado a isso, a compensação a consumidores por prestação de serviço inadequado gera despesas extras, e, além disso, impede o desenvolvimento de cidades e regiões que são atendidas por tensões fora dos limites estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST.

Outro fator que influencia a qualidade do serviço prestado é a distorção harmônica. Nos últimos anos, com a crescente utilização da eletrônica de potência nos mais variados setores da indústria e também em consumidores residenciais nos circuitos de BT, o nível de distorção harmônica de corrente registrado em todas as classes de tensão vem sofrendo um aumento bastante significativo.

No que concerne a adequação dos níveis de tensão, o regulador de tensão exerce um papel fundamental tanto para consumidores em geral, quanto às concessionárias de energia. No tange aos consumidores, como vimos anteriormente, o RT é o principal equipamento empregado para correção dos níveis da tensão de fornecimento. Quanto às concessionárias, o equipamento é de fácil utilização e robusto, permitindo a regulação de tensão a custos reduzidos, uma vez que a instalação de um conjunto trifásico custa em torno de U\$\$ 35Mil, custo bem inferior se formos considerar o valor despendido em obras para

recondutoramento de alimentadores ou mesmo a construção de novos alimentadores e/ou novas subestações de distribuição de energia.

Quanto ao tipo de conexão dos reguladores monofásicos em bancos trifásicos, os mesmos podem ser conectados em Estrela-Aterrada, Delta-Aberto e Delta-Fechado. Normalmente, a conexão Estrela-Aterrada é utilizada em sistemas de 23,1kV e a conexão Delta-Fechado em redes de 13,8kV. A conexão Delta-Aberto, possui a particularidade de regular a tensão de linha das 3 fases, ou seja, regula a tensão medida entre as fases. A fase sem regulador instalado não possui regulação para a tensão de fase, medida entre a fase e o neutro, e, portanto, não possui regulação da tensão. Esta particularidade inviabiliza totalmente a instalação dos RT's em Delta-Aberto nas distribuidoras que possuem extensos ramais monofásicos, pois a sua utilização poderia provocar severas condições de queda de tensão nos ramais monofásicos conectados a fase sem regulação.

Dentre as técnicas de ajustes existentes para o regulador de tensão, destacamos a técnica de Compensação de Queda na Linha, ou *LDC - Line Drop Compensation*. Esta técnica possibilita obter tensão mais próxima dos níveis estabelecidos pelo PRODIST em um ponto distante do RT, ou seja, o ponto de regulação está ao longo da linha e não no ponto de instalação do RT. O principal benefício desta técnica consiste no aumento máximo da tensão para períodos de carga máxima, resultando num menor número de comutações e desta forma obtendo-se variações menores de tensão nos consumidores durante o dia. Apesar deste conjunto de benefícios, convém ressaltar que a maioria dos reguladores em operação nas diversas concessionárias brasileiras é ajustada sem considerar o compensador de queda de linha, pois este método de parametrização, por ser mais difícil de ser implementado, é bastante suscetível a erros, sobretudo em redes com altos níveis de distorções harmônicas. Outros fatores que corroboram para a não utilização deste método é a possibilidade de sobretensões de grande amplitude nos clientes instalados nas

proximidades do RT e também a dificuldade em se realizar manobras de cargas para trechos atendidos pelo regulador, uma vez que estas podem alterar o traçado da rede, fazendo com que o ponto de regulação simulado no controle seja alterado.

No que se refere a harmônicas, apesar de uma regulamentação nacional ainda um tanto omissa sobre a aplicação indicadores e de penalidades para clientes com altas taxas de distorções harmônicas, seja ela de tensão ou corrente, as concessionárias de distribuição de energia do Brasil buscam em normas e recomendações internacionais preencher esta lacuna, mesmo que sem a aplicação de multas. Até o momento, esta ação tem proporcionado bons resultados, uma vez que as recomendações da IEEE-519 atribuem responsabilidades não somente às concessionárias, mas também aos clientes que devem corrigir suas distorções de corrente conforme critérios específicos. Embora isto traga, em um primeiro momento, um desgaste natural da relação cliente e concessionaria, a médio prazo, os clientes, quando realizam ações de mitigação de harmônicas, percebem melhorias em sua planta industrial, tanto no quesito de operação de equipamentos, diminuindo taxas de falhas e aumentando o rendimento, quanto de faturamento, com a diminuição de perdas elétricas e aumento de produção.

