

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**COMUTADOR ELETRÔNICO DE *TAPS* APLICADO A
UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO
MONOFÁSICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Josemar de Oliveira Quevedo

Santa Maria, RS, Brasil

2014

COMUTADOR ELETRÔNICO DE *TAPS* APLICADO A UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO MONOFÁSICO

por

Josemar de Oliveira Quevedo

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Dr. Luciano Schuch

Coorientador: Prof. Dr. Cassiano Rech

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Quevedo, Josemar de Oliveira

Comutador eletrônico de *taps* aplicado a um transformador de distribuição Monofásico / por Josemar de Oliveira Quevedo. – Santa Maria, 2014.

192 p.; 30cm

Orientador: Luciano Schuch, Dr.

Coorientador: Cassiano Rech, Dr.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2014.

1. Engenharia Elétrica 2. Eletrônica de Potência 3. Comutador eletrônico de *taps* 4. Regulação de tensão I. Schuch, Luciano, II. Rech, Cassiano III. Título.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Josemar de Oliveira Quevedo. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Canadá, N° 155, Bairro Becker, Panambi, RS, 98280-000

Fone: 55-91474277; Endereço Eletrônico: josemar.oliveira.quevedo@gmail.com

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAPS APLICADO A UM
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO MONOFÁSICO**

elaborada por
Josemar de Oliveira Quevedo

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:


Luciano Schuch, Dr.
(Presidente/Orientador)


Cassiano Rech, Dr. (UFSM)
(Coorientador)


Sérgio Luís Haffner, Dr. (UFRGS)


Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 27 de fevereiro de 2014.

-

Dedico este trabalho:
aos meus pais Alfredo e Sebastiana,
e às minhas irmãs Cristine e Sandreli,
pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, por minha família maravilhosa, por todas as oportunidades concedidas e por me guiar em todas as minhas escolhas e nos desafios encontrados.

Aos meus pais, Alfredo e Sebastiana, pelo amor, zelo, educação e carinho.

Às minhas irmãs, Cristine e Sandreli, à minha avó Emília e minha tia Gracília, por todo apoio e motivação.

Ao meu orientador, professor Luciano Schuch, por sua amizade, conselhos e a colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho. Também, por sua confiança em aceitar-me como seu orientando.

Ao meu coorientador, professor Cassiano Rech, pelo conhecimento compartilhado e direcionamento no desenvolvimento das atividades.

Aos demais professores do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC), Prof. José Renes Pinheiro, Prof. Humberto Pinheiro, Prof. Hélio Hey, Prof. Hilton Gründling, Prof. Mário Lúcio Martins, Prof. Fábio Bisogno e Prof. Vinicius Montagner. Em especial aos professores Leandro Michels e Robinson Camargo que me acompanharam no desenvolvimento das atividades. Agradeço também ao prof. Tiago Bandeira Marchesan que concedeu ideias e sugestões de grande importância.

Aos colegas e amigos Fabricio Emmanuel Cazakevicius, Luiz Germano Nunes Theodorico e ao professor Rafael Concatto Beltrame, que auxiliaram em todas as etapas do trabalho e que sem os quais os resultados obtidos certamente não seriam possíveis.

Aos colegas e amigos do GEPOC: Antonio Spencer, Fabrício Dupont, Fernando Beltrame, Guilherme da Silva, Hamilton Sartori, Henrique Figueira, Julian Giacomini, Leandro Roggia, Renato Cardoso, Taciana Enderle, Tadeu Vargas e ao engenheiro do GEPOC, Jorge Massing, pelos momentos de descontração e auxílio técnico.

Aos alunos de iniciação científica Abel Gehm, Ademir Toebe, Antonio Bordini, Clecio Fischer, Everton Cancian, Felipe Lorenci e Marco Antônio Boaski pelo auxílio prestado. Em especial, ao colega e amigo Rodrigo Krug, o qual fará grande falta em nossos corações.

À CAPES pelo apoio financeiro e às Centrais Elétricas de Carazinho (ELETROCAR) pelo financiamento do projeto que resultou nesta dissertação.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), pelo suporte acadêmico prestado. Por fim, à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pela minha formação profissional e por proporcionar esta oportunidade.

Volenti nihil difficile.

(Provérbio latino)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

COMUTADOR ELETRÔNICO DE *TAPS* APLICADO A UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO MONOFÁSICO

AUTOR: JOSEMAR DE OLIVEIRA QUEVEDO

ORIENTADOR: LUCIANO SCHUCH

COORIENTADOR: CASSIANO RECH

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2014.

A regulação dos níveis de tensão é um problema ainda enfrentado pelas companhias concessionárias de energia elétrica atualmente. Além da impedância série e da significativa variação de carga das linhas de distribuição, principais causas dos problemas de regulação, a maior exigência dos agentes reguladores do sistema elétrico para a melhoria da qualidade de energia, o aumento do consumo de energia, a inclusão de geração distribuída e o desenvolvimento das redes inteligentes (*smart grids*), tendem a aumentar a complexidade dos sistemas de distribuição. Um dos métodos mais empregados na regulação de tensão em sistemas de corrente alternada é a aplicação de comutadores de *taps* em transformadores. Este método permite a regulação da tensão através da variação da relação de transformação, modificando o valor da tensão secundária. A aplicação desta solução é feita, majoritariamente, através de dispositivos mecânicos de comutação manual nos sistemas de distribuição e de dispositivos automáticos eletromecânicos de comutação sob carga em subestações. No caso dos dispositivos manuais, os custos operacionais e a impossibilidade da regulação automática de tensão são fatores limitantes, enquanto que no caso dos dispositivos eletromecânicos, os limitantes estão relacionados principalmente aos custos de implantação e de manutenção. Atualmente, o aumento dos níveis de tensão e corrente de operação dos dispositivos semicondutores tem permitido vislumbrar a aplicação de chaves semicondutoras em substituição às chaves mecânicas empregadas. Entretanto, devido às características de funcionamento destes dispositivos, uma análise detalhada do processo de comutação do sistema é necessária, de modo a permitir um adequado projeto dos dispositivos envolvidos no processo de comutação e proteção dos comutadores eletrônicos de *taps*. Neste contexto, o presente trabalho apresenta a análise, projeto e implementação de um comutador eletrônico de *taps* aplicado a um transformador de distribuição monofásico, proposto como alternativa aos comutadores mecânicos ou eletromecânicos existentes. Tal sistema permite a regulação automática da tensão, eliminando o desgaste do óleo isolante, resultante do processo de comutação sob carga e também a eliminação de partes móveis, principal causa de defeitos nos comutadores automáticos atuais. Além de permitir a regulação da tensão em regime permanente, o sistema possibilita a regulação para afundamentos de tensão momentâneos, desde que estejam na faixa de operação do transformador. A análise do processo de comutação do dispositivo estudado é apresentada, permitindo o projeto das chaves eletrônicas, bem como do sistema de proteção a ser empregado. Resultados experimentais demonstram a correta regulação de tensão do sistema desenvolvido, dentro dos limites de operação do transformador, para diferentes tipos de carga, evidenciando a potencialidade dos comutadores eletrônicos de *taps* em aplicações nas atuais redes de distribuição e nas futuras redes inteligentes.

Palavras-chave: Engenharia Elétrica, Eletrônica de Potência, Comutador eletrônico de *taps* sob carga, Regulação de tensão

ABSTRACT

Master Thesis

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

ELECTRONIC ON LOAD TAP CHANGER APPLIED TO A SINGLE-PHASE DISTRIBUTION TRANSFORMER

AUTHOR: JOSEMAR DE OLIVEIRA QUEVEDO

RESEARCH SUPERVISOR: LUCIANO SCHUCH

RESEARCH CO-SUPERVISOR: CASSIANO RECH

Santa Maria, February 27th, 2014.

Voltage regulation still is a problem faced by power utilities currently. In addition to the series impedance and the significant load variation of the distribution grids, the main causes of voltage regulation problems, the requirements for the enhancement of power quality by the electricity regulatory agencies, increasing energy consumption, the inclusion of distributed generation and the development of the smart grids tends to increase the complexity of the distribution systems. One of the most used methods for voltage regulation in alternating current systems is the employment of tap changer on transformers, this method allows voltage regulation by varying the transformation ratio, modifying the value of the secondary voltage. The application of these devices is primarily performed by manual commutation mechanical devices in distribution systems, and by automatic electromechanical on load tap changers in substations. In the case of manual devices, operating costs and the impossibility of automatic voltage regulation are limiting factors, while in the case of electromechanical devices the limitations are mainly related to the costs of employment and maintenance. Currently, the increase of voltage and current operating levels of semiconductor devices has allowed envision the application of semiconductor switches instead of the mechanical switches employed nowadays. However, due to the operating characteristics of these devices, a detailed analysis of the commutation process is necessary, in order to allow the proper design of the devices involved in the commutation and protection process of the electronic tap changer. In this context, this work presents the analysis, design and implementation of an electronic on load tap changer applied to a single-phase distribution transformer, proposed as an alternative to the existing mechanical and electromechanical tap changers. Such a system enables the automatic voltage regulation, avoiding the insulation oil degradation, resulting from the commutation process, and also the elimination of movable parts, the main cause of defects in current automatic commutation devices. In addition to allowing steady state voltage regulation, the system allows the regulation for momentary voltage sags, since they occur in the transformer operating range. The analysis of the commutation process is presented, allowing the design of the electronic switches, as well as the protection system to be employed. Experimental results show the correct voltage regulation for different kinds of load, demonstrating the potential application of electronic on load tap changers in the current distribution systems and in future smart grids.

Keywords: Electrical Engineering, Power Electronics, Electronic on Load Tap Changer, Voltage Regulation

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Queda de tensão causada pela impedância de linha. (a) Circuito de uma rede elétrica. (b) Diagrama fasorial (DUGAN, MCGRANAGHAN <i>et al.</i> , 2004)..... | 36 |
| Figura 1.2- Estratégias aplicadas na regulação de tensão das redes de distribuição. | 37 |
| Figura 2.1 – Exemplos de VTCDs. (a) Interrupção momentânea. (b) Interrupção temporária. (c) Afundamento momentâneo. (d) Afundamento temporário. (e) Elevação momentânea. (f) Elevação temporária. | 45 |
| Figura 2.2 – Comutador mecânico de <i>taps</i> proposto em 1926 (GARCIA, RODRIGUEZ <i>et al.</i> , 2009)..... | 47 |
| Figura 2.3 – Comutador mecânico de <i>taps</i> sem carga do tipo circular (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011)..... | 48 |
| Figura 2.4 – Comutador mecânico de <i>taps</i> sob carga do tipo reativo (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011). (a) Regulação para $2n-1$ níveis de tensão. (b) Regulação com n níveis de tensão..... | 49 |
| Figura 2.5 – Comutador mecânico de <i>taps</i> sob carga do tipo resistivo (FAIZ e JAVIDNIA, 2000)..... | 50 |
| Figura 2.6 – Conceito de comutador de <i>taps</i> híbrido (ROBERTS e ASHMAN, 1969)..... | 51 |
| Figura 2.7 – Conceito de comutador de <i>taps</i> híbrido apresentado por (COOKE e WILLIAMS, 1992). (a) Circuito seletor de <i>taps</i> . (b) Comutador proposto. | 52 |
| Figura 2.8 – Comutador de <i>taps</i> proposto por (SHUTTLEWORTH, TIAN <i>et al.</i> , 1996). (a) Circuito de desvio. (b) Circuito auxiliar..... | 53 |
| Figura 2.9 – Comutador de <i>taps</i> proposto por (GAO, 2002). (a) Circuito proposto (substituição dos resistores por tiristores). (b) Comando das chaves bidirecionais em corrente e tensão “A” e “B”..... | 54 |
| Figura 2.10 – Comutador de <i>taps</i> proposto por (LAVIEVILLE, WEBER <i>et al.</i> , 2008)..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.11 – Topologias de comutadores eletrônicos de <i>taps</i> (FRY, 1965). (a) Comutador eletrônico de <i>taps</i> proposto. (b) Configuração para obtenção de dupla polaridade do enrolamento de <i>tap</i> | 56 |
| Figura 2.12 – Arranjos ótimos de comutadores de <i>taps</i> propostos em (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003) considerando: (a) O menor número de chaves. (b) Menor esforço de tensão nas chaves. (c) Menor número de <i>taps</i> | 58 |
| Figura 2.13 – <i>Taps</i> derivados a partir de enrolamentos contínuos e de enrolamentos independentes (GOMEZ-EXPOSITO e MONROY BERJILLOS, 2007)..... | 59 |
| Figura 2.14 – Blocos básicos: configuração unidirecional (soma de tensões) e bidirecional.. | 59 |
| Figura 2.15 – Configurações de comutadores de <i>taps</i> analisadas em (GOMEZ-EXPOSITO e MONROY BERJILLOS, 2007). (a) Configuração convencional em transformadores de média e baixa tensão na Europa. (b) Configuração proposta para a obtenção de quatro degraus de tensão. | 60 |
| Figura 2.16 – Possíveis arranjos para a implementação de chaves bidirecionais em corrente e tensão (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003)..... | 60 |
| Figura 2.17 – Célula bidirecional apresentada em (BAUER e SCHOEVAARS, 2003). (a) Avaliação para a polaridade positiva da tensão da rede. (b) Avaliação para a polaridade negativa. (c) Sequência de comutação para a polaridade positiva. (d) Sequência de comutação para a polaridade negativa..... | 61 |
| Figura 2.18 – Comutador eletrônico de <i>taps</i> estudado em (YOUSEF-ZAI e O'KELLY, 1996). | 62 |
| Figura 2.19 – Implementação do comutador de <i>taps</i> empregando chaves semicondutoras bidirecionais (BAUER e DE HAAN, 1998b)..... | 63 |
| Figura 2.20 – Sistema de controle/supervisão proposto (BAUER e DE HAAN, 1998a)..... | 63 |
| Figura 2.21 – Comutador com regulação <i>in phase</i> (ASSELMAN, GRIFFIOEN <i>et al.</i> , 1999). | 64 |
| Figura 2.22 – Comutador de <i>taps</i> que emprega o método de regulação por quadratura - combinação entre fases, empregando núcleos adicionais (ASSELMAN, GRIFFIOEN <i>et al.</i> , 1999). | 64 |
| Figura 2.23 – Comutador de <i>taps</i> aplicável ao sistema MRT para áreas rurais proposto por (MEYER e VAN COLLER, 1999). | 65 |
| Figura 2.24 – Comutador de <i>taps</i> proposto por (LI, LIAO <i>et al.</i> , 2002). | 66 |
| Figura 2.25 – Comutador de <i>taps</i> proposto por (FOURIE e MOUTON, 2009). | 66 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.26 – Estratégia de modulação adotada no comutador (FOURIE e MOUTON, 2009). (a) Tensão de entrada. (b) Comando T1. (c) Comando T2. (d) Comando T3. (e) Comando T4. (f) Tensão de saída..... | 67 |
| Figura 2.27 – Comutador eletrônico de <i>taps</i> estudado em (MONROY-BERJILLOS, GOMEZ- EXPOSITO <i>et al.</i> , 2010). | 68 |
| Figura 2.28 –Proteção por indutores acoplados proposta por (KLINGBIEL, 1989). (a) Proteção das chaves na comutação. (b) Equalização da corrente entre chaves em paralelo. ... | 69 |
| Figura 2.29 – Circuito de <i>crowbar</i> apresentado em (FOURIE e MOUTON, 2009). | 70 |
| Figura 2.30 – Curva estimada da razão de falhas das tecnologias de OLTC (EPRI, 2006). | 72 |
| Figura 3.1 – Representação do sistema de distribuição MRT do transformador desenvolvido. | 76 |
| Figura 3.2 - Representação dos enrolamentos e terminais do transformador..... | 77 |
| Figura 3.3 – Vistas do transformador. (a) Vista frontal. (b) Vista traseira. (c) Vista superior. (d) Vista lateral direita..... | 79 |
| Figura 3.4 – Arranjo de terminais de <i>taps</i> do transformador..... | 80 |
| Figura 3.5 – Modelo do transformador refletido ao secundário..... | 81 |
| Figura 3.6 – Circuito T equivalente do transformador. (a) Refletido ao secundário. (b) Refletido ao primário..... | 86 |
| Figura 3.7 - Circuito T equivalente do transformador refletido ao primário considerando os terminais N_9 e N_7 conectados..... | 88 |
| Figura 3.8 – Estresse cumulativo de tensão (KULKARNI e KHAPARDE, 2004)..... | 89 |
| Figura 3.9 – Estresse cumulativo de tensão para o exemplo apresentado em (KULKARNI e KHAPARDE, 2004). | 90 |
| Figura 3.10 - Caminhos de avaliação da estrutura de acesso aos <i>taps</i> . (a) Detalhe I. (b) Detalhe II. | 92 |
| Figura 3.11 – Comportamento da tensão ao longo da seção C-C' de arranjo de <i>taps</i> | 93 |
| Figura 3.12 – Comportamento da tensão ao longo da seção D-D' de arranjo de <i>taps</i> | 93 |
| Figura 3.13 – Comportamento da tensão no arranjo de <i>taps</i> para o caso estudado. | 94 |
| Figura 3.14 – Comportamento da tensão ao longo do caminho de avaliação A-B. | 94 |
| Figura 3.15 – Comportamento da tensão ao longo do caminho de avaliação A'-B'..... | 95 |
| Figura 3.16 – Avaliação do estresse cumulativo e da suportabilidade dielétrica através do caminho A-B. | 95 |
| Figura 3.17 – Avaliação do estresse cumulativo e da suportabilidade dielétrica através do caminho A'-B'..... | 95 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.1 – Comutador eletrônico de <i>taps</i> . (a) Circuito e conexões ao transformador. (b) Implementação das chaves semicondutoras bidirecionais. | 97 |
| Figura 4.2 – Comutador eletrônico de <i>taps</i> proposto e respectivos circuitos auxiliares. | 98 |
| Figura 4.3 - Tensão sobre as chaves semicondutoras durante a operação normal do transformador. (a) Topologia genérica. (b) Topologia do transformador desenvolvido. | 100 |
| Figura 4.4 – Excursão da tensão sobre as chaves em função da chave selecionada. | 102 |
| Figura 4.5 – Corrente de pico sobre as chaves durante operação normal do comutador eletrônico. | 103 |
| Figura 4.6 – Circuito para análise da corrente de sobreposição das chaves (YOUSEF-ZAI e O'KELLY, 1996). | 105 |
| Figura 4.7 – Análise da corrente de sobreposição das chaves. (a) Operação normal do transformador na chave S_1 . (b) Sobreposição das chaves durante a comutação. (c) Operação na chave S_2 após a comutação. | 106 |
| Figura 4.8 – Circuito equivalente para obtenção da corrente nas chaves no processo de comutação. | 107 |
| Figura 4.9 – Circuito equivalente genérico para obtenção das correntes nas chaves. | 112 |
| Figura 4.10 – Corrente i_{cc} em função do fator de potência da carga. | 116 |
| Figura 4.11 – Correntes para carga puramente indutiva, FP=0. (a) Corrente primária (i_p) e tensão primária (v_{in}). (b) Corrente na chave S_1 (i_t) e tensão v_{in} . (c) Corrente na chave S_2 (i_{cc}) e tensão v_{in} . (d) Correntes i_p , i_t e i_{cc} | 117 |
| Figura 4.12 – Comportamento das correntes sobre as chaves durante a comutação. | 119 |
| Figura 4.13 – Corrente i_{cc} para a condição de carga indutiva. | 121 |
| Figura 4.14 – Tensão sobre os diodos. (a) Circuito com três diodos em série. (b) Curva VxI dos diodos. (c) Circuito de equilíbrio de tensão. (d) Curva VxI dos diodos. | 122 |
| Figura 4.15 – Diagrama do circuito de acionamento das chaves semicondutoras. | 123 |
| Figura 4.16 – Esquemático da fonte auxiliar isolada. | 124 |
| Figura 4.17 – Fluxograma de controle do comutador eletrônico de <i>taps</i> | 129 |
| Figura 5.1 – Comutador eletrônico de <i>taps</i> empregado na simulação no <i>software</i> PSIM [®] . (a) Detalhes do transformador e do alimentador (rede elétrica de distribuição). (b) Comutador eletrônico de <i>taps</i> empregando IGBTs em conexão anti-série. | 131 |
| Figura 5.2 – Resultados de simulação. Superior: valor eficaz da tensão secundária e limites “adequados” do PRODIST. Central: Comando de <i>gate</i> nas chaves. Inferior: corrente pelos IGBTs. | 132 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.4 – Resultados de simulação. Superior: semiciclos positivos e valor eficaz da tensão primária. Central: valor eficaz da tensão secundária e limites “adequados” do PRODIST. Inferior: semiciclos positivos e valor eficaz da corrente primária..... | 134 |
| Figura 5.5 – Sistema de alimentação do transformador com comutador eletrônico de <i>taps</i> .. | 135 |
| Figura 5.6 – Comutação na passagem por zero da corrente para carga resistiva. (a) Corrente na chave S_1 . (b) Corrente na chave S_2 . (c) Corrente primária. | 137 |
| Figura 5.7 – Comutação na passagem por zero da corrente para carga com FP 0,91. (a) Corrente na chave S_1 . (b) Corrente na chave S_2 . (c) Tensão primária do transformador. | 138 |
| Figura 5.8 – Comutação na passagem por zero da corrente para carga não linear. (a) Corrente na chave S_1 . (b) Corrente na chave S_2 . (c) Tensão primária do transformador. | 139 |
| Figura 5.9 – Ensaio de redução da tensão primária devido à impedância da linha. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária. | 140 |
| Figura 5.10 – Ensaio de redução da tensão primária devido à impedância da linha para meio ciclo de rede. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária..... | 141 |
| Figura 5.11 – Ensaio de aumento da tensão primária. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária. | 142 |
| Figura 5.12 – Ensaio de aumento da tensão primária para meio ciclo de operação. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária. | 143 |
| Figura 5.13 – Ensaio de redução da tensão primária com carga de FP = 0,91. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária. | 144 |
| Figura 5.14 – Ensaio de redução da tensão primária com carga não linear. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária. | 145 |
| Figura 5.15 – Tensão sobre as chaves para comutação com carga resistiva. (a) tensão sobre S_1 na comutação de S_1 para S_2 . (b) Tensão sobre S_2 na comutação de S_2 para S_3 . (c) Tensão sobre S_3 na comutação de S_3 para S_4 . (d) Tensão sobre S_4 na comutação de S_4 para S_5 . (e) Tensão sobre S_5 na comutação de S_5 para S_4 | 146 |
| Figura 5.16 – Tensão sobre as chaves para comutação com fator de potência 0,91. (a) Tensão sobre S_1 na comutação de S_1 para S_2 . (b) Tensão sobre S_2 na comutação de S_2 para S_3 . (c) Tensão sobre S_3 na comutação de S_3 para S_4 . (d) Tensão sobre S_4 na comutação de S_4 para S_5 . (e) Tensão sobre S_5 na comutação de S_5 para S_4 | 147 |
| Figura 5.17 – Comutador eletrônico de <i>taps</i> desenvolvido..... | 148 |
| Figura A.1 – Esquemático das proteções do comutador eletrônicos de <i>taps</i> | 164 |
| Figura A.2 – Modelo refletido ao primário com curto-circuito no secundário. | 165 |

| | |
|---|-----|
| Figura A.3 – Relé de proteção selecionado, modelo LPOX3RC3 (METALTEX, 2013). (a) Vista Superior. (b) Vista lateral. | 166 |
| Figura A.4 – Caminhos de circulação das correntes dos capacitores contra <i>spikes</i> de tensão.. | 169 |
| Figura A.5 – Circuitos de <i>crowbar</i> empregados em comutadores eletrônicos de <i>taps</i> . (a) Circuito apresentado em (BAUER e DE HAAN, 1997). (b) Circuito apresentado em (IXYS, 2000). | 171 |
| Figura A.6 – Tensões de operação dos dispositivos do <i>crowbar</i> | 173 |
| Figura A.7 – Corrente de avalanche (I_R) em função da tensão de avalanche (V_R) para pulsos senoidais com período $t_p \leq 20 \mu s$. Alterado de (ABB, 1995b). | 173 |
| Figura A.8 – Métodos de proteção contra sobretensões. (a) Modo comum, (b) Modo diferencial, (c) Modo comum e diferencial..... | 175 |
| Figura A.9 – Curva V_{xI} típica de um supressor de surtos. Alterado de: (ABB, 1995a)..... | 176 |
| Figura A.10 – Representação das magnitudes da tensão pela duração do evento. Alterado de: (SIEMENS, 2011). | 176 |
| Figura A.11 – Curva característica V_{xI} do dispositivo MOV. Alterado de (LITTELFUSE, 2013). | 179 |
| Figura A.12 – Capacidade de surto repetitivo do dispositivo MOV. Alterado de (LITTELFUSE, 2013). | 179 |
| Figura C.2 – Circuito de força do laboratório de ensaios, (a) unifilar, (b) multifilar. | 186 |
| Figura C.3 – Diagrama de comando. | 187 |
| Figura C.4 – Diagrama da placa de interface do comando. | 188 |
| Figura D.1 – Laboratório de ensaios em média tensão. | 189 |
| Figura D.2 – Acesso aos <i>taps</i> do transformador. | 189 |
| Figura D.3 – Equipamentos de proteção, (a) garra de aterramento, (b) luvas de isolamento classe 15 kV. | 190 |
| Figura D.4 – Circuito de acionamento (<i>gate-driver</i>), (a) vista frontal, (b) vista traseira..... | 190 |
| Figura D.5 – Placa de potência desenvolvida. | 191 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1 – Classificação dos níveis de tensão eficaz para sistemas 440/220 V (ANEEL, 2012b)..... | 44 |
| Tabela 2.2 – Classificação das variações de tensão de curta duração (ANEEL, 2012b). | 45 |
| Tabela 2.3 – Comparação qualitativa de características de tecnologias de OLTC (EPRI, 2006). . | 71 |
| Tabela 2.4 – Considerações sobre qualidade de energia para várias tecnologias de OLTC (EPRI, 2006)..... | 71 |
| Tabela 3.1 – Derivações e relações de tensão para o transformador monofásico. | 77 |
| Tabela 3.2 – Relação de transformação de cada enrolamento..... | 78 |
| Tabela 3.3 – Dados para transformadores monofásicos de 5 kVA, classe de tensão de 15 kV (NBR 5440). | 81 |
| Tabela 3.4 – Parâmetros do modelo do transformador da Figura 3.5. | 84 |
| Tabela 3.6 – Parâmetros do modelo T equivalente refletido ao primário. | 86 |
| Tabela 3.7 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador desconsiderando as reflexões. . | 87 |
| Tabela 3.8 – Estresse cumulativo de tensão para o exemplo apresentado em (KULKARNI e KHAPARDE, 2004). | 89 |
| Tabela 3.9 – Tensão dos terminais de <i>tap</i> quando N_{13} e N_3 estão conectados..... | 92 |
| Tabela 4.1 – Variáveis refletidas ao lado primário do transformador..... | 109 |
| Tabela 4.2 – Variáveis refletidas ao lado terciário do transformador. | 111 |
| Tabela 4.3 – Características das chaves semicondutoras selecionadas (IXYS, 2007; 2009) . | 120 |
| Tabela 5.1 – Condições da simulação de conexão e desconexão de carga. | 132 |
| Tabela 5.2 – Características do Variac e transformador elevador..... | 136 |
| Tabela A.2 – Especificações dos dispositivos do <i>crowbar</i> | 172 |
| Tabela A.5 – Especificações do supressor de surtos de baixa tensão (ABB, 2009)..... | 178 |
| Tabela A.6 – Especificações do MOV - V242BB60 (LITTELFUSE, 2013)..... | 179 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BOD | <i>Break Over Diode</i> |
| CA | Corrente Alternada |
| CEEE-D | Companhia Estadual de Energia Elétrica – Distribuição |
| DCM | <i>Discrete Cycle Modulation</i> |
| DETC | <i>De-energized Tap Changers</i> |
| DR | Dispositivo de proteção residual |
| DRC | Índices de duração relativa da transgressão para tensão crítica |
| DRP | Índices de duração relativa da transgressão para tensão precária |
| DSP | <i>Digital Signal Processor</i> |
| EPRI | <i>Electric Power Research Institute</i> |
| FP | Fator de Potência |
| GTO | <i>Gate Turn-off Thyristor</i> |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| IGBT | <i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i> |
| LDC | <i>Line-Drop Compensation</i> |
| LKT | Lei de Kirchhoff das Tensões |
| MOV | <i>Metal Oxide Varistor</i> |
| MRT | Monofásico Retorno por Terra |
| MTBF | <i>Mean Time Between Failures</i> |
| NBR | Norma Brasileira |
| NF | Normalmente fechado |

| | |
|-----------------------|--|
| OLTC | <i>On-Load Tap Changer</i> |
| PAC | Ponto de Acoplamento Comum |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| RMS | <i>Root Mean Square</i> |
| SF ₆ | Hexafluoreto de Enxofre |
| SSP | <i>Surge Suppressor Protector</i> |
| SWER | <i>Single-Wire Earth Return</i> |
| TAP | <i>Transformer Adjust Point</i> |
| TC | Transformador de corrente |
| TP | Transformador de potencial |
| TRIAC | <i>Triode for Alternating Current</i> |
| VTCD | Variação de tensão de curta duração |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--|--|
| a, b, c, d, e, f, g, h e i | Coefficientes do sistema de equações do modelo genérico |
| $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$ e b_3 | coeficientes de solução de $I_{1_ref}(s)$ |
| A-B | Caminho de avaliação 1 da suportabilidade dielétrica do arranjo de terminais de <i>tap</i> |
| A'-B' | Caminho de avaliação 2 da suportabilidade dielétrica do arranjo de terminais de <i>tap</i> |
| C_s | Capacitor de proteção contra <i>spikes</i> de tensão (F) |
| C-C' | Seção transversal horizontal do arranjo de terminais de <i>taps</i> do transformador |
| c_0, c_1 e c_2 | coeficientes de solução de $I_{3_ref}(s)$ |
| D-D' | Seção transversal vertical do arranjo de terminais de <i>taps</i> do transformador |
| d_1 | Caminho de avaliação da suportabilidade dielétrica (mm) |
| E_C | Energia armazenada no capacitor de proteção contra <i>spikes</i> de tensão (J) |
| E_{creep} | Suportabilidade dielétrica ao longo do caminho de avaliação (Vrms/mm) |
| E_{Ltap} | Energia armazenada no enrolamento de <i>tap</i> durante a comutação (J) |
| f | Frequência da rede (Hz) |
| $G_{1n}, G_{2n}, G_{3n}, G_{4n}, G_{5n}$, | Sinais de <i>gate</i> das chaves do semiciclo negativo do comutador |
| $G_{1p}, G_{2p}, G_{3p}, G_{4p}, G_{5p}$, | Sinais de <i>gate</i> das chaves do semiciclo positivo do comutador |
| H_1 e H_2 | Terminais do circuito primário do transformador |
| i_{1_ref} | Corrente da malha 1 do modelo genérico (A) |
| $I_{1_ref}(s)$ | corrente i_{1_ref} no domínio de Laplace (A) |
| i_{2_ref} | Corrente da malha 2 do modelo genérico (A) |
| $I_{2_ref}(s)$ | corrente i_{2_ref} no domínio de Laplace (A) |
| i_{3_ref} | Corrente da malha 3 do modelo genérico (A) |
| $I_{3_ref}(s)$ | corrente i_{3_ref} no domínio de Laplace (A) |

| | |
|-----------------------|---|
| I_b | Corrente de base do transformador (A) |
| I_{hc} | Corrente impulsiva (A) |
| I_n | Corrente nominal (A) |
| I_C | Corrente circulante pelo capacitor de proteção contra <i>spikes</i> (A) |
| i_{cc} | Corrente através da chave S_2 durante a sobreposição de comutação (A) |
| $I_{cc}(s)$ | Corrente i_{cc} no domínio de Laplace (A) |
| I_{cc_pk} | Corrente de sobreposição das chaves durante a comutação (A) |
| I_{cc_pri} | Corrente eficaz primária quando o secundário está curto-circuitado (A) |
| $I_{exc\%}$ | Corrente de excitação percentual de ensaio a vazio (%) |
| i_p | Corrente do primário durante a sobreposição de comutação (A) |
| $I_p(s)$ | Corrente i_p no domínio de Laplace (A) |
| $I_{S_{max}}$ | Máxima corrente nominal de pico através das chaves (A) |
| I_{S_q} | Corrente através da chave q (A) |
| i_t | Corrente através da chave S_1 durante a sobreposição de comutação (A) |
| $I_t(s)$ | Corrente i_t no domínio de Laplace (A) |
| K | Número de enrolamentos de <i>tap</i> no primário do transformador |
| L_{eq_pri} | Indutância de dispersão do primário descontando o enrolamento em aberto (H) |
| L_{eq_ref} | Indutância equivalente do circuito primário do modelo genérico (H) |
| L_{eq_ter} | Indutância de dispersão L_{eq_pri} refletida ao terciário (H) |
| L_{load_pri} | Indutância de carga refletida ao primário (H) |
| L_{load_ref} | Indutância de carga do modelo genérico (H) |
| L_{load_ter} | Indutância de carga refletida ao terciário (H) |
| L_m | Indutância de magnetização do modelo refletido ao secundário (H) |
| L_{m_1} | Indutância de magnetização refletida ao primário do modelo do transformador (H) |
| L_{m_2} | Indutância de magnetização refletida ao secundário do modelo do transformador (H) |
| L_{m_pri} | Indutância de magnetização refletida ao primário (H) |
| L_{m_ref} | Indutância de magnetização do modelo genérico (H) |
| L_{m_ter} | Indutância de magnetização refletida ao terciário (H) |
| L_{pri_1} | Indutância de dispersão do enrolamento primário (H) |
| L_{pri_2} | Indutância de dispersão do enrolamento primário refletida ao secundário (H) |

| | |
|---|---|
| $L_{principal}$ | Indutância dos enrolamentos principais do primário do transformador (H) |
| L_s | Indutância de dispersão do modelo refletido ao secundário (H) |
| L_{sec_1} | Indutância de dispersão do enrolamento secundário refletida ao primário (H) |
| L_{sec_2} | Indutância de dispersão do enrolamento secundário (H) |
| L_{sec_pri} | Indutância de dispersão do enrolamento secundário refletida ao primário (H) |
| L_{sec_ref} | Indutância do circuito secundário do modelo genérico (H) |
| L_{sec_ter} | Indutância de dispersão do enrolamento secundário refletida ao terciário (H) |
| L_{tap} | Indutância de dispersão dos enrolamentos de <i>tap</i> do primário do transformador (H) |
| L_{tap_pri} | Indutância de dispersão do enrolamento de <i>tap</i> refletida ao primário (H) |
| L_{tap_ref} | Indutância do enrolamento de <i>tap</i> do modelo genérico (H) |
| L_{tap_ter} | Indutância de dispersão do enrolamento de <i>tap</i> refletida ao terciário (H) |
| M | Número de enrolamentos principais no primário do transformador |
| $N_3, N_5, N_7, N_9, N_{11}$ e N_{13} | Terminais de acesso aos enrolamentos de <i>tap</i> |
| N_m | Relação de transformação dos enrolamentos principais do primário |
| N_s | Relação de transformação dos enrolamentos secundário do transformador |
| N_t | Relação de transformação dos enrolamentos de <i>tap</i> do primário |
| N_{total} | Relação de transformação total do circuito primário do transformador |
| p | Referência da chave bloqueada a qual se deseja saber a tensão |
| P_{tap} | Perda máxima por enrolamento de <i>tap</i> devido à corrente circulante (W) |
| P_{total} | Perdas totais do transformador do ensaio de curto-circuito (W) |
| P_{vazio} | Perdas de ensaio a vazio (W) |
| q | Referência da chave que está fechada e conduzindo corrente |
| R_m | Resistência de perdas no núcleo do modelo refletido ao secundário (Ω) |
| R_{eq_pri} | Resistência do enrolamento primário descontando o enrolamento em aberto (Ω) |
| R_{eq_ref} | Resistência equivalente do circuito primário do modelo genérico (Ω) |
| R_{eq_ter} | Resistência R_{eq_pri} refletida ao terciário (Ω) |
| R_{load_pri} | Resistência de carga refletida ao primário (Ω) |
| R_{load_ref} | Resistência de carga do modelo genérico (Ω) |
| R_{load_ter} | Resistência de carga refletida ao terciário (Ω) |
| R_1 | Relé de proteção de comutação sem carga |

| | |
|------------------------------|---|
| R_{m_1} | Resistência de perdas no núcleo refletida ao primário (Ω) |
| R_{m_2} | Resistência de perdas no núcleo refletida ao secundário (Ω) |
| R_{pri_1} | Resistência do enrolamento primário (Ω) |
| R_{pri_2} | Resistência do enrolamento primário refletida ao secundário (Ω) |
| $R_{principal}$ | Resistência dos enrolamentos principais do primário do transformador (Ω) |
| R_R | Resistência da rede primária considerada na simulação (Ω) |
| R_s | Resistência de perdas nos enrolamentos do modelo refletido ao secundário (Ω) |
| R_{sec_1} | Resistência do enrolamento secundário refletida ao primário (Ω) |
| R_{sec_2} | Resistência do enrolamento secundário (Ω) |
| R_{sec_pri} | Resistência do enrolamento secundário refletida ao primário (Ω) |
| R_{sec_ref} | Resistência do circuito secundário do modelo genérico (Ω) |
| R_{sec_ter} | Resistência do enrolamento secundário refletida ao terciário (Ω) |
| R_{tap} | Resistência dos enrolamentos de <i>tap</i> do primário do transformador (Ω) |
| R_{tap_pri} | Resistência do enrolamento de <i>tap</i> refletida ao primário (Ω) |
| R_{tap_ref} | Resistência do enrolamento de <i>tap</i> do modelo genérico (Ω) |
| R_{tap_ter} | Resistência do enrolamento de <i>tap</i> refletida ao terciário (Ω) |
| s | Variável complexa de Laplace |
| S | Potência aparente nominal do transformador (VA) |
| S_1, S_2, S_3, S_4 e S_5 | Chaves do comutador eletrônico de <i>taps</i> |
| S_b | Potência de base do transformador (VA) |
| S_p | Chave bloqueada a qual se deseja saber a tensão |
| S_q | Chave em condução |
| t | Variável temporal (s) |
| U_c | Nível de tensão de operação contínua (V) |
| U_p | Nível de tensão de proteção (V) |
| U_s | Mais alto nível de tensão do sistema (V) |
| V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 | Tensões para cálculo do estresse cumulativo (V) |
| V_b | Tensão de base do transformador (V) |
| V_{C_max} | Máxima tensão admissível sobre os capacitores de proteção contra <i>spikes</i> (V) |
| $V_{cc\%}$ | Tensão percentual do ensaio de curto-circuito (%) |

| | |
|--|--|
| V_{in} | Tensão de pico de entrada do transformador (V) |
| V_{in_1} | Tensão nominal primária eficaz (V) |
| V_{in_2} | Tensão nominal secundária eficaz (V) |
| v_{in_pri} | Tensão primária do transformador (V) |
| v_{in_ref} | Tensão de entrada do modelo genérico (V) |
| $V_{in_ref}(s)$ | Tensão de entrada do modelo genérico v_{in_ref} no domínio de Laplace (V) |
| v_{in_ter} | Tensão do primário refletida ao lado terciário do transformador (V) |
| $V_{N13}, V_{N11}, V_{N9}, V_{N7}, V_{N5}, V_{N3}$ | Tensão sobre os terminais de <i>tap</i> (V) |
| V_{rele} | Tensão de pico sobre o relé de proteção (V) |
| $V_{S1}, V_{S2}, V_{S3}, V_{S4}, V_{S5}, V_{S_n}$ | Tensão sobre as chaves do comutador eletrônico de <i>taps</i> (V) |
| V_{sc} | Tensão do ensaio de curto-circuito (V) |
| V_{sec} | Tensão secundária nominal do transformador (V) |
| V_{sp} | Tensão de pico sobre a chave S_p (V) |
| V_x | Tensão de referência do controle por histerese (V) |
| V_{x_max} | Tensão de limite superior do controle por histerese (V) |
| V_{x_min} | Tensão de limite inferior do controle por histerese (V) |
| X_1, X_2 e X_3 | Terminais do circuito secundário do transformador |
| Z_m | Impedância do ramo de magnetização (Ω) |
| Z_s | Impedância de curto-circuito (Ω) |
| α_1 | Coefficiente de reflexão do secundário para o primário |
| α_2 | Coefficiente de reflexão do terciário para o primário |
| α_3 | Coefficiente de reflexão do primário para o terciário |
| α_4 | Coefficiente de reflexão do secundário para o terciário |
| $\Delta t_{overlap}$ | Tempo de sobreposição das chaves (s) |
| $\Delta V\%$ | Elevação percentual de tensão sobre o capacitor de proteção contra <i>spikes</i> (%) |
| ΔV_c | Elevação de tensão sobre o capacitor de proteção contra <i>spikes</i> (V) |
| ω | Velocidade angular da rede (rad/s) |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 34 |
| 1.1 Definição do problema..... | 40 |
| 1.2 Objetivos..... | 41 |
| 1.3 Organização da dissertação..... | 41 |
| CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 43 |
| 2.1 Questões normativas envolvendo a aplicação de comutadores de <i>taps</i> | 43 |
| 2.2 Revisão histórica..... | 46 |
| 2.3 Comutadores mecânicos de <i>taps</i> | 48 |
| 2.3.1 Comutadores mecânicos de <i>taps</i> automáticos do tipo reativo | 49 |
| 2.3.2 Comutador mecânicos de <i>taps</i> automáticos do tipo resistivo | 50 |
| 2.3.3 Limitações dos comutadores mecânicos de <i>taps</i> | 50 |
| 2.4 Topologias de comutadores de <i>taps</i> assistidos por chaves estáticas | 51 |
| 2.5 Comutadores eletrônicos de <i>taps</i> | 55 |
| 2.5.1 Otimização de estruturas de comutadores eletrônicos de <i>taps</i> | 57 |
| 2.5.2 Configurações de chaves bidirecionais aplicadas em comutadores eletrônicos de <i>taps</i> | 60 |
| 2.5.3 Implementação de comutadores eletrônicos de <i>taps</i> | 61 |
| 2.5.4 Proteção de comutadores eletrônicos de <i>taps</i> | 68 |
| 2.6 Comparação qualitativa das tecnologias de OLTC..... | 70 |
| 2.7 Conclusões..... | 72 |
| CAPÍTULO 3 CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DESENVOLVIDO..... | 75 |
| 3.1 Sistema MRT | 75 |
| 3.2 Características elétricas do transformador | 76 |
| 3.3 Características construtivas do transformador | 78 |
| 3.4 Modelo do transformador | 80 |
| 3.5 Análise de suportabilidade dielétrica do arranjo de terminais de <i>tap</i> | 88 |
| 3.5.1 Cálculo do estresse cumulativo de tensão..... | 89 |
| 3.5.2 Cálculo da suportabilidade dielétrica do material..... | 90 |

| | | |
|--|--|------------|
| 3.5.3 | Avaliação da suportabilidade dielétrica da geometria de terminais de <i>taps</i> analisada..... | 91 |
| 3.6 | Conclusões | 96 |
| CAPÍTULO 4 COMUTADOR ELETRÔNICO DE TAPS DESENVOLVIDO..... | | 97 |
| 4.1 | Topologia empregada e características | 97 |
| 4.2 | Descrição dos circuitos auxiliares..... | 98 |
| 4.3 | Análise da tensão e corrente sobre as chaves semicondutoras..... | 99 |
| 4.3.1 | Máxima tensão de operação sobre as chaves semicondutoras | 100 |
| 4.3.2 | Corrente nominal de operação das chaves semicondutoras | 102 |
| 4.3.3 | Corrente nas chaves em função do tempo de sobreposição na comutação | 104 |
| 4.4 | Definição das chaves semicondutoras..... | 120 |
| 4.4.1 | Projeto baseado na tensão sobre as chaves semicondutoras..... | 120 |
| 4.4.2 | Projeto baseado na capacidade de condução de corrente das chaves..... | 120 |
| 4.4.3 | Diodos em paralelo com as chaves | 121 |
| 4.5 | Sistema de acionamento das chaves (<i>gate-driver</i>)..... | 123 |
| 4.6 | Sistema de controle | 124 |
| 4.6.1 | Regulação de tensão por compensação de queda de tensão..... | 125 |
| 4.6.2 | Método de sincronização da passagem por zero da corrente | 126 |
| 4.6.3 | Rotina de controle do comutador eletrônico de <i>taps</i> | 126 |
| 4.7 | Conclusões | 130 |
| CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS..... | | 131 |
| 5.1 | Simulação do comutador eletrônico de <i>taps</i> | 131 |
| 5.1.1 | Conexão e desconexão da carga..... | 132 |
| 5.1.2 | Variação da tensão do alimentador (com carga nominal) | 133 |
| 5.2 | Experimentos práticos..... | 135 |
| 5.2.1 | Ensaio de comutação na passagem por zero da corrente..... | 136 |
| 5.2.2 | Ensaio de redução da tensão primária | 139 |
| 5.2.3 | Ensaio de aumento da tensão primária..... | 141 |
| 5.2.4 | Regulação de tensão para redução da tensão primária com carga com fator de potência não unitário | 143 |
| 5.2.5 | Regulação de tensão para redução da tensão primária com carga não linear..... | 144 |
| 5.2.6 | Tensão sobre as chaves durante o processo de comutação | 145 |
| 5.3 | Comutador eletrônico de <i>taps</i> desenvolvido | 148 |
| 5.4 | Conclusões | 149 |
| CONCLUSÃO | | 151 |
| BIBLIOGRAFIA | | 156 |
| APÊNDICE A – SISTEMA DE PROTEÇÃO | | 163 |
| A.1 | Circuito de partida e proteção contra curto-circuitos no secundário..... | 164 |

| | | |
|--|--|------------|
| A.1.1 | Corrente de operação com curto-circuito no secundário do transformador | 165 |
| A.1.2 | Tensão sobre o relé | 166 |
| A.1.3 | Especificação do relé de proteção | 166 |
| A.2 | Circuito de proteção contra sobretensões de curta duração (<i>spikes</i>)..... | 167 |
| A.2.1 | Efeito da inclusão dos capacitores contra <i>spikes</i> de tensão | 169 |
| A.3 | Circuito de <i>crowbar</i> | 170 |
| A.4 | Causas de sobretensões na rede de distribuição primária | 174 |
| A.4.1 | Sobretensões causadas por descargas atmosféricas | 174 |
| A.4.2 | Sobretensões ocasionadas por manobras na rede elétrica | 174 |
| A.4.3 | Proteções contra sobretensões de modo comum e modo diferencial | 175 |
| A.5 | Proteção contra sobretensão por supressor de surto | 176 |
| A.5.1 | Especificação do supressor de surtos de média tensão | 177 |
| A.5.2 | Especificação do supressor de surtos de baixa tensão | 177 |
| A.6 | Proteção contra surtos por <i>Metal Oxide Varistor</i> (MOV)..... | 178 |
| A.7 | Conclusões | 180 |
| APÊNDICE B – DETALHAMENTO DA ANÁLISE DO PROCESSO DE COMUTAÇÃO | | 181 |
| B.1 | Análise da corrente de sobreposição das chaves no processo de comutação..... | 181 |
| APÊNDICE C – LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM MÉDIA TENSÃO | | 183 |
| C.1 | Medidas de proteção coletiva | 183 |
| C.2 | Medidas de proteção individual | 183 |
| C.3 | <i>Layout</i> do laboratório..... | 184 |
| C.4 | Circuito de força do laboratório de ensaios | 185 |
| C.5 | Circuito de comando do laboratório de ensaios | 186 |
| C.5.1 | Sequência de operação do circuito de comando | 186 |
| C.5.2 | Circuito de interface do comando | 188 |
| APÊNDICE D – FOTOS DO PROTÓTIPO..... | | 189 |

INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição em corrente alternada (CA) têm passado por profundas transformações desde sua introdução ainda no século XIX. Tais sistemas iniciaram como estruturas monofásicas locais, mantendo a característica monofásica em muitos sistemas de distribuição rurais e em regiões esparsamente povoadas atualmente e evoluíram para sistemas trifásicos de maior potência, permitindo maior abrangência em cidades e áreas com grande concentração de carga (WOODWARD, 1993). Ao longo dos anos, os sistemas de distribuição têm incorporado significativos avanços em áreas como a proteção, operação e qualidade de energia, o que tem contribuído para a ampliação e melhoria do serviço prestado pelas companhias concessionárias de energia. Como consequência, é possível atingir um maior número de pessoas e possibilitar a melhoria da qualidade de vida daqueles atingidos por este importante serviço (PASTEN e SANTAMARINA, 2012).

Apesar dos diversos avanços obtidos nos sistemas de distribuição ao longo dos anos, a regulação de tensão ainda é um sério problema de qualidade de energia enfrentado pelas concessionárias de energia. Este problema é ainda mais crítico em regiões rurais, que tipicamente experimentam os níveis de tensão menos confiáveis (GELLINGS, SAMOTYJ *et al.*, 2004; FRÍAZ, PLATERO *et al.*, 2010). Fatores como a crescente demanda por energia elétrica, a expansão das cidades e o desenvolvimento de zonas rurais, aliados à implementação da geração distribuída e ao desenvolvimento futuro das redes inteligentes tendem a tornar o sistema elétrico de distribuição ainda mais complexo e prejudicar a regulação de tensão (CHENSONG e BAGHZOUZ, 2004; LE, MUTTAQI *et al.*, 2007; MCNUTT, HAMBRICK *et al.*, 2009; GAO e REDFERN, 2010; JAUCH, 2011; MOZINA, 2013).

A principal causa dos problemas de regulação de tensão é a existência de grandes impedâncias nos sistemas de potência, resultando em cumulativas quedas de tensão ao longo da rede (DUGAN, MCGRANAGHAN *et al.*, 2004), esse problema pode ser verificado através da Figura 1.1 (a) onde é representado o circuito que descreve o sistema elétrico e da Figura 1.1 (b) que representa o diagrama fasorial das tensões ao longo da rede. Aliado a isso, a má distribuição das cargas ao longo dos alimentadores de média tensão, a variação de carga ao longo do dia, a sazonalidade do consumo de energia elétrica e as falhas ocorridas nos reguladores de tensão de alta para média tensão são fatores que contribuem para os problemas de regulação de tensão nos sistemas elétricos (BAUER e DE HAAN, 1998a).

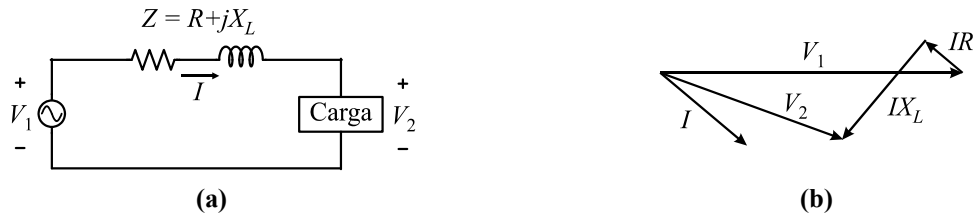


Figura 1.1 – Queda de tensão causada pela impedância de linha. (a) Circuito de uma rede elétrica. (b) Diagrama fasorial (DUGAN, MCGRANAGHAN *et al.*, 2004).

Outro problema enfrentado pelas companhias de energia é a existência de variações de tensão de curta duração (VTCD) na rede elétrica, tais eventos podem ser caracterizados por afundamentos (*sags*) ou elevações (*swells*) do valor eficaz da tensão da rede, conforme definição dos Procedimentos da Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), (ANEEL, 2012a). Esses eventos são resultado, principalmente, de faltas no sistema de potência, manobras na rede elétrica e partida de grandes cargas (DUGAN, MCGRANAGHAN *et al.*, 2004).

Ambos os casos envolvendo o valor eficaz da tensão da rede elétrica resultam em problemas para os consumidores conectados ao sistema elétrico. Para consumidores residenciais e comerciais, essas variações do nível de tensão podem causar problemas como desligamento ou queima de equipamentos eletrônicos. Porém, esses eventos são criticamente danosos em ambientes industriais, onde a interrupção de um processo pode resultar em prejuízos de elevada monta (HINGORANI, 1995; DUGAN, MCGRANAGHAN *et al.*, 2004). Além disso, a presença desses problemas nos sistemas de distribuição prejudica os indicadores de qualidade da companhia concessionária de energia, além de causar insatisfação dos consumidores conectados à rede elétrica.

Na tentativa de corrigir a regulação da tensão do sistema, muitas vezes o nível de tensão secundário é elevado para reverter a queda causada pela impedância de linha. Entretanto, essa estratégia pode resultar em sobretensões na linha quando a carga conectada cai a valores muito baixos, necessitando, desta forma, de um sistema de correção automático que se ajuste às condições de carga da rede. Outras estratégias utilizadas pelas companhias de energia que auxiliam na regulação da tensão são elencadas em ordem de prioridade conforme (DUGAN, MCGRANAGHAN *et al.*, 2004), sendo representadas na Figura 1.2.

1. inclusão de capacitores *shunt* na rede de maneira a reduzir a corrente reativa e reduzir tanto as perdas como queda de tensão na rede;
2. inclusão de reguladores de tensão que elevam a tensão da rede primária;
3. troca de condutores por outros de menor impedância série;

4. mudança da subestação, ou troca de transformadores para outros com menor impedância percentual;
5. adição de compensação dinâmica de potência reativa;
6. adição de capacitores série a fim de cancelar a queda de tensão causada pela impedância indutiva da linha.

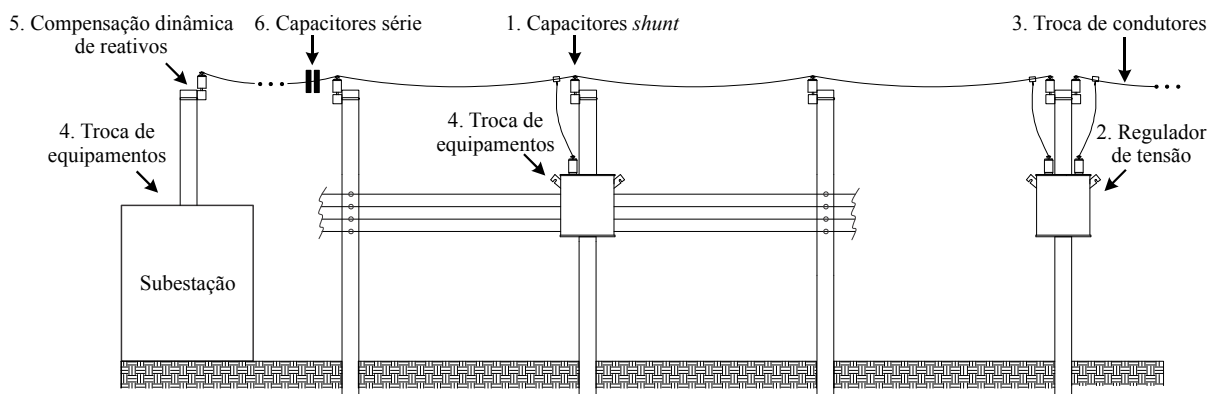


Figura 1.2- Estratégias aplicadas na regulação de tensão das redes de distribuição.

Um dos métodos de regulação de tensão mais populares em sistemas elétricos é o emprego de comutadores de *taps*¹ (também denominados *tap changers*) em transformadores (GAO e REDFERN, 2010), também sendo empregados na regulação do deslocamento de fase destes sistemas (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011). Os comutadores de *taps* têm sido empregados em transformadores desde os primeiros sistemas de distribuição em corrente alternada, caracterizando-se por ser uma maneira fácil de obtenção de regulação de tensão (GARCIA, RODRIGUEZ *et al.*, 2009).

Estes dispositivos permitem a variação física da relação de transformação dos transformadores, possibilitando, desta forma, a regulação da tensão secundária de atendimento dos consumidores dentro dos limites estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A regulação da tensão traz significativos benefícios tanto aos consumidores, que podem usufruir de energia elétrica com maior qualidade, quanto para as companhias concessionárias, que passam a atender os clientes de forma eficiente e podem reduzir também as perdas operacionais causadas pelos níveis inadequados da tensão de atendimento. Essa redução é mais acentuada em sistemas de distribuição com característica de carga de potência

¹ *taps* (TAP - *Transformer Adjust Point*) são pontos de conexão ao longo do enrolamento do transformador que permitem que uma determinado número de espiras seja selecionado. Isso implica em um transformador com relação de transformação variável.

constante, onde a corrente drenada da rede tende a aumentar com a redução da tensão de atendimento, o que aumenta as perdas nos condutores e transformadores da companhia concessionária.

Dessa forma, a regulação de tensão em níveis de transmissão e distribuição depende fortemente dos comutadores de *taps* aplicados aos transformadores, os quais são implementados principalmente através de dispositivos mecânicos. Em sistemas de distribuição, esse tipo de comutador necessita da intervenção de uma equipe no local para realizar a comutação manualmente, caso se identifique a necessidade após a análise dos níveis de tensão fornecidos ao consumidor. Esse processo demanda tempo e recursos, além de prejudicar os indicadores de qualidade da companhia concessionária, estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL, 2012b), uma vez que o nível de tensão de atendimento pode permanecer em níveis inadequados por um tempo significativo até que se identifique o problema, seja por parte da própria concessionária, ou pela solicitação do cliente conectado à rede. Além disso, após a comutação ser executada, o nível de tensão fornecida pode sofrer variação devido à dinâmica do sistema, tornando-se operacionalmente impossível que uma equipe comute manualmente o transformador sempre que houver variação do nível de tensão.

Como alternativa, existem os comutadores eletromecânicos, que podem realizar o processo de comutação entre *taps* distintos de modo automatizado. Por outro lado, suas principais desvantagens residem no seu elevado custo, no longo período para realizar a comutação e a necessidade de manutenção frequente, principalmente no caso de comutação sob carga. A formação de arco elétrico durante a manobra de comutação danifica os contatos e reduz a vida útil do óleo empregado na isolação e arrefecimento do transformador (BAUER e DE HAAN, 1999). Nesse sentido, com o objetivo de minimizar o arco elétrico gerado pela comutação sob carga, alguns trabalhos propõem o emprego de tiristores associados a comutadores mecânicos de *taps* – também denominados *thyristor-assisted tap-changer* – (FRY, 1965; GAO, 2002; LAVIEVILLE, WEBER *et al.*, 2008), sendo que os dispositivos eletrônicos são acionados somente durante o processo de comutação, proporcionando rapidez e redução do arco elétrico e posteriormente a isso, as chaves mecânicas assumem a operação do comutador.

Comutadores sem partes mecânicas, empregando apenas chaves estáticas são uma solução recente (GOMEZ-EXPOSITO e MONROY BERJILLOS, 2007). Essa proposta pode ser economicamente competitiva com o modelo eletromecânico por apresentar vantagens como: reduzida manutenção, prolongada vida útil, rápido reparo e substituição de dispositivos. Além da robustez e tolerância a transientes, características de um transformador

clássico, é possível obter maior controle e velocidade nas comutações, melhorando a qualidade da energia entregue à carga. Aliado a isso, técnicas de controle e de análise da qualidade da energia elétrica podem minimizar, ou mesmo eliminar, a necessidade de intervenção humana no comando do comutador de *taps*, reduzindo os custos de operação.

Um estudo apresentado pela *Electric Power Research Institute* (EPRI) em (GILKER, INDUSTRIES *et al.*, 1990) e revisado em (EPRI, 2006), questionava a percepção de companhias de energia sobre comutadores de *tap* sobre carga, ou *On-Load Tap Changer* (OLTC). Entre os comentários mais interessantes relatados à época pelas companhias de energia cabe ressaltar que: o uso de OLTC reativos isolados a óleo tinha previsão de redução de uso, vindo a ser substituídos predominantemente pelos modelos a vácuo; comutadores isolados por gás SF₆ (Hexafluoreto de enxofre) não eram esperados em um futuro próximo; os comutadores de *taps* de estado sólido eram esperados como possíveis agentes de melhoria da confiança destes sistemas pelo reduzido, ou inexistente, número de partes mecânicas, porém, esperava-se que tivessem um custo mais elevado. Ainda, a maioria das companhias de energia se mostrava mais disposta a investir recursos no desenvolvimento de melhores e mais confiáveis OLTC do que na detecção de falhas iminentes dos dispositivos atuais. Esse estudo mostrava a tendência de investimentos em comutadores de *taps* que seria seguida pelas companhias envolvidas no estudo nos anos que se seguiram.

Nos últimos anos, com os avanços ocorridos na tecnologia de dispositivos semicondutores e principalmente de chaves semicondutoras para elevados níveis de tensão e corrente, houve maior interesse pelo desenvolvimento de comutadores eletrônicos de *taps*. Na avaliação realizada em (EPRI, 2006) foram analisados diversos trabalhos citados na literatura, demonstrando os avanços até então conquistados no desenvolvimento destes comutadores. Dentre as conclusões alcançadas, verificou-se que além de regulação automática de tensão, inerente do processo de operação dos comutadores de *taps* convencionais, se realizada com rapidez e dentro de uma ampla faixa de tensão, a regulação de tensão realizada por comutadores eletrônicos poderia contornar problemas de afundamentos de tensão (*sags*) momentâneos e temporários, demonstrando-se uma possível solução onde a falta de regulação rápida de tensão pode resultar falhas em aparelhos como computadores e motores de velocidade variável.

Aliado a isso, a possibilidade de integração com as redes de distribuição inteligentes e sistemas com geração distribuída, tem gerado uma grande expectativa em relação ao desenvolvimento de comutadores eletrônicos de *taps* aplicados aos sistemas de distribuição.

Nesse sentido, o desenvolvimento destes dispositivos apresenta grande potencial de aplicação na solução dos problemas atuais e futuros relacionados à regulação da tensão.

1.1 Definição do problema

Apesar dos benefícios para os sistemas elétricos propiciados pelos comutadores automáticos de *taps* sob carga, salienta-se que grande parte das aplicações é em média e alta potência, por exemplo, em transformadores de subestações e reguladores de tensão aplicados à rede primária, não sendo empregados em redes de distribuição urbanas e rurais de baixa tensão. Isso muito se deve ao significativo custo de implementação e de manutenção destes equipamentos, o que acaba restringindo sua aplicabilidade.

O desenvolvimento de comutadores eletrônicos de *taps* apresenta-se como uma potencial solução para problemas como a regulação de tensão e afundamentos de tensão temporários e momentâneos dentro da faixa de tensão de operação dos enrolamentos de *tap* do transformador. Tais dispositivos são caracterizados pela rápida comutação automática dos *taps* sem formação de arco elétrico, o que aumenta a vida útil do óleo isolante dos transformadores e reduz a manutenção. Outro fator positivo é o fato da menor necessidade de utilização de reguladores de tensão ao longo dos sistemas de distribuição. Além disso, os custos operacionais do sistema de distribuição podem ser reduzidos, uma vez que não é necessário que uma equipe especializada realize a comutação dos *taps* do transformador sempre que necessário.

Essas características fazem dos comutadores eletrônicos de *taps* importantes dispositivos a serem empregados na melhoria da qualidade de energia dos sistemas elétricos de distribuição. Seu desenvolvimento torna-se cada vez mais solícito à medida que as agências regulamentadoras do setor elétrico impõem medidas mais rígidas de qualidade de energia, ao mesmo tempo em que se tem um acentuado aumento da demanda por energia elétrica. Aliado a isso, a distribuição de energia elétrica avança no sentido de deixar de ser unidirecional, passando a contar com agentes não apenas de consumo de eletricidade, mas também de geração conectados à rede, alterando o fluxo de potência bem como os níveis de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC). Além disso, estes dispositivos têm forte potencial de aplicação nas futuras redes inteligentes, uma vez que ampliam a capacidade de controle sobre a tensão da rede, possibilitando novas funcionalidades para as concessionárias de energia.

1.2 Objetivos

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um comutador eletrônico de *taps* aplicado ao lado de alta tensão de um transformador de distribuição monofásico, onde se busca o desenvolvimento de um dispositivo capaz de regular automaticamente a tensão secundária em redes de distribuição monofásicas, melhorando a qualidade de energia para os consumidores finais e podendo reduzir o uso de reguladores de tensão ao longo das redes de distribuição primárias. Além disso, o sistema proposto visa além da regulação da tensão em regime permanente, a correção de afundamentos de tensão do tipo temporários e momentâneos de acordo com o PRODIST (ANEEL, 2012b).

A partir disso, busca-se reduzir a comutação manual de *taps* em transformadores de distribuição, reduzindo assim os custos operacionais das redes de distribuição. Uma função adicional vislumbrada para o dispositivo proposto é sua aplicação temporária, funcionando como um transformador móvel aplicável na regulação de tensão em localidades que apresentam níveis de tensão inadequados de acordo com o PRODIST e que não possibilitam a solução do problema de maneira rápida. Nestes casos, a instalação do dispositivo permitiria à concessionária ter tempo hábil para planejar as alterações necessárias na rede de distribuição, uma vez que os prazos estabelecidos no PRODIST muitas vezes são inexecutáveis. Com isso, evitaria as compensações aos clientes devido aos níveis de tensão de atendimento inadequados.

1.3 Organização da dissertação

A seguir é descrito, em termos gerais, o conteúdo abordado em cada seção da dissertação.

Capítulo 2: neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre as questões normativas envolvendo a regulação de tensão e aplicação de comutadores de *taps* em transformadores. São apresentados os principais trabalhos encontrados na literatura voltados à aplicação de comutadores de *taps* utilizando-se de dispositivos eletrônicos.

Capítulo 3: apresenta as principais características do transformador de distribuição utilizado no projeto do comutador eletrônico de *taps*. São apresentadas as características de potência, tensão e é feita a obtenção dos parâmetros do modelo do transformador, obtido a partir de dados de norma. É apresentado um *layout* para acesso externo aos terminais de *tap* do transformador, sendo avaliada a característica de tensão da geometria e estresse

cumulativo, comparando posteriormente com o comportamento da suportabilidade dielétrica da configuração de terminais de acesso aos *taps* realizada pelo método de elementos finitos.

Capítulo 4: é apresentada a topologia do comutador eletrônico de *taps* estudado, descrevendo-se os circuitos auxiliares que compõem o sistema de acionamento e o sistema de controle desenvolvido. É feita a avaliação do comportamento de tensão e corrente do transformador em regime de operação normal e durante o processo de comutação das chaves semicondutoras entre os enrolamentos do transformador. A partir disto é realizado o projeto das chaves semicondutoras utilizadas, sendo apresentado ainda os sistemas de controle e acionamento das chaves semicondutoras.

Capítulo 5: é apresentado o sistemas de proteção do comutador eletrônico de *taps*. São descritos os circuitos que compõem este sistema, bem como o projeto dos dispositivos envolvidos na sua operação.

Capítulo 6: resultados experimentais são apresentados com o intuito de validar a metodologia apresentada para o projeto dos componentes eletrônicos do sistema e a eficácia da operação do comutador eletrônico de *taps* sobre diversas condições de carga.

Conclusão: são apresentadas as conclusões obtidas da realização do trabalho, bem como as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica acerca das principais topologias de comutadores de *taps* encontradas na literatura, bem como das normas e resoluções brasileiras que implicam diretamente na qualidade da tensão fornecida ao consumidor e, por consequência, nas exigências requeridas dos comutadores de *taps*.

Como caráter informativo, inicialmente são apresentadas questões normativas envolvendo a qualidade de energia, transformadores de distribuição e comutadores de *taps*. Posteriormente, são apresentadas as configurações de comutadores de *taps*, iniciando-se pelos comutadores mecânicos. Na sequência, são apresentadas proposições que utilizam comutadores mecânicos assistidos por chave eletrônica, que buscam redução de arcos elétricos, proporcionada por circuitos eletrônicos de auxílio às comutações. E, por fim, são apresentadas as topologias de comutadores de *taps* aplicados em transformadores de distribuição que empregam apenas circuitos eletrônicos, envolvendo também questões relacionadas ao desenvolvimento destes dispositivos, como: configurações otimizadas aplicadas a comutadores eletrônicos de *taps*, circuitos de proteção, chaves bidirecionais, entre outros.

2.1 Questões normativas envolvendo a aplicação de comutadores de *taps*

A regulamentação do funcionamento e desempenho dos sistemas elétricos de distribuição de energia elétrica conectados ao sistema interligado nacional é normatizada e padronizada através do PRODIST da ANEEL, no caso do Brasil. Nele são tratados um conjunto de documentos que disciplinam o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradoras) conectados aos sistemas de distribuição, que incluem redes e linhas em tensão inferior a 230 kV. Os problemas de qualidade de energia são tratados especificamente no Módulo 8 (ANEEL, 2012b), definindo e regulamentando questões como: tensão de regime permanente, fator de potência, presença de harmônicos, desequilíbrios de tensão, flutuação de tensão, variações de frequência e tensão de curta duração e estabelecendo os indicadores de qualidade do produto e dos serviços prestados pelas companhias de distribuição de energia elétrica. Quanto à aplicação de comutadores eletrônicos de *taps* dois tópicos tratados no PRODIST são de

grande importância, sendo eles: a regulamentação da tensão de regime permanente e variações de tensão de curta duração.

Referente aos níveis de tensão de regime permanente, o PRODIST estabelece os limites de operação a serem cumpridos pelas companhias concessionárias, os quais podem ser considerados como: adequados, precários e críticos. Para sistemas de distribuição do tipo monofásico com tensão secundária 440 V/220 V (foco deste trabalho) os limites de tensão são apresentados na Tabela 2.1, para os demais sistemas de distribuição esses limites podem ser encontrados no Anexo I do Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2012b). Esses níveis implicam diretamente nos índices de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e para tensão crítica (DRC), sendo que o não cumprimento dos limites estabelecidos pela ANEEL pode resultar em compensações para os consumidores, além de não isentar a distribuidora de outras perdas e danos causados pelo serviço inadequado, o que pode resultar em prejuízos para as companhias concessionárias de energia.

Tabela 2.1 – Classificação dos níveis de tensão eficaz para sistemas 440/220 V (ANEEL, 2012b)

| Nível de tensão nominal | Classificação | Variação |
|--------------------------------|----------------------|--|
| 440 V/220 V | Adequada | (402-458 V) (201-229 V) |
| | Precária | (380-402 V ou 458-466 V) (189-201 V ou 229-233 V) |
| | Crítica | (<380 V ou >466 V) (<189 V ou >233 V) |

As variações de tensão de curta duração representam significativos desvios do valor eficaz da tensão durante curtos períodos de tempo e podem causar danos aos equipamentos conectados à rede elétrica. Estes eventos são um dos principais responsáveis pelo desligamento de equipamentos eletrônicos em residências. Porém, é nos ambientes industriais que causam maiores problemas, uma vez que podem interromper toda uma linha de produção devido ao desligamento de máquinas e outros dispositivos.

Tais eventos são classificados pelo PRODIST conforme apresentado na Tabela 2.2 e são exemplificados na Figura 2.1. A correção destes problemas tem sido um desafio para as companhias de energia elétrica até hoje, pois geralmente são causados por eventos associados à faltas e à partida de grandes cargas que ocorrem ao longo das redes elétricas, o que dificulta a aplicação de soluções corretivas.

Tabela 2.2 – Classificação das variações de tensão de curta duração (ANEEL, 2012b).

| Classificação | Denominação | Duração da variação | Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência |
|-------------------------------|----------------------------------|--|--|
| Variação momentânea de tensão | Interrupção momentânea de tensão | Inferior ou igual a três segundos | Inferior a 0,1 p.u |
| | Afundamento momentâneo de tensão | Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos | Superior a 0,1 p.u. e inferior a 0,9 p.u |
| | Elevação momentânea de tensão | Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos | Superior a 1,1 p.u |
| Variação temporária de tensão | Interrupção temporária de tensão | Superior a três segundos e inferior a três minutos | Inferior a 0,1 p.u |
| | Afundamento temporário de tensão | Superior a três segundos e inferior a três minutos | Superior a 0,1 e inferior a 0,9 p.u |
| | Elevação temporária de tensão | Superior a três segundos e inferior a três minutos | Superior a 1,1 p.u |

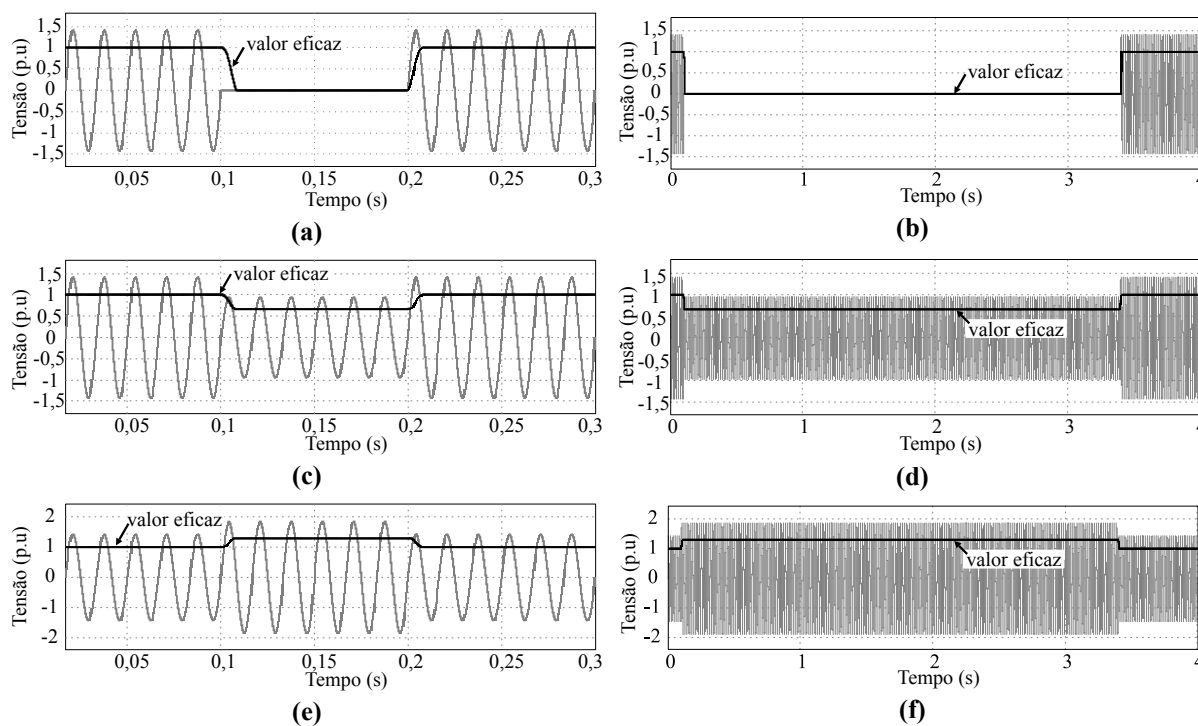


Figura 2.1 – Exemplos de VTCDs. (a) Interrupção momentânea. (b) Interrupção temporária. (c) Afundamento momentâneo. (d) Afundamento temporário. (e) Elevação momentânea. (f) Elevação temporária.

A NBR 5440: 2011 (ABNT, 2011) define as características elétricas e mecânicas relativas aos transformadores aplicáveis em redes aéreas de distribuição para tensões primárias de até 36,2 kV e secundárias usadas em transformadores de distribuição monofásicos e trifásicos. São estabelecidas as potências nominais para transformadores monofásicos, contemplando os valores de: 3; 5; 10; 15; 25; 37,5; 50; 75 e 100 kVA. Para transformadores trifásicos, são estabelecidos os seguintes valores de potências nominais: 15; 30; 45; 75; 112,5; 150; 225 e 300 kVA. Esta norma ainda determina as tensões de derivações a que os transformadores podem operar sendo estabelecidos pelo menos três níveis de tensão para transformadores de distribuição, o que implica diretamente nos enrolamentos de *tap* do transformador. Também são apresentadas características como níveis de isolamento, tipos de ligações dos enrolamentos e características construtivas dos transformadores.

Comutadores de *taps* sob carga com operação por chaves mecânicas possuem uma consolidada normatização, podendo citar-se como exemplos: NBR 8667-1 (ABNT, 2012a), NBR 8667-2 (ABNT, 2012b), IEC 60214-1 (IEC, 2003), IEC 60214-2 (IEC, 2004) e IEEE C57.131-2012 (IEEE, 2012). Porém, comutadores de *taps* eletrônicos não possuem uma normatização própria até então, isso muito se deve a falta de maturação da tecnologia, que ainda encontra-se em desenvolvimento.

2.2 Revisão histórica

Antes do desenvolvimento dos sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente alternada, existiam apenas sistemas isolados de distribuição de energia elétrica e de reduzida capacidade de atendimento (WOODWARD, 1993), nestes sistemas a regulação de tensão era feita através do ajuste da excitação dos geradores. Com a ampliação dos sistemas elétricos, a regulação da tensão em diferentes partes do sistema não podia mais ser feita apenas através desta técnica (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011). Assim, o desenvolvimento de comutadores de *taps* aplicados nos transformadores permitiu uma nova maneira de regular-se a tensão ao longo dos sistemas elétricos tanto de transmissão, quanto de distribuição de energia elétrica.

O emprego de comutadores de *taps* em transformadores de distribuição para a regulação da tensão fornecida ao usuário se fez presente desde as primeiras gerações de linhas elétricas em corrente alternada. Esses dispositivos permitem a mudança da relação de transformação interna dos transformadores, possibilitando a alteração da tensão secundária de maneira simples. Salienta-se que os *taps* eram inicialmente selecionados de modo manual e,

posteriormente, a comutação dos mesmos evoluiu para comutadores automáticos eletromecânicos (GARCIA, RODRIGUEZ *et al.*, 2009).

Na Europa, a grande maioria dos comutadores de *taps* automáticos deriva de patentes como a representada na Figura 2.2, cuja topologia foi proposta em 1926. A operação do comutador de *taps* apresentado na Figura 2.2 ocorre de forma muito simples: o novo *tap* é conectado previamente à desconexão do *tap* atual, evitando a interrupção do fornecimento de energia elétrica à carga. Por outro lado, ocorrem sobrecorrentes no comutador durante a sobreposição no acionamento dos *taps*, uma vez que o enrolamento que entra em operação é curto-circuitado a fim de se evitar a perda de abastecimento dos consumidores. A corrente através do enrolamento curto-circuitado durante a comutação é limitada por impedâncias série, as quais são curto-circuitadas após a operação. Salienta-se que comutadores de *taps* eletromecânicos são hoje empregados na conexão de transformadores de subestações para alimentadores longos, na faixa de médias tensões (11,9 kV a 34,5 kV, com potências entre 3,15 MVA e 40 MVA) e altas tensões (30 kV a 138 kV) (GARCIA, RODRIGUEZ *et al.*, 2009).

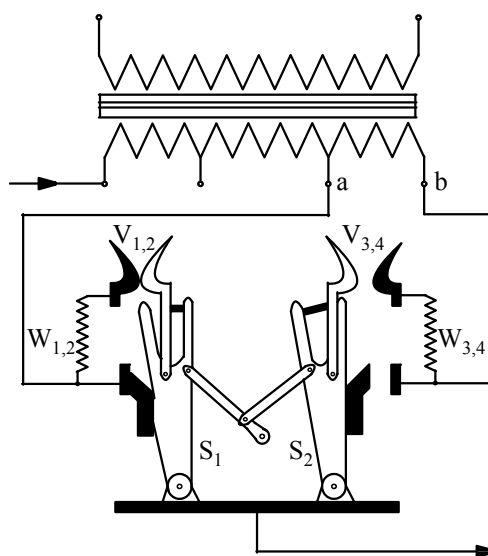


Figura 2.2 – Comutador mecânico de *taps* proposto em 1926 (GARCIA, RODRIGUEZ *et al.*, 2009).

Os comutadores de *taps* mecânicos tiveram seu emprego diversificado por companhias na Europa, América, Austrália e, mais recentemente, na Ásia. A evolução do estudo e desenvolvimento de comutadores de *taps* proporcionou o surgimento de comutadores auxiliados por circuitos eletrônicos, como em (GAO, 2002), bem como comutadores puramente eletrônicos, como em (BAUER e DE HAAN, 1998a). O primeiro comutador estático no mundo foi colocado em operação em campo na Noruega em 1986 pela ABB (Asea Brown Boveri) *Components* e sua grande vantagem reside na eliminação de partes mecânicas

móveis pelo caminho da corrente (LARSSON, INNANEN *et al.*, 1997). Maiores detalhes acerca das diversas tecnologias de comutadores de *taps* são apresentados nas próximas seções.

2.3 Comutadores mecânicos de *taps*

Conforme (GARCIA, RODRIGUEZ *et al.*, 2009), comutadores empregando escovas e núcleos de ferro toroidais são muito comuns atualmente em laboratórios e plantas industriais na implementação de reguladores monofásicos de baixa tensão em potência na faixa de 100 VA a 15 kVA. Já para a regulação dos níveis de tensão na faixa de potência entre 30 kVA e 300 kVA em sistemas de distribuição trifásicos, comutadores de *taps* implementados em núcleos com três braços, empregando escovas de comutação controladas por servomotores estão ainda em uso. Materiais de longa durabilidade a base de grafite são empregados na implementação das escovas de comutação, proporcionando alta confiabilidade. Por outro lado, essa classe de comutadores de *taps* realiza uma operação de comutação de forma lenta (em torno de um segundo para cada comutação entre *taps* distintos).

Em transformadores de distribuição, é usual o emprego de comutadores mecânicos de *taps*, porém, projetados para a operação sem carga. Tais dispositivos são conhecidos como *de-energized tap changers* (DETC) ou *off-circuit tap changers*, conforme a norma IEEE C57.131-2012 (IEEE, 2012). Nesse sentido, depois de identificada a não conformidade dos níveis de tensão fornecidos ao consumidor, a alteração dos *taps* do transformador ocorre de modo manual (implicando uma correção em regime permanente apenas) e requer a interrupção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores alimentados pela mesma rede de baixa tensão, para que o procedimento seja realizado de maneira segura por uma equipe especializada. A Figura 2.3 apresenta um comutador mecânico de *taps* de operação sem carga do tipo circular.

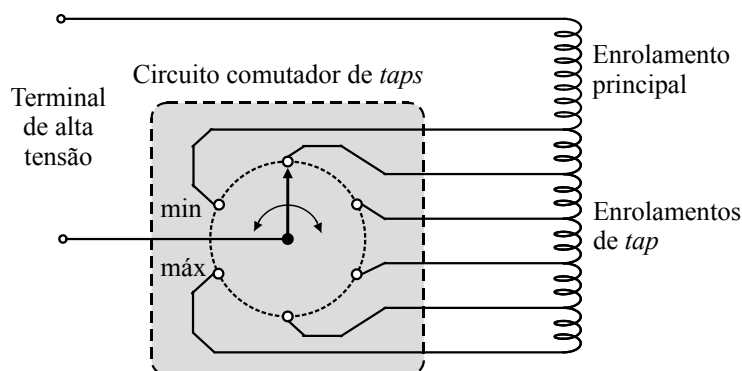


Figura 2.3 – Comutador mecânico de *taps* sem carga do tipo circular (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011).

Comutadores de *taps* sob carga, ou OLTC, são amplamente empregados em transformadores de potência, permitindo a variação automática da tensão sem a necessidade de desconexão da carga. Segundo (GAO, 2002), um OLTC é composto basicamente por dois dispositivos: (i) um seletor de *taps* (mecânico); e (ii) um circuito de desvio de corrente (*diverter*), que limita a corrente circulante entre o *tap* atual e o *tap* a ser conectado. O primeiro dispositivo é projetado para conduzir integralmente a corrente de carga, mas não para bloqueá-la, função destinada ao segundo. Os circuitos de desvio resistivos são geralmente montados no interior do tanque do transformador, já os do tipo reativos são montados em um compartimento externo na maioria dos casos (DOHNAL e MR, 2010).

2.3.1 Comutadores mecânicos de *taps* automáticos do tipo reativo

Os comutadores de *taps* sob carga do tipo reativo podem conduzir a corrente de carga continuamente, enquanto os do tipo resistivo conduzem a corrente apenas durante o período de comutação. Isto representa uma vantagem, pois se o sistema mecânico é danificado e para durante o processo de comutação, o comutador não será danificado e o transformador continuará funcionando. Por outro lado, estes comutadores possuem desvantagens, como a baixa velocidade de comutação entre *taps*, longa duração do arco elétrico no processo de comutação, reduzida vida útil dos contatos e grande volume dos reatores. Estas características tem tornado estes dispositivos obsoletos (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011).

Na Figura 2.4 são apresentadas duas configurações de comutadores de *taps* sob carga do tipo reativo, a Figura 2.4 (a) tem como vantagem a possibilidade de gerar $2n-1$ passos de tensão com n número de *taps*, porém, o grande número de chaves resulta em maior custo, volume e possibilidade de falhas. A Figura 2.4 (b) apresenta uma alternativa com apenas duas chaves de operação sob carga e duas de operação sem carga.

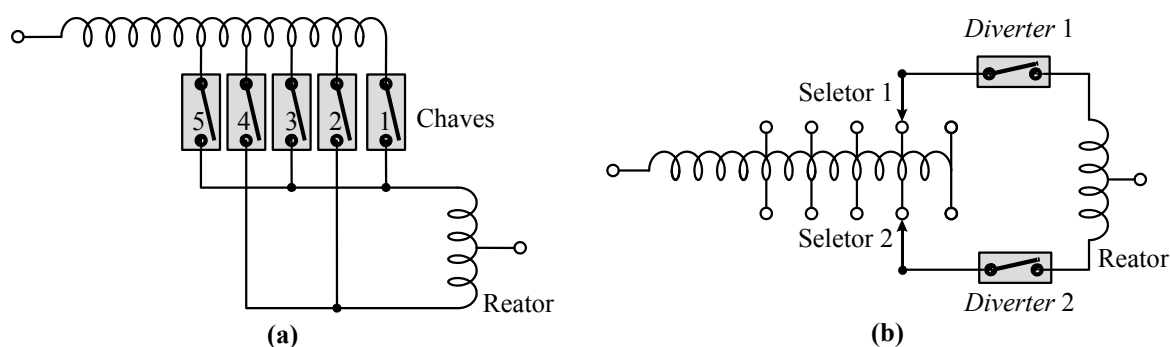


Figura 2.4 – Comutador mecânico de *taps* sob carga do tipo reativo (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011). (a) Regulação para $2n-1$ níveis de tensão. (b) Regulação com n níveis de tensão.

2.3.2 Comutador mecânicos de *taps* automáticos do tipo resistivo

Comutadores de *taps* sob carga do tipo resistivo possuem a vantagem de ter um período de comutação menor que os do tipo reativo, resultando em uma maior vida útil dos contatos. Este tipo de comutador tem substituído os comutadores do tipo reativo justamente pela maior vida útil (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011). Uma representação típica destes dispositivos, bem como seus estágios de comutação é apresentada na Figura 2.5. Diferente dos comutadores reativos, a resistência é conectada apenas durante o processo de comutação, limitando a corrente que surge durante a sobreposição dos enrolamentos de *tap*.

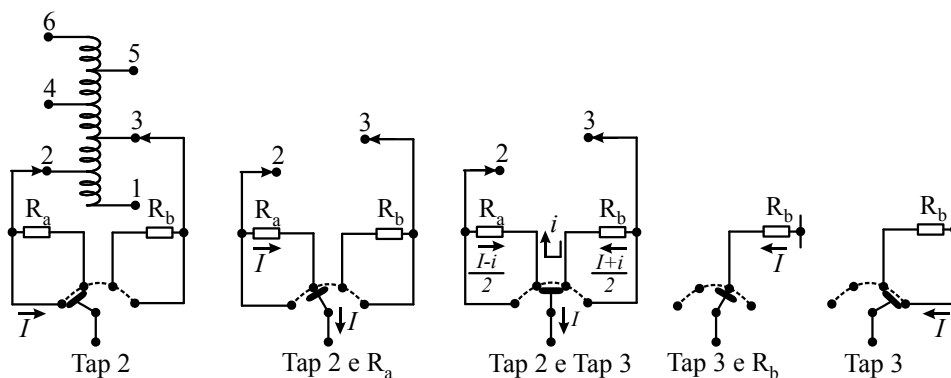


Figura 2.5 – Comutador mecânico de *taps* sob carga do tipo resistivo (FAIZ e JAVIDNIA, 2000).

2.3.3 Limitações dos comutadores mecânicos de *taps*

Apesar do avanço obtido na estrutura de comutadores mecânicos de *taps* sob carga através dos anos, tanto no processo de mudança de *taps*, quanto na tecnologia de contatos e demais dispositivos envolvidos na comutação, os mesmos apresentam algumas limitações e consideráveis desvantagens, representando a principal razão para falhas em transformadores (MAMEDE FILHO, 2005; FAIZ e SIAHKOLAH, 2008). De modo geral, apesar da frequência de operação dos comutadores mecânicos de *taps* imposta pelo sistema de distribuição ser relativamente baixa (na ordem dezenas por dia) e o tempo mínimo entre comutações ser garantido pelo sistema de controle (na ordem de minutos), os contatos das chaves mecânicas, bem como o óleo do transformador, demandam revisões periódicas, resultado do arco elétrico formado no processo de comutação, comprometendo o custo operacional do sistema (GARCIA, RODRIGUEZ *et al.*, 2009).

Além disso, o emprego de comutadores mecânicos de *taps* é voltado apenas para a regulação da tensão em regime permanente fornecida ao consumidor, tendo-se em vista o elevado tempo requerido para a realização de uma comutação (FAIZ e JAVIDNIA, 2000). Uma desvantagem adicional com respeito a estes dispositivos é o fato de apresentarem elevadas perdas durante o processo de comutação, que ocorrem devido ao uso de resistências para limitar a corrente de curto-circuito decorrentes desse processo (FAIZ e SIAHKOLAH, 2008).

2.4 Topologias de comutadores de *taps* assistidos por chaves estáticas

No intuito de minimizar os efeitos do arco elétrico que ocorre em comutadores eletromecânicos de *taps* sob carga, que conforme comentado compromete os contatos das chaves mecânicas bem como a qualidade da classe de isolamento do óleo do transformador, diversos trabalhos sugerem a substituição dos elementos passivos (resistores e/ou indutores) por circuitos que contemplem chaves semicondutoras controladas (*Insulated-Gate Bipolar Transistor* - IGBT, *Gate Turn-off Thyristor* – GTO, etc.) ou semicontroladas (tiristores).

Em (ROBERTS e ASHMAN, 1969) é apresentada uma das primeiras topologias de comutadores mecânicos de *taps* assistidos por chaves estáticas. A topologia consiste de um comutador de *taps* sob carga convencional resistivo, modificado para reduzir o arco elétrico formado durante o processo de comutação. São inclusos três pares de tiristores em antiparalelo, os quais assumem a corrente do circuito de desvio durante o processo de comutação, após a mudança do enrolamento de *tap* os tiristores são desligados, evitando um significativo arco dos contatos. A Figura 2.6 apresenta o circuito do comutador de *taps* proposto.

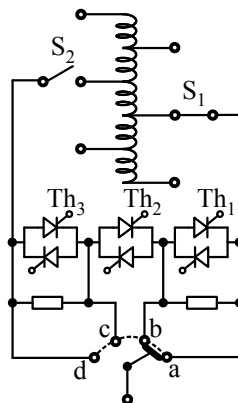


Figura 2.6 – Conceito de comutador de *taps* híbrido (ROBERTS e ASHMAN, 1969).

O comutador apresentado na Figura 2.6 tem como vantagens a significativa redução do arco elétrico, porém, o fato de os tiristores estarem permanentemente conectados ao circuito de desvio de corrente pode causar a queima dos mesmos devido à sobretensões que possam aparecer entre as chaves mecânicas no processo de comutação, o que reduz a confiabilidade do sistema. O comutador proposto por (COOKE e WILLIAMS, 1992) e apresentado na Figura 2.7 permite a solução deste problema, uma vez que as chaves semicondutoras são conectadas ao circuito apenas durante a comutação dos *taps*, permanecendo isoladas durante a operação normal do transformador. Assim, o comutador de *taps* não falha em caso de queima dos tiristores, aumentando a confiabilidade do sistema (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011).

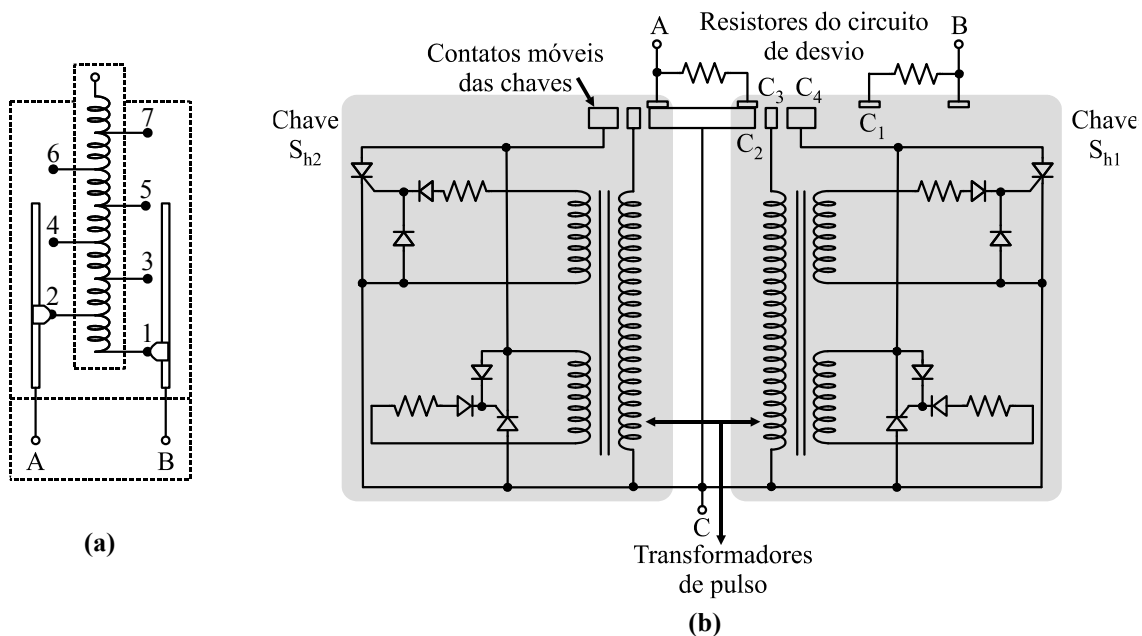


Figura 2.7 – Conceito de comutador de *taps* híbrido apresentado por (COOKE e WILLIAMS, 1992). (a) Circuito seletor de *taps*. (b) Comutador proposto.

Os terminais A e B são conectados a dois enrolamentos de *tap* distintos, conectados ao seletor, como apresentado na Figura 2.7 (a) e o terminal C representa o terminal comum da bobina. O circuito de desvio de corrente apresentado na Figura 2.7 (b) é composto por duas chaves bidirecionais, S_{h1} e S_{h2} , ambas são compostas por um contato fixo (C_1) e três contatos móveis (C_2 , C_3 e C_4), conforme demonstrado para a chave S_{h1} . Durante o processo de comutação da chave S_{h1} , os contatos C_2 , C_3 e C_4 movem-se da esquerda para a direita. Quando o contato C_4 é conectado com C_1 , não há corrente circulando pelo circuito de desvio, pois os tiristores não estão polarizados e a tensão dos terminais B e C aparecem sobre os tiristores dessa chave.

Continuando o deslocamento dos terminais móveis, quando o terminal C_3 e C_4 estiverem conectados ao contato C_1 o transformador de pulso irá ser energizado e seu circuito secundário acionará os tiristores, colocando-os em condução, isso resulta no curto-circuito do transformador de pulso que irá retirar o sinal de acionamento dos tiristores e estes irão sair de condução na próxima passagem por zero da corrente. Entretanto, antes dos tiristores saírem de condução, o contato C_2 assume a corrente e os contatos C_3 e C_4 são isolados, finalizando o processo de comutação das chaves.

Em (SHUTTLEWORTH, TIAN *et al.*, 1996) é proposto um novo método para mudança de *taps* sob carga, o mesmo é apresentado na Figura 2.8 (a), utilizando dispositivos de estado sólido (tiristores), chaves mecânicas: A, B e C e chaves a vácuo: V_A e V_B . Este circuito é empregado em conjunto com um comutador de *taps* convencional em substituição aos resistores de limitação de corrente. A transferência da corrente das chaves a vácuo para as chaves de estado sólido é feita por um circuito auxiliar composto por um transformador, um varistor e uma chave de estado sólido, como representado na Figura 2.8 (b). Apesar do processo de comutação demandar alguns segundos, a utilização deste sistema reduz o tempo de manobra com relação ao uso de *taps* mecânicos, porém, apresenta como desvantagens o maior custo das chaves a vácuo e a conexão permanente das chaves estáticas ao comutador de *taps*.

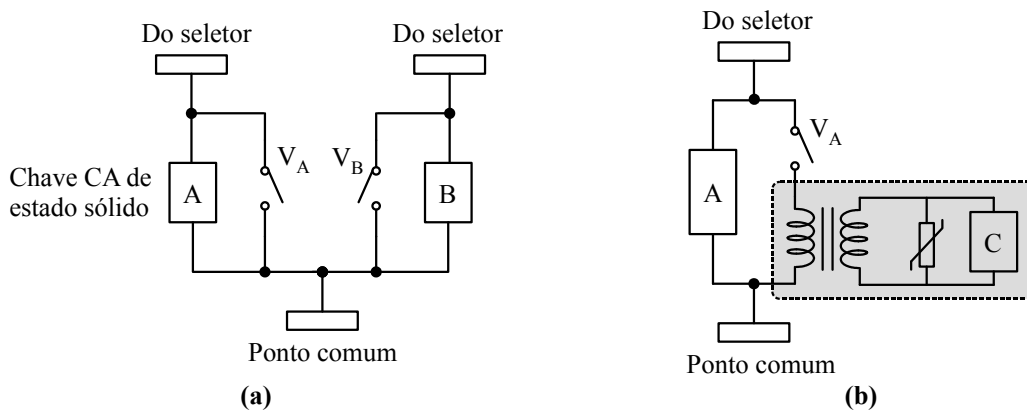


Figura 2.8 – Comutador de *taps* proposto por (SHUTTLEWORTH, TIAN *et al.*, 1996). (a) Circuito de desvio. (b) Circuito auxiliar.

A configuração de comutador de *taps* apresentada por (SHUTTLEWORTH, TIAN *et al.*, 1996) é analisada considerando a substituição de tiristores por GTOs em (FAIZ e JAVIDNIA, 2000). Resultados de simulação indicam que o sistema proposto apresenta comutação significativamente mais rápida que os comutadores de *taps* sob carga convencionais, porém, informações adicionais sobre o projeto não são indicadas no trabalho.

Em (GAO, 2002) é proposto o emprego de um comutador mecânico de *taps* sob carga assistido por tiristores, conforme apresentado na Figura 2.9. Os objetivos são minimizar as perdas de condução (oriundas de resistores de transição utilizadas nas configurações clássicas), bem como o arco elétrico observado no instante da abertura de um *tap*. Resultados experimentais sob carga resistiva e indutiva são apresentados para validar a proposta apresentada no trabalho. Assim, os tiristores são projetados para conduzir por um curto período de tempo, apenas durante a comutação do seletor de *taps*.

Após a conclusão da comutação de um *tap* para o seguinte, o comutador mecânico assume a corrente de carga, quando os tiristores podem ser bloqueados na passagem por zero da corrente. Salienta-se que todo o processo de acionamento/bloqueio dos tiristores deve ser sincronizado com a comutação do seletor. Um detalhe acerca da implementação das chaves bidirecionais em corrente e tensão, bem como do circuito de comando, é representado na Figura 2.9 (b).

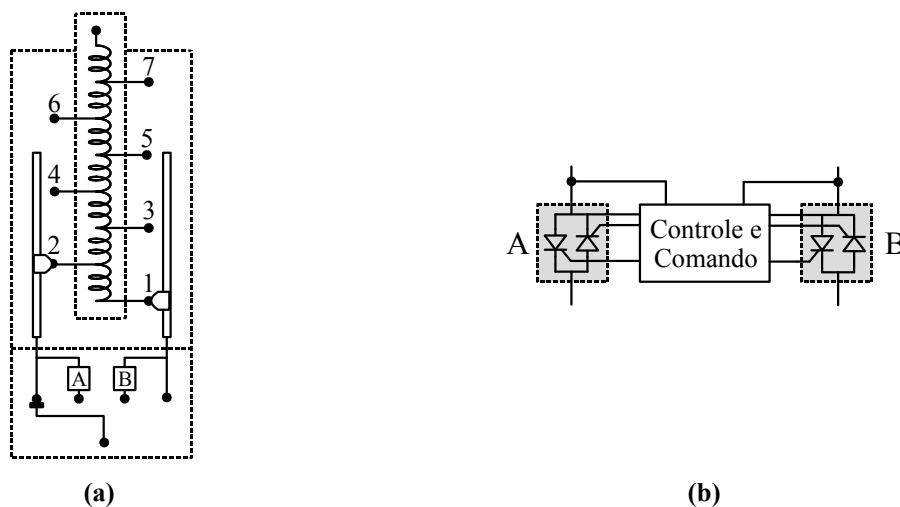


Figura 2.9 – Comutador de *taps* proposto por (GAO, 2002). (a) Circuito proposto (substituição dos resistores por tiristores). (b) Comando das chaves bidirecionais em corrente e tensão “A” e “B”.

A patente (LAVIEVILLE, WEBER *et al.*, 2008) propõe o circuito representado na Figura 2.10 que emprega GTOs ou IGBTs. Segundo os autores, o circuito proposto pode ser aplicado a um transformador apresentando n *taps*. Basicamente, a função do circuito é proporcionar o desvio da corrente de carga enquanto que as chaves mecânicas (C_1 a C_3), responsáveis pela seleção dos *taps* do transformador, são comutadas. Ao final do processo de comutação, o circuito é desativado, quando se emprega as chaves mecânicas de *by-pass* C_4 ou C_5 .