Inseridas nesta nova realidade de consumo, as concessionárias, não raramente, enfrentam situações que nunca haviam sido registradas e sem possibilidades de soluções imediatas com ações corriqueiras de operação. Estas ocorrências demandam um estudo mais elaborado, a começar por campanhas de medições, como no caso explanado no capítulo 5 e que motivou a elaboração deste estudo.

Conforme exposto no capítulo 6, os estudos realizados em laboratório comprovaram que a operação de reguladores de tensão em redes de distribuição com elevados níveis de distorção harmônica de corrente, especialmente de 5ª ordem, pode não ter o comportamento desejado. De acordo com a análise realizada, quando o fluxo harmônico é composto por

distorções de corrente que resultem em formas de ondas com três cruzamentos por zero em um ciclo da forma de onda da corrente, o resultado tende a ser incongruente, levando o painel de controle do regulador a solicitar posições de tap totalmente equivocadas em regime permanente.

Finalmente, a partir do que foi realizado neste trabalho, constatou-se que as preocupações já existentes nas concessionárias, com respeito à vulnerabilidade dos sistemas digitais de controle para RT's, operando em redes com distorções harmônicas elevadas, são procedentes, resultando em um alerta adicional para uma maior observação a estes fenômenos e aos equipamentos que nelas deverão operar.

8 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Apesar da expressiva contribuição deste trabalho no intuito de buscar a origem do problema da operação indevida dos reguladores de tensão em redes de distribuição de energia elétrica com elevados índices de distorção harmônica de corrente, inúmeras outras situações e outros equipamentos também podem ser objeto de análise. Neste contexto, a seguir apresentam-se propostas de continuidade para pesquisa sobre a operação de equipamentos em redes com elevados índices de distorção harmônica de corrente:

a) Avaliar a operação de reguladores de tensão com o ajuste do LDC desabilitado e operando em redes com até três equipamentos em série e com elevado conteúdo harmônico de corrente. Nota-se a relevância na realização deste estudo uma vez que a maioria dos reguladores de tensão operam com esta função desabilitada, conforme mencionado ao longo do trabalho;

b) Estender os testes de estudos de penetração harmônica e incluir a operação dos painéis dos Bancos de Capacitores, com ajustes automáticos e fixos. Deve-se incluir neste estudo a operação dos Bancos de Capacitores atuando em série com reguladores de tensão, em redes com conteúdo harmônico semelhantes aos estudados no presente trabalho;

c) Avaliar a realização de estudos de penetração harmônica sobre os equipamentos de proteção utilizados atualmente nos sistemas de distribuição de energia. A proposta deste estudo deve considerar relés e religadores eletromecânicos e digitais e ponderar sobre o nível de distorção harmônica de corrente que compromete o sistema de medição destes equipamentos, ocasionando operações indevidas;

d) Com o crescente incremento do número de clientes com geração distribuída, através de agentes micro e minigeradores, avaliar a influência deste fluxo bidirecional de

energia com conteúdo elevado de distorções harmônicas de corrente. O estudo deverá prever as influências da inversão de fluxo de um sistema com altos índices de distorção harmônica de corrente na operação dos painéis dos reguladores de tensão;

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA– ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional**. Brasília: ANEEL, 2016.

PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em:

<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf>.

Acessado em: 5 abr 2016.

BALTASAR, C. dos S. **Qualidade da energia no contexto da reestruturação do setor elétrico brasileiro**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia,

Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2007. Disponível em:

<<http://www.iee.usp.br/producao/2007/Teses/BALTAZAR.pdf>>. Acessado em: 12 maio

2016.

BATISTA, R. S. **Análise de falhas de um regulador de tensão com comutador eletrônico de tap's**. 2010. 96 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em

Engenharia Elétrica)– Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:

<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000809.pdf>>. Acessado em: 12

fev 2016.

BORDIM, J. R. G. **Instalação de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica para correção de fator de potência e regulação de tensão: projeto e**

simulação computacional. 2011. 82 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)– Faculdade de Engenharia, Escola de Engenharia de São

Carlos/Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em:

<<http://docplayer.com.br/13687039-Trabalho-de-conclusao-de-curso.html>>. Acessado em:

5 abr 2016.

CAPARÓ, J. L. C. **Modelagem de transformadores de distribuição para alocação em algoritmos de fluxo de potência trifásico**. 2005. 155 f. Dissertação (Mestrado)–

Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2005.

Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/148-dissertacao_jose_luis_choque_caparo.pdf>. Acessado em: 12 fev 2016.

CORRÊA, F. I. M. Estudo de um sistema de distribuição com enfoque na qualidade da energia elétrica. 2007. 89 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)– Faculdade de Engenharia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em:

<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-09042010-113918/publico/Correa_Felipe_Ivan_Malta.pdf>. Acessado em 15 mar 2016.