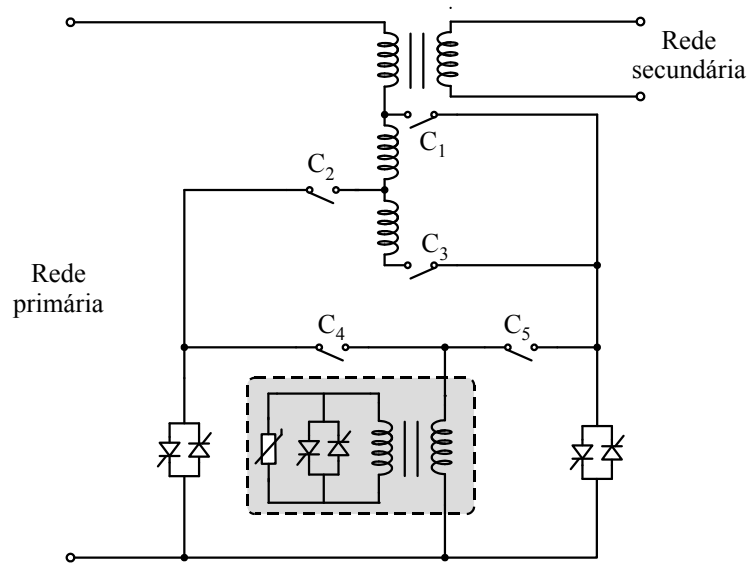


Figura 2.10 – Comutador de *taps* proposto por (LAVIEVILLE, WEBER *et al.*, 2008).

Pode-se concluir que os circuitos híbridos de comutadores de *taps* permitem a redução significativa do arco elétrico, ou mesmo a total extinção dos mesmos, durante o processo de comutação (FAIZ e JAVIDNIA, 2000). Além disso, permitem a redução das perdas, características dos comutadores sob carga do tipo resistivo. Entretanto, estes sistemas mantêm chaves mecânicas, o que leva o sistema a operar em velocidade limitada. A utilização de comutadores de *taps* eletrônicos, sem chaves mecânicas, permite maior velocidade e total eliminação da formação de arco elétrico na comutação (FAIZ e SIAHKOLAH, 2011).

2.5 Comutadores eletrônicos de *taps*

Com o surgimento dos dispositivos semicondutores de potência, especialmente dos tiristores, surgiu o interesse pelo desenvolvimento de comutadores de *taps* de transformadores totalmente eletrônicos. Dentre as patentes consideradas relevantes, a US 3195038 - 1965 (FRY, 1965) é considerada a patente americana mais antiga a propor comutadores de *taps* de estado sólido, ou seja, utilizando-se apenas de chaves semicondutoras de potência (EPRI, 2006). Esta patente apresenta configurações de comutadores eletrônicos de *tap* aplicáveis ao secundário do transformador. Conforme apresentado na Figura 2.11 (a), é proposta a utilização de dois pares de tiristores em antiparalelo, operando de maneira excludente, ou seja, nunca os dois pares operam ao mesmo tempo. Quando os tiristores Th_{N1} estão comutados o enrolamento de *tap* é conectado aos demais enrolamentos do secundário e os tiristores Th_{N2} estão em bloqueados, evitando que o enrolamento de *tap* seja curto-circuitado. Quando Th_{N2} está em condução o

enrolamento de *tap* é retirado de operação e os tiristores Th_{N1} estão em aberto. Ainda nesta patente, é apresentada uma configuração que permite a utilização do enrolamento de *tap* de maneira aditiva ou subtrativa de tensão, a qual é apresenta na Figura 2.11 (b).

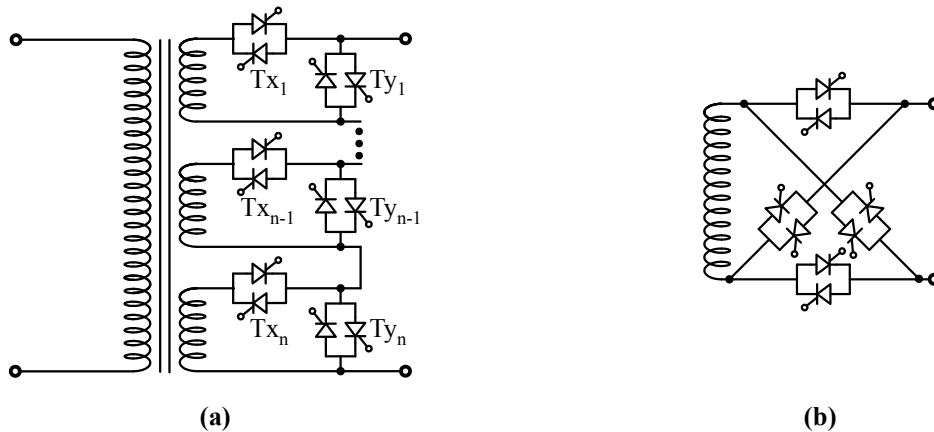


Figura 2.11 – Topologias de comutadores eletrônicos de *taps* (FRY, 1965). (a) Comutador eletrônico de *taps* proposto. (b) Configuração para obtenção de dupla polaridade do enrolamento de *tap*.

Com o aumento dos níveis de tensão e potência das chaves semicondutoras, além do desenvolvimento de novas tecnologias de chaves, as aplicações de comutadores eletrônicos de *taps* puderam ser ampliadas. Na década de 1980, a disponibilidade de chaves semicondutoras de baixo custo para aplicações da ordem 40 A e 800 V, como tiristores e TRIACs, tornou possível a substituição dos comutadores mecânicos de *taps* por circuitos eletrônicos equivalentes em aplicações de baixas potências - na ordem de até 10 kVA - (GARCIA, RODRIGUEZ *et al.*, 2009). Uma vez que o pico de corrente não-repetitiva proporcionada por essas chaves semicondutoras é muito superior a sua capacidade de corrente repetitiva, a necessidade de sobredimensionamento dos semicondutores em função das sobrecorrentes no momento da comutação dos *taps* pode ser eliminada em muitos casos.

A substituição de chaves mecânicas e eletromecânicas por chaves eletrônicas apresenta vantagens como: velocidade de chaveamento muito rápida, ausência de partes móveis e nenhum rebatimento de contatos no fechamento (FAIZ e SIAHKOLAH, 2002). Entretanto, um comutador de *taps* baseado em chaves estáticas deve apresentar alta confiabilidade, vida-útil equivalente ao comutador mecânico e fácil substituição de peças, além disso, deve operar com a temperatura de operação do transformador (BAUER e DE HAAN, 1999).

Assim, de modo a obter as vantagens proporcionadas pelo emprego de comutadores de *taps* baseados apenas em dispositivos semicondutores, uma série de trabalhos tem focado em diversas áreas do desenvolvimento destes dispositivos, envolvendo: otimização de topologias

de enrolamentos de *taps*, desenvolvimento de estruturas com diferentes tecnologias de semicondutores, sistemas de proteção para o comutador eletrônico, além do projeto e implementação deste tipo de comutador. A seguir são apresentados alguns dos trabalhos encontrados na literatura envolvendo comutadores eletrônicos de *taps*.

2.5.1 Otimização de estruturas de comutadores eletrônicos de *taps*

A otimização das estruturas de enrolamentos de *taps* e chaves eletrônicas bidirecionais pode trazer muitos benefícios para o projeto e implementação dos comutadores eletrônicos. Uma série de vantagens foi apontada em (MONROY, GOMEZ-EXPOSITO *et al.*, 2007) acerca do emprego de comutadores eletrônicos de *taps* sob carga. Nesse trabalho, os autores avaliam dois arranjos de comutadores sob diferentes condições de operação: normal, tensão de saída da subestação reduzida, tensão de saída da subestação reduzida e sobrecarga e situação de falta. Em todas as situações analisadas, mesmo com faltas, o uso do comutador eletrônico resultou em níveis de tensão adequados.

Em (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003) é proposto um comutador baseado em chaves estáticas bidirecionais (compostas por tiristores) o qual é aplicado a um transformador de distribuição (800 kVA, 20 kV/400 V), proporcionando um grande número de níveis de tensão empregando um reduzido número de chaves semicondutoras. Propõe-se o emprego de um comutador composto de K estruturas básicas cada uma composta por n *taps*. É realizada uma análise de otimização buscando definir K e n de forma a atender as seguintes restrições:

- (i) Para um dado número de *taps*, que topologia proporciona o maior número de passos (*steps*) de tensão?
- (ii) Para um dado número de chaves N_S , que topologia proporciona o maior número de passos de tensão?
- (iii) Para um dado número de passos de tensão N_V , que topologia proporciona o menor número de *taps* e/ou chaves?
- (iv) Para um dado número de passos de tensão N_V , que topologia proporciona chaves de menor tensão?

Por fim, tendo por base o custo dos semicondutores, os autores propõem posicionar o comutador no primário do transformador ($I_H = 23$ A e $V_H = 4$ kV). Três estruturas obtidas pela metodologia de otimização proposta são apresentadas no trabalho:

- (i) com número mínimo de chaves semicondutoras [Figura 2.12 (a)];

- (ii) com menores esforços de tensão sobre as chaves semicondutoras [Figura 2.12 (b)];
- (iii) com menor número de *taps* [Figura 2.12 (c)].

Cabe ressaltar que as estruturas são assimétricas, ou seja, a tensão entre os *taps* não é idêntica. Uma análise semelhante é desenvolvida em (FAIZ e SIAHKOLAH, 2002).

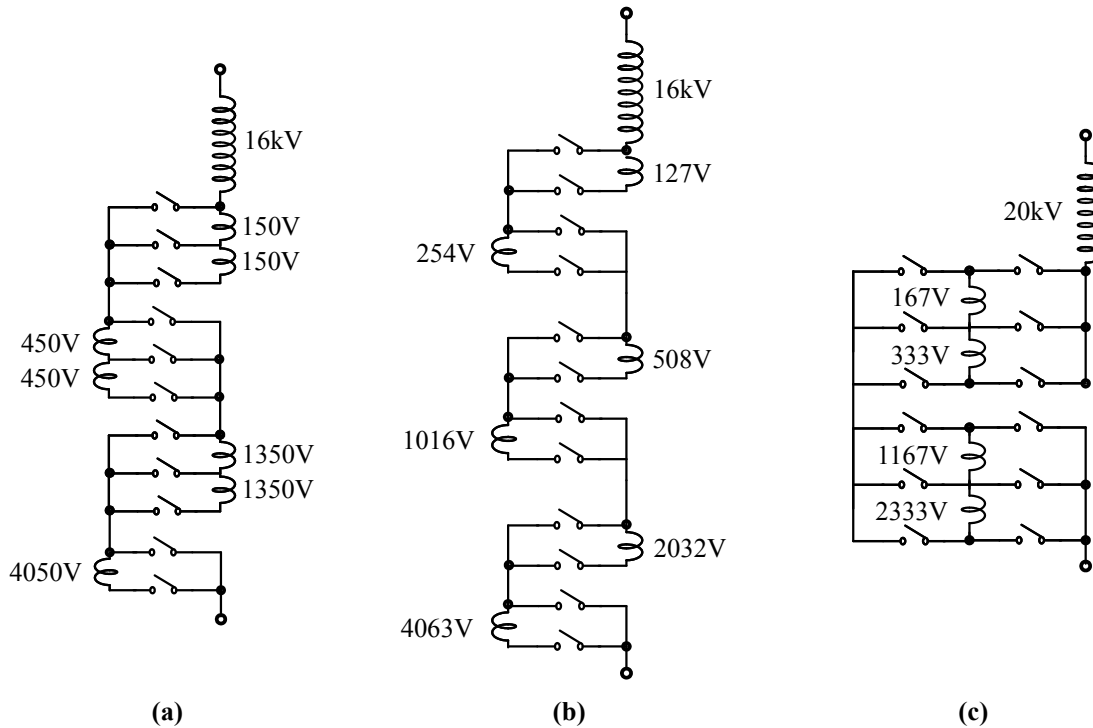


Figura 2.12 – Arranjos ótimos de comutadores de *taps* propostos em (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003) considerando: (a) O menor número de chaves. (b) Menor esforço de tensão nas chaves. (c) Menor número de *taps*.

Buscando o aprimoramento do projeto de comutadores eletrônicos de *taps* segundo critérios definidos *a priori* (como redução no número de chaves, no custo, etc.), em (GOMEZ-EXPOSITO e MONROY BERJILLOS, 2007) é realizada uma revisão/comparação de diferentes configurações de comutadores de *taps*. Os autores pontuam ainda que vinte degraus de tensão (proporcionados pela comutação dos *taps* do transformador) são necessários para altas tensões, ao passo que apenas quatro ou cinco são demandados para transformadores de distribuição. Alguns conceitos básicos são apresentados nesse mesmo trabalho, como a disponibilidade de enrolamentos contínuos e independentes no transformador para a derivação dos *taps* - Figura 2.13 - e a definição de blocos básicos onde é possível apenas a soma de tensões de bobinas ou a soma e a subtração, dependendo do arranjo de chaves semicondutoras e do tipo de enrolamento disponível - Figura 2.14.

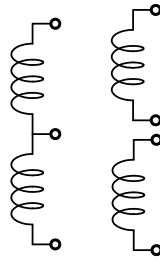


Figura 2.13 – Taps derivados a partir de enrolamentos contínuos e de enrolamentos independentes (GOMEZ-EXPOSITO e MONROY BERJILLOS, 2007).

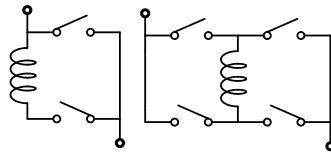


Figura 2.14 – Blocos básicos: configuração unidirecional (soma de tensões) e bidirecional (soma e subtração de tensões) (GOMEZ-EXPOSITO e MONROY BERJILLOS, 2007).

Alguns exemplos de configurações analisadas/propostas neste trabalho podem ser visualizados na Figura 2.15. Na Figura 2.15 (a) é representada a configuração de comutador de *taps* mais empregada em transformadores de média/baixa tensão na Europa, cabe observar que a bobina principal é seccionada no centro e cada metade pode ser conectada em série com outros dois *taps* através de chaves semicondutoras bidirecionais, proporcionando um total de cinco degraus de tensão. Nesse caso, a substituição dos comutadores mecânicos de *taps*, que são comutados à vazio, por um sistema eletrônico baseado em chaves semicondutoras controladas que proporcione comutações sob carga deve aprimorar consideravelmente a qualidade da tensão fornecida aos consumidores, especialmente em alimentadores longos ou sobrecarregados. Adicionando um bloco básico da Figura 2.14 ao comutador de *taps*, conforme representado na Figura 2.15 (b), resulta na possibilidade de obtenção de 4 degraus de tensão sem alterar os enrolamentos principais ou auxiliares do transformador, pode-se verificar que dois *taps* (referentes aos terminais T_1 e T_3) não foram utilizados.

Considerando o aumento da flexibilidade de controle proporcionada por comutadores eletrônicos de *taps*, a redução de uma possibilidade de combinação (como no caso anterior) não implicará grandes restrições na maioria dos casos. Adicionalmente, na Figura 2.15 (c) é apresentado um arranjo alternativo, onde, em função da natureza bidirecional do bloco empregado, nove degraus de tensão são possíveis. Essa é uma solução interessante para aplicações onde o transformador encontra-se localizado em regiões remotas, sujeitas a grandes flutuações de tensão. Por outro lado, a configuração apresentada na Figura 2.15 (c) requer que os enrolamentos auxiliares sejam eletricamente isolados dos enrolamentos

principais, o que implica modificações no processo de produção do transformador e na redução da confiabilidade do mesmo.

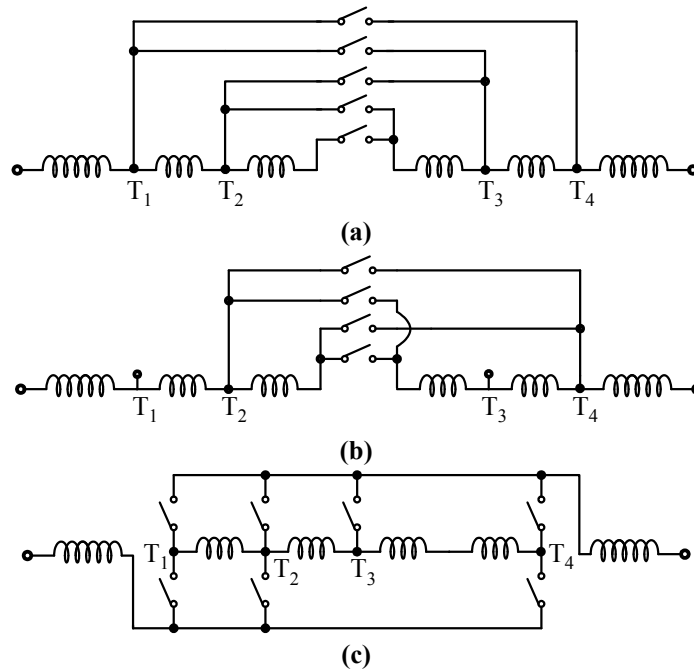


Figura 2.15 – Configurações de comutadores de *taps* analisadas em (GOMEZ-EXPOSITO e MONROY BERJILLOS, 2007). (a) Configuração convencional em transformadores de média e baixa tensão na Europa. (b) Configuração proposta para a obtenção de quatro degraus de tensão. (c) Configuração proposta para a obtenção de nove degraus de tensão.

2.5.2 Configurações de chaves bidirecionais aplicadas em comutadores eletrônicos de *taps*

Além do desenvolvimento de estruturas de enrolamentos de *taps*, alguns trabalhos estudam e propõem estruturas de chaves bidirecionais aplicadas em comutadores eletrônicos de *taps*. Em (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003) os autores fazem uma análise de otimização buscando identificar qual o arranjo de *taps* reduz o número de chaves semicondutoras para um dado número de níveis de tensão. São propostos três arranjos de tiristores e diodos para a implementação de chaves bidirecionais em corrente e tensão, conforme representado na Figura 2.16.

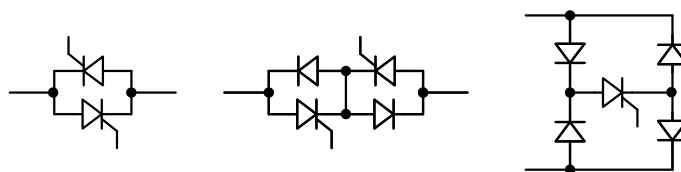


Figura 2.16 – Possíveis arranjos para a implementação de chaves bidirecionais em corrente e tensão (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003).

Em (BAUER e SCHOEVAARS, 2003) é apresentada uma configuração de célula bidirecional formada por IGBTs em configuração anti-série, coletor-comum. O arranjo é avaliado para aplicação em um comutador eletrônico de *taps* com modulação PWM (*Pulse Width Modulation*). A configuração proposta emprega uma técnica de comutação para as chaves semicondutoras que elimina a necessidade de medição da corrente primária, isso se deve à lógica de comutação das chaves semicondutoras, que ainda permite evitar o curto-circuito do enrolamento de *tap* a ser colocado em operação. Porém, a estratégia proposta necessita que todas as chaves semicondutoras sejam acionadas por circuitos de *gate-driver* isolados, o que encarece o sistema para um grande número de chaves semicondutoras. A Figura 2.17 apresenta a configuração das chaves bidirecionais e a lógica de comutação das chaves.

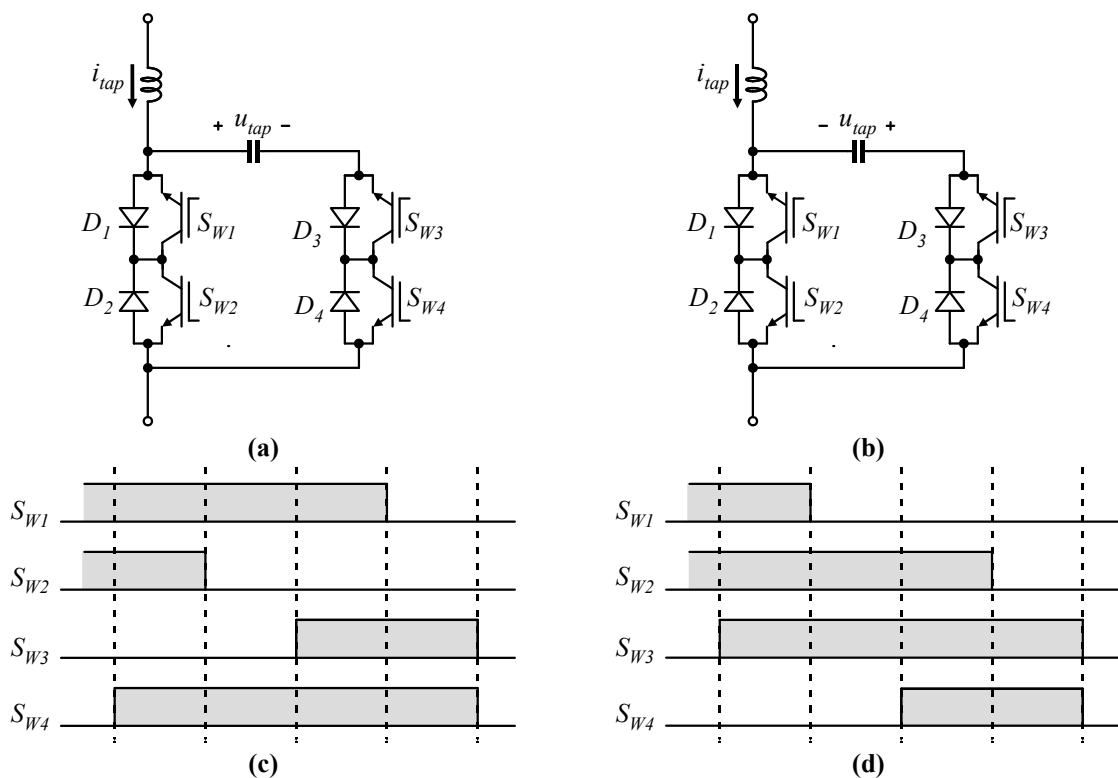


Figura 2.17 – Célula bidirecional apresentada em (BAUER e SCHOEVAARS, 2003). (a) Avaliação para a polaridade positiva da tensão da rede. (b) Avaliação para a polaridade negativa. (c) Sequência de comutação para a polaridade positiva. (d) Sequência de comutação para a polaridade negativa.

2.5.3 Implementação de comutadores eletrônicos de *taps*

Muitos trabalhos têm focado no projeto e implementação de comutadores eletrônicos de *taps*, considerando diversas topologias e tecnologias de semicondutores. Um dos primeiros trabalhos voltados à análise da operação de comutadores eletrônicos de *taps* foi apresentado por (YOUSEF-ZAI e O'KELLY, 1996), neste artigo os autores avaliam a lógica

de comutação juntamente com outras características operacionais destes dispositivos. A configuração de comutador de *taps* apresentada na Figura 2.18 é examinada, sendo feito o estudo da região de comutação segura em função da corrente de sobreposição das chaves durante o processo de comutação para diferentes características de fator de potência (FP) da carga, também é avaliado o ângulo ótimo de disparo dos tiristores e o tempo de sobreposição das chaves eletrônicas. Além disso, são comentadas questões como aplicação de circuitos de *snubbers* e proteções necessárias para o funcionamento do comutador eletrônico de *taps* proposto.

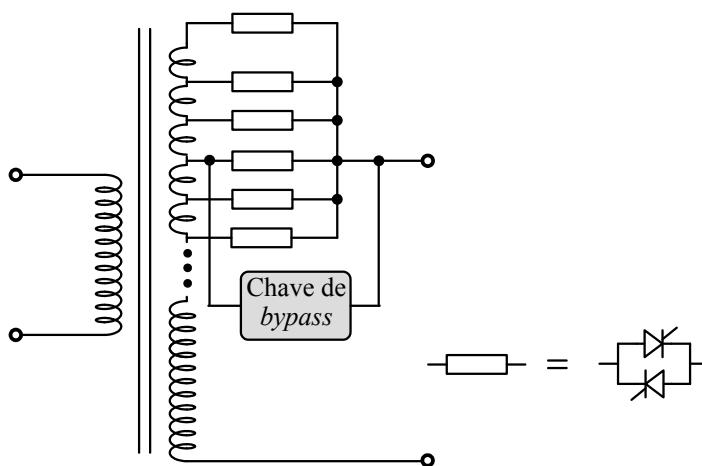


Figura 2.18 – Comutador eletrônico de *taps* estudado em (YOUSEF-ZAI e O'KELLY, 1996).

Em (DEGENEFF, 1997) é apresentado um novo método de modulação para o aumento do número de passos de tensão de comutadores de *taps* sem mudar a configuração de comutadores. O método apresentado, *discrete cycle modulation* (DCM), propõe a sintetização da tensão de saída a partir de um número discreto de ciclos da rede onde se empregam diferentes níveis de tensões fornecidas pelos enrolamentos de *tap*, sendo que o processo de comutação só ocorre na passagem por zero da corrente. É de se ressaltar que essa técnica pode causar a presença de sub-harmônicos e *flicker* na rede.

O trabalho apresentado por (BAUER e DE HAAN, 1998a) e (BAUER e DE HAAN, 1998b) não propõe configurações novas, mas foca na implementação de um comutador eletrônico de *taps* em configuração clássica empregando IGBTs, conforme Figura 2.19. O circuito proposto permite o controle da tensão de saída através da comutação discreta dos *taps*, ou seja, proporcionando degraus de tensão para atingir conformidade com a regulamentação, ou através de modulação por largura de pulso. Salienta-se que o sistema proposto foi testado em um transformador de 500 kVA/10 kV/400 V. O esquemático do circuito de controle/supervisão proposto é apresentado na Figura 2.20.

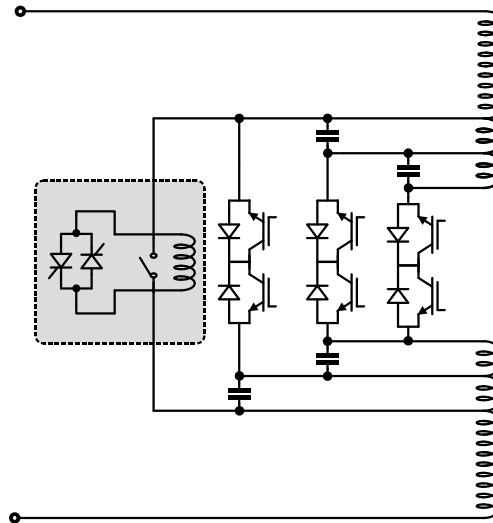


Figura 2.19 – Implementação do comutador de *taps* empregando chaves semicondutoras bidirecionais (BAUER e DE HAAN, 1998b)

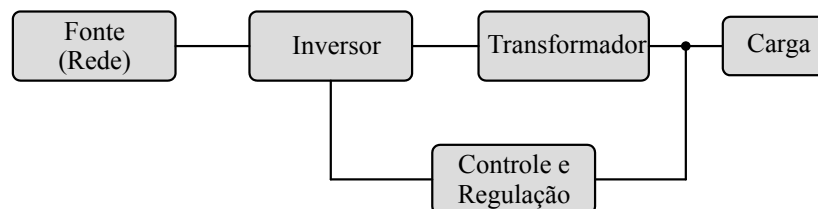


Figura 2.20 – Sistema de controle/supervisão proposto (BAUER e DE HAAN, 1998a).

Já em (BAUER e DE HAAN, 1999), os mesmos autores comentam que um comutador posicionado no primário de um transformador de 500 kVA/10 kV/400 V, onde a tensão dos *taps* não ultrapassa 1 kV (desde que sempre haja uma chave conduzindo), IGBTs são também aplicáveis. A topologia proposta nesse trabalho é semelhante à anterior, porém são apresentadas duas estratégias de controle: controle contínuo (“controle por fase”, que é comprometido para cargas capacitivas ou indutivas) e controle discreto (“controle por ajustes fino e grosso”, com *taps* para variações de grandes e pequenas amplitudes, “controle binário”, *taps* de 16% 8%, 4% e 1% e “modulação PWM”).

Os autores implementam um comutador aplicado a um transformador com três chaves bidirecionais (IGBTs em anti-série, 1700 V, 30 A) e um circuito de *crowbar* para proteção. A regulação na tensão nominal se dá em aproximadamente um segundo. O circuito também é ensaiado para um curto-circuito no secundário do transformador, quando o circuito de *crowbar* assume a corrente, a qual é superior à capacidade dos IGBTs.

A patente (ASSELMAN, GRIFFIOEN *et al.*, 1999) apresenta um comutador de *taps* baseado em tiristores, GTOs ou IGBTs aplicado ao lado de alta tensão de um transformador trifásico. Diferentes métodos de regulação de tensão são propostos, como o método clássico

de variação da relação de transformação em cada fase (*in-phase*), representado na Figura 2.21, bem como o método de regulação por quadratura (combinação entre fases, empregando núcleos adicionais), representado na Figura 2.22 e, por fim, modulação PWM.

Os autores apresentam três topologias de comutadores de *taps*. As duas primeiras são similares aos comutadores clássicos (derivações no lado de alta tensão em cada fase do transformador – *in-phase*), enquanto que a última possibilita, além da variação da relação de cada fase, a soma de contribuições das demais fases do transformador. Nesse caso, os autores comentam sobre a necessidade do emprego de núcleos adicionais o que pode não ser vantajoso sob o ponto de vista dos custos finais do produto e/ou da complexidade de implementação do transformador.

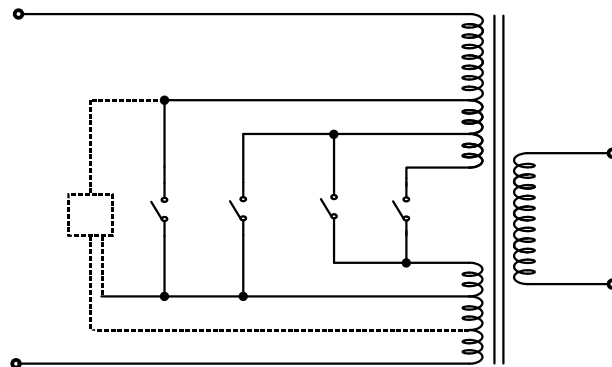


Figura 2.21 – Comutador com regulação *in phase* (ASSELMAN, GRIFFIOEN *et al.*, 1999).

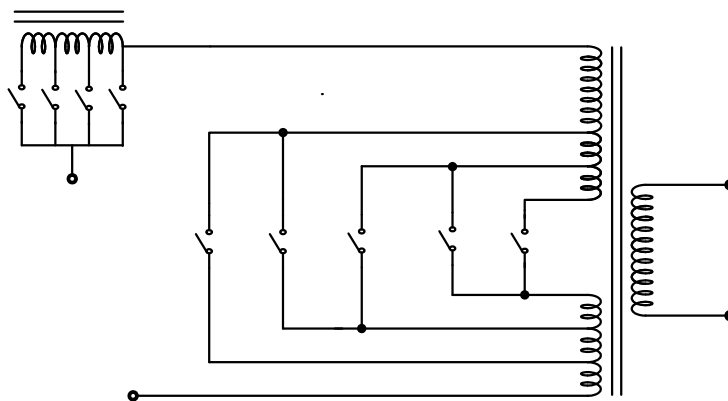


Figura 2.22 – Comutador de *taps* que emprega o método de regulação por quadratura - combinação entre fases, empregando núcleos adicionais (ASSELMAN, GRIFFIOEN *et al.*, 1999).

O problema da regulação de tensão em redes rurais é discutido em (MEYER e VAN COLLER, 1999). No caso específico, o problema reside na distância das comunidades rurais dos grandes centros, visto que, as comunidades rurais apresentam baixa densidade populacional e baixo consumo de energia, o custo da instalação de sistemas elétricos é alto. As longas linhas de distribuição presentes nestes sistemas causam quedas de tensão, que

geralmente podem causar problemas para os consumidores. Segundo os autores, a variação de tensão aceitável é 10% e o cálculo para as unidades rurais é de 30%. Nessas aplicações, os transformadores utilizados são monofásicos isolados com retorno por terra (MRT), ou do inglês, *single-wire earth return* (SWER). Nesse caso, protetores contra surtos (*surges*) devem ser usados para proteger o sistema de *taps* eletrônicos. O circuito proposto para essa aplicação é representado na Figura 2.23.

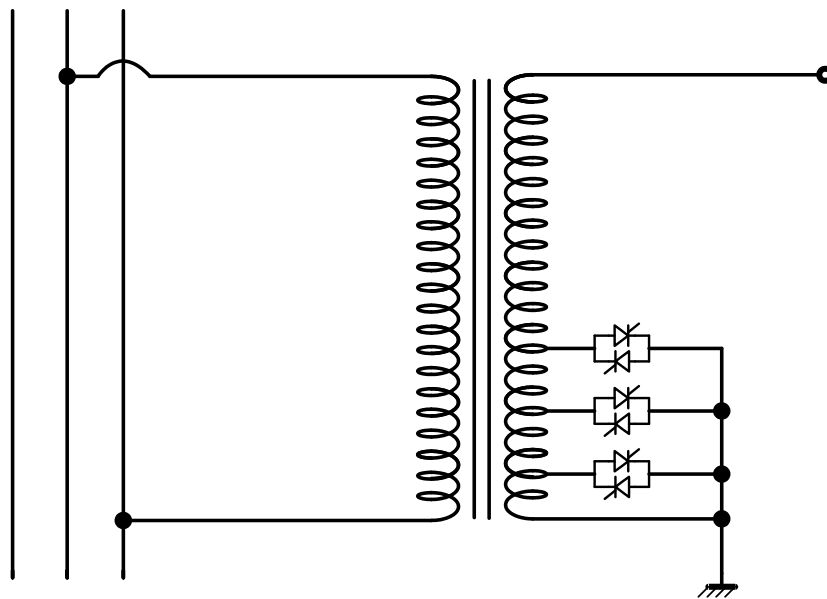


Figura 2.23 – Comutador de *taps* aplicável ao sistema MRT para áreas rurais proposto por (MEYER e VAN COLLER, 1999).

Outro sistema eletrônico para comutação de *taps* de transformadores sob carga é proposto em (LI, LIAO *et al.*, 2002) sendo representado na Figura 2.24. Conforme se observa, o circuito não difere muito da estrutura clássica de comutadores de *taps*. Adicionalmente, os autores abordam, sem muitos detalhes, a implementação do circuito principal (com tiristores), o sistema de detecção e seleção de *taps*, os procedimentos de operação e o sistema de proteção na energização e desligamento do transformador.

A aplicação de um comutador de *taps* similar à apresentada em (BAUER e DE HAAN, 1998b) é apresentada em (ABBASZADEH, ARDEBILI *et al.*, 2010). Os autores empregam cinco chaves bidirecionais formadas por TRIACs (*Triode for Alternating Current*) em um transformador de 2 kVA de 220/1200 V, possibilitando a obtenção de quatro níveis de tensão de saída. São apresentadas simulações e também experimentos práticos que comprovam o funcionamento do sistema desenvolvido, porém, não são apresentados detalhes de projeto ou análise do sistema.

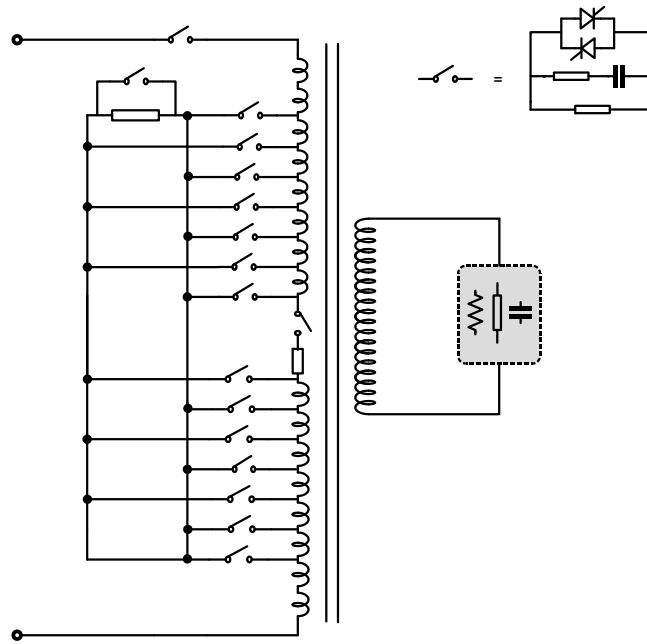


Figura 2.24 – Comutador de *taps* proposto por (LI, LIAO *et al.*, 2002).

Em (FOURIE e MOUTON, 2009) é proposto um comutador eletrônico de *taps* com modulação PWM - empregando IGBTs - aplicado a sistemas de média tensão, o qual utiliza dois enrolamentos de um autotransformador para sintetizar a tensão de saída com o valor desejado. É apresentado o estudo de perdas causado pela técnica utilizada e a partir disso e do dissipador utilizado para as chaves, é feita a definição da máxima frequência de chaveamento a que o sistema pode operar. Resultados experimentais aplicados a um sistema de pequena escala comprovam o funcionamento da estrutura e da técnica de modulação propostas. A Figura 2.25 apresenta a estrutura de comutador de *taps* proposta e a Figura 2.26 apresenta o esquema de chaveamento utilizado. Esta técnica apresenta como desvantagem a inserção de componentes harmônicos na tensão de carga.

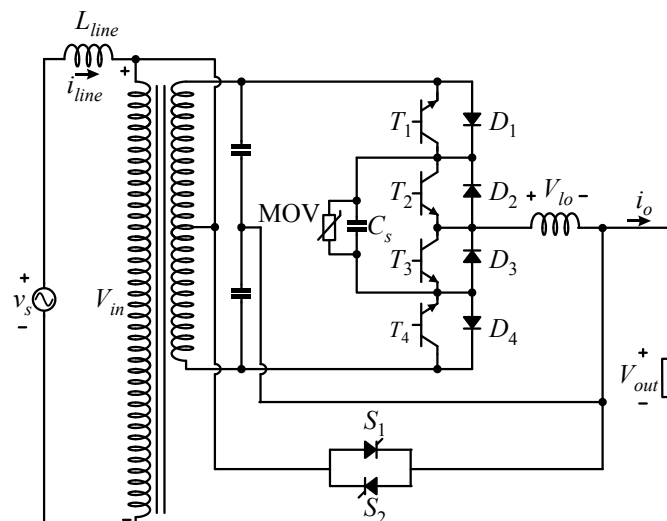


Figura 2.25 – Comutador de *taps* proposto por (FOURIE e MOUTON, 2009).

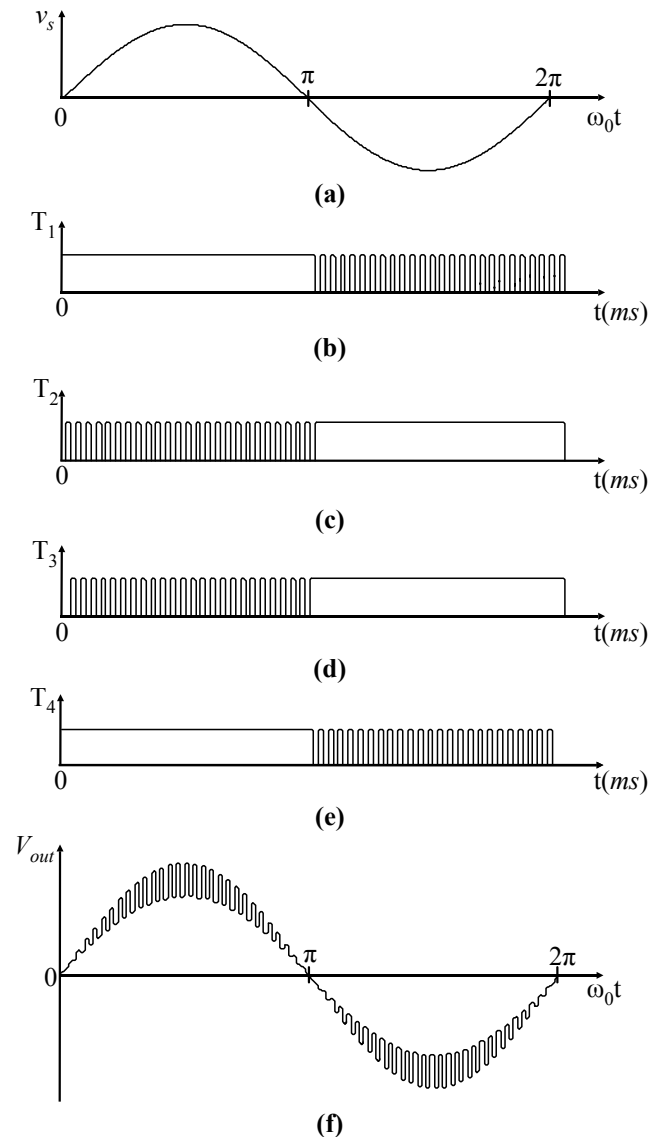


Figura 2.26 – Estratégia de modulação adotada no comutador (FOURIE e MOUTON, 2009). (a) Tensão de entrada. (b) Comando T1. (c) Comando T2. (d) Comando T3. (e) Comando T4. (f) Tensão de saída.

Em (MONROY-BERJILLOS, GOMEZ-EXPOSITO *et al.*, 2010) os autores propõem um laboratório de ensaios para aplicação de eletrônica de potência em comutadores de *taps*. O trabalho detém-se mais em aspectos educacionais do que na análise técnica do protótipo e do comutador especificamente, porém, são descritas duas soluções para o problema de curto-circuito do enrolamento de *tap* durante o processo de comutação. Uma é baseada no atraso do sinal de disparo do tiristor que entrará em condução, sendo necessário incluir um ramo LC adicional como caminho para a corrente de carga. A segunda solução apresentada consiste em acionar antecipadamente o tiristor, tal que ambos tiristores conduzam simultaneamente. A solução proposta consiste em remover os pulsos de comando dos tiristores em condução e simultaneamente acionar o próximo par, o que resultará na interrupção do fornecimento menor que um ciclo, tempo normalmente menor que o obtido

com chaves mecânicas. São apresentados resultados experimentais que comprovam o funcionamento do protótipo e do processo de comutação. A Figura 2.27 apresenta a estrutura de comutador eletrônico de *taps* estudada.

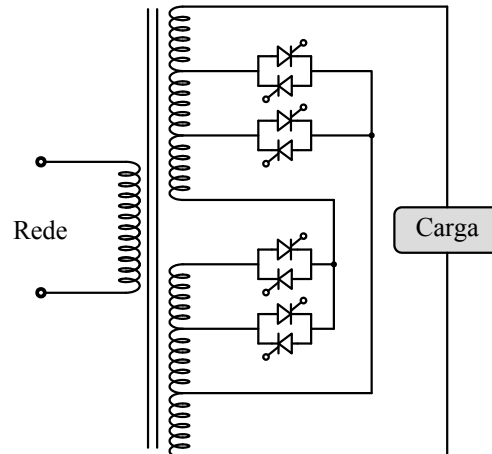


Figura 2.27 – Comutador eletrônico de *taps* estudado em (MONROY-BERJILLOS, GOMEZ-EXPOSITO *et al.*, 2010).

2.5.4 Proteção de comutadores eletrônicos de *taps*

A utilização de comutadores eletrônicos de *taps* em sistemas de distribuição tem como um dos principais complicadores à sua aplicação o sistema de proteção (EPRI, 2006). Este sistema deve operar sob elevados níveis de tensão em condições normais, além disso, estão sujeitos a distúrbios da rede elétrica, como: curtos-circuitos e manobras de sistemas de proteção, surtos de tensão devido à inclusão ou retirada de equipamentos indutivos ou bancos de capacitores e também descargas atmosféricas. Esses eventos extremos podem causar danos aos dispositivos eletrônicos do comutador eletrônico de *taps* conectado à rede elétrica, portanto, faz-se necessário um sistema de proteção que garanta o funcionamento do sistema de comutação.

Dentre os trabalhos encontrados na literatura que abordam a proteção de comutadores eletrônicos de *taps* cabe ressaltar os que são resumidos a seguir:

Na patente (KLINGBIEL, 1989) o autor propõe uma proteção contra sobrecorrente no processo de comutação das chaves eletrônicas baseada em indutores acoplados, conectados em série com as chaves eletrônicas. As bobinas adjacentes possuem o ponto em sentido oposto, no indutor acoplado, de tal sorte que na transição o canal a entrar em condução inicia a comutação com quatro vezes a impedância de regime constante. Esta estratégia auxilia na redução dos transientes de corrente, sem penalizar a carga; porém, adiciona um volumoso

indutor ao circuito. A técnica é aplicada a um transformador com quatro níveis de tensão, como mostrado na Figura 2.28 (a) e também para um autotransformador. A mesma técnica é aplicada na operação de múltiplas chaves operando em paralelo, a fim de evitar que uma chave do conjunto conduza mais corrente que as outras devido a não idealidades dos dispositivos semicondutores, a Figura 2.28 (b) apresenta esta aplicação. Adicionalmente, é mostrado um circuito discreto para executar o controle das chaves.

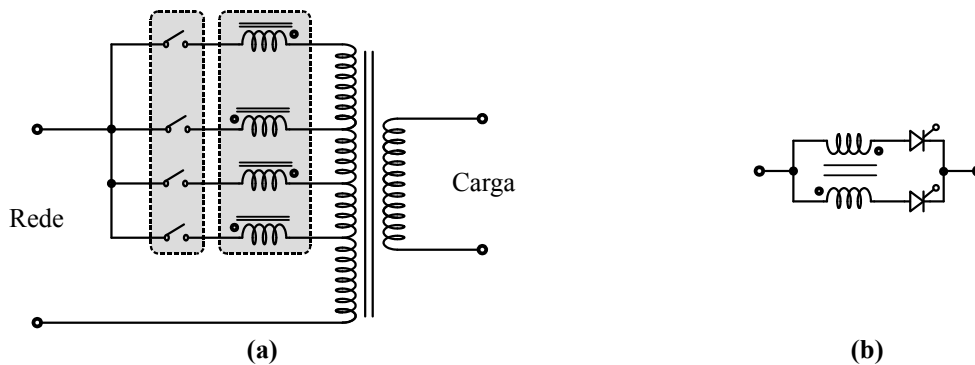


Figura 2.28 –Proteção por indutores acoplados proposta por (KLINGBIEL, 1989). (a) Proteção das chaves na comutação. (b) Igualização da corrente entre chaves em paralelo.

Em (BAUER e DE HAAN, 1997) é apresentado o circuito de *crowbar* demonstrado na Figura A.5 (a), o qual protege as chaves semicondutoras contra sobretensões e sobrecorrentes durante a operação do sistema. A utilização de elementos semicondutores permite que este circuito apresente rápida atuação contra estes eventos. O circuito de *crowbar* pode operar de duas maneiras: por atuação externa, acionada por comando do circuito de controle e por atuação automática em casos de sobretensão. A operação por atuação externa ocorre quando ocorre sobrecorrente, a operação por sobretensão ocorre pela atuação de um BOD (*Break Over Diode*), o qual entra em condução sempre que a tensão de operação é ultrapassada. Também é utilizado um SSP (*Surge Suppressor Protector*) conectado aos terminais P e P' e um circuito *snubber* do tipo resistor-capacitor (RC) para os tiristores. O circuito proposto é projetado sem maiores detalhes e resultados práticos são apresentados. Além disso, os autores apresentam um diagrama de coordenação do acionamento dos dispositivos de proteção. Uma configuração bastante semelhante, porém, que não implementa os capacitores C_4 e o SSP é apresentada na Figura A.5 (b) (IXYS, 2000).

Em (YOUSEF-ZAI e O'KELLY, 1996) é sugerida a utilização de uma chave de *bypass* entre os terminais da chave conectada em paralelo com o *tap* central do transformador. Essa aplicação evita que na partida do transformador as chaves eletrônicas fiquem em aberto e enfrentem toda a tensão do circuito primário. Após a correta inicialização do sistema de

controle e da entrada em operação das chaves eletrônicas, esta chave pode então ser aberta. Esta mesma chave tem a função de conduzir correntes sobre condições de falta. Neste trabalho é comentada ainda a questão de sobretensões sobre as chaves, em especial as causadas por descargas atmosféricas, onde a distribuição da tensão inicial causada pela descarga depende fortemente das capacitâncias parasitas do transformador, inerentes ao seu modo de fabricação, porém, não é apresentada uma solução para este problema. A Figura 2.18 apresenta o comutador eletrônico de *taps* estudado, bem como o posicionamento da chave de *bypass*.

O comutador de *taps* apresentado por (FOURIE e MOUTON, 2009) emprega um circuito de *snubber* com capacitor e um dispositivo MOV (*metal oxide varistor*), tal circuito tem o objetivo de dar um caminho alternativo para a corrente de saída do comutador de *taps* em caso de falha das chaves ou sobretensão, como pode ser verificado na Figura 2.25. É apresentado também um circuito de *crowbar*, similar ao apresentado em (BAUER e DE HAAN, 1997), conforme apresentado na Figura 2.29. Também é utilizada uma chave de *bypass* para proteções contra sobretensão e sobrecorrente.

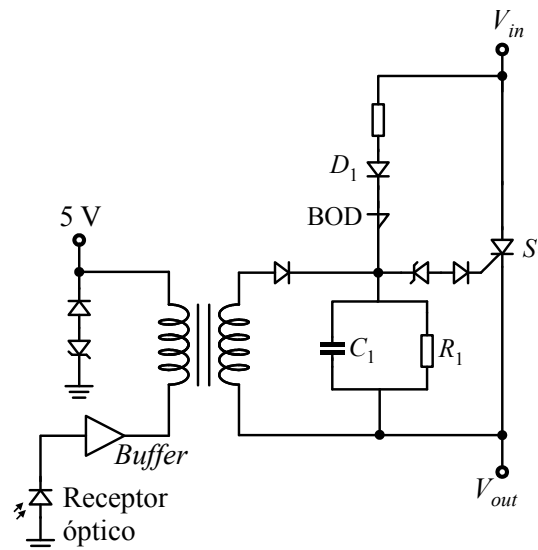


Figura 2.29 – Circuito de *crowbar* apresentado em (FOURIE e MOUTON, 2009).

2.6 Comparação qualitativa das tecnologias de OLTC

Em (EPRI, 2006) é apresentado um estudo sobre o desenvolvimento de OLTCs de estado sólido. É realizada uma comparação qualitativa de diversas características das tecnologias de OLTC, sendo apresentada na Tabela 2.3. É também feita uma avaliação do impacto do uso das diversas tecnologias sobre a qualidade de energia, a qual é mostrada na Tabela 2.4.

Tabela 2.3 – Comparação qualitativa de características de tecnologias de OLTC (EPRI, 2006).

| Atributo de comparação | Tecnologia de OLTC | | |
|---|--|---|---|
| | A vácuo | Híbrido (<i>thyristor assisted</i> OLTC) | Estado sólido (apenas chaves semicondutoras) |
| Mitigação de arco elétrico | Sem arco no óleo, o mesmo ocorre sobre a chave. | Pequeno arco ocorre no óleo. Mínima perda de contatos. | Sem formação de arco. Comutação ocorre nas chaves eletrônicas. |
| Contribuição para as perdas do sistema | Sem aumento de perdas relativas a OLTC convencional. | Sem aumento de perdas relativas aos OLTC convencionais. | Aumento das perdas devido à queda de tensão nas chaves, $P = EI$. |
| Manutenção | Menor que os OLTC convencionais. Desgaste mecânico. | Menor que os OLTC convencionais. Desgaste mecânico. | Sem rotina de manutenção indicada. |
| Harmônicos | Sem contribuições de harmônicos para o sistema. | Sem contribuições de harmônicos para o sistema. | Contribuição pode ser nula ou pequena. |
| Custo | Um pouco maior que o convencional. | Um pouco maior que o convencional. | Pode ser apreciavelmente maior que o convencional. |
| <i>Taps</i> acionados por vez | Um <i>tap</i> por vez. | Um <i>tap</i> por vez. | Pode realizar a comutação de quantos <i>taps</i> forem necessários de uma só vez. |
| Velocidade de resposta | De um a quatro segundos por <i>tap</i> . | De um a quatro segundos por <i>tap</i> . | Um a dois meio-ciclos da rede por <i>tap</i> . Permite pular alguns <i>taps</i> . |
| Contribuição na estabilidade do sistema | Não é rápido o bastante para isso. | Não é rápido o bastante para isso. | A mudança de <i>tap</i> pode ocorrer em poucos meio-ciclos da rede. |

Tabela 2.4 – Considerações sobre qualidade de energia para várias tecnologias de OLTC (EPRI, 2006).

| Atributo de comparação | Tecnologia de OLTC | | |
|--|--|---|---|
| | OLTC convencional | Híbrido (<i>thyristor assisted</i> OLTC) | Estado sólido (apenas chaves semicondutoras) |
| Afundamentos momentâneos de tensão (<i>sags</i>) | Sem efeito. | Sem efeito. | Possibilidade de mitigação da maioria dos <i>sags</i> existentes nos sistemas elétricos. |
| Tensão de sequência positiva | Sem efeito para OLTC trifásicos. Reguladores de tensão monofásicos poderiam reduzir a tensão de sequência negativa derivada do desbalanço de fase. | Sem efeito para OLTC trifásicos. | OLTC poderiam controlar a porção de tensão de sequência negativa derivada do desbalanço de fase através de bancos monofásicos de transformadores. |

Ainda em (EPRI, 2006) é feita uma comparação sobre a confiabilidade das diversas tecnologias de OLTCs através da característica de razão de falha. A análise feita é apenas ilustrativa devido à inexistência de comutadores eletrônicos de *taps* comerciais à época para realizar a comparação. Porém, o estudo é feito baseado em procedimentos industriais a partir dos trabalhos até então apresentados na literatura. Neste caso é utilizado o método do *mean time between failures* (MTBF) demonstrado em (DEFENSE, 1991), o que dá uma aproximação do comportamento teórico da confiabilidade das tecnologias estudadas. A Figura 2.30 apresenta a curva estimada da razão de falhas para as diferentes tecnologias de OLTC, onde λ representa a razão de falhas.

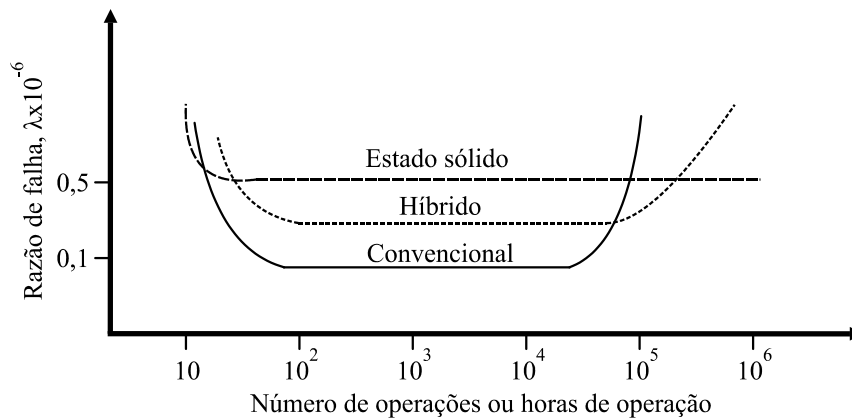


Figura 2.30 – Curva estimada da razão de falhas das tecnologias de OLTC (EPRI, 2006).

No estudo apresentado, verifica-se que a razão de falhas dos comutadores de *taps* de estado sólido tende a ser maior no começo da vida útil do equipamento, porém, se mantém constante ao longo da vida útil do equipamento. Já os comutadores de *taps* convencionais e híbridos, a razão de falhas tende a aumentar com o tempo, isso se deve a natureza mecânica dos contatos do comutador, o que torna o custo operacional desses dispositivos maior. Cabe ressaltar que o estudo apresentado não considera eventos extremos na rede, como surtos de tensão causados por descargas atmosféricas, por exemplo, mas foca no desgaste das chaves das tecnologias estudadas.

2.7 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a revisão bibliográfica sobre o emprego de comutadores de *taps* em transformadores. Foram apresentadas as principais tecnologias empregadas na comutação de *taps*, sendo classificadas em: comutadores mecânicos, mecânicos assistidos por

chaves estáticas e comutadores eletrônicos, onde foram expostas as principais vantagens e desvantagens de cada topologia.

Foi dada atenção especial aos comutadores eletrônicos de *taps*, sendo apresentados os principais estudos envolvendo estes dispositivos. Conforme apresentado, os estudos relacionados a estes dispositivos são voltados principalmente à definição de topologias otimizadas de enrolamentos de *taps* e chaves bidirecionais, implementação de comutadores eletrônicos de *taps* em novas e consolidadas topologias de transformadores, além de estudos voltados à proteção destes dispositivos.

Devido a sua característica de operação, estes dispositivos são vistos como potenciais agentes de melhoria da regulação de tensão em sistemas de distribuição. Cabe ressaltar, porém, que apesar dos trabalhos desenvolvidos até então, ainda são necessários estudos para que de fato se torne possível a aplicação destes dispositivos em sistemas de distribuição.

CAPÍTULO 3 CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DESENVOLVIDO

Neste capítulo são apresentadas as principais características do transformador utilizado para o desenvolvimento do comutador eletrônico de *taps*. O mesmo trata-se de uma unidade especial, projetada para apresentar os terminais de acesso aos *taps* externamente a sua carcaça, diferente dos transformadores de distribuição convencionais que possuem as conexões de *tap* no interior do tanque do equipamento. Entretanto, apesar da alteração no acesso aos terminais de *taps*, o projeto dos enrolamentos, do sistema de arrefecimento e demais características não sofreram alterações, seguindo o padrão adotado pela Companhia Estadual de Energia Elétrica - Distribuição – CEEE - D – (CEEE-D, 2013), visando-se assim atender a uma padronização já estabelecida.

Para validação da proposta do comutador eletrônico de *taps* proposto e por apresentar maior facilidade de implementação laboratorial e menores custos, foi adotado um transformador monofásico com retorno por terra (MRT). Porém, a proposta de acesso externo aos *taps* do transformador pode ser replicada para outros transformadores, sejam monofásicos ou trifásicos. Cabe destacar ainda que o comutador eletrônico foi alocado no lado primário do transformador, isso se justifica pelo fato evitar a necessidade da alteração do projeto do transformador além das modificações propostas, mantendo-se assim uma estrutura já consolidada de projeto.

Inicialmente são apresentadas as características elétricas e dimensionais do transformador. Na sequência é apresentada a topologia e o levantamento dos parâmetros do modelo elétrico. Por fim é avaliada a suportabilidade dielétrica da estrutura de acesso aos terminais de *taps* proposta, sendo realizada através da análise baseada em elementos finitos.

3.1 Sistema MRT

O sistema MRT do transformador em questão, representado na Figura 3.1, é utilizado em sistemas de distribuição com característica de baixa carga e afastados dos grandes centros, sendo empregado geralmente em localidades rurais. É caracterizado por possuir apenas um condutor de fase na média tensão com retorno da corrente realizado pela terra e dois circuitos

monofásicos com neutro comum no secundário do transformador, podendo operar com dois níveis de tensão distintos, onde um geralmente é o dobro do outro.

As características de implantação deste sistema o tornam mais barato que os sistemas trifásicos convencionais para uma mesma potência, uma vez que reduz o número de condutores primários e assim, reduz o número de componentes que integram a rede de distribuição (RIBEIRO, 1993).

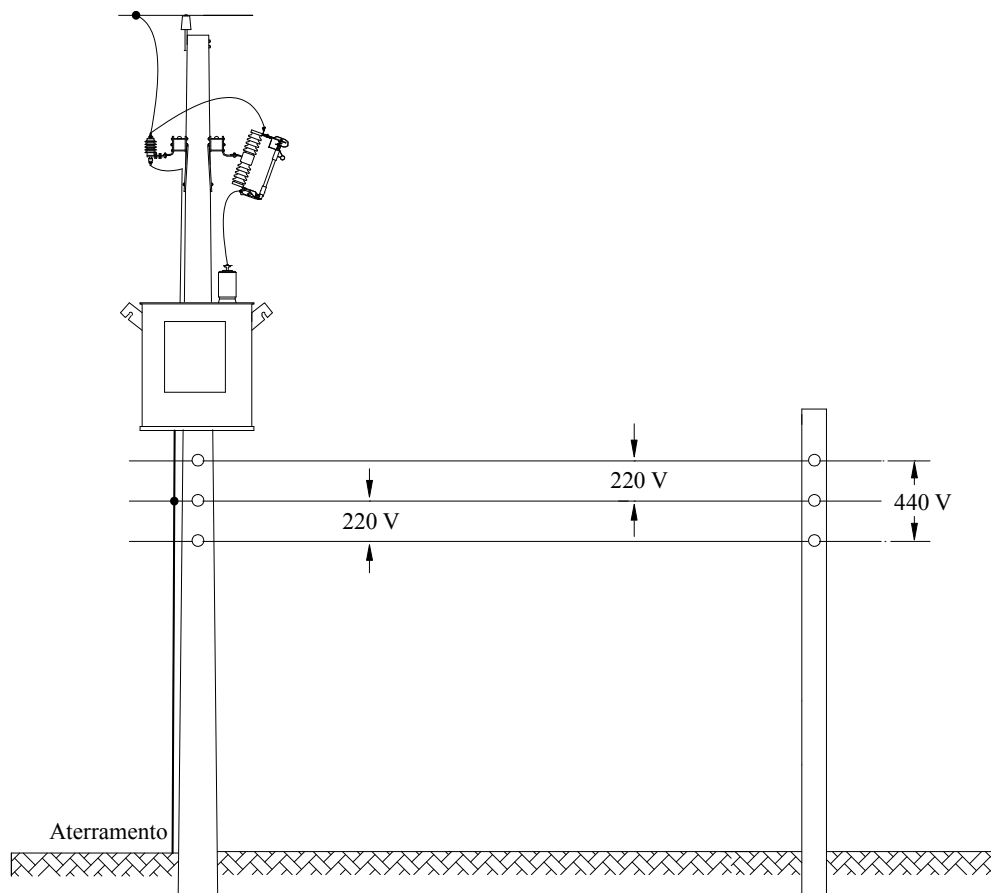


Figura 3.1 – Representação do sistema de distribuição MRT do transformador desenvolvido.

3.2 Características elétricas do transformador

A topologia do transformador adotada é apresentada na Figura 3.2. Esta topologia adequa-se à maioria dos transformadores de distribuição utilizados no país que empregam o sistema MRT, sendo compatível com o padrão utilizado pela CEEE-D e similar à topologia adotada por (ASSELMAN, GRIFFIOEN *et al.*, 1999). O transformador é aplicável em sistemas MRT com tensão eficaz primária de 7,96 kV e redes secundárias de 440 V ou 220 V, tendo classe de isolamento de 15 kV e potência nominal de 5 kVA.

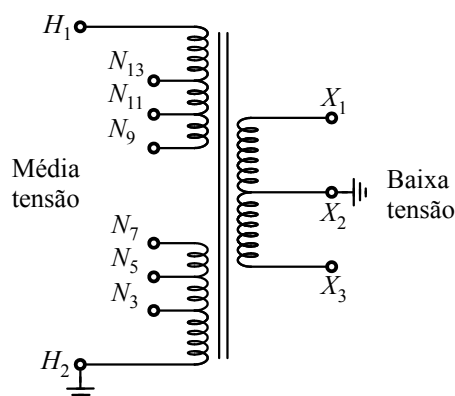


Figura 3.2 - Representação dos enrolamentos e terminais do transformador.

A Figura 3.2 apresenta a topologia do transformador, de onde se tem que os terminais H_1 e H_2 representam as conexões da rede primária, os terminais X_1 , X_2 e X_3 representam as conexões da rede secundária e os terminais: N_{13} , N_{11} , N_9 , N_7 , N_5 e N_3 representam os terminais de acesso aos enrolamentos de *tap* do transformador. Pode-se perceber ainda que o lado primário do transformador possui dois enrolamentos principais (entre H_1 - N_{13} e H_2 - N_3) e quatro enrolamentos de *tap* (entre N_{13} - N_{11} , N_{11} - N_9 , N_7 - N_5 e N_5 - N_3), possuindo o circuito central aberto. E ainda, possui dois enrolamentos secundários, os quais devem operar paralelamente no caso de redes monofásicas de 220 V (com cargas conectadas aos terminais X_1 - X_2 e X_2 - X_3), ou em série no caso de redes 440 V (com a carga conectada entre os terminais X_1 - X_3).

A norma NBR 5440 (ABNT, 2011) impõe a existência de, ao menos, três enrolamentos de *taps* em transformadores monofásicos de distribuição, sendo que o transformador proposto possui quatro enrolamentos de *tap*, podendo operar com até cinco níveis de tensão primária mantendo a tensão secundária constante ao selecionarem-se os enrolamentos de *taps* adequados. Estes níveis são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Derivações e relações de tensão para o transformador monofásico.

| Conexões de <i>taps</i> | Tensão primária | Tensão secundária |
|-------------------------|-----------------|-------------------|
| $N_7 - N_9$ | 7967 V* | 440 V/ 220 V |
| $N_7 - N_{11}$ | 7621 V | |
| $N_5 - N_{11}$ | 7274 V | |
| $N_5 - N_{13}$ | 6928 V | |
| $N_3 - N_{13}$ | 6582 V | |

* Nível nominal de tensão primária para a frequência de 60 Hz.

As relações de transformação dos enrolamentos do transformador são apresentadas na Tabela 3.2, de onde se tem que: N_m é a relação de transformação dos enrolamentos principais do primário para o secundário do transformador, N_s é a relação de transformação dos enrolamentos secundários, N_t é a relação de transformação dos enrolamentos de *tap* do primário para o secundário. Ainda, N_{total} é a relação de transformação total do circuito primário para o secundário, considerando todos os enrolamentos principais e de *taps* conectados em série, ou seja, considerando os terminais N_9 e N_7 conectados entre si.

Tabela 3.2 – Relação de transformação de cada enrolamento.

| Lado | Relação de transformação | Símbolo | Relações de transformação |
|--------------|---------------------------------|----------------|----------------------------------|
| Baixa Tensão | Secundário 1 | N_s | 1 |
| | Secundário 2 | N_s | 1 |
| Média Tensão | Primário total | N_{total}^* | 36,216 |
| | Enrolamento principal | N_m | 14,958 |
| | Enrolamento de <i>tap</i> | N_t | 1,575 |

* Com N_7-N_9 conectados.

3.3 Características construtivas do transformador

Diferentemente dos comutadores de *taps* automáticos do tipo eletromecânicos, onde os interruptores mecânicos estão imersos no óleo isolante (GARCIA, RODRIGUEZ *et al.*, 2009), em um comutador eletrônico de *taps* é importante ter acesso aos terminais de *taps*. Isso favorece tanto o projeto da disposição das chaves semicondutoras e demais circuitos envolvidos na comutação, quanto à manutenção do sistema. Esta abordagem permite a modularidade e fácil substituição de peças. Entretanto, tais características implicam desafios tecnológicos, especialmente no desenvolvimento de uma topologia compacta de comutadores eletrônicos de *taps* aplicados ao lado primário do transformador.

Entre os fatores construtivos mais importantes a serem atendidos por comutadores eletrônicos de *taps*, indicados em (EPRI, 2006), a substituição de chaves semicondutoras defeituosas em eventuais falhas do sistema é apontada como ponto fundamental no desenvolvimento destes sistemas. Nesse sentido, a estrutura do comutador deve favorecer à fácil manutenção, de forma a permitir o restabelecimento da energia elétrica o mais rapidamente possível em uma possível falha. Isto pode ser alcançado quando se tem acesso ao comutador eletrônico de *taps* externamente ao tanque do transformador, não sendo necessária a troca de

todo o transformador em uma possível manutenção, mas somente dos componentes eletrônicos defeituosos. A faixa de temperatura de operação das chaves eletrônicas é outro importante incentivo para alocarem-se as mesmas em um compartimento próprio, evitando a redução de sua vida útil devido à temperatura de operação do óleo do transformador (EPRI, 2006).

Baseado nisso, o transformador utilizado no desenvolvimento do comutador eletrônico de *taps* trata-se de uma configuração especial, desenvolvido especialmente para atender estas características supracitadas. O mesmo apresenta os terminais de acesso aos enrolamentos de *tap* externamente, em um compartimento próprio. A Figura 3.3 apresenta as vistas do transformador utilizado no desenvolvimento do comutador eletrônico de *taps*, indicando o local de acesso aos terminais de *taps*. A Figura 3.4 apresenta o arranjo de terminais para acesso externo aos terminais de *taps* do transformador, sendo indicadas as principais dimensões e os materiais utilizados na construção da estrutura de acesso.

Cabe ressaltar que neste trabalho somente é realizada a avaliação da suportabilidade dielétrica do arranjo proposto, sendo que a fabricação do transformador foi realizado pela empresa Romagnole Produtos Elétricos S/A com base nas especificações determinadas.

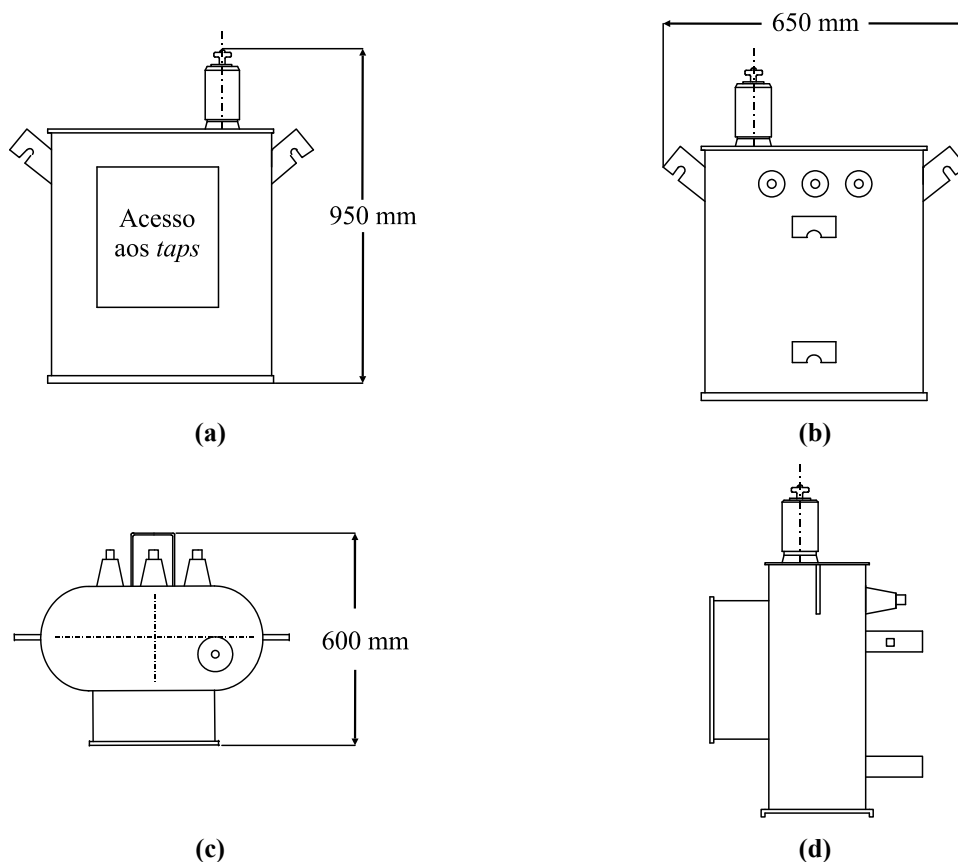


Figura 3.3 – Vistas do transformador. (a) Vista frontal. (b) Vista traseira. (c) Vista superior. (d) Vista lateral direita.

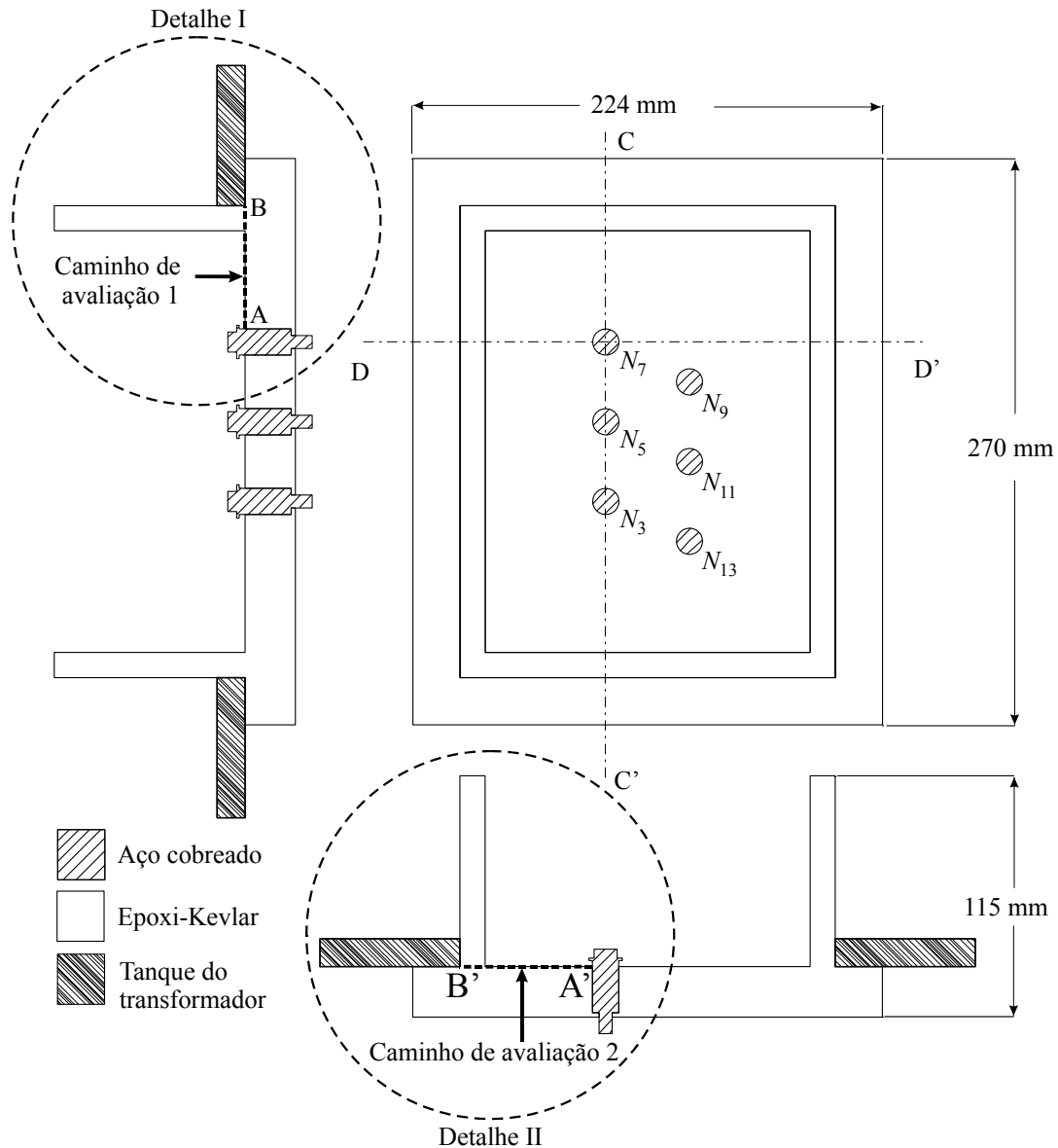


Figura 3.4 – Arranjo de terminais de *taps* do transformador.

3.4 Modelo do transformador

O modelo a ser definido considera os enrolamentos secundários operando na tensão de 220 V, ou seja, com os mesmos operando em paralelo e com metade da carga nominal conectada em cada enrolamento. Dessa forma, esta análise considera as impedâncias dos enrolamentos do secundário idênticas. Para facilitar a representação do modelo, a partir de agora os enrolamentos referentes aos terminais X_1 a X_3 serão representados apenas por um enrolamento equivalente, tendo seus terminais representados por X_1 e X_2 , como demonstrado na Figura 3.5 e o modelo obtido é referenciado ao lado secundário do transformador.

Deve-se considerar de que os ensaios para a obtenção do modelo do transformador são realizados considerando os terminais de *tap* N_7 e N_9 interconectados, ou seja, o circuito primário é considerado como um único enrolamento. Além disso, são desconsiderados os efeitos de saturação do núcleo e outras não-linearidades referentes ao material do núcleo magnético.

Na Figura 3.5 é apresentado o modelo do transformador refletido ao lado de baixa tensão, onde R_m é uma resistência que representa as perdas no núcleo, L_m é a indutância magnetizante, R_s representa as perdas tanto nos enrolamentos primários quanto secundários e L_s é a composição das indutâncias de dispersão nos enrolamentos primários e secundários.

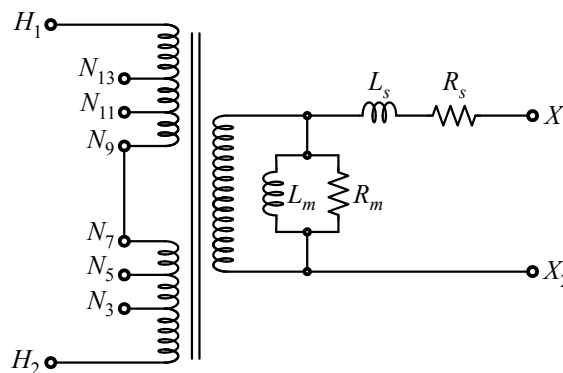


Figura 3.5 – Modelo do transformador refletido ao secundário.

A partir dos dados relativos aos ensaios de curto-circuito e a vazio definidos na norma NBR 5440 para transformadores de distribuição monofásicos, resumidos na Tabela 3.3 para um transformador de 5 kVA e classe de isolamento de 15 kV, os parâmetros do modelo da Figura 3.5 podem ser calculados. Da Tabela 3.3 tem-se que S é a potência nominal do transformador, $I_{exc\%}$ é a corrente de excitação percentual para o ensaio a vazio, P_{vazio} representa as perdas do ensaio a vazio, P_{total} refere-se às perdas totais do transformador (contemplando as perdas no núcleo magnético e nos enrolamentos) e $V_{cc\%}$ é a tensão de excitação do transformador para o ensaio de curto-circuito.

Tabela 3.3 – Dados para transformadores monofásicos de 5 kVA, classe de tensão de 15 kV (NBR 5440).

| Potência do transformador | Corrente de excitação | Perdas em vazio | Perda total | Tensão de curto-circuito a 75°C |
|---------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| $S = 5 \text{ kVA}$ | $I_{exc\%} = 4\%$ | $P_{vazio} = 50 \text{ W}$ | $P_{total} = 160 \text{ W}$ | $V_{cc\%} = 2,5\%$ |

Nas equações (3.1) a (3.3) são definidos, respectivamente, os valores base para potência (S_b), tensão (V_b) e corrente (I_b) do transformador a partir dos dados da Tabela 3.3.

$$S_b = S \quad (3.1)$$

$$V_b = 220V \quad (3.2)$$

$$I_b = \frac{S}{V_b} = 22,73A \quad (3.3)$$

Desse modo, a impedância do ramo de magnetização Z_m , relativa às perdas no núcleo e à indutância de magnetização, associação paralela entre R_m e L_m , respectivamente, pode ser calculada pela equação (3.4).

$$Z_m = \frac{V_b}{I_b \cdot I_{exc\%}} \quad (3.4)$$

Por sua vez, a resistência que modela as perdas no núcleo, R_m , pode ser calculada a partir das perdas em vazio do transformador conforme (FITZGERALD, KINGSLEY JR. *et al.*, 2003), desconsiderando as perdas nos enrolamentos, sendo dada pela equação (3.5).

$$R_m = \frac{V_b^2}{P_{vazio}} \quad (3.5)$$

Como a reatância de magnetização está em paralelo com a resistência de perdas no núcleo, esta pode ser isolada da equação (3.6).

$$|Z_m| = \left| \frac{R_m \cdot jX_m}{R_m + jX_m} \right| = \frac{R_m \cdot X_m}{\sqrt{R_m^2 + X_m^2}} \quad (3.6)$$

Elevando ambos os lados da equação (3.6) ao quadrado e isolando X_m , chega-se a equação (3.7), que define a reatância de magnetização X_m .

$$X_m = \frac{R_m \cdot Z_m}{\sqrt{R_m^2 - Z_m^2}} \quad (3.7)$$

A indutância de magnetização é dada pela equação (3.8), onde f é a frequência da rede.

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} \quad (3.8)$$

Para o cálculo da resistência própria e da reatância de dispersão dos enrolamentos primário e secundário, consideram-se os parâmetros de ensaio de curto-circuito do transformador. A impedância de curto-circuito Z_s relativa às perdas nos enrolamentos e à indutância de dispersão, associação série entre R_s e L_s , respectivamente, pode ser calculada pela equação (3.9), onde V_{sc} representa a tensão aplicada no ensaio de curto-circuito do transformador:

$$|Z_s| = \frac{V_{sc}}{I_b} = \frac{V_b \cdot V_{cc\%}}{I_b} \quad (3.9)$$

Por sua vez, a resistência que modela as perdas nos enrolamentos, R_s , pode ser calculada pela equação (3.10):

$$R_s \cong \frac{P_{total} - P_{vazio}}{I_b^2} \quad (3.10)$$

A reatância de dispersão equivalente X_s é encontrada através da equação (3.11):

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \quad (3.11)$$

A indutância de dispersão L_s total é dada pela equação (3.12):

$$L_s = \frac{X_s}{2\pi f} \quad (3.12)$$

Salienta-se que L_s é composta pela indutância de dispersão do lado de baixa tensão somada à indutância de dispersão do lado de alta tensão (refletida ao lado de baixa tensão). Da mesma forma, R_s representa a composição da resistência do lado de baixa e alta tensões. Os parâmetros do modelo apresentado na Figura 3.5 são sumarizados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros do modelo do transformador da Figura 3.5.

| Impedância | Valor | Impedância | Valor |
|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Z_m | 242 Ω | Z_s | 242 m Ω |
| R_m | 968 Ω | R_s | 212,9 m Ω |
| X_m | 249,93 Ω | X_s | 115,1 mH |
| L_m | 662,96 mH | L_s | 305,31 μ H |

A partir dos parâmetros encontrados para o transformador, é possível descrever os circuitos equivalentes refletidos ao primário e secundário do mesmo. Adotando como definições:

- R_{sec_1} – resistência do enrolamento secundário refletida ao primário
- R_{sec_2} – resistência do enrolamento secundário;
- R_{pri_1} – resistência do enrolamento primário;
- R_{pri_2} – resistência do enrolamento primário refletido ao secundário;
- L_{sec_1} – indutância de dispersão do enrolamento secundário refletida ao primário;
- L_{sec_2} – indutância de dispersão do enrolamento secundário;
- L_{pri_1} – indutância de dispersão do enrolamento primário;
- L_{pri_2} – indutância de dispersão do enrolamento primário refletido ao secundário;
- R_{m_1} – resistência de perdas do núcleo refletida ao primário;
- R_{m_2} – resistência de perdas do núcleo refletida ao secundário;
- L_{m_1} – indutância magnetizante refletida ao primário;
- L_{m_2} – indutância magnetizante refletida ao secundário;
- V_{in_1} – tensão nominal primária eficaz (7967 V);
- V_{in_2} – tensão nominal secundária eficaz (220 V).

As resistências do enrolamento secundário (R_{sec_2}) e do primário refletida ao secundário (R_{pri_2}) podem ser definidas como sendo a metade da resistência equivalente R_s . Da mesma forma, as indutâncias de dispersão do enrolamento secundário (L_{sec_2}) e do primário refletida ao secundário (L_{pri_2}) podem ser definidas como sendo a metade da indutância equivalente L_s segundo (FITZGERALD, KINGSLEY JR. *et al.*, 2003).

$$R_{sec_2} = R_s \cdot 0,5 \quad (3.13)$$

$$R_{pri_2} = R_s \cdot 0,5 \quad (3.14)$$

$$L_{sec_2} = L_s \cdot 0,5 \quad (3.15)$$

$$L_{pri_2} = L_s \cdot 0,5 \quad (3.16)$$

As resistências e indutâncias referidas ao lado secundário do transformador apresentadas nas equações (3.13) a (3.16) podem ser refletidas ao lado primário pelas equações (3.17) a (3.20).

$$R_{sec_1} = R_{sec_2} \cdot \left(\frac{N_{total}}{N_s} \right)^2 \quad (3.17)$$

$$R_{pri_1} = R_{pri_2} \cdot \left(\frac{N_{total}}{N_s} \right)^2 \quad (3.18)$$

$$L_{sec_1} = L_{sec_2} \cdot \left(\frac{N_{total}}{N_s} \right)^2 \quad (3.19)$$

$$L_{pri_1} = L_{pri_2} \cdot \left(\frac{N_{total}}{N_s} \right)^2 \quad (3.20)$$

A resistência de perdas do núcleo refletida ao secundário (R_{m_2}) é igual à resistência de perdas do núcleo obtida do modelo (R_m) e é expressa pela equação (3.21). Da mesma forma, a indutância de magnetização refletida ao secundário (L_{m_2}) é igual à indutância de magnetização obtida no modelo (L_m) e expressa pela equação (3.22).

$$R_{m_2} = R_m \quad (3.21)$$

$$L_{m_2} = L_m \quad (3.22)$$

A resistência de perdas do núcleo refletida ao primário (R_{m_1}) e a indutância de magnetização refletida ao primário (L_{m_1}) podem ser expressas pelas equações (3.23) e (3.24).

$$R_{m_1} = R_{m_2} \cdot \left(\frac{N_{total}}{N_s} \right)^2 \quad (3.23)$$

$$L_{m_1} = L_{m_2} \cdot \left(\frac{N_{total}}{N_s} \right)^2 \quad (3.24)$$

O transformador pode ser então representado pelo circuito T equivalente referido ao lado secundário como apresentado na Figura 3.6 (a), cujos parâmetros são sumarizados na Tabela 3.5, ou pelo circuito T equivalente refletido ao primário, como apresentado na Figura 3.6 (b), cujos parâmetros são sumarizados na Tabela 3.6.

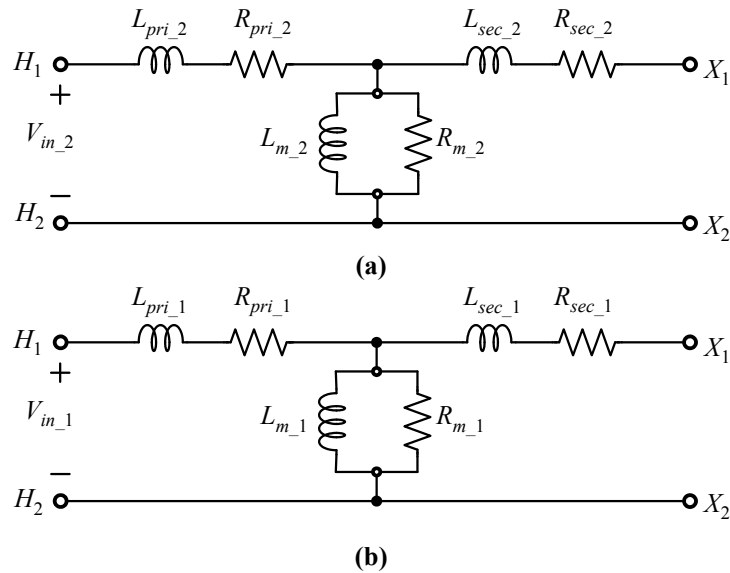


Figura 3.6 – Circuito T equivalente do transformador. (a) Refletido ao secundário. (b) Refletido ao primário.

Tabela 3.5 – Parâmetros do modelo T equivalente refletido ao secundário.

| Impedância | Valor | Impedância | Valor |
|--------------|-----------|--------------|-----------|
| R_{pri_2} | 106,45 mΩ | L_{pri_2} | 152,45 μH |
| R_{m_2} | 968 Ω | L_{m_2} | 662,96 mH |
| R_{sec_2} | 106,45 mΩ | L_{sec_2} | 152,45 μH |

Tabela 3.6 – Parâmetros do modelo T equivalente refletido ao primário.

| Impedância | Valor | Impedância | Valor |
|--------------|----------|--------------|------------|
| R_{pri_1} | 139,57 Ω | L_{pri_1} | 200,149 mH |
| R_{m_1} | 1,27 MΩ | L_{m_1} | 869,25 H |
| R_{sec_1} | 139,57 Ω | L_{sec_1} | 200,149 mH |

Considerando que a resistência e indutância primária se distribuem uniformemente entre os enrolamentos principais e de *tap* do circuito primário do transformador, ou seja, seguindo a distribuição com base nas relações de transformações de cada enrolamento, é possível determinar os valores das resistências dos enrolamentos principais e de *tap* ($R_{principal}$ e R_{tap} , respectivamente) e também as indutâncias de dispersão dos enrolamentos principais e de

tap ($L_{principal}$ e L_{tap} , respectivamente) do transformador. Tais valores podem ser encontrados com base nas relações de transformações definidas na Tabela 3.2, sendo calculados pelas equações (3.25) a (3.28):

$$R_{principal} = R_{pri_1} \cdot \left(\frac{N_m}{N_{total}} \right) \quad (3.25)$$

$$L_{principal} = L_{pri_1} \cdot \left(\frac{N_m}{N_{total}} \right) \quad (3.26)$$

$$R_{tap} = R_{pri_1} \cdot \left(\frac{N_t}{N_{total}} \right) \quad (3.27)$$

$$L_{tap} = L_{pri_1} \cdot \left(\frac{N_t}{N_{total}} \right) \quad (3.28)$$

Os parâmetros próprios dos enrolamentos primário e secundário do transformador, ou seja, aqueles que desconsideram os efeitos de reflexão são sumarizados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Parâmetros dos enrolamentos do transformador desconsiderando as reflexões.

| Impedância | Valor | Impedância | Valor |
|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| R_{pri_1} | 139,57 Ω | L_{pri_1} | 200,149 mH |
| $R_{principal}$ | 57,655 Ω | $L_{principal}$ | 82,7 mH |
| R_{tap} | 6,07 Ω | L_{tap} | 8,7 mH |
| R_{sec_2} | 106,45 m Ω | L_{sec_2} | 152,65 μ H |
| --- | --- | L_{m_2} | 662,96 mH |

Para melhor representação da distribuição das resistências e indutâncias de dispersão nos enrolamentos do circuito primário do transformador, a Figura 3.6 (b) pode ser representada pela Figura 3.7, esta representação é similar ao circuito apresentado em (BAUER e DE HAAN, 1999). Verifica-se nesta figura a contribuição de cada enrolamento para o aumento ou redução da resistência e indutância de dispersão primária do transformador à medida que os enrolamentos de *tap* são comutados. Deve-se notar que nesta representação os terminais de *tap* N_7 e N_9 estão interconectados, significando assim que todos os enrolamentos do lado primário do transformador estão conectados em série.

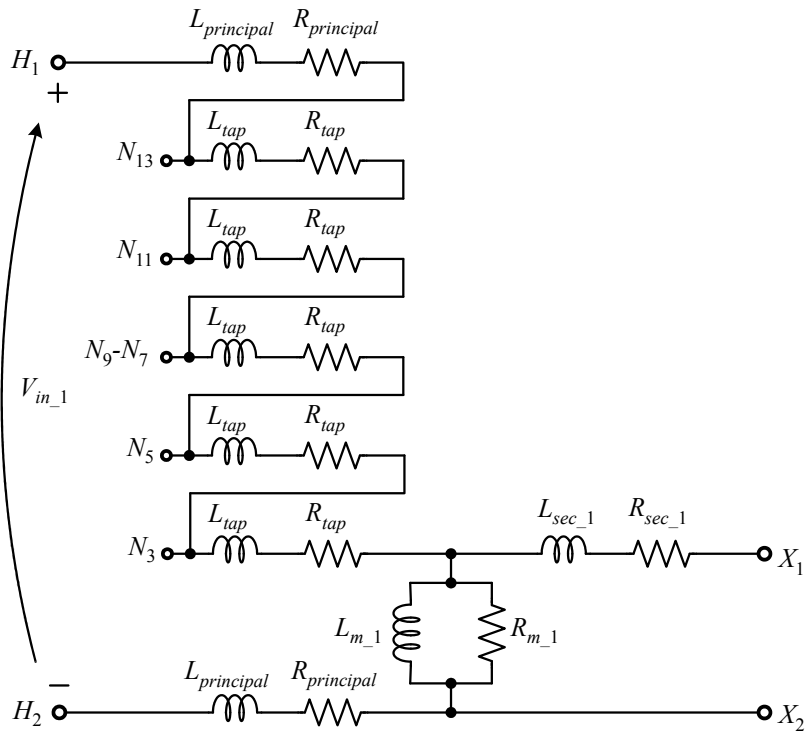


Figura 3.7 - Circuito T equivalente do transformador refletido ao primário considerando os terminais N_9 e N_7 conectados.

3.5 Análise de suportabilidade dielétrica do arranjo de terminais de tap

Buscando possibilitar maior facilidade de manutenção e de substituição de dispositivos defeituosos, o transformador desenvolvido para aplicação do comutador eletrônico de taps apresenta os terminais de acesso aos enrolamentos de tap externos a sua carcaça, conforme mostrado na Figura 3.4. Isto implica desafios tecnológicos, uma vez que as conexões de tap não estão imersas no óleo isolante, dificultando a isolamento dos terminais quanto aos níveis de tensão que aparecem entre eles e em relação à carcaça do transformador.

Esta característica torna necessária a avaliação das características de suportabilidade dielétrica do arranjo de terminais dos taps a fim de assegurar a sua correta operação com relação à isolamento do transformador. Neste trabalho, esta avaliação foi realizada através da análise de estresse cumulativo de tensão em comparação com a suportabilidade dielétrica característica do material isolante (Epoxi-Kevlar nesse caso) empregado na isolamento dos terminais de acesso aos taps, conforme método apresentado em (NELSON, 1994). A análise foi realizada através do método de elementos finitos, utilizando-se o software Maxwell[®].

3.5.1 Cálculo do estresse cumulativo de tensão

O estresse cumulativo de tensão pode ser calculado utilizando o procedimento descrito em (NELSON, 1994), sendo que para um caso onde estejam envolvidos apenas dois eletrodos com potenciais diferentes separados por uma determinada distância, o estresse cumulativo representa a diferença de tensão entre estes dois pontos num determinado percurso, dividido pela distância entre estes dois pontos (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

Para um caso genérico, onde se quer avaliar mais de um potencial elétrico, como o exemplo apresentado na Figura 3.8, deve-se tomar o cuidado de avaliar as contribuições de todos os potenciais envolvidos para a análise do estresse cumulativo. Como exemplo, assume-se que para o ponto 3 representado na Figura 3.8 está localizado o maior valor de estresse (com 7 kVrms/mm), a partir disso, o estresse cumulativo é calculado para cada 2 mm de distância em ambas as direções do ponto 3. Posteriormente, calcula-se para as distâncias de 4 mm e 6 mm, obtendo-se os valores calculados na Tabela 3.8. Com esses dados é possível descrever o comportamento do estresse cumulativo no percurso avaliado, conforme mostrado na Figura 3.9.

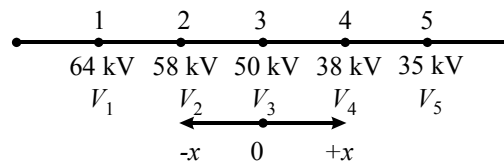


Figura 3.8 – Estresse cumulativo de tensão (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

Tabela 3.8 – Estresse cumulativo de tensão para o exemplo apresentado em (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

| Caminho de avaliação (mm) | Direção +x | Direção -x | Avaliação estendida ao ponto |
|---------------------------|--|--|------------------------------|
| 2 | $\frac{V_3 - V_4}{2} = 6,0 \text{ kV/mm}$ | $\frac{V_2 - V_3}{2} = 4,0 \text{ kV/mm}$ | 4 |
| 4 | $\frac{V_3 - V_5}{2} = 3,75 \text{ kV/mm}$ | $\frac{V_2 - V_4}{2} = 5,0 \text{ kV/mm}$ | 2 |
| 6 | $\frac{V_2 - V_5}{2} = 3,83 \text{ kV/mm}$ | $\frac{V_1 - V_4}{2} = 4,33 \text{ kV/mm}$ | 1 |

Em casos que apresentem uma geometria complexa, muitas vezes uma solução analítica do comportamento da tensão se torna demasiadamente complicada. Nestes casos, pode-se fazer uso de *softwares* de análise numérica, como aqueles que utilizam o método dos

elementos finitos. Conforme apresentado em (NELSON, 1994), a solução deste tipo de problema pode ser feito de duas formas: através da avaliação invariante no tempo (convencionalmente eletrostática), ou avaliação senoidal em regime permanente (avaliação *quasi*-eletrostática), devendo observar-se a frequência da tensão no caso senoidal.

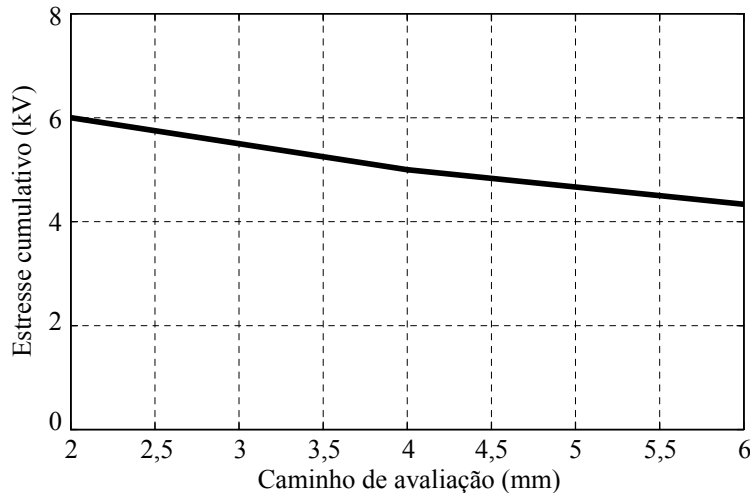


Figura 3.9 – Estresse cumulativo de tensão para o exemplo apresentado em (KULKARNI e KHAPARDE, 2004).

3.5.2 Cálculo da suportabilidade dielétrica do material

O cálculo da suportabilidade dielétrica do material isolante é obtido por ensaios e pode ser representado por uma equação empírica em muitos casos. Esta informação geralmente é apenas de conhecimento industrial. Para o caso do Epoxi-Kevlar, material utilizado na isolação do arranjo de acesso aos terminais de *tap*, a suportabilidade dielétrica pode ser encontrada através da equação (3.29). Cabe ressaltar que o caminho de avaliação da suportabilidade dielétrica deve ser o mesmo em que se avalia o estresse cumulativo de tensão da estrutura a ser estudada.

$$E_{creep} = 0,8 \cdot d_1^{-0,37} \quad (3.29)$$

Onde:

E_{creep} – é a suportabilidade dielétrica do material ao longo do caminho de avaliação determinado.

d_1 – é o caminho de avaliação (em milímetros).

3.5.3 Avaliação da suportabilidade dielétrica da geometria de terminais de *taps* analisada

Nesta análise, é necessário descrever o comportamento do estresse cumulativo de tensão ao longo de um caminho de avaliação, comparando com a suportabilidade dielétrica do material isolante. Para o caso do transformador avaliado, este caminho refere-se à menor distância entre o ponto de maior tensão dos terminais de *tap* e a carcaça aterrada do transformador. Uma vez que a diferença de potencial que aparece entre os terminais de *taps* é significativamente inferior àquela referenciada à terra, o estresse cumulativo de tensão será menor para os terminais entre si e maior entre os terminais e a terra. Sendo assim, ao garantir-se a suportabilidade dielétrica para o pior caso de estresse cumulativo, as demais avaliações são satisfeitas.

A condição de maior nível de tensão aplicada aos terminais de *taps* do transformador em relação à terra, em operação normal, é obtida quando os terminais N_3 e N_{13} estão conectados (ver Figura 3.2). Nesta condição, o terminal de *tap* N_7 tem o nível de tensão mais elevado do que qualquer outro, em qualquer outra condição de operação do transformador. Isso ocorre porque a tensão sobre este terminal conta com as contribuições de tensão do enrolamento principal (entre os terminais N_3-H_2) e dos enrolamentos de *tap* entre os terminais N_5-N_3 e N_7-N_5 , que embora não estejam conectados ao circuito primário nesta condição, permanecem magneticamente acoplados, o que resulta no aparecimento de tensões que se somam a do enrolamento entre N_3-H_2 . Esta condição é a mais crítica justamente pela menor relação de transformação do circuito primário, que conta apenas com os enrolamentos principais, ocasionando uma maior tensão nestes enrolamentos. Além disso, é induzida maior tensão nos enrolamentos de *tap* que permanecem magneticamente acoplados ao transformador.

As tensões eficazes nos terminais de *tap* em relação à terra quando os terminais N_{13} e N_3 estão conectados podem ser calculadas pelas equações (3.30) a (3.35) e são sumarizadas na Tabela 3.9. Onde:

K – é o número de enrolamentos de *tap* no primário do transformador (quatro);

M – é o número de enrolamentos principais no primário do transformador (dois);

$$V_{N13} = \frac{V_{in-1}}{M} \quad (3.30)$$

$$V_{N11} = V_{in-1} \cdot \left(\frac{1}{M} - \frac{N_t}{N_{total} - K \cdot N_t} \right) \quad (3.31)$$

$$V_{N9} = V_{in-1} \cdot \left(\frac{1}{M} - \frac{2 \cdot N_t}{N_{total} - K \cdot N_t} \right) \quad (3.32)$$

$$V_{N7} = V_{in-1} \cdot \left(\frac{1}{M} + \frac{2 \cdot N_t}{N_{total} - K \cdot N_t} \right) \quad (3.33)$$

$$V_{N5} = V_{in-1} \cdot \left(\frac{1}{M} + \frac{N_t}{N_{total} - K \cdot N_t} \right) \quad (3.34)$$

$$V_{N3} = \frac{V_{in-1}}{M} \quad (3.35)$$

Tabela 3.9 – Tensão dos terminais de *tap* quando N_{13} e N_3 estão conectados.

| Terminal de <i>tap</i> | Simbologia | Tensão eficaz em relação à terra |
|-------------------------------|-------------------|---|
| N_{13} | V_{M13} | 3986 V |
| N_{11} | V_{M11} | 3567 V |
| N_9 | V_{N9} | 3147 V |
| N_7 | V_{N7} | 4825 V |
| N_5 | V_{N5} | 4406 V |
| N_3 | V_{N3} | 3986 V |

O caminho mais curto a partir do terminal N_7 para a carcaça do transformador é ao longo do caminho de avaliação **A-B**, mostrado na Figura 3.10 (a), tendo comprimento de 57,05 mm. O caminho **A'-B'**, mostrado na Figura 3.10 (b), apresenta comprimento de 61,85 mm. É importante ressaltar que o estresse cumulativo ao longo de qualquer percurso de avaliação deve ser inferior à suportabilidade do material de isolamento, essa condição se faz necessária a fim de garantir a isolação dielétrica do arranjo analisado.