DA SILVA, L. C. E. Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa. 2008. 203 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2008. Disponível em:

<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/232-dissertacao_luiz_evangelista.pdf>. Acessado em: 12 fev 2016.

DE LIMA, D. de O. Modelação de redes de distribuição de energia elétrica com carregamento não linear, incluindo elementos de regulação e compensação. 2014. 187 f. Tese (Doutorado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2014. Disponível em:

<<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/124544/000836238.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acessado em: 10 jan 2016.

DE LIMA, D. de O.; CANESIN, C. A.; BURATTI, R. P.; OLIVEIRA, L. C. O. de; SOUZA, J. B. de. Operação de regulador de tensão em redes poluídas: análise de caso. **In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**, 9., 2011, Cuiabá. **Conferência...**Cuiabá: CBQEE, 2011. p. 1 – 6;

FELBER, L. A. Regulação de tensão em subestações de distribuição de energia elétrica. 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010. Disponível em:

<http://www.gqee.unifei.edu.br/arquivos_upload/mesdou/72/72.pdf>. Acessado em: 12 fev 2016.

FIGUEIREDO, A. C. **Análise de modelos para cargas não lineares no estudo trifásico de penetração harmônica**. 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/158-dissertacao_alfredo_arcarnjo_cruz_figueirero.pdf>. Acessado em: 15 mar 2016.

IEEE Std 519 - 2014, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, New York, 2014.

ISONI, M. **A moderna eficiência energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas**. Belo Horizonte: Engenparc Engenharia, 2015. Disponível em: <http://www.engenparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf>. Acessado em: 10 ago 2015.

INSTITUTO TÉCNICO DE BIRIGUI- ITB. **Equipamentos elétricos: manual do regulador de tensão monofásico RAV-2 com controlador CTR2**. São Paulo: Birigui, 2008.

MADRUGA, E. P. **Otimização de níveis de tensão nas redes de distribuição considerando a alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão**. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=4251>. Acessado em: 12 fev 2016.

MAURÍCIO, D. M. **Instalação de capacitores para redução das perdas em uma rede de distribuição de energia elétrica via algoritmos genéticos**. 2007. 56 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)– Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em:

<<http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2007/DOUGLAS%20MAURICIO.pdf>>.

Acessado em: 12 fev 2016.

PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Harmônicas nas instalações elétricas**: causas, efeitos e soluções. São Paulo: [s.n], 2001. 66 f. Disponível em:

<http://www3.fsa.br/energia/QEE%20E%20TECNOLOGIAS%20DE%20USO%20FINAL/ARQ_34.pdf>. Acessado em: 12 fev 2016.

RESENER, M. **Alocação e ajuste ótimo de reguladores de tensão em sistemas de distribuição**. 2008. 83 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)– Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2008. Disponível em:

<http://www.ece.ufrgs.br/~gmasp/publicacoes/projetos_diplomacao/2008_mariana.pdf>.

Acessado em: 15 mar 2016.

SZUVOVOVSKI, I. **Alocação de bancos de capacitores e reguladores de tensão em sistema de distribuição usando algoritmos genéricos e fluxo de potência ótimo**. 2008. 207 f. Dissertação (Mestrado)– Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em:

<<https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewjxmrmP5r7PAhVFgJAKHcZSChYQFgggMAA&url=http%3A%2F%2Facervodigital.ufpr.br%2Fbitstream%2Fhandle%2F1884%2F15658%2FDisserta%25C3%25A7%25C3%25A3o%2520-%2520Itamar%2520Szuvovivski.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usq=AFQjCNFpoLLaxhoP7b9ejuu9rZbZiBNmgg&cad=rja>>. Acessado em: 15 mar 2016;

TOSHIBA – LEADINH INNOVATION. **Controle para regulador de tensão monofásico TB-R1000**. Contagem: Toshiba do Brasil, 2011. 69 p. Disponível em:

<<http://www.toshiba-bhz.com.br/tic-bhz/downloads/EP-55166%20rev%201%20TB-R1000.pdf>>. Acessado em: 15 mar 2016.

TOSHIBA – LEADINH INNOVATION, **Manual de instruções para reguladores de tensão**. Contagem: Toshiba do Brasil, 2012. 57 p. Disponível em: <<http://www.toshiba->

bhaz.com.br/tic-bhz/downloads/EP-40021%20rev%203%20REGULADOR.pdf>. Acessado em: 12 fev 2016;