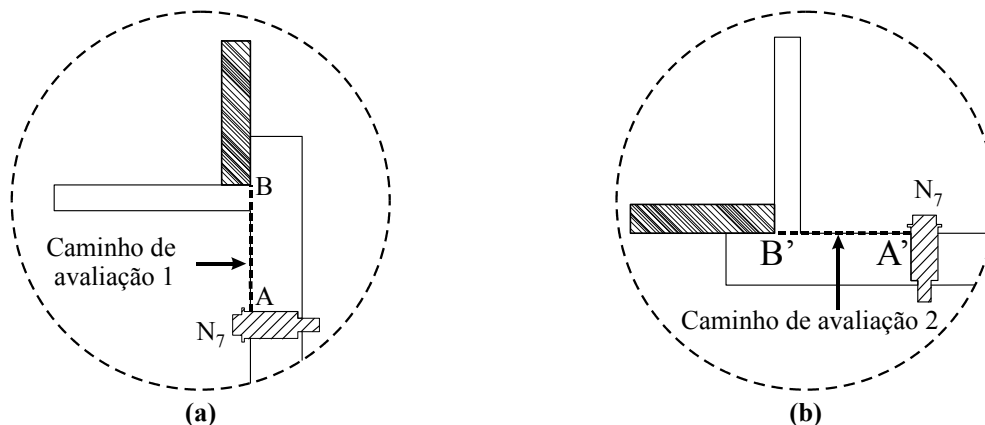


Figura 3.10 - Caminhos de avaliação da estrutura de acesso aos *taps*. (a) Detalhe I. (b) Detalhe II.

Com os parâmetros da Tabela 3.9 é feita a simulação em elementos finitos da geometria do arranjo de terminais de *tap* do transformador utilizado, sendo considerado o método senoidal em regime permanente proposto por (NELSON, 1994) para a frequência de 60 Hz. A avaliação é realizada através da seção transversal C-C' (conforme apresentado na Figura 3.4), permitindo descrever a distribuição da tensão ao longo desta seção, a qual é apresentada na Figura 3.11.

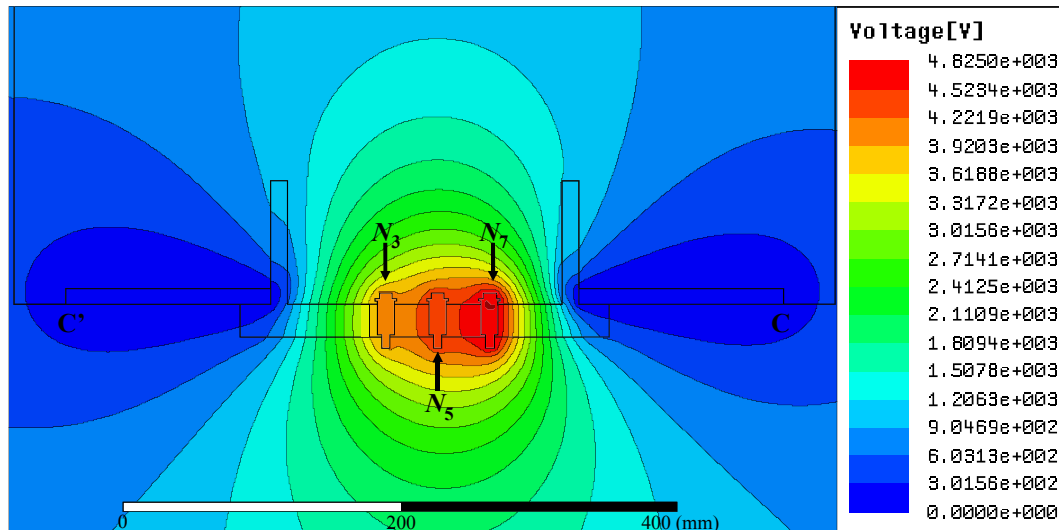


Figura 3.11 – Comportamento da tensão ao longo da seção C-C' de arranjo de *taps*.

Além disso, é também avaliado o comportamento da tensão através da seção D-D', sendo apresentado na Figura 3.12.

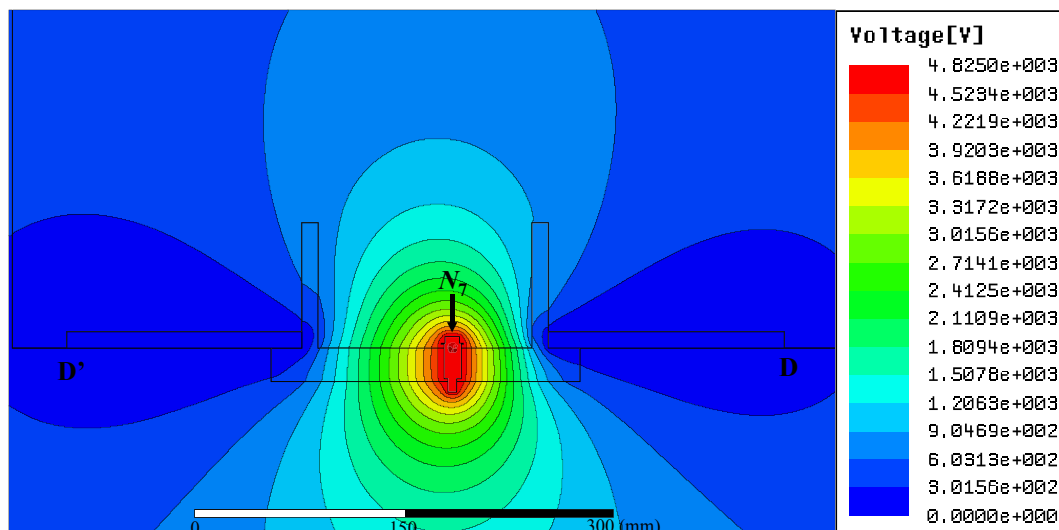
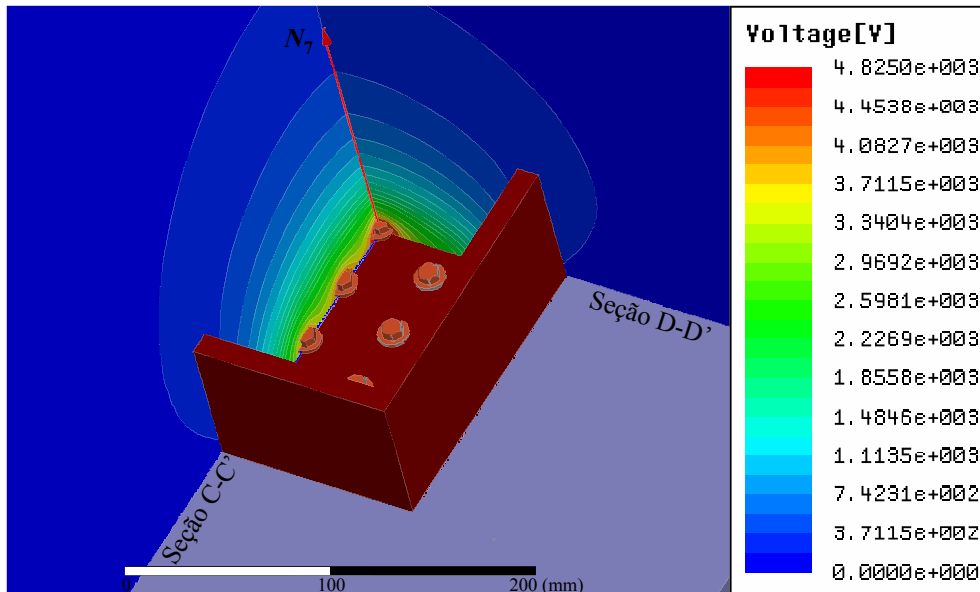


Figura 3.12 – Comportamento da tensão ao longo da seção D-D' de arranjo de *taps*.

A Figura 3.13 apresenta a representação tridimensional da distribuição da tensão na estrutura analisada, representando a composição dos dois casos anteriores.



A partir dos dados encontrados na análise em elementos finitos, é possível descrever o comportamento da tensão ao longo do caminho A-B, o qual é representado na Figura 3.14. A mesma avaliação é feita para o caminho A'-B', conforme apresentado na Figura 3.15.

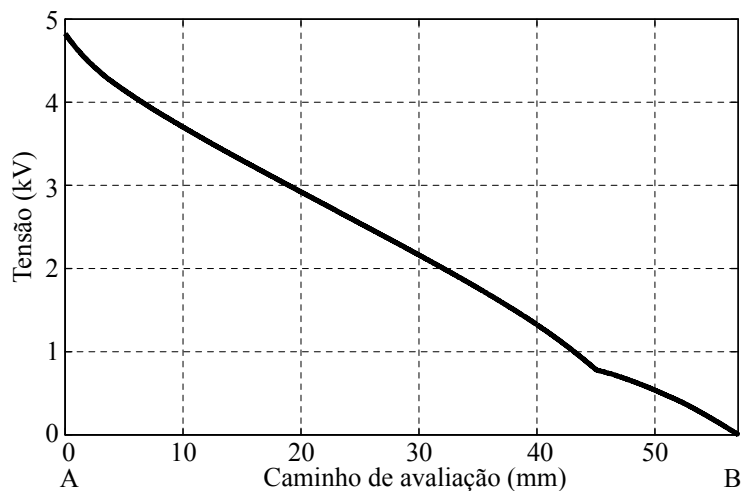


Figura 3.14 – Comportamento da tensão ao longo do caminho de avaliação A-B.

Com os dados da tensão ao longo do caminho de avaliação, é possível fazer a avaliação do estresse cumulativo de tensão e da suportabilidade dielétrica da geometria estudada. Sendo realizada considerando a variação da distância em cada ponto de avaliação com um passo de 0,05701 mm (precisão imposta pela malha de elementos finitos). A Figura 3.16 traz esta avaliação para o caminho A-B e a Figura 3.17 apresenta a avaliação para o caminho A'-B'. Os resultados obtidos demonstram que o arranjo geométrico adotado no transformador apresenta suportabilidade dielétrica adequada frente ao estresse cumulativo

causado no pior caso de tensão nos *taps* do transformador, com mínima margem de diferença de 52,79% para o caminho de avaliação A-B e 55,14% para o caminho A'-B'.

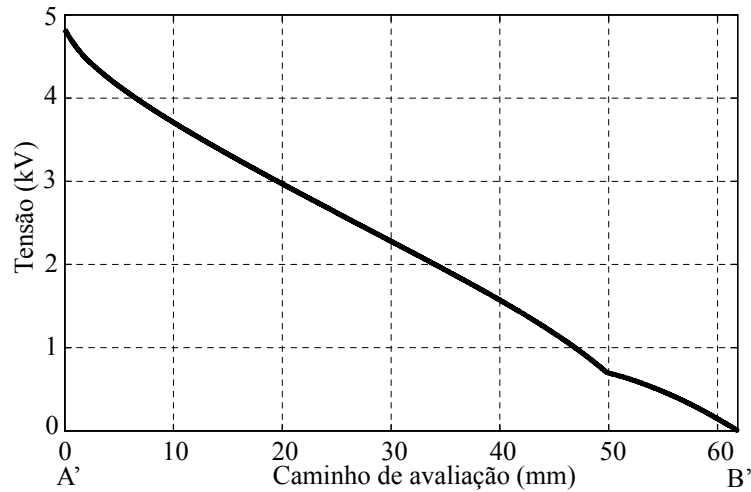


Figura 3.15 – Comportamento da tensão ao longo do caminho de avaliação A'-B'.

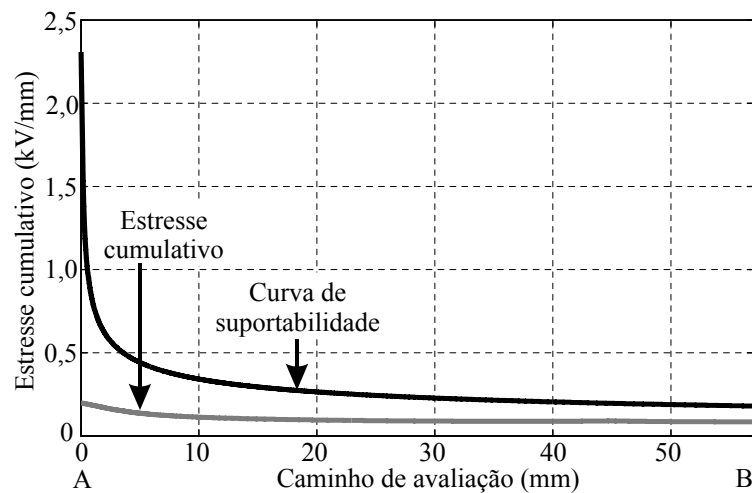


Figura 3.16 – Avaliação do estresse cumulativo e da suportabilidade dielétrica através do caminho A-B.

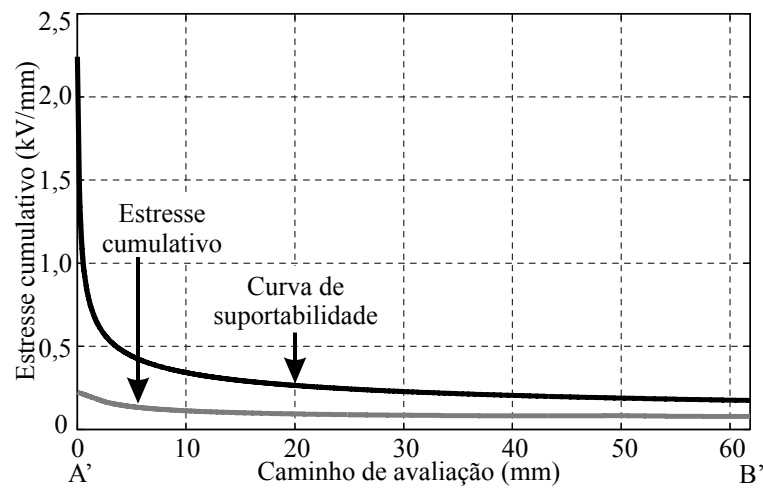


Figura 3.17 – Avaliação do estresse cumulativo e da suportabilidade dielétrica através do caminho A'-B'.

3.6 Conclusões

Neste capítulo foi apresentado o transformador desenvolvido para o emprego do comutador eletrônico de *taps*. A topologia proposta é compatível com o padrão adotado pela CEEE-D, entretanto, apresenta os terminais de acesso aos *taps* externamente à carcaça do transformador. Apesar de alterar a carcaça do transformador e o sistema de isolamento dos terminais de acesso aos enrolamentos de *taps*, essa característica não altera o projeto elétrico dos enrolamentos e do arrefecimento do transformador.

Foram apresentadas as principais características elétricas e construtivas do transformador. Posteriormente, foi obtido o modelo T equivalente do mesmo, o qual é usado no próximo capítulo para avaliação do comportamento das tensões e correntes durante o processo de comutação das chaves semicondutoras.

Por fim, foi apresentado o estudo da suportabilidade dielétrica da estrutura de acesso externo aos *taps* do transformador. Esta análise foi desenvolvida baseada no método de comparação entre a suportabilidade do material e o estresse cumulativo de tensão da estrutura, sendo realizada através da análise de elementos finitos da distribuição da tensão ao longo da estrutura analisada. A avaliação realizada demonstra que o emprego da estrutura de acesso externo aos *taps* do transformador proposta não implica na perda de confiabilidade do equipamento, porém, ensaios de norma aplicáveis a transformadores precisam ser desenvolvidos a fim de validar a estrutura proposta.

CAPÍTULO 4 COMUTADOR ELETRÔNICO DE *TAPS* DESENVOLVIDO

Neste capítulo é apresentado o comutador eletrônico de *taps* desenvolvido. Inicialmente é apresentada a topologia e características do sistema. Posteriormente são apresentados os estudos do comportamento das tensões e correntes durante o processo de comutação. Na sequência é realizado o projeto das chaves e são apresentados os circuitos de acionamento das chaves semicondutoras e o sistema de controle empregado.

4.1 Topologia empregada e características

A topologia empregada no comutador eletrônico de *taps*, apresentada na Figura 4.1 (a), busca adequação com o transformador apresentado na Figura 3.2, cuja configuração é amplamente empregada em sistemas de distribuição. Sendo assim, o presente trabalho diferencia-se pelo fato de aplicar a comutação eletrônica de *taps* em um transformador já existente comercialmente, o qual apresenta como diferença o acesso externo aos *taps*. As chaves semicondutoras bidirecionais são implementadas através de dispositivos IGBTs em conexão anti-série (BAUER e DE HAAN, 1998a), (ASSELMAN, GRIFFIOEN *et al.*, 1999), ou emissor comum; conforme demonstrado na Figura 4.1 (b). Uma vantagem dessa configuração é a possibilidade de acionar ambas as chaves semicondutoras com o mesmo sinal de *gate*.

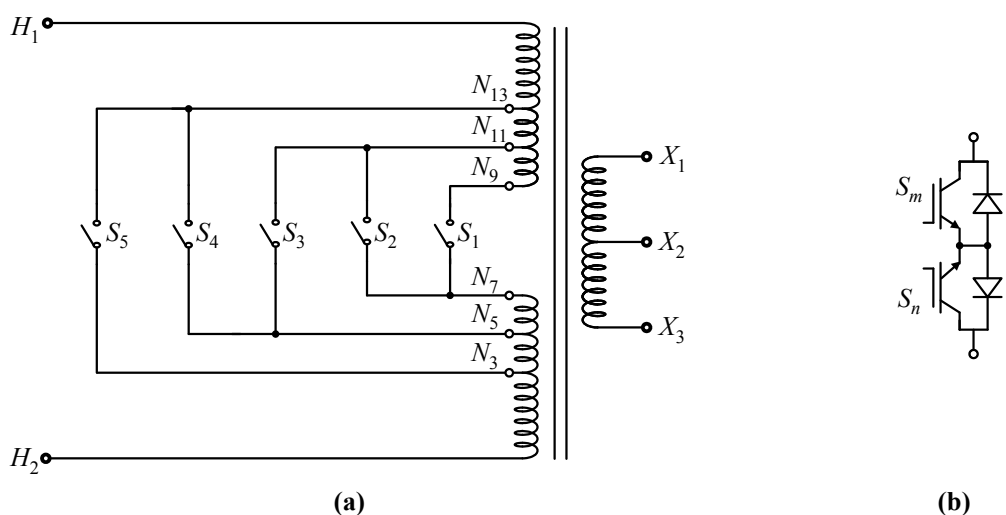


Figura 4.1 – Comutador eletrônico de *taps*. (a) Circuito e conexões ao transformador. (b) Implementação das chaves semicondutoras bidirecionais.

4.2 Descrição dos circuitos auxiliares

O comutador eletrônico de *taps* proposto, englobando os diagramas dos principais circuitos auxiliares necessários à sua operação é representado na Figura 4.2. Destaca-se que apenas os circuitos de proteção não são apresentados nesta figura, sendo que os mesmos serão apresentados no APÊNDICE A –.

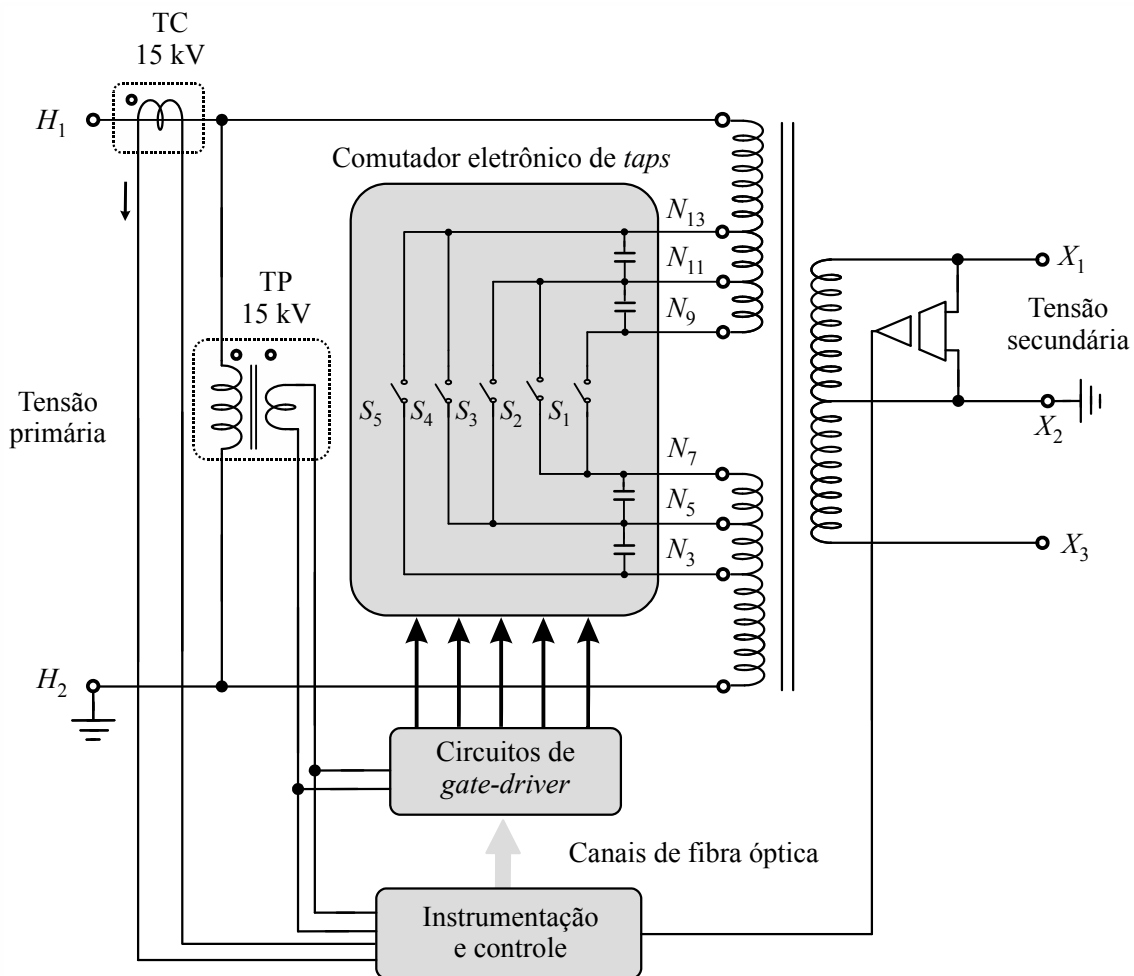


Figura 4.2 – Comutador eletrônico de *taps* proposto e respectivos circuitos auxiliares.

Conforme se observa na Figura 4.2, no primário do transformador emprega-se um transformador de corrente (TC) com classe de isolamento de 15 kV. O TC realiza a medição da corrente no primário de modo a permitir a sincronização da comutação das chaves semicondutoras no cruzamento por zero desta. Além disso, um transformador de potencial (TP) com classe de isolamento de 15 kV é empregado no primário do transformador, tanto para medição do seu valor, quanto para a implementação das fontes de alimentação dos circuitos de instrumentação, controle e acionamento (*gate-driver*).

O emprego de um TP no primário tem por objetivo aumentar a confiabilidade do sistema, uma vez que, caso a alimentação dos circuitos supracitados fosse derivada do secundário do transformador, um evento de falha no circuito de potência do comutador eletrônico de *taps* poderia comprometer a disponibilidade de tensão no secundário do transformador e por consequência, deixar o circuito de controle sem alimentação.

Além disso, destaca-se na Figura 4.2 a medição isolada da tensão no secundário do transformador. Essa informação é necessária para a tomada de decisão, por parte do circuito de controle, por comutar ou não os *taps* do transformador, obedecendo à lei de controle implementada em um *Digital Signal Processor* (DSP), modelo TMS320F28335 de fabricação da Texas Instruments[®]. Finalmente, cabe destacar que a interface entre o circuito de controle e os circuitos de acionamento (*gate-driver*), responsáveis pelo comando das chaves semicondutoras bidirecionais, é realizada por meio de canais de fibra óptica, proporcionando elevados níveis de isolamento elétrica (dezenas de quilovolts) e alta imunidade a ruídos eletromagnéticos.

A proposta inicial deste trabalho visava a utilização de tiristores em configuração anti-paralela como chaves bidirecionais, como apresentado em (FAIZ e SIAHKOLAH, 2003), devido a sua disponibilidade para aplicações com tensões elevadas (na ordem de quilovolts). Entretanto, em função dos níveis de tensão e, principalmente, dos baixos níveis de corrente no lado de alta tensão do transformador estudado – inferiores à corrente de *latch* e *hold* de todos os tiristores comerciais pesquisados para os níveis de tensão da aplicação em questão – o desenvolvimento de circuitos de acionamento das chaves semicondutoras para esta aplicação seria dificultado. Por isso, optou-se pelo emprego de IGBTs em configuração anti-série, o que favorece o desenvolvimento dos circuitos de acionamento para o caso específico.

Sendo assim, é possível verificar-se que em aplicações que envolvam elevadas tensões, mas reduzidas correntes primárias, a aplicação de chaves eletrônicas controladas em tensão, como é o caso dos IGBTs, é uma opção melhor. Já em aplicações de maiores potências, onde a tecnologia de tiristores é mais desenvolvida, a aplicação destes dispositivos é a mais indicada.

4.3 Análise da tensão e corrente sobre as chaves semicondutoras

Para o adequado dimensionamento das chaves semicondutoras e dos sistemas de proteção utilizados no comutador eletrônico de *taps*, faz-se necessária uma avaliação criteriosa do comportamento da tensão e corrente sobre estes dispositivos durante a operação do transformador. A seguir são apresentados os estudos que descrevem o comportamento da

tensão e corrente sobre as chaves semicondutoras do comutador eletrônico de *taps* em operação normal e durante o processo de comutação. Para a análise adota-se a mesma condição imposta para a obtenção do modelo do transformador, considerando-se que os enrolamentos referentes aos terminais X_1 a X_3 serão representados apenas por um enrolamento equivalente, tendo seus terminais representados por X_1 e X_2 .

4.3.1 Máxima tensão de operação sobre as chaves semicondutoras

A avaliação dos níveis de tensão a que as chaves semicondutoras estarão sujeitas durante a operação do transformador é necessária devido à mudança do nível de tensão causada pela alteração da relação de transformação do enrolamento primário. À medida que os *taps* são selecionados, os enrolamentos principais do transformador permanecem operando, mas alguns enrolamentos de *tap* são retirados de operação. Entretanto, o fato de todos os enrolamentos do transformador estarem acoplados magneticamente faz com que surjam tensões sobre os enrolamentos de *tap* fora de operação, que afetam a tensão sobre as chaves semicondutoras.

Dessa maneira, faz-se necessário conhecer esse comportamento da tensão sobre as chaves semicondutoras de maneira a dimensioná-las corretamente para qualquer condição de operação do comutador eletrônico de *taps*. A Figura 4.3 (a) apresenta uma representação genérica para n enrolamentos de *tap* da topologia do transformador empregado, a qual é descrita na Figura 4.3 (b).

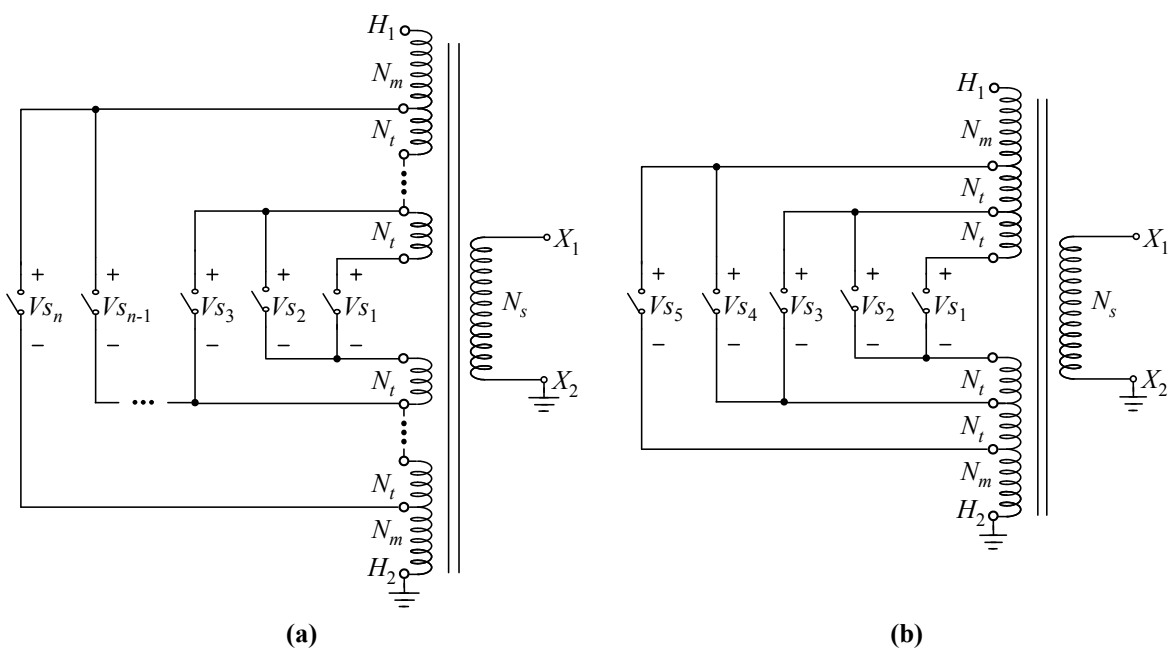


Figura 4.3 - Tensão sobre as chaves semicondutoras durante a operação normal do transformador. (a) Topologia genérica para n enrolamentos de *taps*. (b) Topologia do transformador desenvolvido.

Assumindo que os enrolamentos de *tap* possuem a mesma relação de transformação entre si (N_t) e que os enrolamentos principais também possuem a mesma relação de transformação entre si (N_m). Pode-se fazer uma avaliação dos níveis de tensão sobre as chaves do comutador eletrônico de *taps* que se encontram bloqueadas em função de qualquer uma das chaves que se encontre em operação e assim, encontrar o comportamento da tensão sobre as chaves semicondutoras para qualquer condição de operação do transformador.

Adotando como variáveis:

p – é a referência da chave bloqueada a qual se deseja saber a tensão;

q – é a referência da chave que está fechada e conduzindo corrente;

S_p – é a chave bloqueada a qual se deseja saber a tensão;

S_q – é a chave que está fechada e conduzindo corrente;

V_{S_p} – é a tensão de pico sobre a chave S_p ;

$V_{S_1}, V_{S_2}, V_{S_3}, V_{S_4}, V_{S_5}, V_{S_n}$ - tensões sobre as chaves do comutador eletrônico de *taps*;

V_{in} – é o valor de pico da tensão de entrada do transformador.

Com essas definições é possível afirmar que a tensão V_{S_p} quando a chave S_q está fechada é dada pela equação (4.1).

$$V_{S_p} = \frac{V_{in} \cdot |q - p| \cdot N_t}{(M \cdot N_m + K \cdot N_t) - (q - 1) \cdot N_t} \quad (4.1)$$

Tomando como exemplo o comutador eletrônico de *taps* aplicado à topologia do transformador desenvolvido, apresentado na Figura 4.3 (b), tem-se que $M = 2$ e $K = 4$. Assumindo que a chave S_1 esteja fechada e conduzindo a corrente primária do transformador e é desejável saber a tensão que aparece sobre a chave S_3 , então, tem-se que $q = 1$ e $p = 3$. Substituindo esses valores na equação (4.1), tem-se:

$$V_{S_3} = \frac{V_{in} \cdot 2 \cdot N_t}{(2 \cdot N_m + 4 \cdot N_t)} \quad (4.2)$$

Substituindo agora os valores da Tabela 3.1 e da Tabela 3.2 na equação (4.2), tem-se que a tensão sobre a chave S_3 quando a chave S_1 esta fechada é dada pela equação (4.3):

$$V_{S_3} = \frac{7967 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 1,575}{(2 \cdot 14,956 + 4 \cdot 1,575)} = 980,15 \text{ V} \quad (4.3)$$

Assumindo a mesma análise para os demais casos de comutação das chaves semicondutoras para a topologia da Figura 4.3 (b), pode-se descrever o comportamento das tensões sobre as demais chaves à medida que os enrolamentos de *taps* são comutados, esse processo é apresentado pela Figura 4.4.

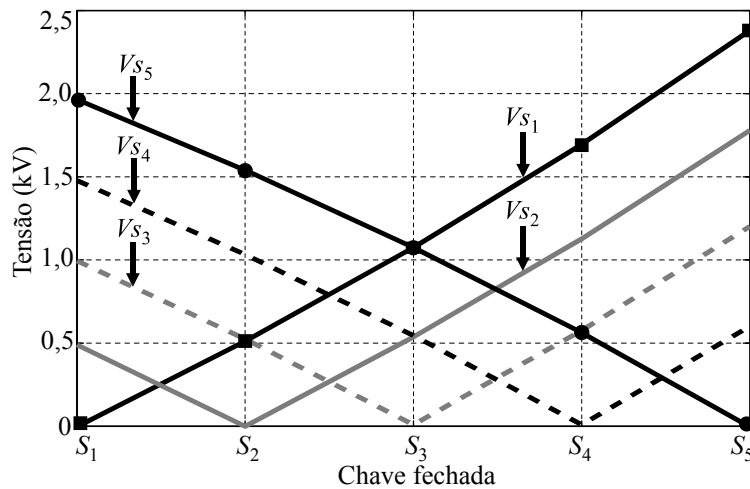


Figura 4.4 – Excursão da tensão sobre as chaves em função da chave selecionada.

Conforme apresentado na Figura 4.4, é possível identificar que a maior tensão ocorre sobre a chave S_1 quando a chave S_5 está fechada. Neste caso, a tensão de pico V_{S_1} é de 2373 V quando a tensão primária está em 1 p.u., desconsiderando as perdas nas impedâncias da rede primária e do transformador. Assim, todas as chaves semicondutoras podem então ser projetadas para esta condição de tensão, especificando-se uma chave semicondutora que tenha tensão de operação superior a este valor e margem de segurança adequada, de modo a suportar sobretensões decorrentes das redes de distribuição que o sistema de proteção não possa limitar instantaneamente.

4.3.2 Corrente nominal de operação das chaves semicondutoras

A mudança da relação de transformação do enrolamento primário do transformador faz com que a corrente primária mude à medida que os *taps* são comutados, mesmo mantendo-se a carga nominal no secundário do transformador. Considerando o

transformador operando com os enrolamentos secundários em paralelo, a tensão secundária eficaz (V_{sec}) é 220 V e a corrente sobre as chaves eletrônicas é dada pela equação (4.4).

$$I_{s_q} = \frac{S}{V_{sec}} \cdot \frac{N_s}{[N_{total} - (q-1) \cdot N_t]} \cdot \sqrt{2} \quad (4.4)$$

Onde I_{s_q} representa a corrente de pico sobre a chave q (chave que se encontra em condução). O comportamento das correntes nas chaves durante a operação do comutador eletrônico de *taps* é apresentado na Figura 4.5.

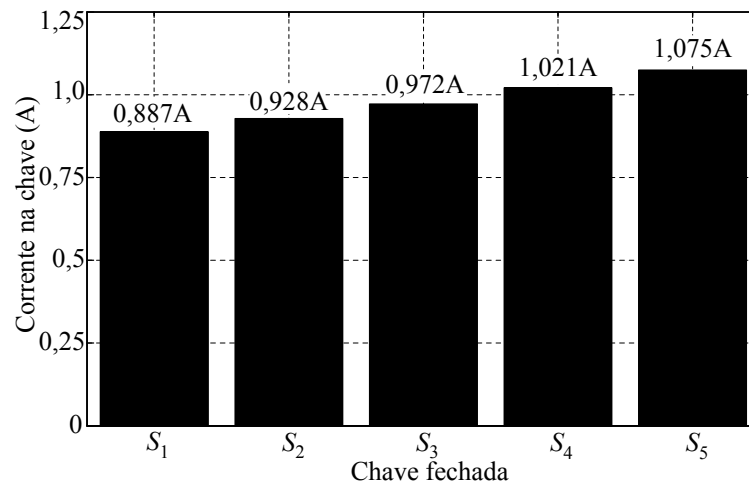


Figura 4.5 – Corrente de pico sobre as chaves durante operação normal do comutador eletrônico.

Assim, a máxima corrente nominal de pico do enrolamento primário através das chaves, $I_{s_{max}}$, é dada para a condição de menor relação de transformação desse enrolamento, que ocorre quando a chave S_5 está em condução. A equação (4.5) apresenta esta condição.

$$I_{s_{max}} = \frac{S}{V_{sec}} \cdot \frac{N_s}{[N_{total} - K \cdot N_t]} \cdot \sqrt{2} \quad (4.5)$$

Substituindo os valores da Tabela 3.1 e da Tabela 3.2 na equação (4.5), é possível encontrar-se o valor da corrente primária nominal de pico máxima do transformador em operação normal, a qual é dada pela equação (4.6). A partir deste valor é possível projetar-se as chaves semicondutoras para a condição de corrente de operação nominal.

$$I_{s_{max}} = \frac{5000}{220} \cdot \frac{1}{[36,21 - (5-1) \cdot 1,575]} \cdot \sqrt{2} = 1,075 \text{ A} \quad (4.6)$$

É de destacar que as chaves semicondutoras não são projetadas para operação na condição de curto-circuito no secundário do transformador. Nesta condição o circuito de proteção assume a corrente primária, evitando a danificação das chaves semicondutoras. A avaliação desta condição de operação é apresentada na seção A.1 deste trabalho.

4.3.3 Corrente nas chaves em função do tempo de sobreposição na comutação

Durante o processo de comutação, faz-se necessário que duas chaves estejam fechadas ao mesmo tempo a fim de garantir que o transformador não fique em aberto e toda a tensão primária fique sobre as chaves semicondutoras. Entretanto, a sobreposição de duas chaves resulta no curto-circuito do enrolamento de *tap* que inicialmente encontra-se conduzindo. A corrente resultante do processo de comutação no enrolamento de *tap* é, portanto, limitada apenas pela impedância do próprio enrolamento, podendo chegar a magnitudes elevadas dependendo do tempo de sobreposição das chaves. Esta técnica é também utilizada em comutadores eletromecânicos de *taps*, os quais, por usarem chaves mecânicas na comutação, apresentam um período de sobreposição das chaves significativamente grande devido ao elevado tempo de comutação entre um *tap* e outro. Isso gera elevadas correntes sobre as chaves mecânicas durante o processo de comutação.

Devido a isso, faz-se necessária uma avaliação criteriosa do processo de sobreposição das chaves semicondutoras, a fim de que as mesmas possam ser dimensionadas de maneira adequada, seja pela corrente máxima que possam conduzir, ou o tempo que as mesmas podem ser sobrepostas durante a comutação, permitindo definir o modelo de chave semicondutora mais adequada e evitando o sub ou sobre dimensionamento das mesmas.

Alguns trabalhos da literatura apresentam estudos relacionados à corrente de sobreposição das chaves, em (YOUSEF-ZAI e O'KELLY, 1996) é apresentado um modelo simplificado do transformador desconsiderando os acoplamentos magnéticos, esta análise apresenta uma aproximação do caso real. Porém, esta análise despreza o efeito da impedância magnetizante, da resistência dos enrolamentos e da impedância de dispersão do circuito secundário sobre a corrente de sobreposição. A Figura 4.6 apresenta o modelo utilizado na análise, onde inicialmente considera-se o par de tiristores A em condução, posteriormente é inserido o par B e após um dado período de sobreposição o par A é retirado de operação. A análise é feita considerando-se o tempo de sobreposição, o fator de potência e o ângulo da corrente em que os tiristores que entram em condução são comutados.

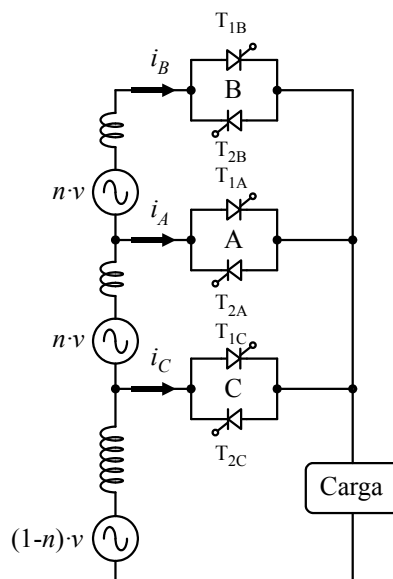


Figura 4.6 – Circuito para análise da corrente de sobreposição das chaves (YOUSEF-ZAI e O’KELLY, 1996)

Em (LOPEZ, RODRIGUEZ *et al.*, 2006a; b), é apresentado o estudo analisando a inclusão de indutâncias auxiliares para a redução da corrente de curto-circuito com comutação do tipo *hard switching*². Similar à análise anterior, os efeitos da componente magnetizante do transformador são desconsiderados. Em (ECHAVARRIA, CLAUDIO *et al.*, 2007), uma análise para a mesma topologia é realizada. Todavia, são consideradas as resistências dos enrolamentos e, além disso, a carga é considerada como sendo uma fonte de corrente e a comutação pode ocorrer para um ângulo de corrente de até 10°.

4.3.3.1 Circuito de avaliação da corrente de sobreposição

A análise apresentada neste trabalho é feita a partir do modelo T equivalente obtido na seção 3.4, desconsiderando a resistência de perdas no núcleo do transformador. A análise é feita com as seguintes considerações:

- a resistência e indutância totais primárias do transformador são divididas igualmente entre todos os enrolamentos principais e de *tap* do transformador, seguindo a relação de transformação de cada enrolamento;
- todos os enrolamentos de *tap* possuem a mesma relação de transformação;

²*hard switching*: é um tipo de comutação que ocorre quando tensão e corrente sobre a chave não são nulas, ocorrendo uma sobreposição entre esses parâmetros, resultando em perdas no processo de comutação.

- a comutação só ocorre de uma chave para a sua adjacente;
- a comutação ocorre no cruzamento por zero da corrente do primário, ou seja, não há corrente circulando nos enrolamentos do transformador no instante de comutação;
- a resolução é feita considerando-se carga com fator de potência unitário e indutivo;

A Figura 4.7 apresenta uma versão generalizada do processo de comutação entre duas chaves para a topologia de transformador empregada neste trabalho.

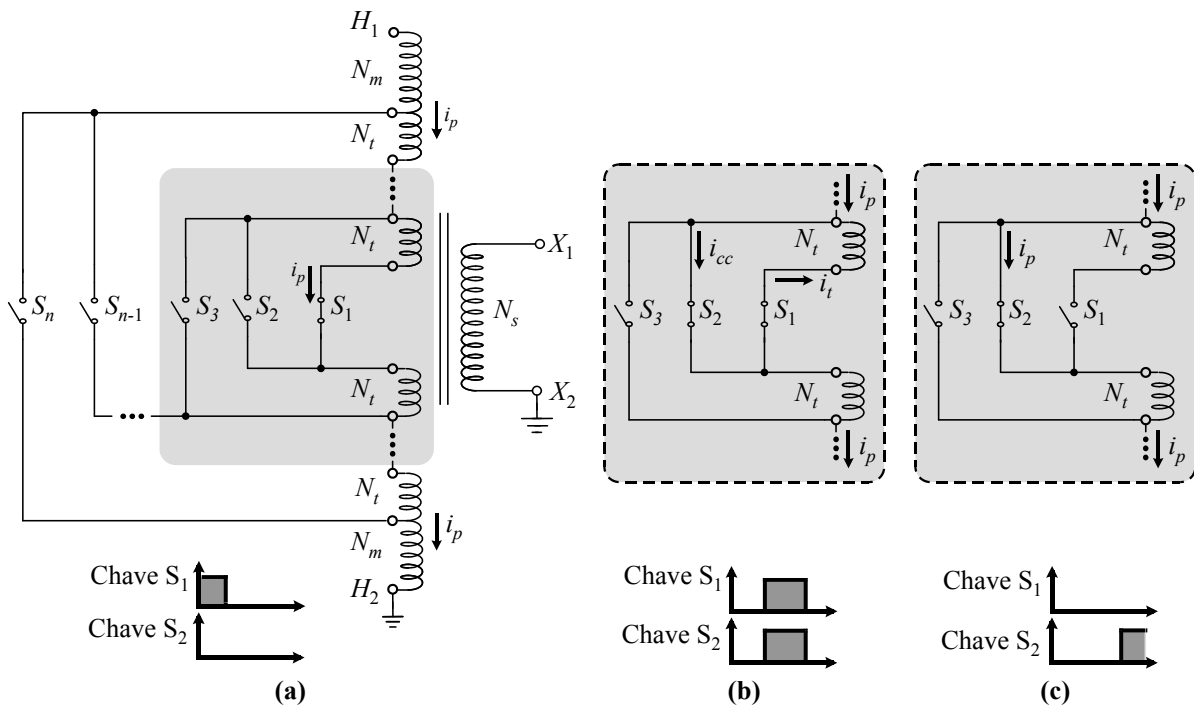


Figura 4.7 – Análise da corrente de sobreposição das chaves. (a) Operação normal do transformador na chave S_1 . (b) Sobreposição das chaves durante a comutação. (c) Operação na chave S_2 após a comutação.

A análise da comutação é feita para a mudança da chave S_1 para a chave S_2 . Considerando a Figura 4.7 (a), durante a operação normal do transformador, todos os enrolamentos do circuito primário conduzem a mesma corrente, comportando-se como um único enrolamento. Quando é realizada a comutação, como apresentado na Figura 4.7 (b), duas chaves são sobrepostas e o enrolamento de *tap* envolvido no processo de comutação encontra-se curto-circuitado, comportando-se como um circuito terciário. Isso ocorre porque o enrolamento de *tap* curto-circuitado continua magneticamente acoplado com relação aos demais circuitos do primário, portanto, terá tensão induzida em seus terminais. A corrente através da chave S_1 (i_i) será a mesma que circula pelo enrolamento de *tap* curto-circuitado. Porém, a corrente através da chave S_2 (i_{cc}) será a soma da corrente primária, i_p , com a corrente i_i .

Após o processo de comutação ser realizado, a chave S_1 é bloqueada e a chave S_2 mantém-se em operação até que uma nova comutação seja realizada, como mostrado na Figura 4.7 (c). A Figura 4.8 apresenta o circuito equivalente para a obtenção da corrente através das chaves S_1 e S_2 durante o processo de comutação, o mesmo é baseado no modelo T equivalente linear de três enrolamentos apresentado em (CHIPING, KUTKUT *et al.*, 1995). Este circuito além de apresentar os circuitos primário e secundário, característicos do circuito T equivalente, apresenta também um ramo das impedâncias do circuito terciário em paralelo com o secundário.

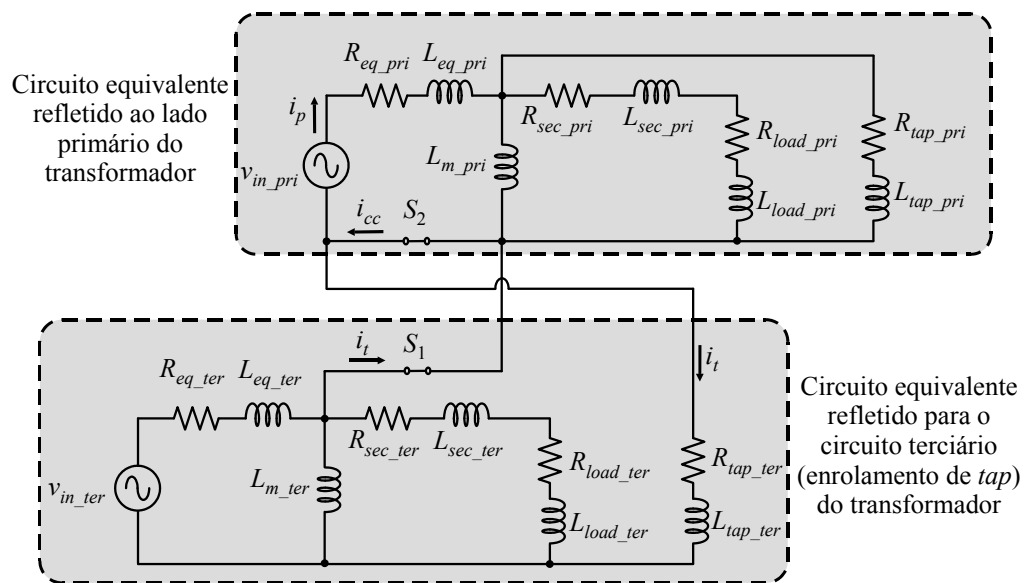


Figura 4.8 – Circuito equivalente para obtenção da corrente nas chaves no processo de comutação.

Como apresentado na Figura 4.8, a corrente primária (i_p) é obtida refletindo as impedâncias de carga, de magnetização e do enrolamento secundário diretamente ao primário do transformador e a impedância do enrolamento de *tap*, que é curto-circuitado na comutação, é considerada como uma impedância terciária, sendo também refletida ao lado primário. A corrente através da chave S_1 (i_t) é obtida refletindo-se as impedâncias e tensão do enrolamento primário para o lado do enrolamento terciário (ou enrolamento de *tap* nesse caso) e também refletindo-se as impedâncias do circuito secundário e de carga para o lado do enrolamento terciário em questão. A corrente através da chave S_2 (i_{cc}) é obtida a partir da soma de i_p e i_t .

4.3.3.2 Obtenção dos parâmetros refletidos ao primário

As variáveis referentes ao modelo refletido ao primário do transformador apresentado na Figura 4.8 são definidas como:

v_{in_pri} – Tensão do lado primário do transformador;

R_{eq_pri} e L_{eq_pri} – soma das resistências e indutâncias de todos os enrolamentos, principais e de *tap*, pertencentes ao primário do transformador, exceto as do enrolamento de *tap* curto-circuitado no processo de comutação;

R_{sec_pri} e L_{sec_pri} – resistência e indutância do lado secundário do transformador (R_{sec_2} e L_{sec_2}) refletidas ao lado primário;

R_{load_pri} e L_{load_pri} – resistência e indutância de carga conectadas ao secundário do transformador (R_{load} e L_{load}) e refletidas ao lado primário;

R_{tap_pri} e L_{tap_pri} – resistência e indutância do enrolamento terciário (enrolamento de *tap*) refletidas ao lado primário do transformador;

L_{m_pri} – indutância de magnetização do transformador pertencente ao lado secundário (L_{m_2}) e refletida ao primário.

As variáveis refletidas ao lado primário do transformador são apresentadas nas equações (4.7) a (4.18) e são sumarizadas na Tabela 4.1. As variáveis do circuito primário, desconsiderando os valores do enrolamento de *tap* curto-circuitado são dadas pelas equações (4.7) a (4.9).

$$v_{in_pri} = V_{in} \cdot \text{sen}(2\pi 60 \cdot t) \quad (4.7)$$

$$R_{eq_pri} = M \cdot R_{principal} + (K - 1) \cdot R_{tap} \quad (4.8)$$

$$L_{eq_pri} = M \cdot L_{principal} + (K - 1) \cdot L_{tap} \quad (4.9)$$

As impedâncias dos lados secundário e terciário do transformador refletidas ao lado primário são obtidas a partir de dois fatores de reflexão, sendo α_1 o coeficiente de reflexão do secundário para o primário e α_2 o coeficiente de reflexão do terciário para o primário.

$$\alpha_1 = \left(\frac{M \cdot N_m + (K - 1) \cdot N_t}{N_s} \right)^2 \quad (4.10)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{M \cdot N_m + (K - 1) \cdot N_t}{N_t} \right)^2 \quad (4.11)$$

As impedâncias do secundário do transformador refletidas ao primário são dadas por:

$$R_{sec_pri} = R_{sec_2} \cdot \alpha_1 \quad (4.12)$$

$$L_{sec_pri} = L_{sec_2} \cdot \alpha_1 \quad (4.13)$$

$$L_{m_pri} = L_{m_2} \cdot \alpha_1 \quad (4.14)$$

As impedâncias de carga refletidas ao primário do transformador são dadas pelas equações (4.15) e (4.16):

$$R_{load_pri} = R_{load} \cdot \alpha_1 \quad (4.15)$$

$$L_{load_pri} = L_{load} \cdot \alpha_1 \quad (4.16)$$

As impedâncias do circuito terciário refletidas ao primário do transformador são dadas pelas equações (4.17) e (4.18):

$$R_{tap_pri} = R_{tap} \cdot \alpha_2 \quad (4.17)$$

$$L_{tap_pri} = L_{tap} \cdot \alpha_2 \quad (4.18)$$

Tabela 4.1 – Variáveis refletidas ao lado primário do transformador.

| Parâmetro | Valor | Parâmetro | Valor |
|------------------|---|------------------|------------------|
| v_{in_pri} | $7967 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen}(2\pi 60 \cdot t) \text{ V}$ | L_{sec_pri} | 183,1 mH |
| R_{eq_pri} | 133,52 Ω | L_{m_pri} | 789,35 H |
| L_{eq_pri} | 191,47 mH | R_{load_pri} | --- |
| α_1 | 1200 | L_{load_pri} | --- |
| α_2 | 483,62 | R_{tap_pri} | 2,936 k Ω |
| R_{sec_pri} | 127,7 Ω | L_{tap_pri} | 4,21 H |

4.3.3.3 Obtenção dos parâmetros refletidos ao terciário

As variáveis referentes ao modelo refletido ao terciário do transformador são definidas como:

v_{in_ter} – Tensão do lado primário do transformador, refletida ao terciário.

R_{eq_ter} e L_{eq_ter} – soma das resistências e indutâncias de todos os enrolamentos, principais e de *tap* pertencentes ao primário do transformador, exceto o enrolamento de *tap* curto-circuitado no processo de comutação, refletidas ao lado terciário do transformador;

R_{sec_ter} e L_{sec_ter} – resistência e indutância do lado secundário do transformador (R_{sec_2} e L_{sec_2}) refletidas ao lado terciário;

R_{load_ter} e L_{load_ter} – resistência e indutância de carga conectadas ao secundário do transformador (R_{load} e L_{load}) e refletidas ao lado terciário;

L_{m_ter} – indutância de magnetização do transformador pertencente ao lado secundário (L_{m_2}) e refletida ao terciário;

R_{tap_ter} e L_{tap_ter} – resistência e indutância do circuito terciário (enrolamento de *tap*);

As impedâncias dos lados primário e secundário do transformador refletidas ao lado terciário são obtidas a partir de dois fatores de reflexão, sendo α_3 o coeficiente de reflexão do primário para o terciário e α_4 o coeficiente de reflexão do secundário para o terciário, os quais são dados pelas equações (4.19) e (4.20). As variáveis refletidas ao lado terciário do transformador são apresentadas nas equações (4.21) a (4.30) e são sumarizadas na Tabela 4.2.

$$\alpha_3 = \left(\frac{N_t}{M \cdot N_m + (K - 1) \cdot N_t} \right)^2 \quad (4.19)$$

$$\alpha_4 = \left(\frac{N_t}{N_s} \right)^2 \quad (4.20)$$

As variáveis do circuito primário refletidas ao circuito terciário são dadas pelas equações (4.21) a (4.23):

$$v_{in_ter} = v_{in_pri} \cdot \sqrt{\alpha_3} \quad (4.21)$$

$$R_{eq_ter} = R_{eq_pri} \cdot \alpha_3 \quad (4.22)$$

$$L_{eq_ter} = L_{eq_pri} \cdot \alpha_3 \quad (4.23)$$

As impedâncias do secundário do transformador refletidas ao primário são dadas pelas equações (4.24) a (4.26):

$$R_{sec_ter} = R_{sec_2} \cdot \alpha_4 \quad (4.24)$$

$$L_{sec_ter} = L_{sec_2} \cdot \alpha_4 \quad (4.25)$$

$$L_{m_ter} = L_{m_2} \cdot \alpha_4 \quad (4.26)$$

As impedâncias de carga refletidas ao primário do transformador são dadas pelas equações (4.27) e (4.28):

$$R_{load_ter} = R_{load} \cdot \alpha_4 \quad (4.27)$$

$$L_{load_ter} = L_{load} \cdot \alpha_4 \quad (4.28)$$

As impedâncias do circuito terciário (impedância do enrolamento de *tap*) são dadas pelas equações (4.29) e (4.30):

$$R_{tap_ter} = R_{tap} \quad (4.29)$$

$$L_{tap_ter} = L_{tap} \quad (4.30)$$

Tabela 4.2 – Variáveis refletidas ao lado terciário do transformador.

| Parâmetro | Valor | Parâmetro | Valor |
|------------------|---|------------------|----------------------|
| v_{in_ter} | $362,29 \cdot \sqrt{2} \cdot \text{sen}(2\pi 60 \cdot t) \text{ V}$ | L_{sec_ter} | 378,67 μH |
| R_{eq_ter} | 276,1 m Ω | L_{m_ter} | 1,6446 H |
| L_{eq_ter} | 395,9 μH | R_{load_pri} | --- |
| α_3 | 0,002067 | L_{load_pri} | --- |
| α_4 | 2,4806 | R_{ter_pri} | 6,0714 Ω |
| R_{sec_ter} | 264,1 m Ω | L_{tap_pri} | 8,7 mH |

4.3.3.4 Resolução do circuito de avaliação da corrente de sobreposição

O circuito equivalente apresentado na Figura 4.8 pode ser resolvido para obter-se as correntes que circulam nas chaves S_1 e S_2 . Como se pode perceber nesta figura, ambos os circuitos refletidos, tanto para o lado primário quanto para o terciário, apresentam o mesmo

modelo elétrico, diferindo apenas com relação ao lado de reflexão das impedâncias e fontes de tensão equivalentes. Dessa maneira, pode-se encontrar um modelo genérico para os dois circuitos, onde é possível substituir as variáveis refletidas ao circuito primário para encontrar-se a corrente primária do transformador, i_p . E ainda, substituírem-se as variáveis refletidas ao terciário para encontrar-se a corrente que circula no enrolamento terciário, i_t .

A Figura 4.9 apresenta o circuito genérico para obtenção das correntes através das chaves S_1 e S_2 . É possível verificar que quando forem substituídas as variáveis refletidas ao lado primário do transformador (ou seja, aquelas com extensão “pri”, por exemplo, R_{eq_pri} e v_{in_pri}), pode-se resolver o circuito para encontrar a corrente i_{1_ref} , que nesse caso será a própria corrente do primário do transformador (i_p). Quando forem substituídas as variáveis referentes ao lado terciário do transformador (ou seja, aquelas com extensão “ter”, por exemplo, R_{eq_ter} e v_{in_ter}), pode-se resolver o circuito para encontrar a corrente i_{3_ref} , que nesse caso será a própria corrente da chave S_1 , ou seja, i_t .

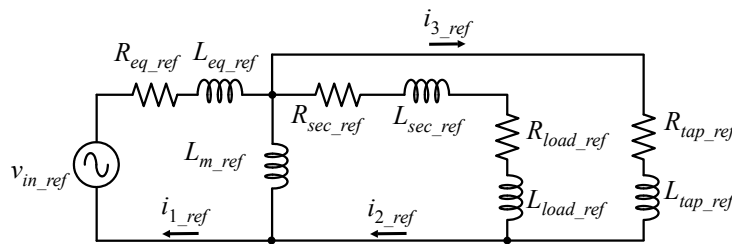


Figura 4.9 – Circuito equivalente genérico para obtenção das correntes nas chaves.

Adotando como variáveis para o circuito genérico:

v_{in_ref} – tensão de entrada do modelo genérico;

i_{1_ref} – corrente da malha 1 do modelo genérico;

i_{2_ref} – corrente da malha 2 do modelo genérico;

i_{3_ref} – corrente da malha 3 do modelo genérico;

R_{eq_ref} – resistência equivalente do circuito primário do modelo genérico;

L_{eq_ref} – indutância equivalente do circuito primário do modelo genérico;

L_{m_ref} – indutância de magnetização do modelo genérico;

R_{sec_ref} – resistência do circuito secundário do modelo genérico;

L_{sec_ref} – indutância do circuito secundário do modelo genérico;

R_{load_ref} – resistência de carga do modelo genérico;

L_{load_ref} – indutância de carga do modelo genérico;

R_{tap_ref} – resistência do enrolamento de tap do modelo genérico;

L_{tap_ref} – indutância do enrolamento de tap do modelo genérico;

Considerando as variáveis do circuito da Figura 4.9 no domínio de Laplace, aplicando a lei de Kirchhoff das tensões (LKT) e agrupando as equações em forma matricial, chega-se a matriz que descreve o comportamento das correntes do circuito apresentado, que é dada pela equação (4.31). Deve-se lembrar de que a corrente inicial do circuito é nula, isso se deve ao fato da comutação ocorrer sempre na passagem por zero da corrente primária. A resolução detalhada desta equação é apresentada no APÊNDICE B – deste trabalho.

$$\begin{bmatrix} V_{in_ref}(s) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{1_ref}(s) \\ I_{2_ref}(s) \\ I_{3_ref}(s) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Da equação (4.31) tem-se que:

$a, b, c, d, e, f, g, h, i$ – são coeficientes do sistema de equações do modelo genérico;

$I_{1_ref}(s)$ – é a corrente i_{1_ref} no domínio de Laplace;

$I_{2_ref}(s)$ – é a corrente i_{2_ref} no domínio de Laplace;

$I_{3_ref}(s)$ – é a corrente i_{3_ref} no domínio de Laplace;

$V_{in_ref}(s)$ – tensão de entrada do modelo genérico v_{in_ref} no domínio de Laplace.

s – é a variável complexa de Laplace;

Onde:

$$a = R_{eq_ref} + s \cdot (L_{eq_ref} + L_{m_ref}) \quad (4.32)$$

$$b = -s \cdot L_{m_ref} \quad (4.33)$$

$$c = 0 \quad (4.34)$$

$$d = -s \cdot L_{m_ref} \quad (4.35)$$

$$e = R_{sec_ref} + R_{load_ref} + s \cdot (L_{m_ref} + L_{sec_ref} + L_{load_ref}) \quad (4.36)$$

$$f = -(R_{sec_ref} + R_{load_ref} + s \cdot (L_{sec_ref} + L_{load_ref})) \quad (4.37)$$

$$g = 0 \quad (4.38)$$

$$h = -\left(R_{sec_ref} + R_{load_ref} + s \cdot (L_{sec_ref} + L_{load_ref})\right) \quad (4.39)$$

$$i = R_{sec_ref} + R_{load_ref} + R_{tap_ref} + s \cdot (L_{sec_ref} + L_{load_ref} + L_{tap_ref}) \quad (4.40)$$

Resolvendo o sistema de equações da equação (4.31) para a corrente $I_{1_ref}(s)$, chega-se a equação (4.41). Onde a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , b_2 e b_3 são os coeficientes de solução de $I_{1_ref}(s)$.

$$I_{1_ref}(s) = \frac{(a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0) \cdot V_{in_ref}(s)}{b_3 \cdot s^3 + b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0} \quad (4.41)$$

De onde se tem que:

$$a_0 = R_{tap_ref} \cdot (R_{load_ref} + R_{sec_ref}) \quad (4.42)$$

$$a_1 = \left[\begin{array}{l} L_{tap_ref} \cdot (R_{load_ref} + R_{sec_ref}) + R_{tap_ref} \cdot (L_{load_ref} + L_{sec_ref}) + \\ L_{m_ref} \cdot (R_{load_ref} + R_{sec_ref} + R_{tap_ref}) \end{array} \right] \quad (4.43)$$

$$a_2 = L_{m_ref} \cdot (L_{load_ref} + L_{sec_ref} + L_{tap_ref}) + L_{tap_ref} \cdot (L_{load_ref} + L_{sec_ref}) \quad (4.44)$$

$$b_0 = R_{eq_ref} \cdot R_{tap_ref} \cdot (R_{load_ref} + R_{sec_ref}) \quad (4.45)$$

$$b_1 = R_{eq_ref} \cdot \left[\begin{array}{l} L_{tap_ref} \cdot (R_{load_ref} + R_{sec_ref}) + R_{tap_ref} \cdot (L_{load_ref} + L_{sec_ref}) + \\ + L_{m_ref} \cdot (R_{load_ref} + R_{sec_ref} + R_{tap_ref}) \end{array} \right] + \\ + (L_{eq_ref} + L_{m_ref}) \cdot [R_{tap_ref} \cdot (R_{load_ref} + R_{sec_ref})] \quad (4.46)$$

$$b_2 = R_{eq_ref} \cdot [L_{m_ref} (L_{load_ref} + L_{sec_ref} + L_{tap_ref}) + L_{tap_ref} (L_{load_ref} + L_{sec_ref})] + \\ + L_{eq_ref} \cdot \left[\begin{array}{l} L_{tap_ref} (R_{load_ref} + R_{sec_ref}) + R_{tap_ref} (L_{load_ref} + L_{sec_ref}) + \\ + L_{m_ref} (R_{load_ref} + R_{sec_ref} + R_{tap_ref}) \end{array} \right] + \\ + L_{m_ref} [L_{tap_ref} (R_{load_ref} + R_{sec_ref}) + R_{tap_ref} (L_{load_ref} + L_{sec_ref})] \quad (4.47)$$

$$b_3 = L_{eq_ref} \cdot [L_{m_ref} (L_{load_ref} + L_{sec_ref} + L_{tap_ref})] + \\ + (L_{eq_ref} + L_{m_ref}) [L_{tap_ref} (L_{load_ref} + L_{sec_ref})] \quad (4.48)$$

Resolvendo o sistema de equações (4.31) para a corrente $I_{3_ref}(s)$, chega-se a equação (4.49).

$$I_{3_ref}(s) = \frac{(c_2 \cdot s^2 + c_1 \cdot s + c_0) \cdot V_{in_ref}(s)}{b_3 \cdot s^3 + b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0} \quad (4.49)$$

Onde o denominador da equação (4.49) é o mesmo que o da equação (4.41) e os coeficientes do numerador, c_0 , c_1 e c_2 , são dados a seguir.

$$c_0 = 0 \quad (4.50)$$

$$c_1 = L_{m_ref} \cdot (R_{load_ref} + R_{sec_ref}) \quad (4.51)$$

$$c_2 = L_{m_ref} \cdot (L_{load_ref} + L_{sec_ref}) \quad (4.52)$$

Substituindo-se os parâmetros refletidos ao primário do transformador na equação (4.41), ou seja, aqueles com a extensão “*ref*” pelos parâmetros com extensão “*pri*”, dados na Tabela 4.1, pode-se dizer que a corrente $I_{1_ref}(s)$ corresponde à corrente primária do transformador $I_p(s)$, sendo dada pela equação (4.53). Da mesma forma, substituindo os parâmetros refletidos ao terciário do transformador na equação (4.49), ou seja, aqueles com a extensão “*ref*”, pelos parâmetros com extensão “*ter*”, dados pela Tabela 4.2, pode-se dizer que a corrente $I_{3_ref}(s)$ corresponde à corrente do terciário do transformador que passa pela chave S_1 , ou seja, $I_t(s)$, sendo dada pela equação (4.54). A partir destas duas correntes, é possível descrever a corrente total $I_{cc}(s)$ que circula pela chave S_2 , que é dada pela equação (4.55).

$$I_p(s) = I_{1_ref}(s) \Big|_{ref=pri} \quad (4.53)$$

$$I_t(s) = I_{3_ref}(s) \Big|_{ref=ter} \quad (4.54)$$

$$I_{cc}(s) = I_p(s) + I_t(s) \quad (4.55)$$

Mantendo a referência de corrente iniciando em zero e variando a fase da tensão de entrada – com relação ao fator de potência (FP) da carga – que é aplicada às equações das correntes $I_p(s)$ e $I_t(s)$, é possível então resolver numericamente a equação (4.55) e descrever o comportamento da corrente de sobreposição das chaves para diferentes condições de FP. A Figura 4.10 apresenta o comportamento da corrente i_{cc} considerando um período de

sobreposição das chaves S_1 e S_2 equivalente a meio ciclo da rede para diversos casos de fator de potência indutivo da carga nominal conectada ao transformador. Cabe ressaltar que o modelo obtido foi validado considerando o modelo de transformador de múltiplos *taps* do software PSIM[®].

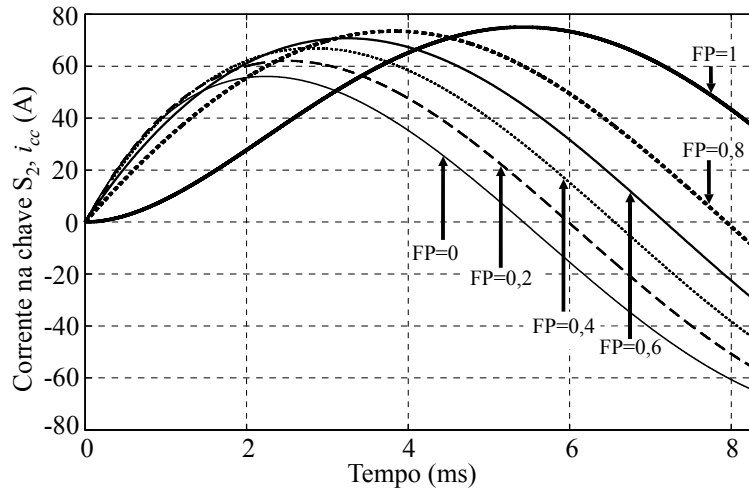


Figura 4.10 – Corrente i_{cc} em função do fator de potência da carga.

Conforme apresentado na Figura 4.10 é possível perceber que quanto mais indutiva a carga, mais rápido é o crescimento da corrente i_{cc} através da chave S_2 durante o processo de comutação. Nessa condição, o período de sobreposição das chaves deve ser menor, a fim de limitar a corrente que circula pelas chaves do comutador eletrônico de *taps*. Sabendo-se que a aplicação de comutadores eletrônicos de *taps* visa minimizar o tempo de sobreposição durante o processo de comutação, a partir de agora a análise se concentra no caso de corrente de curto-circuito que apresenta elevação da corrente de forma mais abrupta, ou seja, o caso de carga puramente indutiva. Desta forma, os demais casos são atendidos.

A Figura 4.11 apresenta o comportamento das correntes i_p , i_t e i_{cc} durante meio ciclo da rede elétrica, para a condição de carga puramente indutiva ($FP = 0$) conectada ao secundário do transformador. Como é possível verificar, o aumento da corrente no primário, i_p , mostrado na Figura 4.11 (a) tem um valor máximo não superior a três vezes o valor da máxima corrente nominal dada pela equação (4.6). Isso ocorre porque o enrolamento de *tap* tem relação de transformação significativamente menor que a relação total do enrolamento primário, por isso não influencia tão significativamente no aumento da corrente primária drenada da rede.

Por outro lado, a corrente que circula no enrolamento de *tap* e na chave S_1 (i_t), apresentada na Figura 4.11 (b), é maior que trinta vezes a máxima corrente nominal do transformador, podendo danificar o enrolamento em caso de um período de sobreposição

muito elevado, além de danificar as próprias chaves semicondutoras. Isso se deve ao fato de o enrolamento de *tap* apresentar uma pequena impedância durante o processo de comutação, o que resulta no aumento da corrente sobre este enrolamento.

Como esperado, a corrente que circula na chave S_2 (i_{cc}) apresentada na Figura 4.11 (c), é a soma das correntes i_p e i_t , resultando assim na corrente mais elevada a ser considerada no projeto das chaves para o caso do período de sobreposição do processo de comutação. A Figura 4.11 (d) apresenta a comparação entre as três correntes supracitadas.

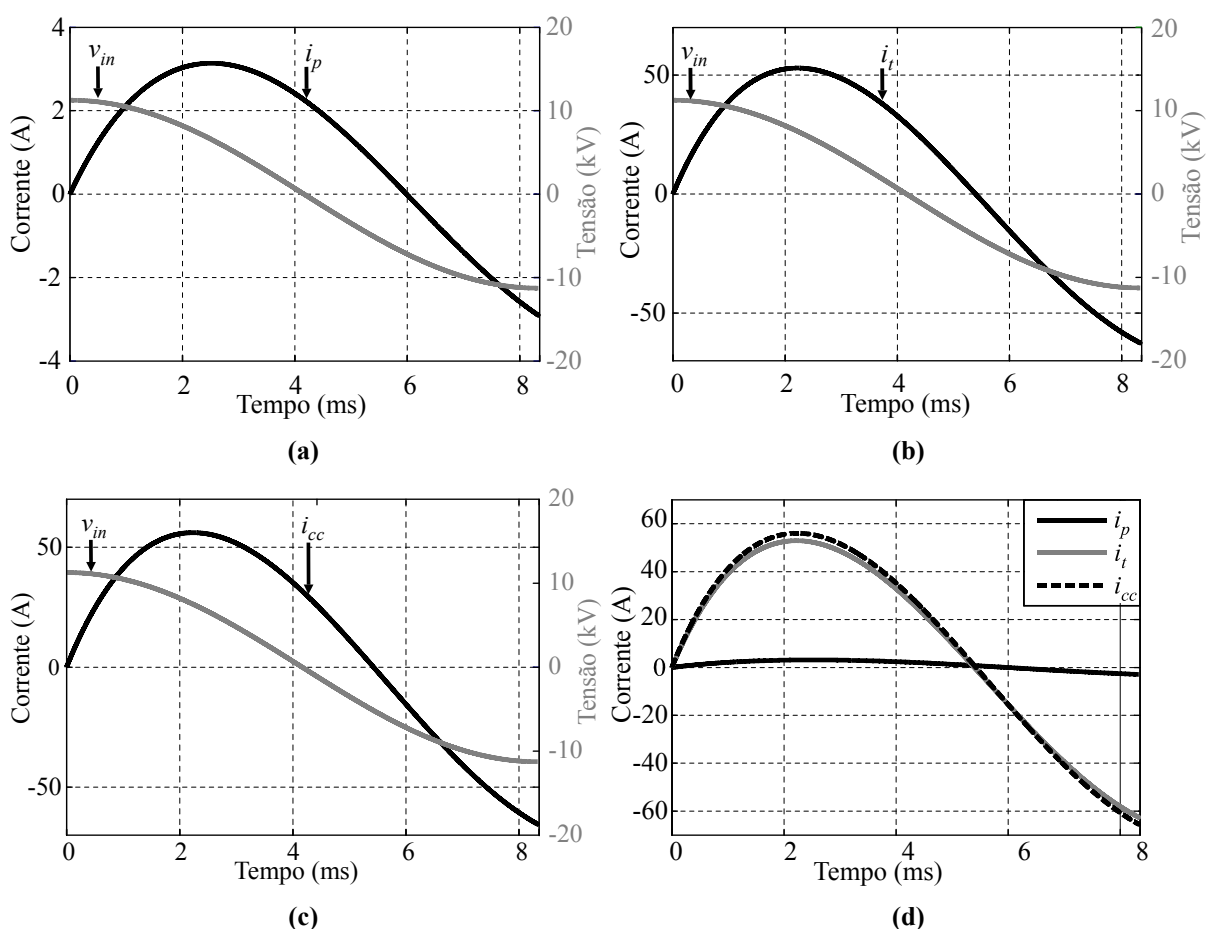


Figura 4.11 – Correntes para carga puramente indutiva, FP=0. (a) Corrente primária (i_p) e tensão primária (v_{in}). (b) Corrente na chave S_1 (i_t) e tensão v_{in} . (c) Corrente na chave S_2 (i_{cc}) e tensão v_{in} . (d) Correntes i_p , i_t e i_{cc} .

Com a avaliação do comportamento das correntes através das chaves é possível definir o máximo tempo de sobreposição a que as chaves semicondutoras podem estar sujeitas durante o processo de comutação, de forma a ter-se a comutação adequada sem danificá-las. A escolha das chaves semicondutoras é baseada também neste estudo e será apresentada posteriormente, levando em consideração o tempo de sobreposição das chaves no processo de comutação e o pior caso encontrado na análise, que se refere a uma carga puramente indutiva.

Como se pode verificar da Figura 4.11 (d) a componente de corrente mais significativa para a resposta da corrente i_{cc} é a corrente do terciário do transformador, ou seja, i_t . Além disso, é possível perceber que para um tempo inferior a 1 ms, a resposta da corrente i_{cc} pode ser aproximada para uma resposta linear sem grandes prejuízos à resposta analisada. Essa analogia se torna interessante no projeto de comutadores eletrônicos de *taps* justamente pelo fato das chaves eletrônicas permitirem comutações em períodos de tempo significativamente inferiores a 1 ms. Portanto, pode-se adotar uma abordagem simplificada no projeto das chaves semicondutoras sem ter de considerar o circuito equivalente completo do processo de comutação apresentado na Figura 4.8. Isso é reforçado pela relativa complexidade para a obtenção de uma equação no domínio do tempo que descreve o comportamento das correntes envolvidas no processo de comutação.

Baseado nisso, foram feitas simplificações na análise da resposta de corrente do transformador de modo a tornar o cálculo mais prático. A análise foi feita a partir das seguintes considerações:

- tomou-se o enrolamento disposto entre os terminais N_{11} e N_9 , durante o processo de comutação da chave S_1 para S_2 , para o cálculo da corrente;
- como análise conservativa, assume-se que a tensão no enrolamento de *tap* no momento da comutação encontra-se no valor de pico, ou seja, a defasagem entre tensão e corrente no lado de alta tensão do transformador é 90° (carga puramente indutiva);
- a corrente analisada contempla apenas a tensão e indutância do enrolamento de *tap* do transformador em um determinado período de tempo de sobreposição $\Delta t_{overlap}$.

Com essas definições, a corrente de sobreposição resultante a ser utilizada para o projeto das chaves, I_{cc_pk} , pode ser obtida a partir da equação (4.56), que considera a tensão, a indutância e o tempo de sobreposição desejado para o enrolamento de *tap* do transformador. A Figura 4.12 exemplifica a obtenção da corrente I_{cc_pk} a partir do tempo de sobreposição $\Delta t_{overlap}$.

$$I_{cc_pk} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{in-2}}{L_{tap}} \cdot \left(\frac{N_{tap}}{N_s} \right) \cdot \Delta t_{overlap} \quad (4.56)$$

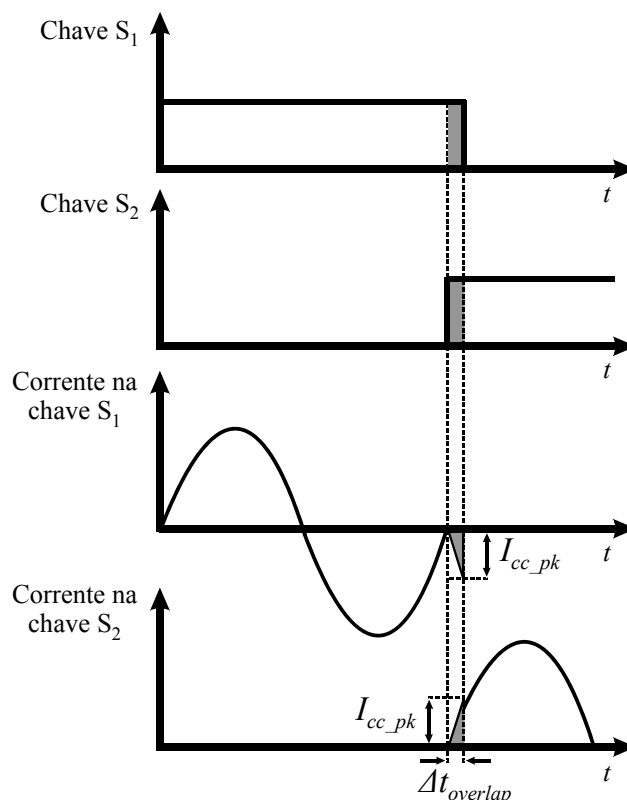


Figura 4.12 – Comportamento das correntes sobre as chaves durante a comutação.

Considerando um período de sobreposição das chaves S_1 e S_2 de $10 \mu\text{s}$ e utilizando os parâmetros do transformador encontrados na seção 3.4, tem-se que a corrente gerada no processo de comutação é dada por:

$$I_{cc_pk} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{8,7 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{1,575}{1} \right) \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0,5627 \text{ A} \quad (4.57)$$

Resolvendo numericamente a equação (4.55), obtém-se uma corrente i_{cc} para um tempo de sobreposição de $10 \mu\text{s}$ igual a $0,5863 \text{ A}$, o que gera um erro aproximado de $4,02\%$ entre o valor da corrente i_{cc} para o modelo completo do transformador e a corrente da análise simplificada I_{cc_pk} . A corrente terciária i_t , obtida a partir da equação (4.54) - que é correspondente à corrente encontrada I_{cc_pk} - para um tempo de $10 \mu\text{s}$ é dada por $0,5573 \text{ A}$, gerando um erro de $0,956\%$ entre o valor de i_t e I_{cc_pk} . Com isso, o projeto das chaves semicondutoras pode ser realizado através da equação (4.56) quando se utiliza um período de sobreposição das chaves semicondutoras pequeno, gerando uma resposta da corrente sobre as chaves semicondutoras que se aproxima da análise apresentada para o circuito da Figura 4.8.

4.4 Definição das chaves semicondutoras

A escolha das chaves semicondutoras utilizadas no comutador eletrônico de *taps* é baseada na análise da tensão e corrente sobre estas. Como explicitado na seção 4.1, o IGBT é a tecnologia de dispositivo semicondutor utilizado no comutador de *taps* projetado, portanto, modelos deste tipo de dispositivo foram avaliados para as condições de tensão e corrente sobre as chaves semicondutoras.

4.4.1 Projeto baseado na tensão sobre as chaves semicondutoras

Durante a operação normal do comutador eletrônico de *taps*, a máxima tensão de pico que aparece sobre as chaves é de 2373 V e aparece sobre a chave S_1 quando os terminais N_3 e N_{13} estão conectados, ou seja, quando a chave S_5 está fechada, como mostrado na seção 4.3.1. A Tabela 4.3 apresenta modelos de IGBTs compatíveis com a classe de tensão necessária para aplicação no projeto das chaves semicondutoras. Devido à disponibilidade para importação em tempo hábil e suas características, a chave semicondutora modelo IXGH10N300 é a que mais se adequa à aplicação. Sendo este o dispositivo escolhido e empregado no comutador eletrônico de *taps*.

Tabela 4.3 – Características das chaves semicondutoras selecionadas (IXYS, 2007; 2009)

| Chave | Encapsulamento | Nível de corrente | Nível de tensão | Custo por unidade* |
|------------|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| IXGH25N250 | TO-247 | 25 A (110°C) | 2,5 kV | US\$ 52,00 |
| IXGH10N300 | TO-247 | 10 A (90°C) | 3 kV | US\$ 27,00 |

*Preços referentes a março de 2012.

4.4.2 Projeto baseado na capacidade de condução de corrente das chaves

Baseado nos estudos apresentados nas seções 4.3.2 e 4.3.3, é possível definir a chave semicondutora a ser utilizada com relação à capacidade de condução de corrente. Conforme apresentado na seção 4.3.2, a corrente nominal máxima no circuito primário do transformador é de 1,075 A, como apresentado na equação (4.6), o que torna a chave de modelo IXGH10N300 adequada para esta condição de operação.

Como apresentado na seção 4.3.3, a corrente que circula pelas chaves durante o processo de comutação depende fortemente do tempo de sobreposição de acionamento

destas. A aplicação da chave semicondutora IXGH10N300, cuja capacidade de condução de corrente é de 10 A (para a temperatura de 90°C), resulta no máximo tempo de sobreposição aceitável entre duas chaves de 181 μ s, como mostrado na Figura 4.13 para o caso de carga indutiva conectada ao transformador. Entretanto, como a chave semicondutora apresenta tempo de atraso de acionamento de 72 ns e tempo de subida de 227 ns (IXYS, 2009), é possível realizar a comutação em um período de tempo significativamente menor que o período máximo de sobreposição aceitável, sendo seguro operar as chaves semicondutoras considerando um período de sobreposição de 10 μ s. O período de sobreposição definido leva em consideração os atrasos dos sistemas de controle, comunicação e acionamento e resulta em uma corrente de sobreposição de 0,58 A, garantindo a adequada operação da chave semicondutora definida.

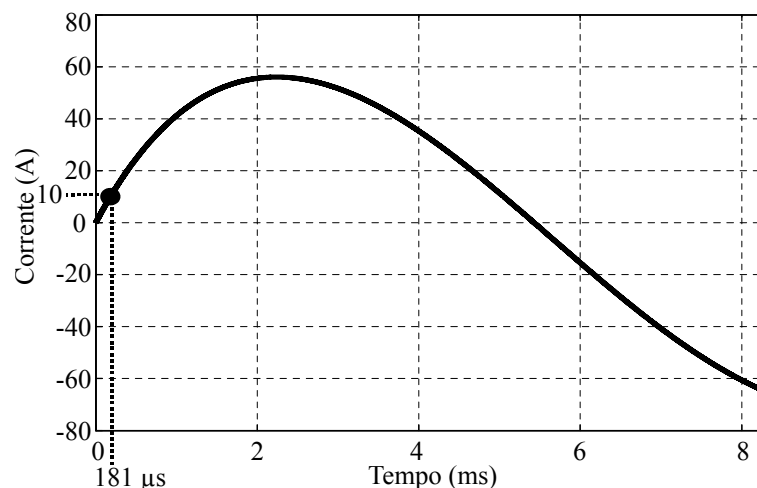


Figura 4.13 – Corrente i_{cc} para a condição de carga indutiva.

4.4.3 Diodos em paralelo com as chaves

Devido a questões relacionadas à importação dos dispositivos semicondutores, não foi possível obter-se, em tempo hábil, dispositivos IGBT que incorporam diodos em antiparalelo com as chaves semicondutoras em um mesmo encapsulamento para o nível de tensão requerido. A falta do diodo em antiparalelo, como é o caso chave semicondutora IXGH10N300, impede a criação de uma chave bidirecional, portanto, faz-se necessária a inclusão externa de um diodo com tensão igual ou superior a do IGBT para viabilizar isso.

De forma a permitir a bidirecionalidade da chave semicondutora utilizada, optou-se pelo emprego de um conjunto de diodos em série, como mostrado na Figura 4.14 (a), de modo a garantir a mesma capacidade de bloqueio de tensão reversa sobre os IGBTs.

Entretanto, a não idealidade dos diodos implica diferentes características de recuperação reversa e possíveis desequilíbrios de tensão sobre os mesmos, como mostrado na Figura 4.14 (b). Essa característica pode resultar em sobretensão e queima de um ou mais diodos do conjunto. Isso requer a utilização de dispositivos que equilibrem as tensões sobre os diodos, sendo usualmente empregados resistores, como mostrado na Figura 4.14 (c), o que altera as correntes de recuperação reversa dos diodos e permite que a tensão se distribua de forma igualitária, como mostrado na Figura 4.14 (d).

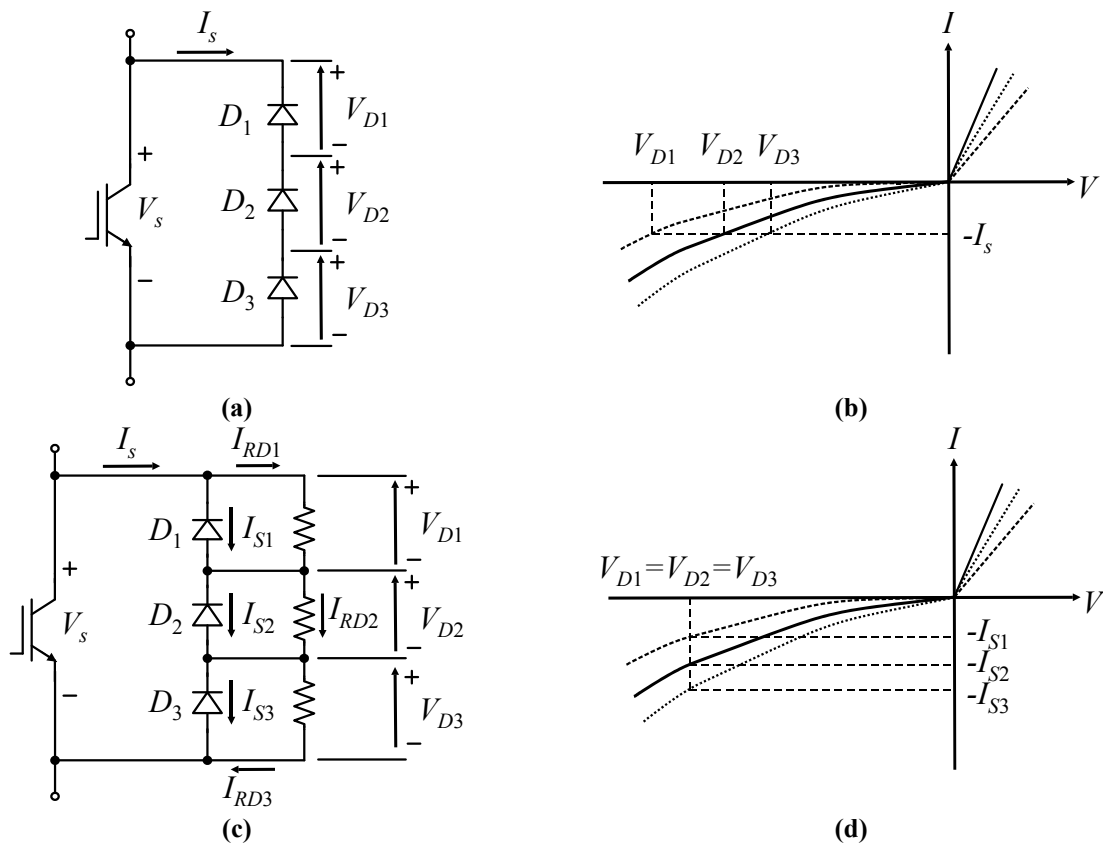


Figura 4.14 – Tensão sobre os diodos. (a) Circuito com três diodos em série. (b) Curva $V \times I$ dos diodos. (c) Circuito de equilíbrio de tensão. (d) Curva $V \times I$ dos diodos.

Para a chave semicondutora em questão, foi utilizado um arranjo com três diodos em série do tipo RHRP8120 (FAIRCHILD, 2002), cujo modelo apresenta como características: corrente nominal de 8 A, tensão de pico reversa de operação de 1200 V, operação ultrarrápida com tempo de recuperação reversa de 70 ns. A fim de garantir a distribuição equivalente de tensão entre os diodos foram utilizados resistores de 400 k Ω em paralelo com cada diodo, os quais foram dispostos de forma a suportar a tensão de bloqueio de cada diodo ao qual estão em paralelo.

4.5 Sistema de acionamento das chaves (*gate-driver*)

O acionamento de chaves semicondutoras controladas (ou semicontroladas, como no caso de tiristores) requer um circuito dedicado para seu acionamento e bloqueio, denominado circuito de acionamento ou *gate-driver*. Este circuito é responsável por fazer a interface entre o controle e o elemento semiconductor de potência controlado, adequando os níveis de tensão do sinal de controle aos da chave semicondutora a ser controlada, além de também ser responsável por garantir os níveis de isolamento necessários entre ambos.

A topologia do circuito *gate-driver* desenvolvida para o acionamento das chaves semicondutoras é apresentada na Figura 4.15. Verifica-se que na topologia empregada, tanto o sistema de controle quanto o circuito de acionamento das chaves são alimentados pelo secundário do TP, isso garante a alimentação de todo o comutador eletrônico de *taps* sempre que houver tensão no alimentador primário do transformador, independentemente da disponibilidade de tensão no circuito secundário. Porém, como o circuito de acionamento das chaves semicondutoras precisa operar no mesmo nível de tensão destas, faz-se necessário que tanto o sinal de controle das chaves semicondutoras quanto à alimentação deste circuito sejam isolados do circuito de controle. Por esta razão, utiliza-se uma fonte isolada com classe de isolamento de 15 kV, desenvolvida para esta aplicação, garantindo assim a isolamento galvânica entre o TP e o circuito de acionamento.

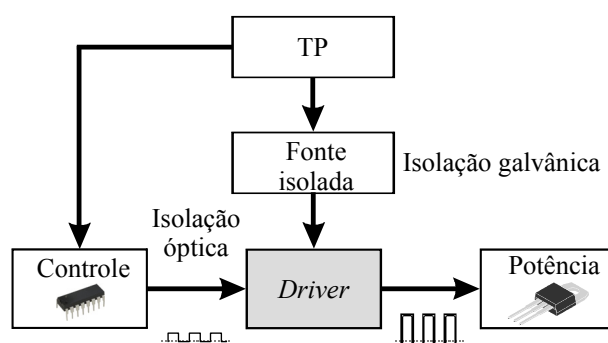


Figura 4.15 – Diagrama do circuito de acionamento das chaves semicondutoras.

A isolamento do sinal de comando vinda do sistema de controle para o circuito de acionamento é realizada através de canais de fibra óptica, garantindo assim elevada classe de isolamento elétrica, característica primordial no presente caso, além de baixa susceptibilidade a ruídos eletromagnéticos. Outra característica importante da utilização de canais ópticos é o fato de atuarem como barreira de bloqueio da propagação de danos oriundos de um curto-

circuito ou sobretensão nas chaves semicondutoras de potência, evitando assim a possível danificação do sistema de controle.

Para a alimentação dos circuitos de *gate-driver* foi desenvolvida uma fonte isolada com classe de 15 kV, sendo apresentada na Figura 4.16. A tensão do secundário do TP é retificada, alimentando um circuito inversor *full-bridge* que aciona o primário dos transformadores de isolamento, os quais garantem a classe de isolamento requerida, tornando o transformador no principal componente da fonte chaveada. Nesse sentido, o transformador empregado possui núcleo de ferrite, com enrolamentos primário e secundário dispostos em lados opostos no núcleo magnético e não sobrepondo os enrolamentos (garantindo o afastamento necessário). Além disso, é empregado material isolante entre os enrolamentos e o núcleo e o conjunto é selado com resina epóxi.

Cada transformador possui em seu secundário uma placa de interface com o circuito de *gate-driver*. Essa placa contempla: retificador passivo, filtros, regulação da alimentação e um indicador luminoso que é ativado quando o enrolamento de *tap* correspondente entra em operação. O conjunto transformador e circuito de acionamento são apresentados na Figura D.4 do APÊNDICE D –.

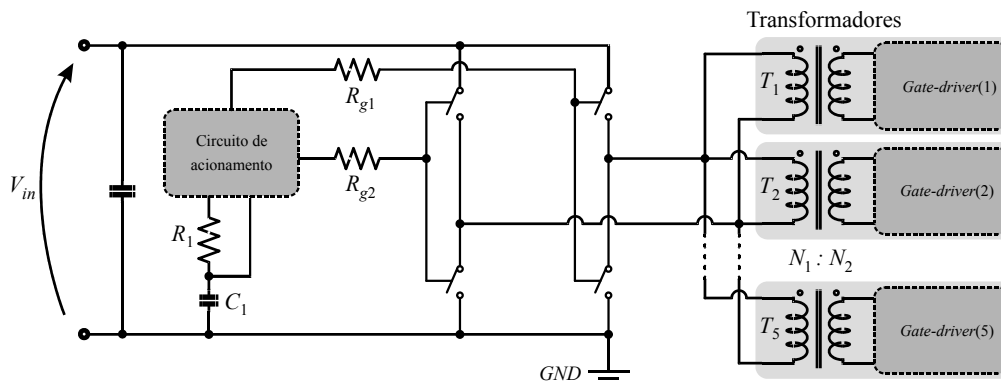


Figura 4.16 – Esquemático da fonte auxiliar isolada.

4.6 Sistema de controle

O sistema de controle é operado por um DSP e baseia-se em um controlador por histerese. Nesse caso, são estabelecidos um limite inferior (V_{x_min}) e um limite superior (V_{x_max}) para o nível de tensão eficaz medido no secundário do transformador (V_x). Quando esses limites são ultrapassados, as chaves semicondutoras são autorizadas a comutar de modo a acrescentar ou retirar enrolamentos de *tap* do enrolamento primário e assim, restabelecer o nível de tensão dentro da faixa “adequada” definida pelo PRODIST (ANEEL,

2012b). Salienta-se que as comutações são realizadas apenas no cruzamento por zero da corrente do lado de alta tensão do transformador – que coincide com a corrente pelas chaves semicondutoras do comutador eletrônico de *taps*. É de se destacar que as comutações podem ocorrer a cada semiciclo da rede elétrica, sendo que este período é requerido tanto para o cálculo da tensão eficaz, quanto para permitir a comutação sempre na passagem por zero da corrente primária.

A técnica de regulação de tensão por comparador de histerese é interessante em sistemas que apresentem variações de carga não-cíclicas, permitindo assim a regulação da tensão de maneira adequada. Entretanto, em sistemas sujeitos a oscilações do nível eficaz da tensão, este tipo de controlador pode excitar sub-harmônicos na rede de distribuição na tentativa de correção deste. Essa característica do sistema proposto não foi avaliada neste trabalho, caracterizando assim como um estudo futuro, de modo a definir técnicas de correção da tensão eficaz secundária que rejeitem estes tipos de oscilações.

4.6.1 Regulação de tensão por compensação de queda de tensão

Uma técnica amplamente empregada na regulação de tensão é a compensação por queda de tensão na linha ou *Line-Drop Compensation* (LDC) (SPATTI, 2007). Esta técnica tem por objetivo manter a tensão constante, não no secundário do transformador, mas no consumidor (CHOI, 2001). Nos sistemas que empregam o LDC a regulação da tensão geralmente é feita para o centro de carga (SPATTI, 2007). Entretanto, esta técnica permite a regulação em qualquer ponto da rede, seja no início da rede secundária, no meio ou no final da mesma, dependendo do ponto mais crítico quanto às subtensões ou sobretensões (KADUREK, COBBEN *et al.*, 2011).

O LCD é comumente utilizado com OLTC operando de modo a controlar a tensão em um local remoto sem a utilização de um canal de comunicação. Nesta técnica, a tensão e a corrente do lado secundário do transformador são monitoradas e usadas para simular a queda de tensão ao longo da impedância do alimentador, que deve ser conhecida. Essa queda de tensão é usada como parâmetro para definir a elevação ou redução da tensão secundária através da comutação de *taps* no transformador (GAO e REDFERN, 2011). Cabe destacar que as comutações apresentam uma determinada temporização, de modo que o ajuste de *taps* esteja compatibilizado com os demais controles de tensão aplicados na rede.

Verifica-se que a aplicação do LCD na regulação de tensão por comutadores eletrônicos de *taps* demonstra-se interessante, especialmente para a topologia apresentada neste trabalho, que apresenta a medição dos níveis de tensão secundária e corrente primária do transformador. Assim, a partir destes dados e dos parâmetros da rede de distribuição onde o sistema está instalado seria possível realizar a regulação da tensão de atendimento do consumidor. Essa estratégia adequa-se melhor ao que estabelece o PRODIST, que define os níveis de tensão de atendimento ao cliente que devem ser respeitados (ANEEL, 2012b).

Cabe destacar que a aplicação do LCD no comutador eletrônico de *taps* proposto não foi realizada neste trabalho, entretanto, sua implementação é possível uma vez que os parâmetros da rede de distribuição sejam conhecidos.

4.6.2 Método de sincronização da passagem por zero da corrente

Como explicado anteriormente, o processo de comutação das chaves *taps* é realizado sempre na passagem por zero da corrente primária do transformador, sendo obtido a partir da aplicação de uma técnica de sincronização que permite identificar o instante de passagem por zero, neste caso é utilizado o filtro de Kalman. Esta técnica de sincronismo foi proposta em (KALMAN, 1960) e consiste de um filtro recursivo utilizado na estimação de estados de um sistema dinâmico a partir de variáveis medidas, sendo amplamente empregado no campo de comunicações e de controle.

A técnica de sincronismo apresentada em (CARDOSO, DE CAMARGO *et al.*, 2006) emprega o filtro de Kalman para realizar o sincronismo com a rede elétrica, permitindo assim a identificação da componente fundamental da corrente medida e a realização do processo de comutação sob as condições desejadas.

4.6.3 Rotina de controle do comutador eletrônico de *taps*

A Figura 4.17 apresenta o fluxograma que descreve o funcionamento do comutador eletrônico de *taps*. A operação do sistema de controle é baseada em uma rotina principal de laço infinito que controla a comutação dos *taps* e a atuação da proteção do sistema; e uma rotina de interrupção temporal periódica que realiza a aquisição de variáveis medidas, calcula os valores eficazes e identifica a passagem por zero da corrente.

Para contextualização, cabe destacar que o sistema de proteção do comutador eletrônico de *taps* possui um relé de proteção com contatos normalmente fechados (NF) em paralelo com a chave S_1 , o projeto e a descrição da operação deste dispositivo é apresentado na seção A.1.

A rotina de interrupção opera em uma frequência de 10 kHz e realiza as seguintes funções a cada iteração:

- Executa a conversão dos sinais analógicos para digitais (conversão A/D) da corrente primária, tensão primária e tensão secundária do transformador;
- Realiza a sincronização e a identificação da passagem por zero da corrente através do filtro de Kalman. A comutação de *taps* é habilitada sempre na passagem por zero da corrente, podendo ser realizada na rotina principal caso a tensão secundária esteja fora dos limites estabelecidos;
- Calcula o valor eficaz da tensão secundária do transformador para a verificação da necessidade de comutação dos *taps* do transformador.

A rotina principal do programa realiza as seguintes funções:

- Inicializa o sistema de controle de forma automática sempre que o transformador é energizado;
- Mantém o relé de proteção desligado, ou seja, com seu contato NF fechado durante a energização do transformador, de modo a evitar que as chaves fiquem sujeitas à tensão primária total ou mesmo às correntes de *inrush* resultantes da partida do transformador;
- Após a estabilização da corrente, habilita o sistema de comutação de *taps*, colocando a chave S_1 em condução e posteriormente aciona o relé de proteção, que resulta na abertura do seu contato NF. A comutação é realizada na passagem por zero da corrente, a partir disso, as chaves semicondutoras assumem a corrente primária do transformador.
- A partir desse estágio a rotina entra em um *looping* infinito, que tem por função regular a tensão secundária e proteger as chaves semicondutoras em caso de elevação indesejável da corrente primária;
- Posteriormente à inicialização da operação do comutador eletrônico de *taps*, é verificado se a corrente do transformador está dentro da faixa de atuação do comutador, caso esteja, é verificado se o relé de proteção está acionado (ou seja,

com o contato NF em estado aberto), então segue para a verificação do nível da tensão eficaz secundária. Caso a corrente primária esteja além do valor nominal é desligado o relé de proteção, o que resulta no fechamento do contato NF, e chaves semicondutoras são então bloqueadas até que a corrente volte à faixa de operação do sistema ou até que ocorra a atuação da proteção do alimentador primário;

- Com o relé de proteção aberto, é verificado o nível de tensão eficaz do secundário, o qual foi previamente calculado na rotina de interrupção;
- Caso a tensão secundária esteja abaixo do limite inferior V_{x_min} , é esperada a habilitação da comutação, que ocorre na passagem por zero da corrente. A comutação só é habilitada caso a chave que está acionada seja anterior à chave S_5 , pois essa é a última chave que pode ser selecionada quando se deseja reduzir a relação de transformação do transformador. Dessa maneira, o comutador atua de forma a selecionar as chaves mais externas do comutador eletrônico de *taps* (partindo da chave S_1), ou seja, retirando enrolamentos de *tap* do enrolamento primário, o que diminui a relação de transformação do transformador e consequentemente aumenta a tensão secundária;
- Caso a tensão secundária esteja acima do limite superior V_{x_max} , é esperada a habilitação da comutação, que ocorre na passagem por zero da corrente. A comutação só é habilitada caso a chave que está em condução seja posterior a S_1 , pois esta é a chave que fica no centro do transformador. Dessa maneira, o comutador atua de forma a selecionar as chaves mais internas do comutador eletrônico de *taps*, acrescentando enrolamentos de *tap* ao enrolamento primário, o que aumenta a relação de transformação do transformador e consequentemente diminui a tensão secundária;
- O processo de comutação ocorre sobrepondo-se a chave que se encontra em condução com a chave adjacente que deve ser comutada. Posteriormente, a chave que se encontrava em condução é bloqueada e a chave selecionada para entrar em operação é mantida em condução;
- A partir disso, o processo de verificação do nível de corrente é novamente realizado e a rotina do *looping* se repete ininterruptamente.

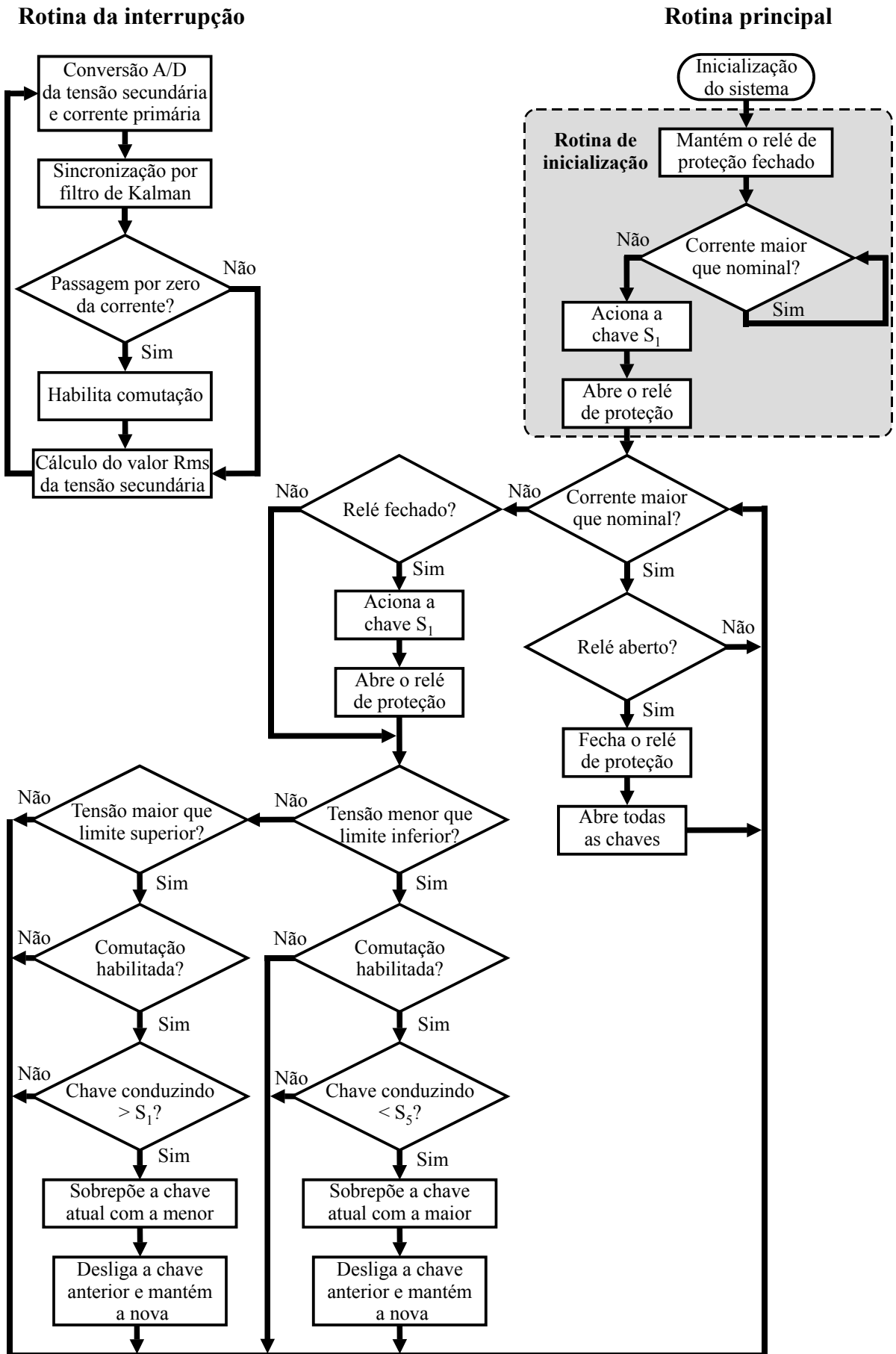


Figura 4.17 – Fluxograma de controle do comutador eletrônico de taps.

4.7 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a topologia do comutador eletrônico de *taps* desenvolvido, bem como a análise do seu funcionamento. A topologia proposta emprega um TP e um TC no circuito primário, os quais permitem a medição da tensão primária e alimentação dos circuitos de acionamento e controle – no caso do TP – e a medição da corrente primária e sincronização das comutações pela passagem por zero da corrente pelas chaves semicondutoras – no caso do TC. Também é empregado um sistema de medição isolado da tensão secundária que permite a regulação da tensão no PAC.

Foram apresentados os estudos do comportamento das correntes e tensões sobre as chaves semicondutoras durante o processo de comutação dos enrolamentos de *taps*, os quais permitem o projeto das chaves semicondutoras e do sistema de proteção (como será mostrado no APÊNDICE A –). Também é apresentado o sistema de acionamento das chaves semicondutoras, o qual trata-se de uma topologia que emprega isolamento galvânica e óptica, assegurando elevada isolamento elétrica entre o circuito de controle e acionamento das chaves.

O sistema de controle é apresentado, o qual se baseia em um controlador de histerese para a tensão secundária, associado a um sistema de sincronismo por filtro de Kalman, que permite a regulação da tensão com comutações ocorrendo apenas na passagem por zero da corrente. É importante frisar que em sistemas de distribuição que apresentem oscilações no valor eficaz da tensão secundária no PAC, a utilização do controlador por histerese pode excitar sub-harmônicos na rede, de forma que técnicas que permitam a mitigação destes problemas precisam ser avaliadas para estes casos.

Por fim, cabe ressaltar que o sistema de acionamento das chaves desenvolvido necessita passar por ensaios de norma dos transformadores de distribuição, a fim de validar sua aplicação em sistemas de distribuição reais. Ainda, é de se destacar que apesar do comutador eletrônico de *taps* ter sido empregado em um transformador com padrão MRT, a expansão do conceito para transformadores de distribuição trifásicos também é possível.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da simulação e implementação prática do comutador eletrônico de *taps*. Inicialmente são apresentados resultados de simulação a respeito da regulação de tensão do comutador eletrônico de *taps*. Posteriormente, são apresentados os resultados práticos da implementação do sistema, demonstrando o comportamento da comutação na passagem por zero da corrente, a regulação da tensão e o comportamento da tensão sobre as chaves semicondutoras para diferentes condições de cargas.

5.1 Simulação do comutador eletrônico de *taps*

A simulação do comutador eletrônicos de *taps* foi realizada no *software* PSIM[®], considerando o modelo do transformador apresentado na seção 3.4. O circuito de simulação é apresentado na Figura 5.1, o qual considera resistência de rede R_R .

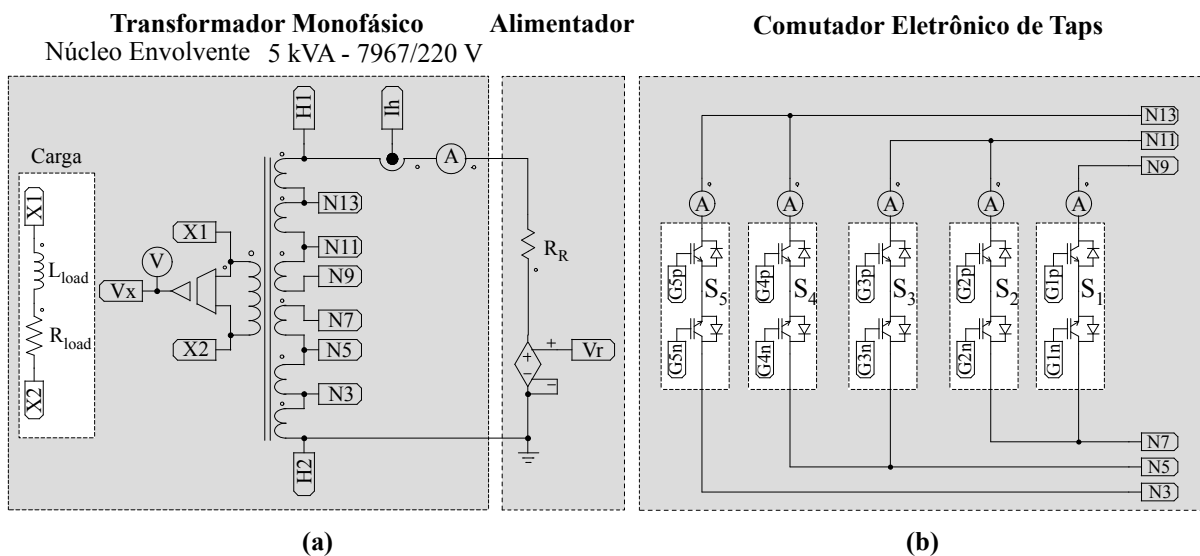


Figura 5.1 – Comutador eletrônico de *taps* empregado na simulação no *software* PSIM[®]. (a) Detalhes do transformador e do alimentador (rede elétrica de distribuição). (b) Comutador eletrônico de *taps* empregando IGBTs em conexão anti-série.

Conforme apresentado na Figura 5.1 (a), a tensão de entrada é emulada com variações dadas pela referência “ V_r ”, a variável “ V_x ” é usada para controle da tensão secundária e a variável “ I_h ” é usada para detectar o cruzamento por zero da corrente. Na Figura 5.1 (b) apresenta-se as chaves semicondutoras bidirecionais do comutador eletrônico de *taps*.

5.1.1 Conexão e desconexão da carga

Neste ensaio é apresentada a queda de tensão ocasionada pela impedância própria do transformador para a condição de máxima relação de transformação, ou seja, quando todos os enrolamentos de *tap* estão em operação. Inicialmente o transformador opera a vazio com tensão primária nominal, na sequência é conectada e retirada de operação a carga do secundário. Como se deseja apenas verificar a queda de tensão causada pela impedância do transformador sobre a tensão secundária, não são realizadas comutações. Na Tabela 5.1 são definidas as condições de simulação e na Figura 5.2 são apresentados os resultados obtidos. Salienta-se que o transformador encontra-se com os *taps* $N_7 - N_9$ conectados (IGBTs G_{1p} e G_{1n} acionados).

Tabela 5.1 – Condições da simulação de conexão e desconexão de carga.

| Especificação da carga | Instante do ensaio |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Tensão nominal: 7967 V (eficaz) | Conexão: $t = 83,33$ ms |
| Potência: $S = 5$ kVA (nominal) | Desconexão: $t = 916,67$ ms |
| Fator de potência: $FP = 0,92$ | |

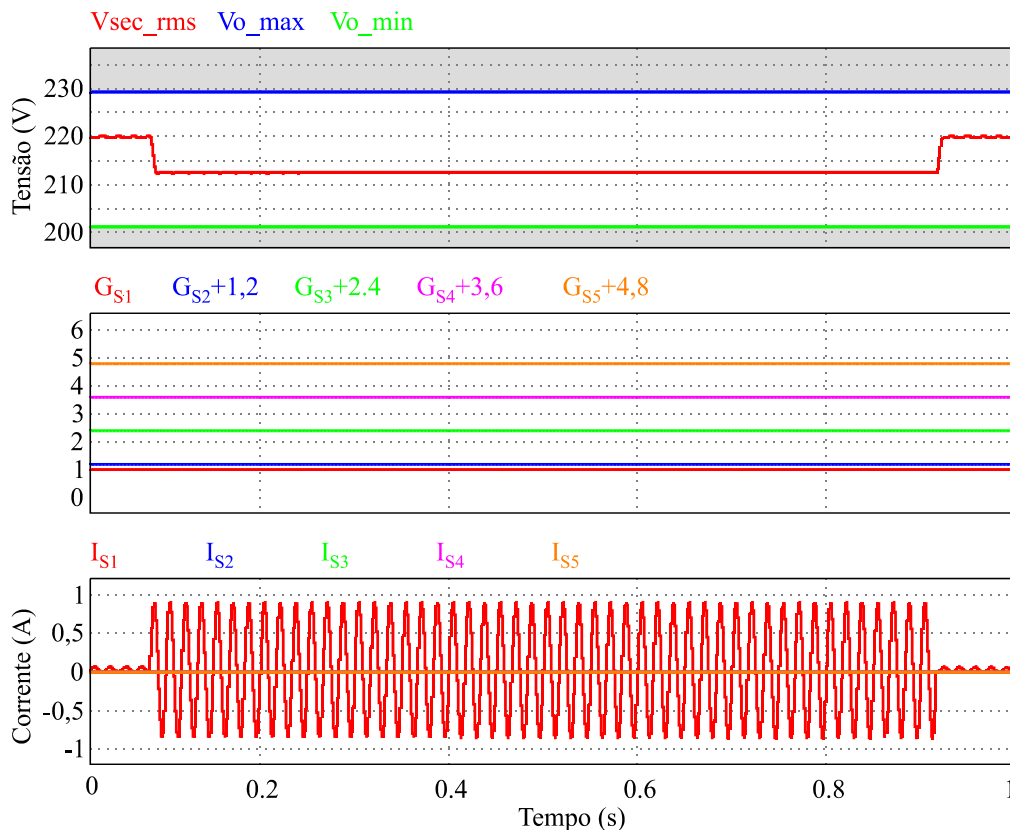


Figura 5.2 – Resultados de simulação. Superior: valor eficaz da tensão secundária e limites “adequados” do PRODIST. Central: Comando de *gate* nas chaves. Inferior: corrente pelos IGBTs.

5.1.2 Variação da tensão do alimentador (com carga nominal)

Com o objetivo de avaliar a operação do comutador eletrônico de *taps*, a seguir é realizada a simulação de variação da tensão suprida pelo alimentador (alta tensão) de modo a verificar a atuação do comutador no sentido de restaurar a tensão secundária. Salienta-se que o transformador opera com carga nominal resistiva e as comutações ocorrem a cada dez ciclos da frequência da rede elétrica, a fim de melhor visualizar os resultados. Porém, cabe ressaltar que o comutador eletrônico pode realizar comutações a cada semiciclo da rede se necessário. A tensão primária é ajustada em 1 p.u. e é incluída uma impedância de linha de 0,2 p.u., ocasionando a operação do comutador eletrônico de *taps* de maneira a restabelecer os níveis de tensão. Na Figura 5.3 são apresentados os resultados obtidos, onde os valores indicados são relacionados aos níveis eficazes de tensões e corrente.

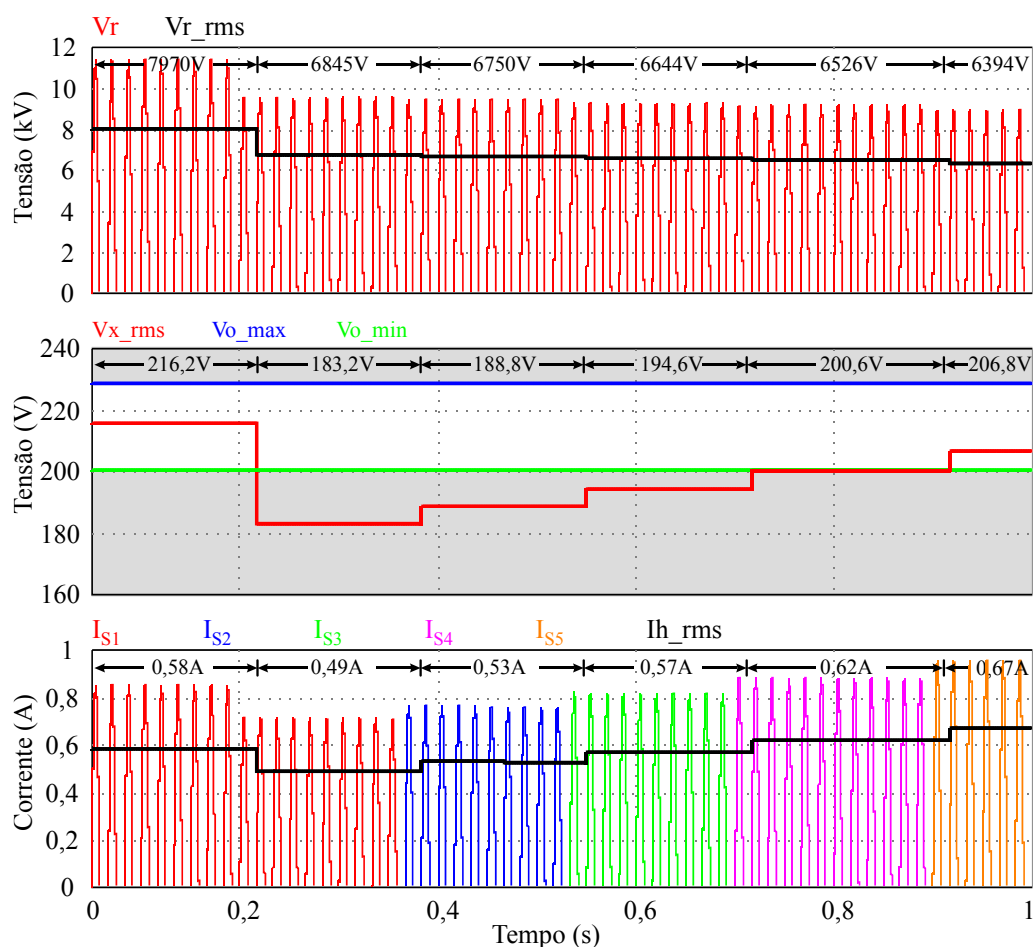


Figura 5.3 – Resultados de simulação. Superior: semiciclos positivos e valor eficaz da tensão primária. Central: valor eficaz da tensão secundária e limites “adequados” do PRODIST. Inferior: semiciclos positivos e valor eficaz das correntes nas chaves S_1 a S_5 .

Também foi simulada a atuação do comutador eletrônico de *taps* para níveis de tensão secundária acima dos níveis adequados do PRODIST. Inicialmente considera-se o primário do transformador com redução de tensão causada pela presença de uma impedância de 0,1 p.u. na rede, emulando assim a redução de tensão no PAC. Nessa situação o comutador de *taps* encontra-se operando de forma a corrigir a queda de tensão gerada, ou seja, o comutador encontra-se com a chave S_5 conduzindo. Posteriormente, é retirado o efeito de redução de tensão causado pela impedância da rede e a tensão primária aumenta, elevando também a tensão secundária que fica acima do valor previsto pelo PRODIST (229 V eficaz). Isso faz com que o comutador eletrônico de *taps* opere novamente de modo a regular a tensão secundária para os valores estabelecidos. A Figura 5.4 apresenta o comportamento das tensões primária e secundária e da corrente primária do transformador nesta condição de operação, onde os valores indicados são relacionados aos níveis eficazes de tensões e corrente.

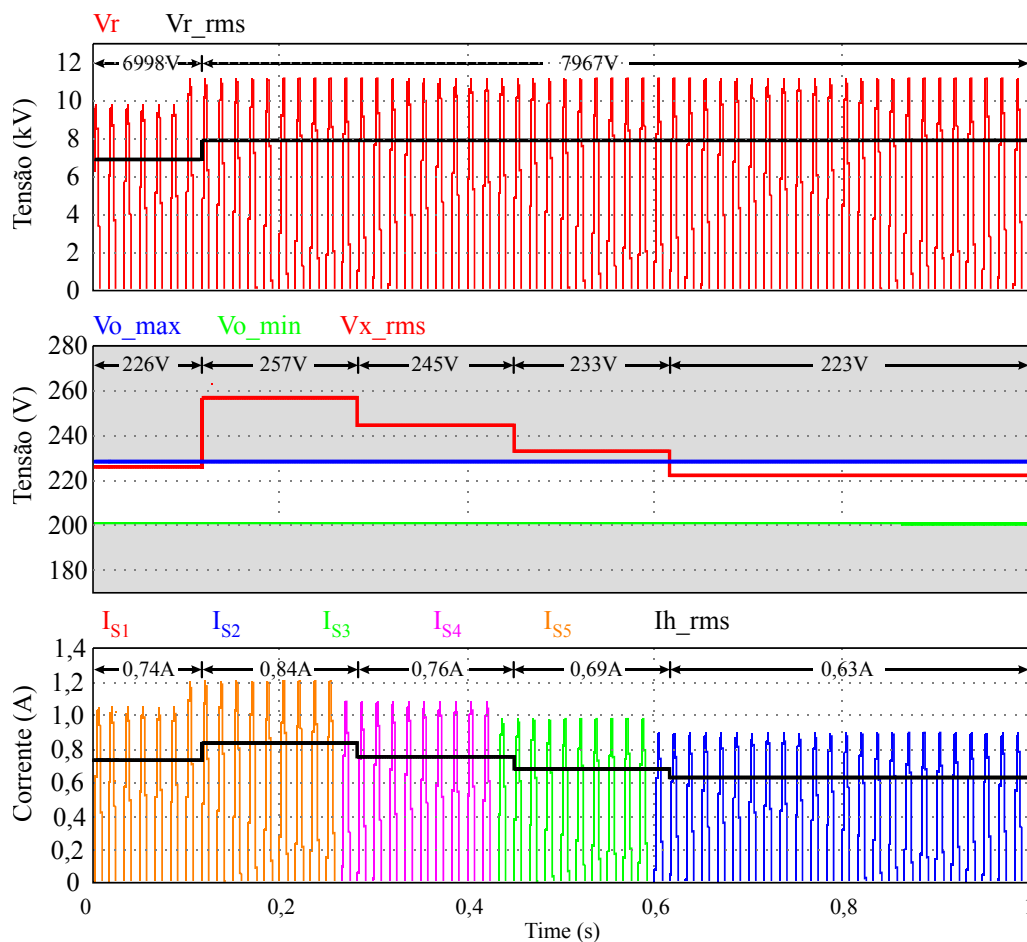


Figura 5.4 – Resultados de simulação. Superior: semiciclos positivos e valor eficaz da tensão primária. Central: valor eficaz da tensão secundária e limites “adequados” do PRODIST. Inferior: semiciclos positivos e valor eficaz da corrente primária.

Conforme se observa na Figura 5.3 e na Figura 5.4, a cada variação no nível de tensão do alimentador que reflete em um nível de tensão no ponto de conexão fora dos limites “adequados” definidos pelo PRODIST, o comutador eletrônico de *taps* atua no sentido de modificar a relação de transformação para restabelecer o nível de tensão dentro da faixa estabelecida pela norma. É de se destacar que o processo de comutação só ocorre na passagem por zero da corrente.

5.2 Experimentos práticos

Os experimentos práticos são realizados a partir da emulação de uma rede MRT, a qual é obtida a partir de um autotransformador do tipo Variac conectado a um transformador monofásico de distribuição utilizado como elevador de tensão. Também é empregada uma resistência em série com o Variac conectada ao lado secundário do transformador elevador, de modo a emular o efeito da queda de tensão em uma linha de distribuição longa. A alocação da resistência no circuito secundário do transformador elevador se dá devido à maior facilidade de realizar a comutação da mesma em uma rede de baixa tensão.

A Figura 5.5 apresenta o circuito de emulação da rede monofásica de distribuição e a Tabela 5.2 apresenta os dados do Variac e do transformador elevador utilizados. Cabe ressaltar que os ensaios foram realizados com os secundários do transformador com comutador eletrônico de *taps* operando individualmente, com tensão de 220 V e metade da carga cada.

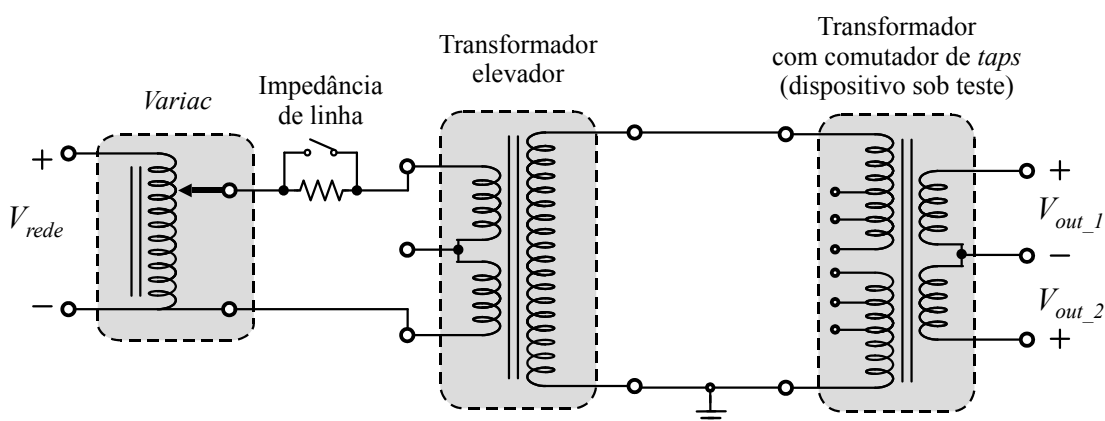


Figura 5.5 – Sistema de alimentação do transformador com comutador eletrônico de *taps*.

Na realização dos ensaios, a tensão primária do transformador com comutador de *taps* é regulado em 1 p.u. para a condição de carga nominal, ignorando-se assim os efeitos da impedância do Variac e do transformador elevador. Os ensaios visam demonstrar o

funcionamento do comutador eletrônico de *taps* para condições que comumente ocorrem em redes de distribuição, especialmente, em redes de distribuição rurais.

Para isso, são implementadas situações que emulam o efeito de uma linha de distribuição longa, causando queda de tensão primária, assim como o aumento da tensão da mesma. Também é avaliado o funcionamento do comutador para operação com carga resistiva, com fator de potência indutivo e carga não-linear. Os ensaios são realizados com as comutações ocorrendo a cada dez ciclos da rede para uma melhor visualização dos resultados, porém, como será mostrado, o processo de comutação em operação normal pode ocorrer a cada semiciclo da rede.

Tabela 5.2 – Características do Variac e transformador elevador.

| Equipamento | Dados | Características |
|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Variac | Potência nominal | 10 kVA |
| | Tensão nominal | 0-265 V |
| Transformador elevador | Potência Nominal | 10 kVA |
| | Tensão nominal | 7967/240/120 V |
| | Impedância percentual | 2,5% |

5.2.1 Ensaio de comutação na passagem por zero da corrente

O ensaio de comutação na passagem por zero da corrente visa demonstrar o comportamento da corrente através das chaves semicondutoras durante o processo de comutação, especialmente o efeito da sobreposição das chaves. É considerado um período de sobreposição das chaves de 10 μ s e o ensaio é realizado para diversas características de carga, sendo elas: carga puramente resistiva, carga com fator de potência indutivo e carga não-linear do tipo retificador em ponte completa com filtro capacitivo.

A Figura 5.6 apresenta o processo de comutação entre as chaves S_1 e S_2 para uma carga resistiva equivalente de 10 Ω conectada ao secundário do transformador, considerando tensão primária nominal. Verifica-se que como a tensão e a corrente estão em fase, a tensão que aparece sobre as chaves durante o processo de comutação é pequena, dessa maneira, a corrente resultante do processo de comutação também é pequena, não sendo identificada nesse caso. Destaca-se que o ruído presente nas medições da corrente primária é devido à ponteira de corrente, a qual teve de ser adaptada para apresentar classe de isolamento de 15 kV.

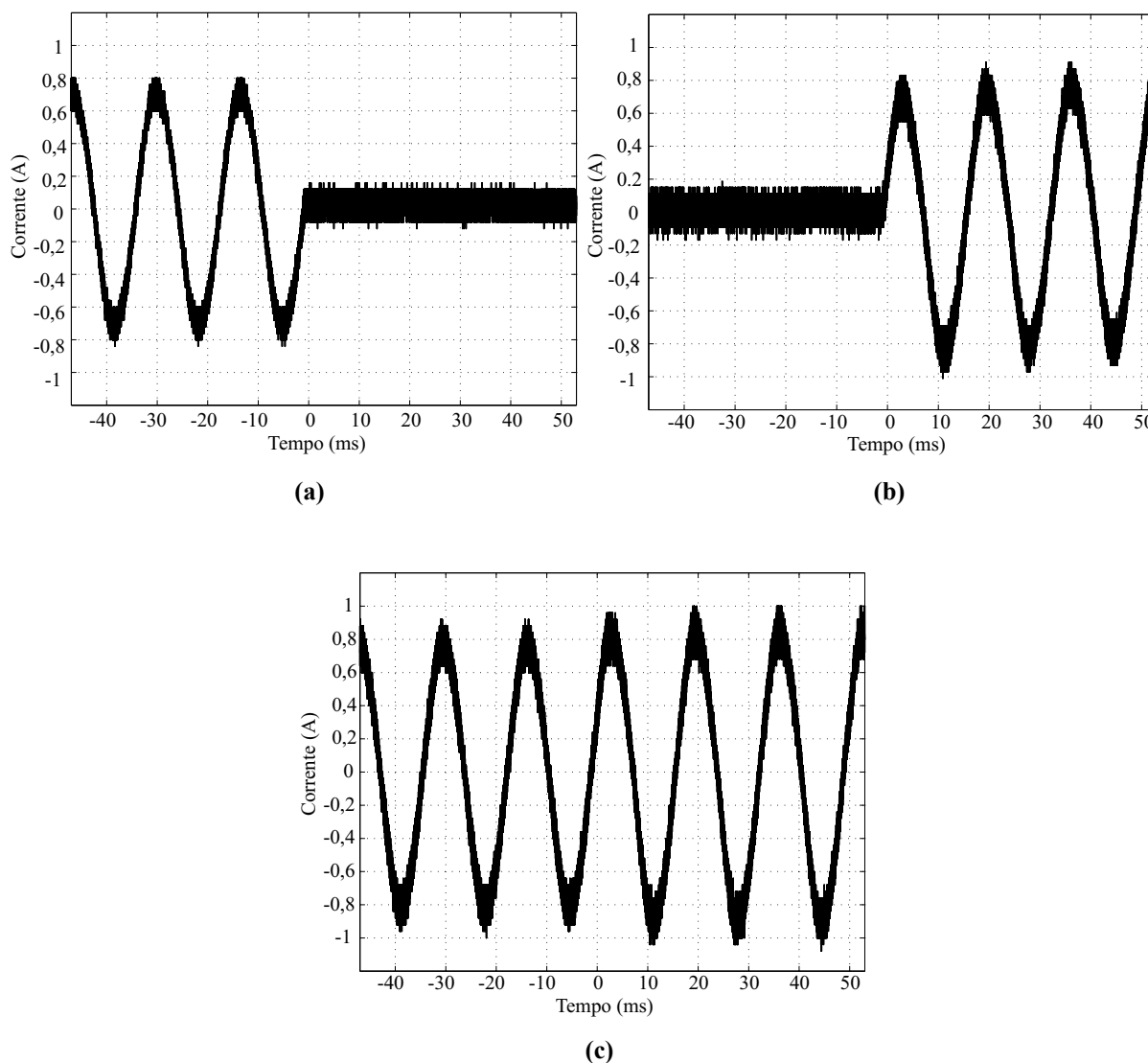


Figura 5.6 – Comutação na passagem por zero da corrente para carga resistiva. (a) Corrente na chave S_1 . (b) Corrente na chave S_2 . (c) Corrente primária.

A Figura 5.7 apresenta o processo de comutação entre as chaves S_1 e S_2 considerando tensão primária nominal e uma carga equivalente com resistência de $10\ \Omega$ e uma indutância de $12,06\ \text{mH}$ conectada ao secundário do transformador, resultando em uma carga com fator de potência de $0,91$ indutivo. A defasagem entre tensão e corrente faz com que uma maior tensão apareça sobre as chaves semicondutoras durante o processo de comutação, resultando em uma corrente de sobreposição maior que para o caso da carga resistiva. Entretanto, como se pode observar, o reduzido tempo de sobreposição impede que essa corrente cresça de forma a danificar o comutador eletrônico de *taps*, permanecendo dentro dos valores esperados para esta condição. Salienta-se que a corrente de sobreposição aumenta quanto mais indutiva a carga, como mostrado na seção 4.3.3.

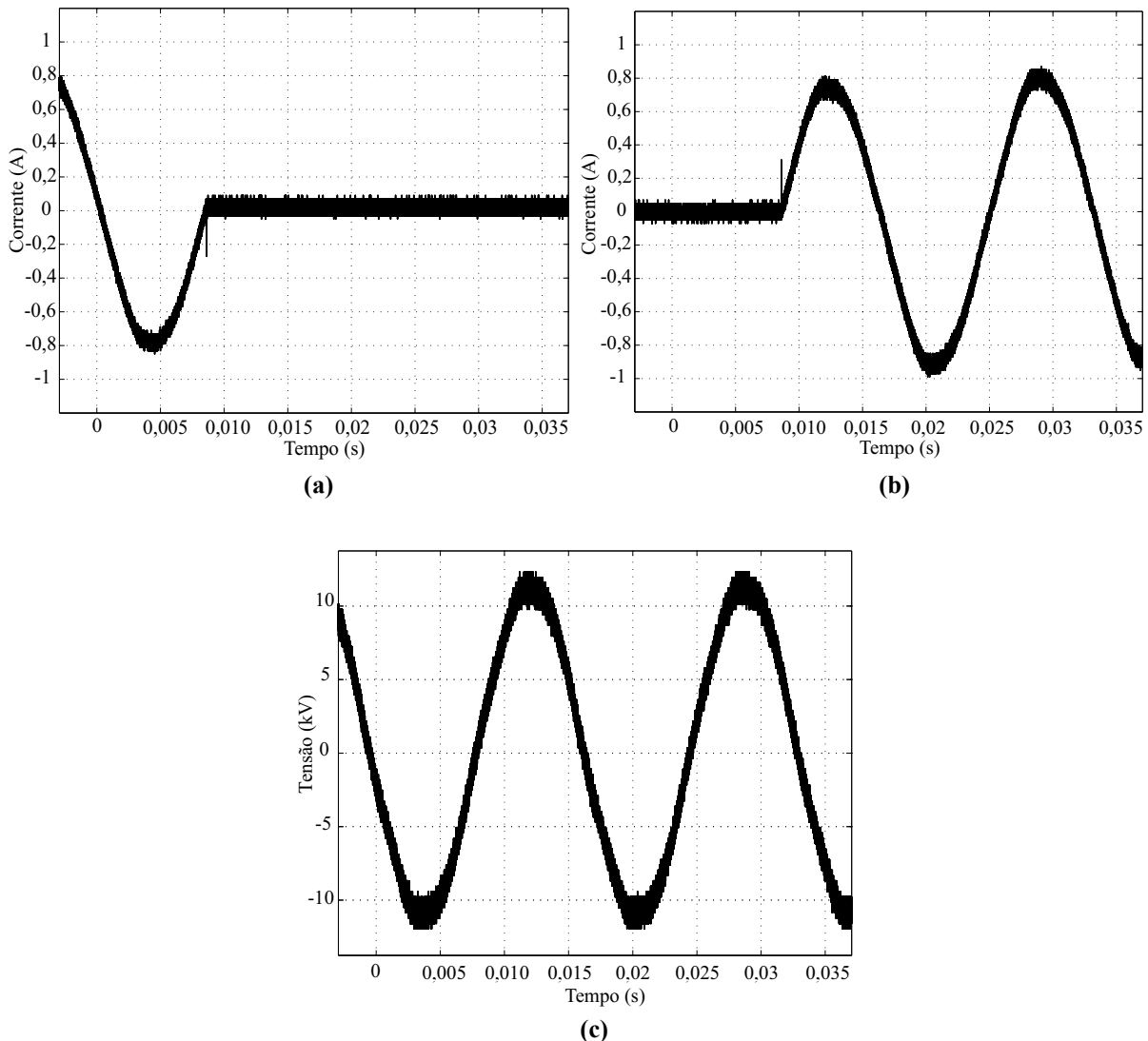


Figura 5.7 – Comutação na passagem por zero da corrente para carga com FP 0,91. (a) Corrente na chave S_1 . (b) Corrente na chave S_2 . (c) Tensão primária do transformador.

A Figura 5.8 apresenta o processo de comutação entre as chaves S_1 e S_2 considerando tensão primária nominal e uma carga não-linear composta por um retificador monofásico de ponte completa com filtro capacitivo conectada em apenas um dos enrolamentos secundários, sendo que o outro enrolamento permanece em aberto. As características da carga atendida pelo retificador são dadas por uma resistência de 40Ω e capacitor de saída de $440 \mu\text{F}$.

Tal ensaio teve por objetivo avaliar a operação do comutador eletrônico de *taps* em situações com presença de harmônicas na rede. Verifica-se nesse caso que mesmo para a condição de carga não-linear o sistema de controle realiza a comutação apenas na passagem por zero da corrente, evitando que a chave retirada de operação sofra uma sobretensão, operando da mesma maneira que para os casos de cargas lineares apresentados anteriormente. A distorção que aparece na forma de onda da tensão primária, Figura 5.8 (c), é devida à presença de harmônicas na corrente de carga, que resulta em distorção da tensão primária.

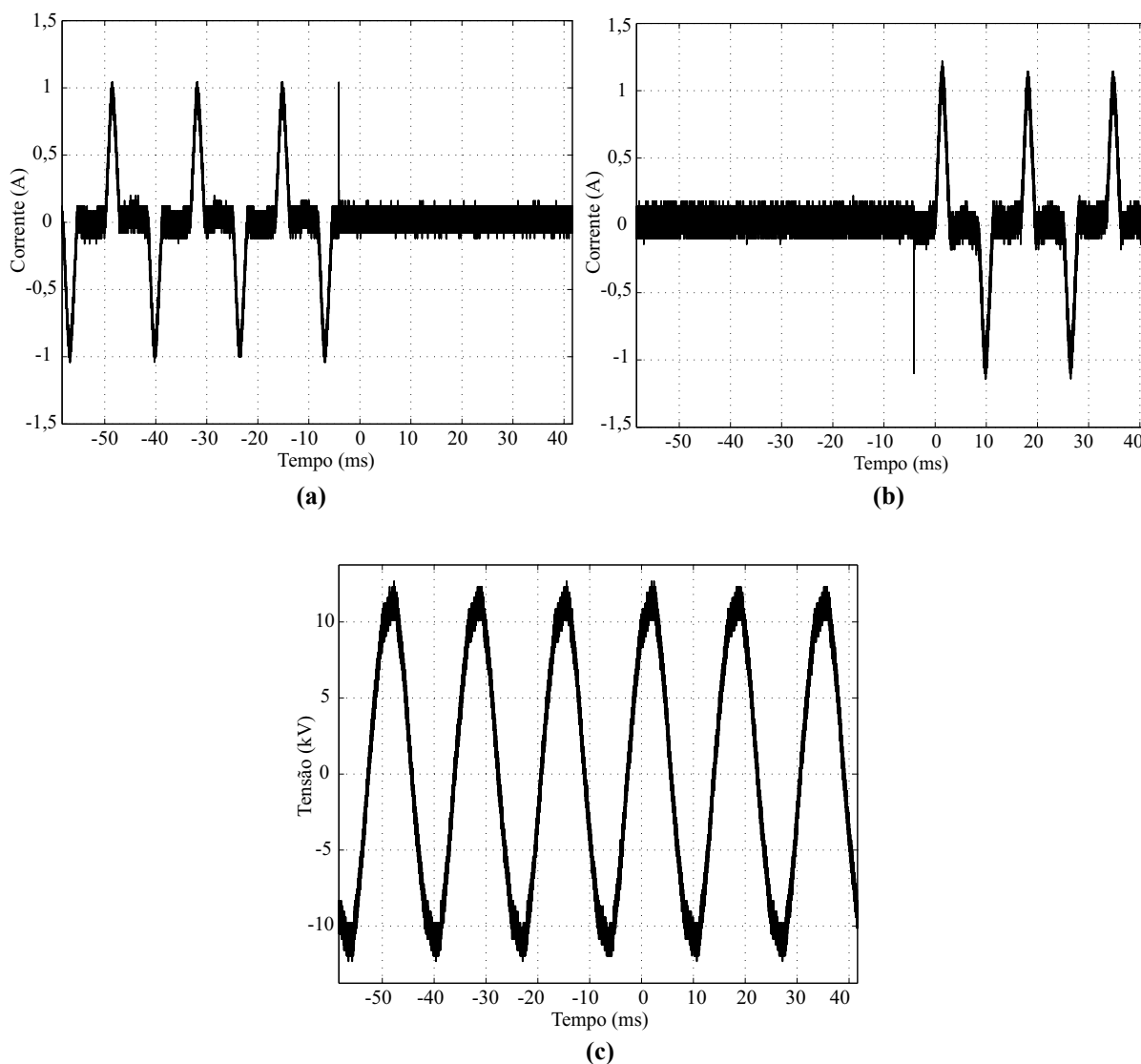


Figura 5.8 – Comutação na passagem por zero da corrente para carga não linear. (a) Corrente na chave S_1 . (b) Corrente na chave S_2 . (c) Tensão primária do transformador.

5.2.2 Ensaio de redução da tensão primária

Neste ensaio, é considerada a aplicação de carga nominal puramente resistiva e é emulada a queda de tensão causada pela impedância de uma linha de distribuição longa. A tensão primária é ajustada em 1 p.u. e é incluída uma impedância de linha de 0,2 p.u., ocasionando a operação do comutador eletrônico de *taps* de maneira a restabelecer os níveis de tensão. A Figura 5.9 (a) apresenta o comportamento do semiciclo positivo da tensão primária antes e após a conexão da impedância na rede, é possível verificar que à medida que os enrolamentos de *tap* são comutados, a tensão primária continua a reduzir, isso é justificado pela mudança da relação de transformação do transformador, que aumenta a corrente primária e conseqüentemente aumenta a queda de tensão na impedância da linha.

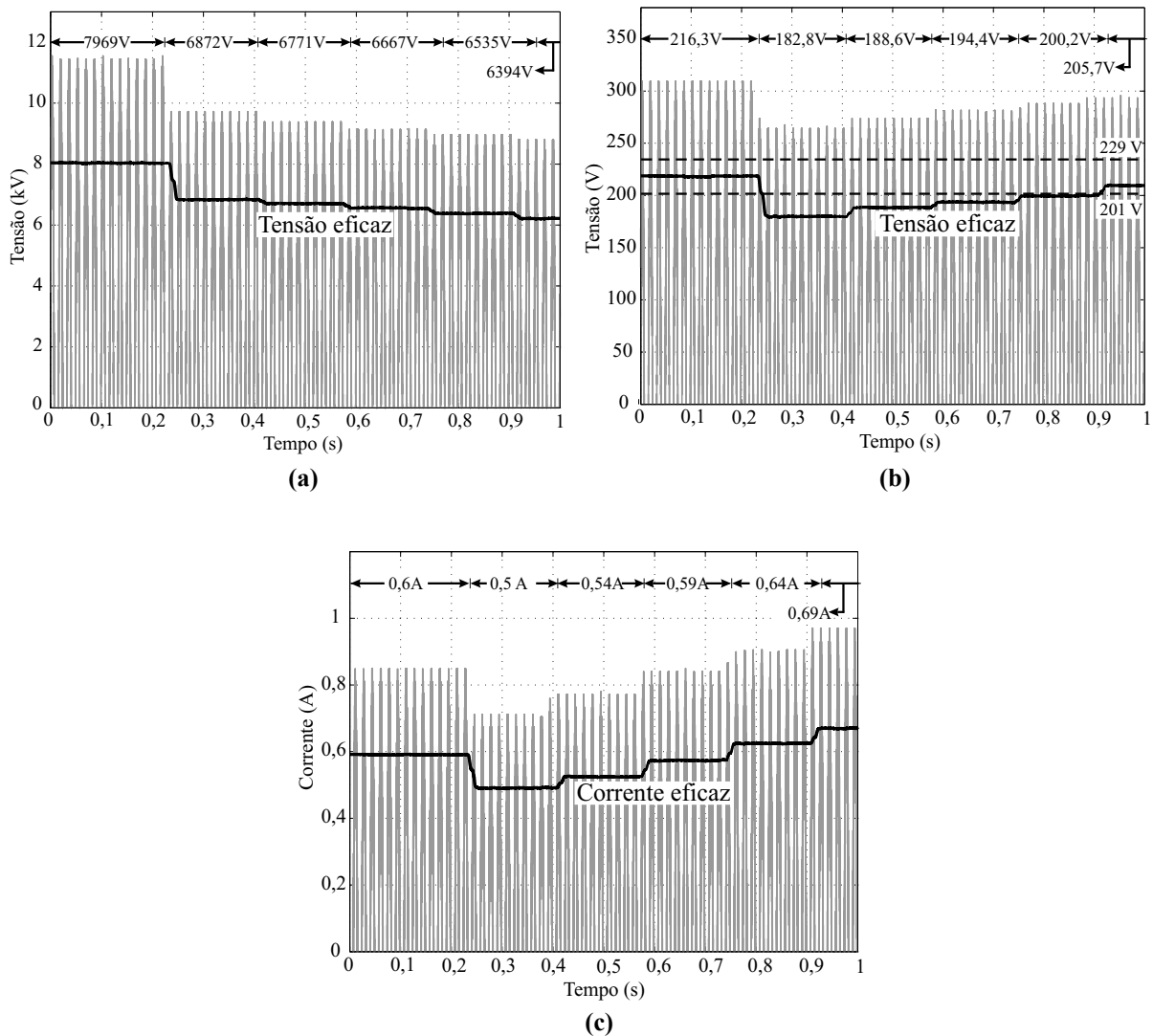


Figura 5.9 – Ensaio de redução da tensão primária devido à impedância da linha. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária.

O ensaio apresentado na Figura 5.9 é feito considerando-se um tempo de comutação entre os enrolamentos de *taps* de dez ciclos da rede, permitindo uma melhor visualização das comutações e seu efeito sobre a componente eficaz de tensão e corrente. Porém, em uma aplicação real o tempo requerido para a comutação dos enrolamentos de *taps* é de meio ciclo da rede. O ensaio considerando essa condição é apresentado na Figura 5.10, onde são mostrados os semiciclos positivos e os valores eficazes da tensão primária e secundária e da corrente primária do transformador. Assim, a resposta do sistema permite além da correção da tensão em regime permanente, também a correção de afundamentos momentâneos de tensão – desde que ocorram dentro da faixa de tensão de operação dos enrolamentos de *tap* do transformador – que são definidos com duração de um ciclo a três segundos de acordo com o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2012b).

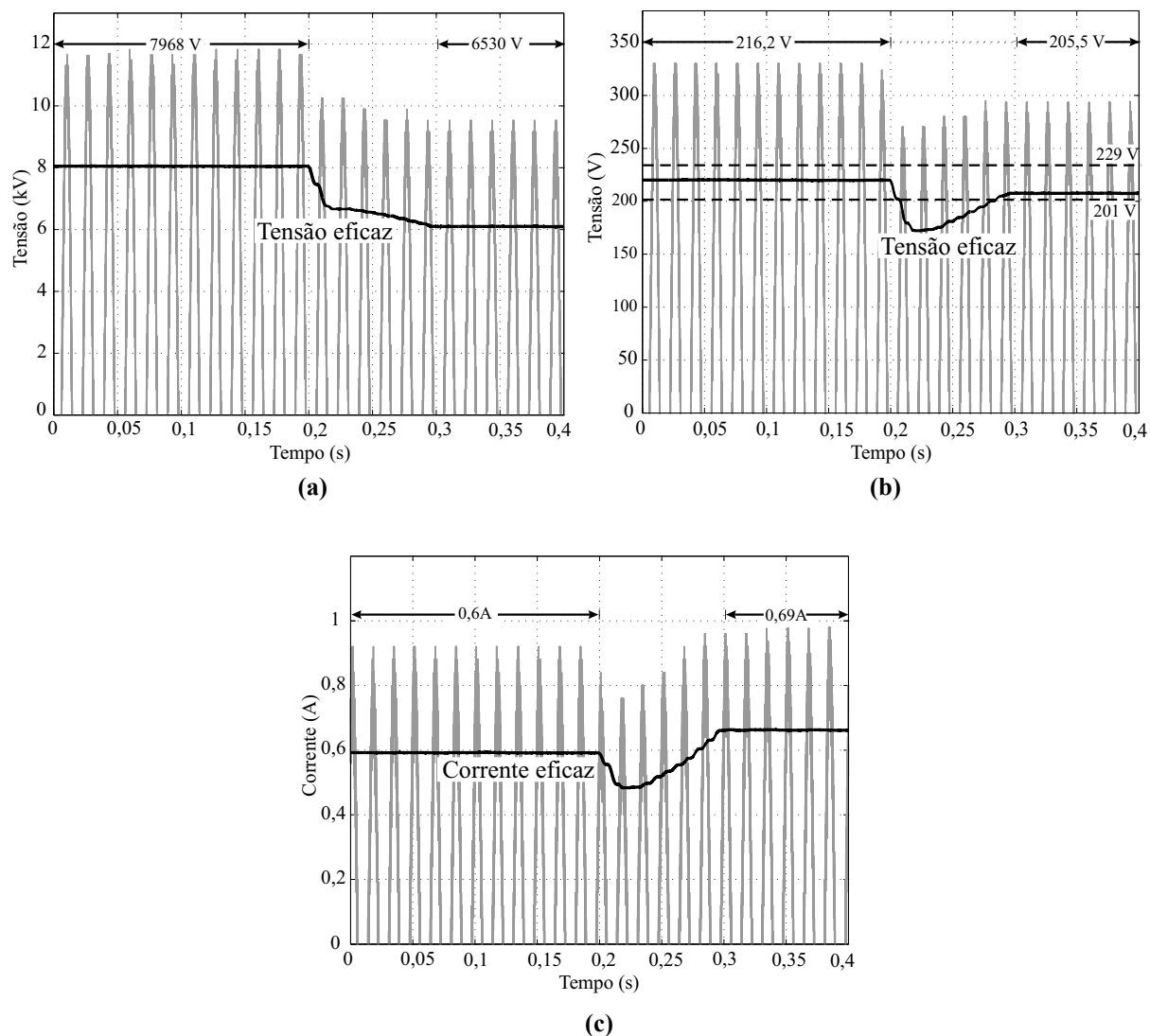


Figura 5.10 – Ensaio de redução da tensão primária devido à impedância da linha para meio ciclo de rede. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária.

5.2.3 Ensaio de aumento da tensão primária

Neste ensaio, é considerada a aplicação de carga nominal puramente resistiva e é avaliada a regulação da tensão secundária para elevações da tensão primária do transformador. É considerada inicialmente a tensão nos terminais do primário do transformador com redução de tensão causada pela presença de uma impedância de 0,1 p.u. na rede, emulando assim a redução de tensão no PAC. Nessa situação o comutador de *taps* encontra-se operando de forma a corrigir a queda de tensão gerada, ou seja, o comutador encontra-se com a chave S_5 fechada. Posteriormente, é retirado o efeito de redução de tensão causado pela impedância da rede e a tensão primária aumenta, elevando também a tensão secundária que fica fora dos valores previstos pelo PRODIST. Isso faz com que o

comutador eletrônico de *taps* opere novamente de modo a regular a tensão secundária novamente para os dois valores estabelecidos.

A Figura 5.11 apresenta o comportamento do semiciclo positivo e do valor eficaz das tensões primária e secundária e da corrente primária. Devido às características construtivas do transformador, não é possível realizar-se a regulação da tensão secundária quando a tensão primária eleva-se para valores superiores a 1 p.u., para isso ser possível seria necessário optar-se por uma configuração de transformador com enrolamentos de ação subtrativa, ou então trabalhar de forma a reverter-se a polaridade dos enrolamentos existentes, como por exemplo, o método de reversão de enrolamentos apresentado na Figura 2.11 (b) (FRY, 1965).

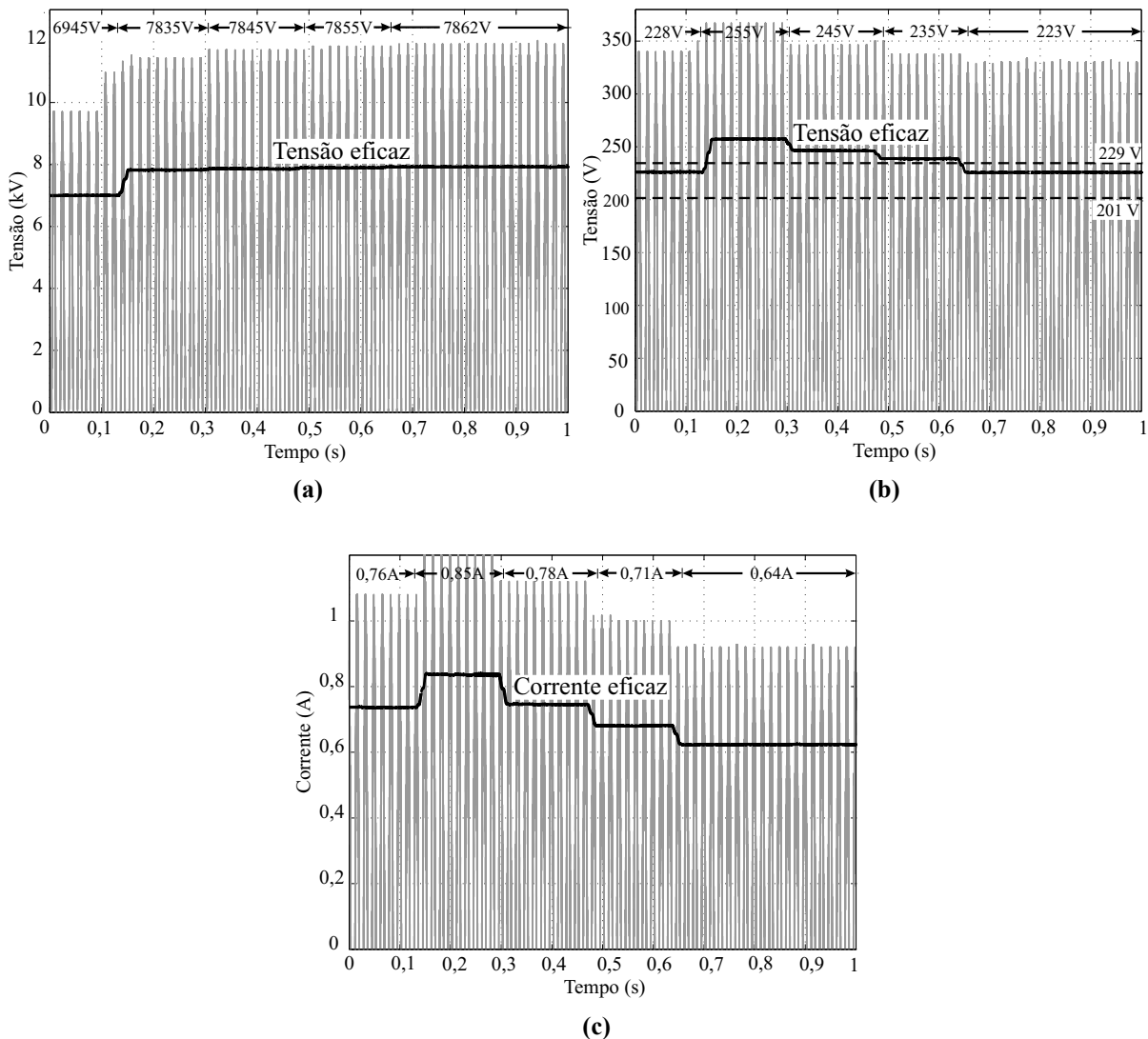


Figura 5.11 – Ensaio de aumento da tensão primária. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária.

A avaliação feita na Figura 5.11 apresenta a resposta do comutador eletrônico de *taps* para dez ciclos da rede. A resposta para comutações em meios ciclos da rede é dada na Figura 5.12.

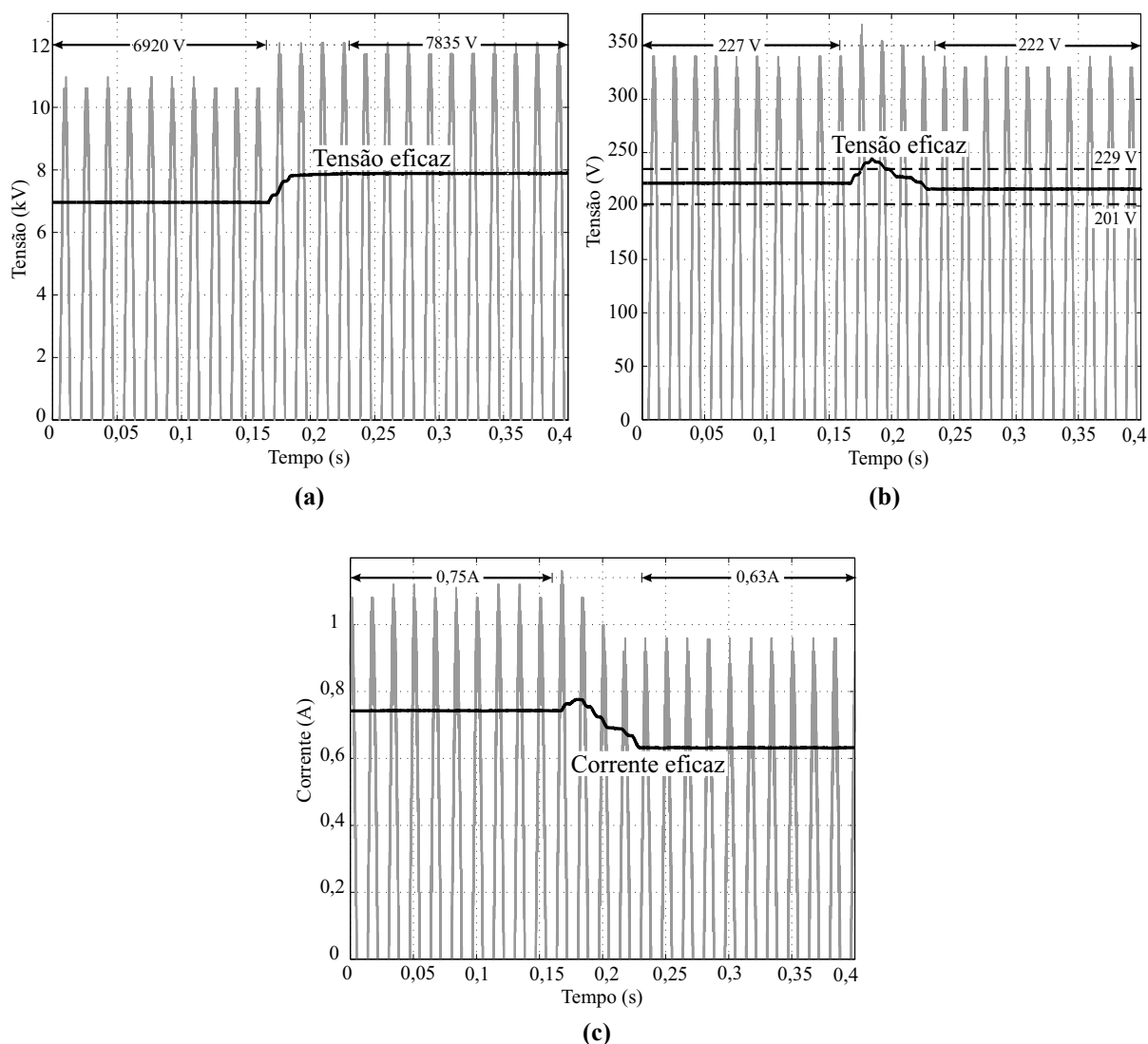


Figura 5.12 – Ensaio de aumento da tensão primária para meio ciclo de operação. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária.

5.2.4 Regulação de tensão para redução da tensão primária com carga com fator de potência não-unitário

Neste ensaio, é considerada a aplicação de carga nominal com fator de potência indutivo de 0,91 e é emulada a queda de tensão causada pela impedância de uma linha de distribuição longa. A tensão primária é ajustada em 1 p.u. e é incluída uma impedância de linha de 0,2 p.u., resultando na queda da tensão primária e na operação do comutador eletrônico de *taps* de maneira a restabelecer os níveis de tensão. A Figura 5.13 apresenta o comportamento do semiciclo positivo e do valor eficaz da tensão primária, tensão secundária e corrente primária, antes e após a conexão da impedância na rede, apresentando comportamento semelhante ao obtido na Figura 5.9.

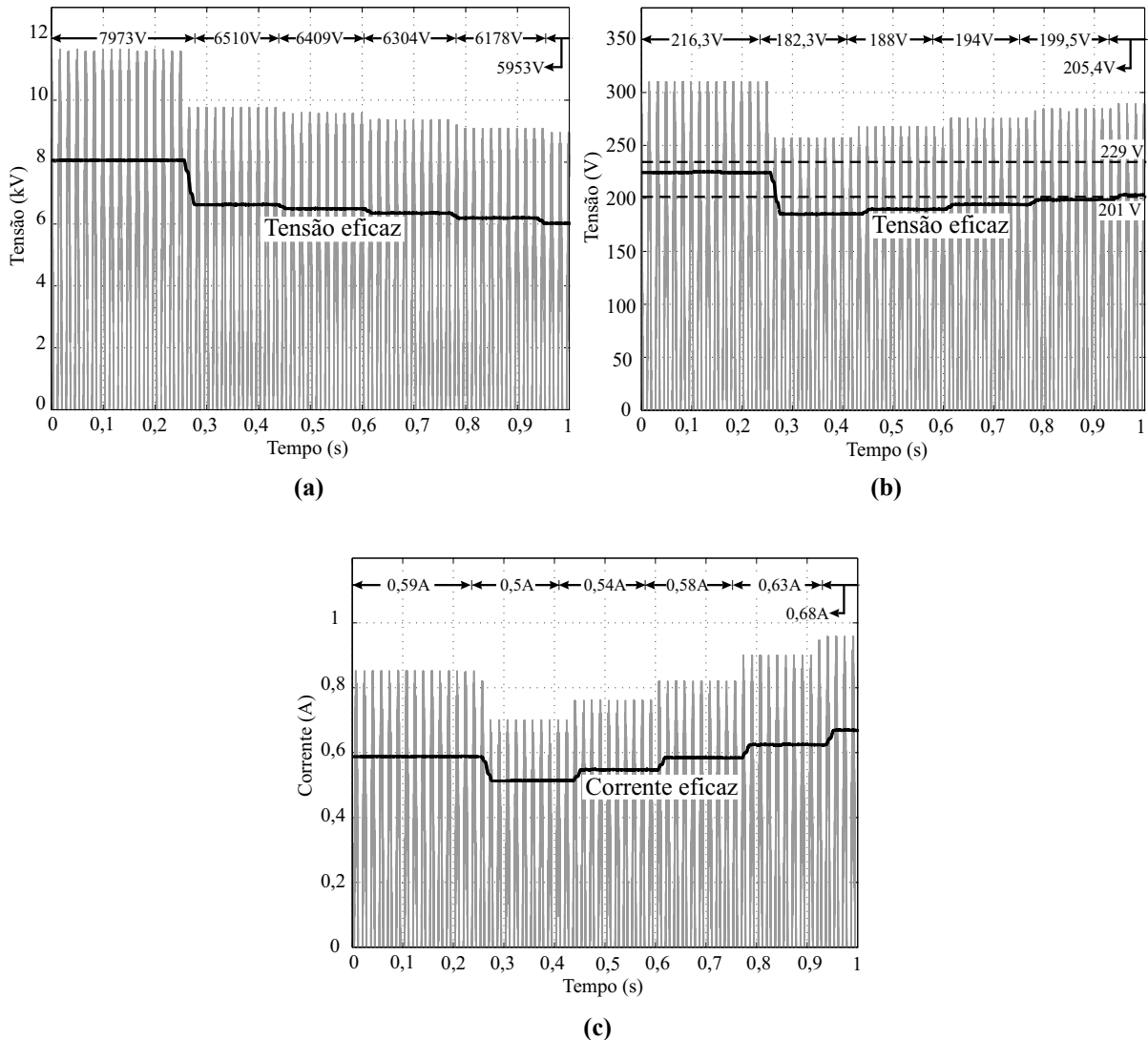


Figura 5.13 – Ensaio de redução da tensão primária com carga de FP = 0,91. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária.

5.2.5 Regulação de tensão para redução da tensão primária com carga não-linear

Neste ensaio, é considerada a aplicação de carga não-linear composta por um retificador de ponte completa com filtro capacitivo com resistência de carga de 40Ω e capacitor de saída de $440 \mu\text{F}$ conectada a um enrolamento secundário do transformador e é emulada a queda de tensão causada pela impedância da linha. A tensão primária é ajustada em 1 p.u. e é incluída uma impedância de linha de 0,1 p.u., resultando na queda da tensão primária, o que resulta na operação do comutador eletrônico de *taps* de maneira a restabelecer os níveis de tensão. A Figura 5.14 apresenta o comportamento do semiciclo positivo e do valor eficaz da tensão primária e secundária e a corrente primária. Cabe salientar que inicialmente o comutador está operando na chave S_1 e após a atuação, a chave S_2 encontra-se em operação.

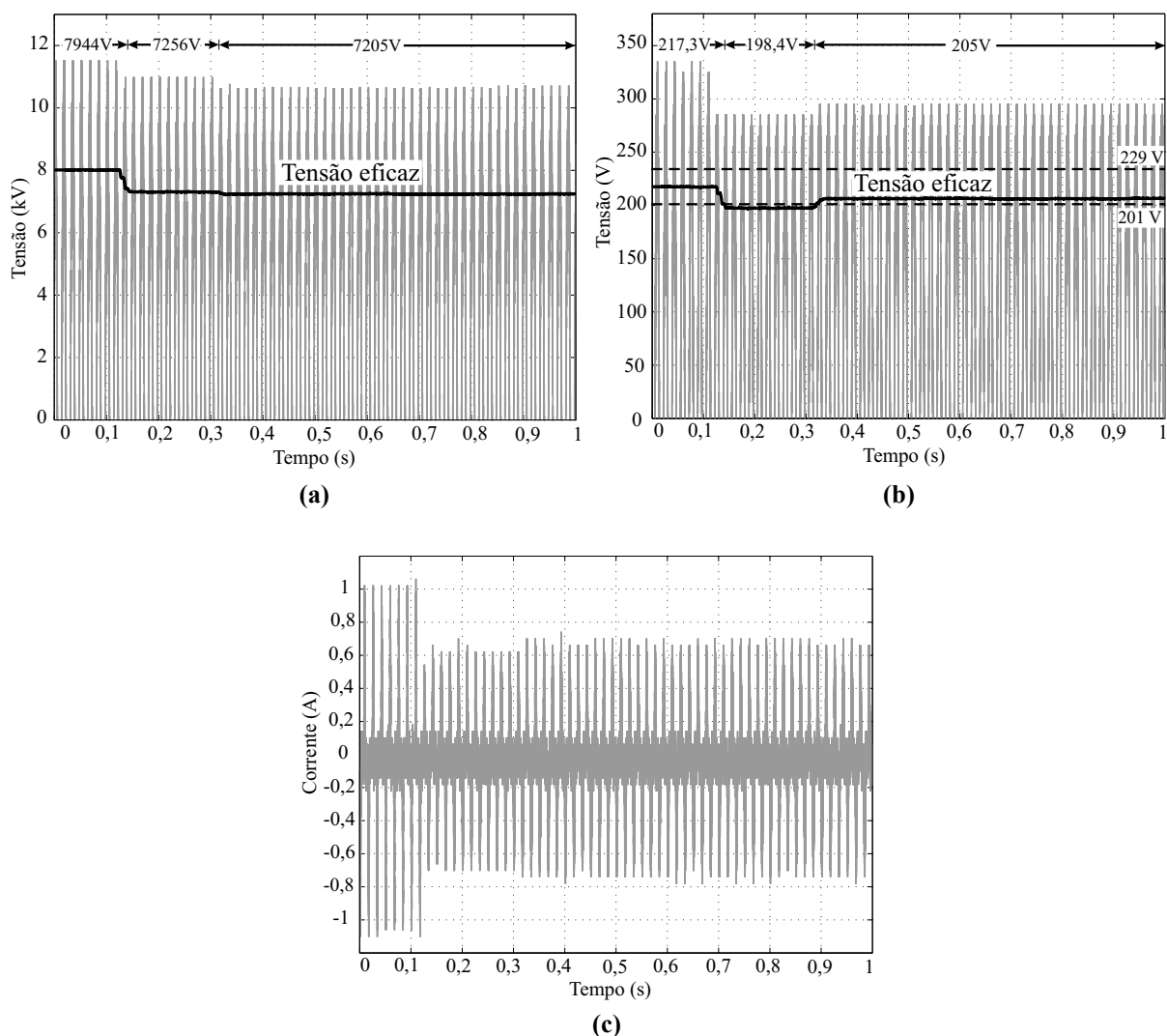


Figura 5.14 – Ensaio de redução da tensão primária com carga não linear. (a) Tensão primária. (b) Tensão secundária. (c) Corrente primária.

5.2.6 Tensão sobre as chaves durante o processo de comutação

O ensaio de tensão sobre as chaves semicondutoras visa apresentar o comportamento da tensão que aparece sobre as chaves do comutador eletrônico de *taps* durante o processo de comutação para diferentes condições de carga. A tensão é medida sobre a chave que se encontra inicialmente em condução e que após a comutação permanece em aberto. Essa avaliação visa além de demonstrar o comportamento da tensão sobre as chaves semicondutoras, validar o projeto dos capacitores utilizados na proteção contra *spikes* de tensão apresentado na seção A.2.

Nesse sentido, a Figura 5.15 apresenta o comportamento da tensão sobre as chaves S_1 a S_5 durante o processo de comutação, considerando carga nominal puramente resistiva e a comutação ocorrendo de uma chave para a sua adjacente.

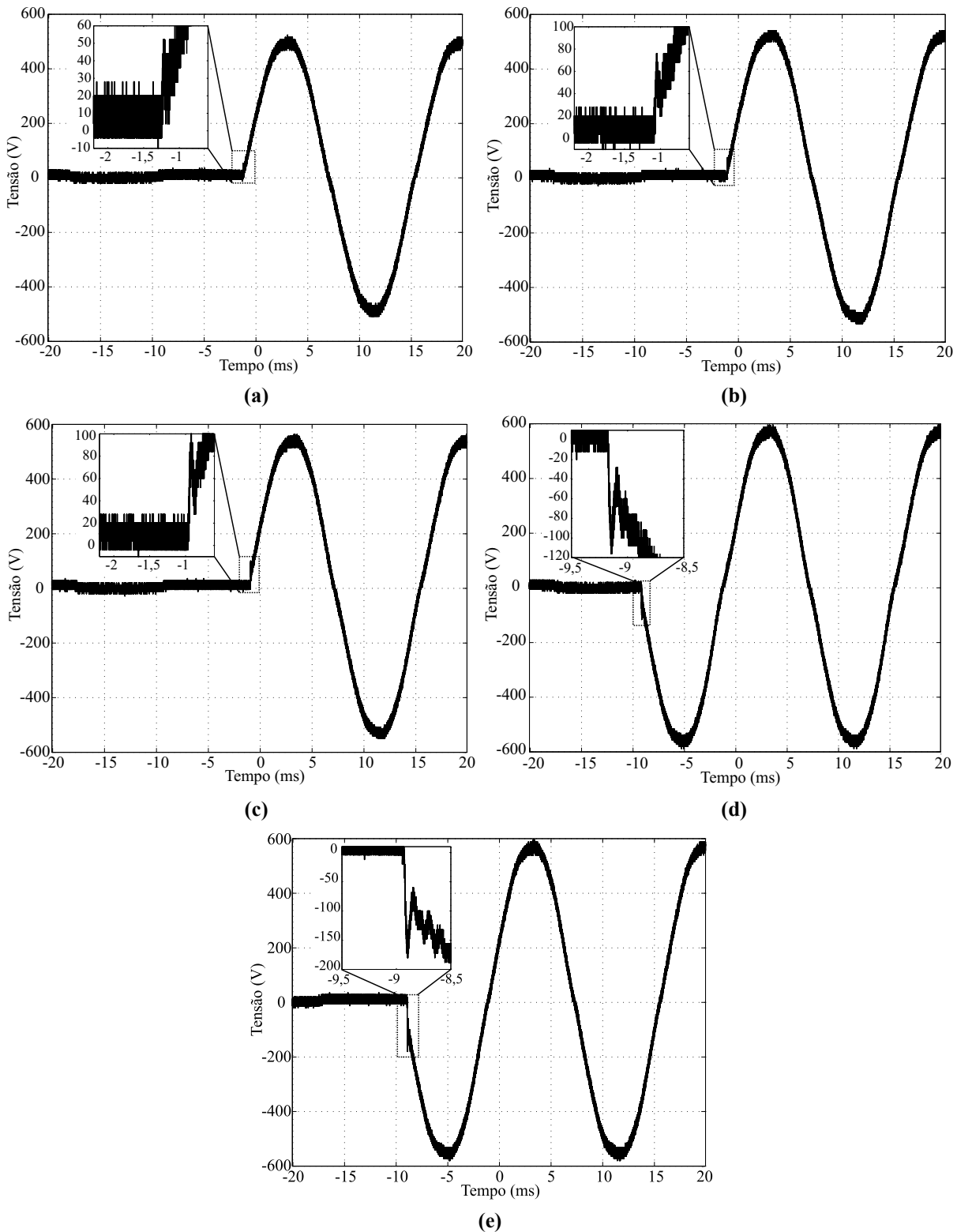


Figura 5.15 – Tensão sobre as chaves para comutação com carga resistiva. (a) tensão sobre S_1 na comutação de S_1 para S_2 . (b) Tensão sobre S_2 na comutação de S_2 para S_3 . (c) Tensão sobre S_3 na comutação de S_3 para S_4 . (d) Tensão sobre S_4 na comutação de S_4 para S_5 . (e) Tensão sobre S_5 na comutação de S_5 para S_4 .

A Figura 5.16 apresenta o comportamento da tensão sobre as chaves S_1 a S_5 considerando a comutação com carga nominal e $FP = 0,91$. A maior defasagem entre a tensão e a corrente resulta em uma maior tensão sobre o enrolamento de *tap* durante a comutação e uma corrente de

sobreposição também maior. A presença do capacitor de proteção cria um caminho desviando a energia armazenada na indutância de dispersão devido à corrente de dispersão do enrolamento de *tap*, o que evita que a tensão sobre a chave que é bloqueada se eleve de maneira a causar danos.

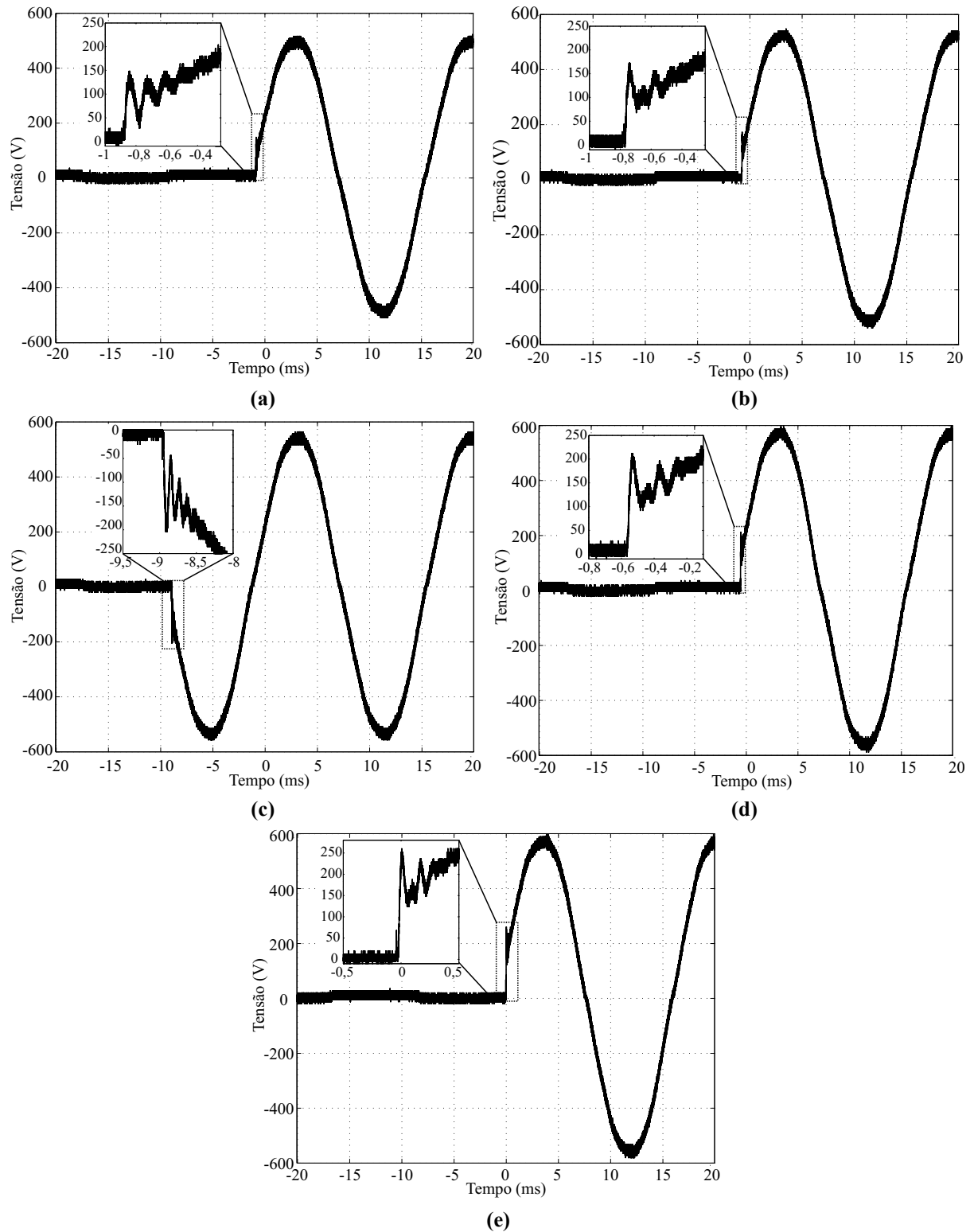


Figura 5.16 – Tensão sobre as chaves para comutação com fator de potência 0,91. (a) Tensão sobre S_1 na comutação de S_1 para S_2 . (b) Tensão sobre S_2 na comutação de S_2 para S_3 . (c) Tensão sobre S_3 na comutação de S_3 para S_4 . (d) Tensão sobre S_4 na comutação de S_4 para S_5 . (e) Tensão sobre S_5 na comutação de S_5 para S_4 .

5.3 Comutador eletrônico de *taps* desenvolvido

A Figura 5.17 apresenta o comutador eletrônico de *taps* desenvolvido. De modo a manter o nível de isolamento requerido, o conjunto de IGBTs e diodos (que forma a chave bidirecional), assim como os capacitores contra *spikes* de tensão foram dispostos próximos aos terminais de *tap* do transformador. Os circuitos de acionamento foram dispostos externamente às chaves.

Cabe destacar que a parte frontal do acesso aos *taps* do transformador é protegida por tampa metálica, a qual é fixada à carcaça aterrada do transformador, garantindo a isolamento do comutador eletrônico de *taps* do meio externo, permitindo assim a vedação do sistema quanto às intempéries e proteção contra contatos diretos.

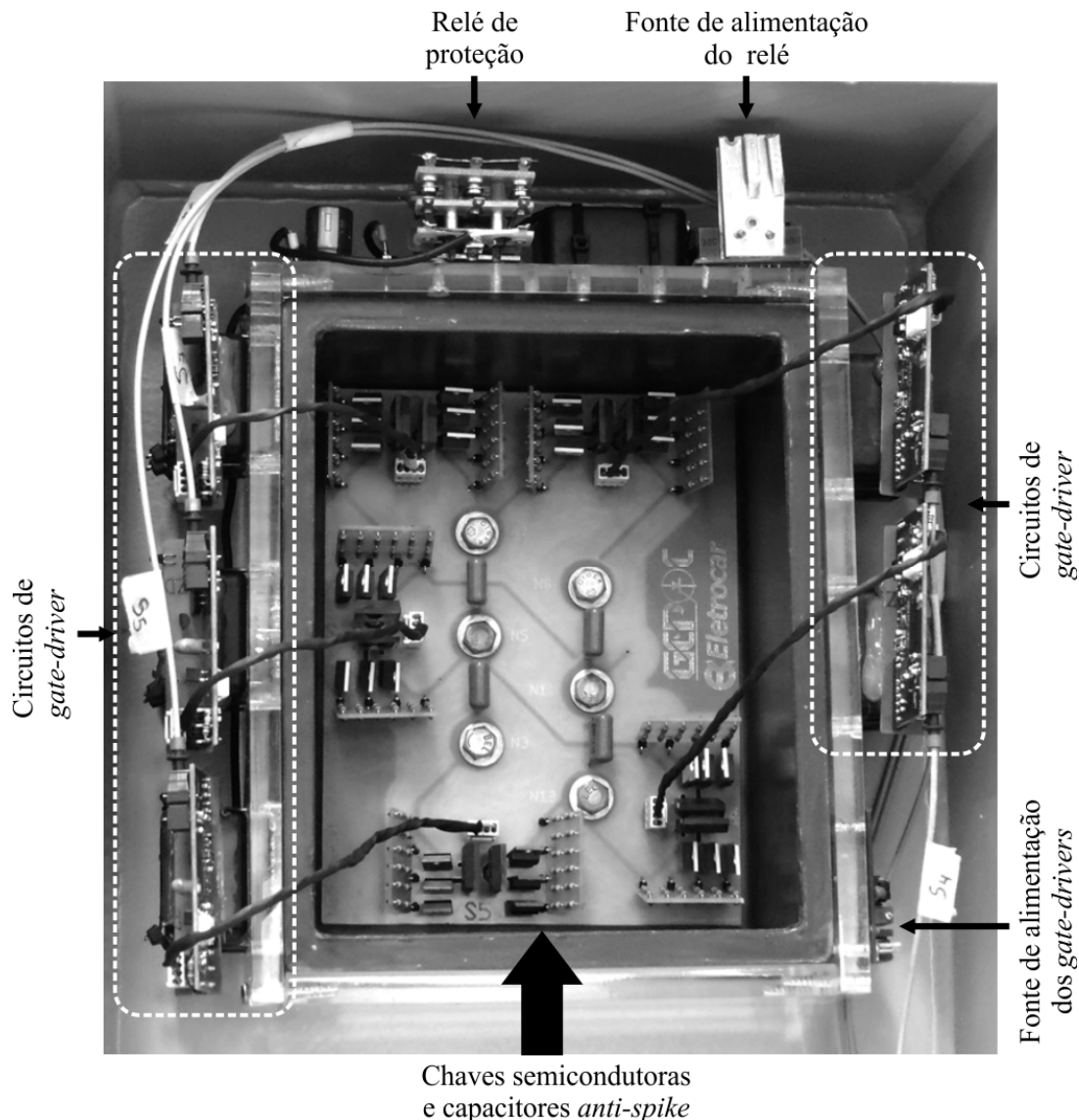


Figura 5.17 – Comutador eletrônico de *taps* desenvolvido.

5.4 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulação e experimentais do comutador eletrônico de *taps* desenvolvido. Inicialmente, foram realizadas simulações, de modo a avaliar o comportamento do processo de comutação com base nos parâmetros obtidos para o sistema desenvolvido. Posteriormente, foram apresentados os ensaios experimentais práticos realizados, os quais tiveram por objetivo: apresentar o comportamento das correntes sobre as chaves semicondutoras durante o processo de comutação, avaliar o processo de regulação de tensão para diferentes condições de carga e perturbações na tensão primária e por fim, a avaliação do comportamento da tensão sobre as chaves semicondutoras durante o processo de comutação.

Conforme demonstrado, a estratégia de sincronismo com a rede elétrica permite que a comutação entre os enrolamentos de *taps* ocorra somente no cruzamento da corrente, seja para cargas lineares ou cargas com harmônicos conectadas ao secundário do transformador. Além disso, é demonstrada a limitação da corrente de sobreposição sobre as chaves semicondutoras para diferentes condições de carga, permitindo assim, a comutação em até 10 μ s sem implicar danos aos demais componentes do comutador eletrônico de *taps* devido a sua operação.

Os ensaios avaliando a regulação da tensão demonstram a operação do comutador eletrônico de *taps* para diferentes condições de carga, regulando a tensão no PAC em casos de redução da tensão primária do transformador. Salienta-se que a comutação do sistema pode ser realizada em até meio ciclo da rede elétrica, o que permite, de acordo com o PRODIST, a regulação tanto da tensão em regime permanente, quanto afundamentos momentâneos de tensão, desde que os mesmos ocorram dentro da faixa de operação do transformador.

A avaliação da tensão sobre as chaves semicondutoras durante o processo de comutação demonstra a eficácia do emprego do sistema de proteção contra *spikes* de tensão oriundos do processo de sobreposição das chaves.

CONCLUSÃO

A regulação de tensão através de comutadores de *taps* tem sido empregada em transformadores desde os primeiros sistemas de distribuição em corrente alternada. Ao longo dos anos, os comutadores foram sendo modificados de forma a atender as necessidades de regulação de tensão, sendo desenvolvidos dispositivos de comutação através de chaves mecânicas manuais, amplamente empregados em sistemas de distribuição e dispositivos eletromecânicos, empregados na mudança automática de *taps* sob carga. Atualmente, os comutadores de *taps* de operação sob carga eletromecânicos são uma realidade em subestações e em transformadores de grande porte, possibilitando a redução das perdas no fornecimento de energia elétrica e a garantia da qualidade da energia. Porém, seu alto custo e a constante manutenção têm sido limitadores da implantação em sistemas de distribuição.

Contudo, com a crescente utilização da geração distribuída, o desenvolvimento das redes inteligentes e a maior exigência das agências reguladoras, o problema da regulação da tensão passa a ser crítico também nas redes de distribuição de energia elétrica urbanas e rurais. Atualmente não é mais aceitável o desligamento da carga para a realização da comutação manual entre *taps* do transformador, cujos principais problemas são: (i) o tempo de deslocamento da equipe, o custo homem/hora e o custo por quilômetro rodado; (ii) o tempo de interrupção no fornecimento de energia do transformador e o impacto nos indicadores de qualidade do serviço; (iii) o risco envolvido na tarefa, uma vez que o electricista trabalha em uma zona controlada; e (iv) a insatisfação do usuário. Além disso, depois da comutação executada, o nível de tensão fornecido ao consumidor pode sofrer variação devido à dinâmica do sistema, sendo impossível uma equipe comutar manualmente o transformador sempre que houver variações.

Portanto, a substituição do sistema mecânico de comutação de *taps* de transformadores de distribuição por um sistema eletrônico e automático será uma necessidade em um futuro próximo. Destacam-se como principais características dos sistemas eletrônicos: fácil manutenção, regulação da tensão em tempo real, alta velocidade de comutação e ausência de partes móveis com rebatimento de contatos no fechamento que operem durante a comutação sob carga dos *taps*. Como desvantagens, pode-se citar maior complexidade e custo (quando comparado aos sistemas manuais) e menor robustez – sendo que essa última pode ser aprimorada com um projeto adequado de tolerância a falhas e medidas de redundância.

Na literatura são apresentadas inúmeras topologias de comutadores eletrônicos de *taps*, cada qual com suas características específicas, como: reduzido número de semicondutores, reduzida tensão sobre os semicondutores, elevado número de níveis de regulação de tensão, entre outros. Esse trabalho propõe a utilização de um comutador eletrônico de *taps* que possa ser empregado nos transformadores com características similares aos utilizados atualmente. A topologia do transformador empregado altera apenas o acesso aos enrolamentos de *taps* do transformador e a forma de comutarem-se os *taps*, não alterando o projeto dos enrolamentos ou do sistema de arrefecimento do mesmo. Nesse sentido, um transformador monofásico, sistema MRT, de 5 kVA com classe de isolamento 15 kV foi projetado e desenvolvido para a implementação no trabalho, cujos detalhes construtivos foram discutidos. O mesmo é compatível com o padrão adotado pela CEEE-D.

Além disso, a topologia do comutador eletrônico de *taps* foi definida, sendo composta por cinco chaves bidirecionais formadas por IGBTs em associação anti-série (ou emissor comum). Os circuitos de acionamento foram desenvolvidos com mesma classe de isolamento do transformador, operando de maneira satisfatória para uma relação de custo significativamente inferior aos dispositivos encontrados no mercado.

Foram apresentados detalhes acerca da estratégia de controle, onde um controlador por histerese foi adotado para a regulação da tensão de saída e o filtro de Kalman é utilizado para a identificação do cruzamento por zero da corrente. Entretanto, é de se ressaltar que outras técnicas de sincronização devem ser avaliadas em casos onde possam ocorrer variações na frequência da rede. Também é necessário avaliar outras técnicas de regulação da tensão secundária onde a estratégia de regulação por controlador de histerese possa excitar oscilações na rede elétrica.

A topologia de proteção do comutador eletrônico de *taps* é apresentada e discutida (no APÊNDICE A –), apresentando-se o projeto dos principais componentes necessários para a operação do sistema. Estes circuitos devem possuir as seguintes características: (i) garantir a partida do comutador eletrônico de *taps*; (ii) proteger as chaves semicondutoras contra sobrecorrentes; (iii) proteger as chaves semicondutoras contra sobretensões; e (iv) proteger os circuitos de potência e controle contra sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas ocorridas no lado de alta e/ou baixa tensão do transformador.

Do sistema de proteção, foram implementados o sistema de partida e proteção contra curto-circuito realizado pelo relé de proteção e o sistema de proteção contra *spikes* de tensão. Entretanto, o sistema de proteção por *crowbar*, assim como o sistema de proteção contra descargas atmosféricas e surtos de tensão foram apenas dimensionados, não sendo

implementados no protótipo final do comutador eletrônico de *taps*. Devido à entraves no processo de aquisição destes dispositivos, o sistema de proteção a ser aplicado no comutador eletrônico de *taps* não pôde ser implementado em sua totalidade no presente trabalho, porém, importantes avanços no sentido de implementá-los foram realizados neste trabalho. Outro fator não considerado é a operação coordenada dos dispositivos de proteção, sendo que este estudo é de grande importância para o emprego de comutadores eletrônicos de *taps* nos sistemas de distribuição.

Foi realizado o projeto e análise do sistema proposto e foram feitas simulações do mesmo, evidenciando sua aplicabilidade. Na sequência, foi realizado o projeto e a montagem do laboratório de ensaios em média tensão para execução dos ensaios e foi efetuada a aquisição dos dispositivos eletrônicos necessários para a implementação do sistema. Com as montagens finalizadas iniciaram-se os ensaios, os quais tiveram por objetivo: demonstrar o processo de comutação do sistema pela passagem por zero da corrente primária do transformador para diferentes tipos de cargas, avaliação da operação do sistema para redução e elevação da tensão primária para diferentes tipos de cargas e também foram realizados ensaios demonstrando o comportamento da tensão sobre as chaves durante o processo de comutação.

Os ensaios práticos realizados comprovam a análise do processo de comutação apresentado, garantindo a comutação entre os enrolamentos de *taps* em um período de 10 μ s, com limitada corrente de sobreposição durante a comutação e sem apresentar *spikes* de tensão danosos. O sistema consegue regular a tensão secundária dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST para quedas de tensão primária de até 17,4% tanto em regime permanente quanto para afundamento de tensão do tipo momentâneos, sendo que o limite de operação é dado pela característica dos enrolamentos de *tap*. Dessa forma, garante-se melhor qualidade de energia aos consumidores atendidos, além de permitir a redução de perdas no sistema de distribuição. Ainda, caso o transformador apresentasse enrolamentos para regulação negativa da tensão, elevações de regime permanente e momentâneas poderiam também ser compensadas, sendo esta uma alternativa a ser avaliada para sistemas com grandes variações do valor eficaz da tensão.

Sendo assim, o sistema desenvolvido apresenta potencial para aplicações em sistemas de distribuição rurais monofásicas, apresentando-se como uma alternativa para aplicações em regiões urbanas e rurais com problemas de regulação da tensão, além de apresentar um forte potencial para aplicações nas futuras redes inteligentes e sistemas com geração distribuída. Por fim, destaca-se que a aplicação do sistema desenvolvido pode ser expandida também para sistemas de distribuição trifásicos.

Proposta de trabalhos futuros:

Importantes tópicos relacionados à aplicação de comutadores eletrônicos de *taps* poderiam ser abordados em trabalhos futuros, entre eles pode-se ressaltar:

- um estudo aprofundado e implementação do sistema completo de proteção do comutador eletrônico de *taps*, avaliando-se os impactos de uma rede de distribuição real no funcionamento do sistema;
- aplicação da técnica de controle por regulação de tensão por compensação de queda de tensão (LCD);
- avaliação econômica para implementação do sistema;
- apesar dos avanços obtidos no desenvolvimento dos circuitos de *gate-driver*, os mesmos devem passar por ensaio de norma a fim de garantir a mesma classe de isolamento do transformador, conforme tabela A.1 da NBR 5440 (ABNT, 2011);
- faz-se necessário avaliar a influência dos tipos de sistema de aterramento (TN-S TN-C-S, etc.) sobre o funcionamento do sistema de proteção. Verificando se a variação da tensão de terra altera a atuação desses dispositivos;
- estudo do efeito da comutação dos *taps* de forma não sequencial, ou seja, pulando alguns *taps*, de forma a tornar a regulação da tensão mais rápida;
- implementação de uma unidade para aplicação em campo e avaliação do comportamento do sistema frente a condições reais de operação, visando um produto comercial;
- desenvolvimento de um sistema de comunicação bidirecional entre o transformador com comutador eletrônico de *taps* e a concessionária de energia, proporcionando assim o desenvolvimento do conceito de *smart transformer*, que alia os benefícios dos comutadores eletrônicos de *taps* com as funcionalidades de uma rede de comunicação, como por exemplo: atuação direta sobre os *taps* do transformador pela concessionária de energia, permitindo um melhor controle do fluxo de carga; monitoramento *online* do comportamento de carga e das demais variáveis do sistema, permitindo o planejamento de expansões na rede, manutenções e substituição de transformadores sobrecarregados, além de outras vantagens.

Artigos resultantes deste trabalho:

QUEVEDO, J. O. ; BELTRAME, R. C. ; CAZAKEVICIUS, F. E. ; THEODORICO, L. G. N. ; CAMARGO, R. F. ; QUADROS, C. J. ; SCHUCH, L. Comutador eletrônico de

taps aplicado a um transformadores de distribuição. In: XV Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, 2013, Foz do Iguaçu, PR. Anais do XV ERIAC, 2013. p. 1-8.

QUEVEDO, J. O. ; GIACOMINI, J. C. ; BELTRAME, R. C. ; CAZAKEVICIUS, F. E. ; RECH, C. ; SCHUCH, L. ; MARCHESAN, T. B. ; De CAMPOS, M. ; SAUSEN, P. S. ; KINAS, J. R. *Smart distribution transformer applied to smart grids*. In: 12th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP2013).

Artigos submetidos aguardando resposta de aceite:

QUEVEDO, J. O.; GIACOMINI, J. C.; BELTRAME, R. C.; CAZAKEVICIUS, F. E.; RECH, C.; SCHUCH, L.; MARCHESAN, T. B.; De CAMPOS, M.; SAUSEN, P. S.; KINAS, J. R. Transformador de distribuição inteligente aplicado em *smart grids*. Revista Sobraep: *Special Issues - Selected papers from Brazilian Power Electronics Conference*. (Artigo convidado, referente ao artigo publicado no COBEP 2013 intitulado: *Smart distribution transformer applied to smart grids*).

Outros trabalhos relacionados ao estudo:

THEODORICO, L. G. N.; QUEVEDO, J. O. ; CAZAKEVICIUS, F. E. ; BELTRAME, R. C.; SCHUCH, L. Comutador eletrônico de *taps* aplicado a um transformador monofásico de distribuição. In: II Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação, 2012, São Leopoldo, RS. Anais II CICPG, 2012.

THEODORICO, L. G. N.; CAZAKEVICIUS, F. E.; QUEVEDO, J. O.; BELTRAME, R. C.; SCHUCH, L.; RECH, C. Implementação de um Laboratório de Teste e Ensaio em Média Tensão Adequado às Normas Brasileiras. In: 28ª Jornada Acadêmica Integrada, Santa Maria, RS. 2013.

CAZAKEVICIUS, F. E. ; QUEVEDO, J. O.; BELTRAME, R. C.; THEODORICO, L. G. N.; SCHUCH, L.; PINHEIRO, J. R. Implementação de chaves semicondutoras de potência em um transformador de distribuição inteligente. In: 7º Seminário de Eletrônica de Potência e Controle, SEPOC 2013, Santa Maria, RS, 2013.

CAZAKEVICIUS, F. E. ; QUEVEDO, J. O.; BELTRAME, R. C.; THEODORICO, L. G. N.; SCHUCH, L.; PINHEIRO, J. R. Estudo do arranjo de chaves semicondutoras adequado a um comutador eletrônico de *taps*. In: XXV Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, CRICTE 2013, Passo Fundo. RS, 2013.

BIBLIOGRAFIA

ABB. **Selection guide for ABB HV surge arresters:** 31 p. 1995a.

_____. **Silicon Surge Voltage Suppressor - 5SSB..X Series:** 6 p. 1995b.

_____. **Low voltage products - LOVOS-5 LOVOS-10 - Low voltage surge arrester:** 8 p. 2009.

_____. **Application guidelines - Overvoltage protection metal oxide surge arresters in medium voltage systems:** 88 p. 2011.

_____. **Datasheet - Surge arrester POLIM-D:** 5 p. 2013.

ABBASZADEH, K.; ARDEBILI, M.; ALAEI, A. R. Design and built of on - load fully electronic Tap-changer with triac switch: Simulation and practical results. Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2010. p.340-344.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5440:** . Transformadores para redes aéreas de distribuição - Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas: 1-28 p. 2011.

_____. **NBR 8667-1:** . Comutadores de derivação - Parte 1: Especificação e ensaios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas 2012a.

_____. **NBR 8667-2:** . Comutadores de derivação - Parte 2: Guia de aplicação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas 2012b.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST):**. Módulo 1 – Introdução. Brasília: 61 p. 2012a.

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST):** . Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília: 72 p. 2012b.

ASSELMAN, P. G. J. M.; GRIFFIOEN, J. H.; BAUER, P.; PAAP, G. C.; DE HAAN, S. W. H.; VAN DE WATER, C. J. **Method and device for continuous adjustment and regulation of transformer turns ratio, and transformer provided with such device.** USA: N. V. Eneco. Patent U.S. 5969511: 1-10 p. 1999.

BAUER, P.; DE HAAN, S. W. H. Protective device for electronic tap-changer for distribution transformers. EPE 97, 1997. p.4.282–4.287.

_____. Electronic tap changer for 500 kVA/10 kV distribution transformers: design, experimental results and impact in distribution networks. IEEE Industry Applications Conference. 33th IAS Annual Meeting. , 1998a. p.1530-1537 vol.2.

_____. New concept for voltage control. International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth. Proceedings., 1998b. p.918-923 Vol. 2.

_____. Solid state tap changers for utility transformers. IEEE Africon, 1999. p.897-902 vol.2.

BAUER, P.; SCHOEVAARS, R. Bidirectional switch for a solid state tap changer. IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference, 2003, 15-19 June 2003. p.466-471 vol.1.

BRASIL. **NR 10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade.** Ministério do Trabalho. Portaria GM n.º 598, de 07 de dezembro de 2004. Brasília, Brasil: Diário Oficial da República Federativa do Brasil 2004.

_____. **NR 6: Equipamento de proteção individual - EPI.** Ministério do Trabalho. Portaria SIT n.º 292, de 08 de dezembro de 2011. Brasília, Brasil: Diário Oficial da República Federativa do Brasil 2011.

CARDOSO, R.; DE CAMARGO, R. F.; PINHEIRO, H.; GRÜNDLING, H. A. Estruturas de sincronismo monofásica e trifásica baseadas no filtro de Kalman. **Revista Controle & Automação**, v. 17, n. 4, p. 493-513, 2006.

CEEE-D. **Materiais para redes aéreas de distribuição: equipamentos e proteções - transformador de distribuição monofásico fase-neutro para poste.** Disponível em <[http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/PTD-00.001%20SE%C3%87%C3%83O%2010-16a%20\(TR%20Monof%C3%A1sico%20Fase-Neutro%20220V\)_44424.pdf](http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/PTD-00.001%20SE%C3%87%C3%83O%2010-16a%20(TR%20Monof%C3%A1sico%20Fase-Neutro%20220V)_44424.pdf)>. Acesso em: 30 nov. 2013.

CHENSONG, D.; BAGHZOUZ, Y. Impact of distributed generation on voltage regulation by LTC transformer. 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2004. p.770-773.

CHIPING, S.; KUTKUT, N. H.; NOVOTNY, D. W.; DIVAN, D. M. General equivalent circuit of a multi-winding co-axial winding transformer. IEEE Industry Applications Conference, 1995. p.2507-2514.

CHOI, J. H. K., J. J. The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation. **Electrical Power & Energy Systems**, v. 23, p. 91-98, 2001.

COOKE, G. H.; WILLIAMS, K. T. New thyristor assisted diverter switch for on load transformer tap changers. **IEE Proceedings-B, Electric Power Applications**, v. 139, n. 6, p. 507-511, 1992. ISSN 0143-7038.

DEFENSE, D. O. **MIL-HDBK-217F: reliability prediction of electronic equipment.** 1991. p. 205.

DEGENEFF, R. C. A new concept for a solid-state on-load tap changers. 14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED., 1997. p.7/1-7/4 vol.1.

DOHNAL, D.; MR. **On-load ap-changers for power transformers a technical digest.** MR Publication. Germany, p.1-28. 2010

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. 2004. McGraw-Hill. Second edition. p. 525.

ECHAVARRIA, R.; CLAUDIO, A.; COTOROGEA, M. Analysis, Design, and Implementation of a Fast On-Load Tap Changing Regulator. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 22, n. 2, p. 527-534, 2007. ISSN 0885-8993.

EPRI. **New Equipment and Performance Design Review – LTC Management Course Materials**. EPRI Staff. Rep. 1012350, p.3-7, 151-164. 2006

FAIRCHILD. **Hyperfast diode: RHRP8120**: 1-5 p. 2002.

FAIZ, J.; JAVIDNIA, H. Fast response solid-state on load transformers tap-changer. 8th IEE International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000. p.355-359.

FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B. Optimal configurations for taps of windings and power electronic switches in electronic tap-changers. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 149, n. 5, p. 517-524, 2002. ISSN 1350-2360.

_____. New solid-state onload tap-changers topology for distribution transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 1, p. 136-141, 2003. ISSN 0885-8977.

_____. Implementation of a low-power electronic tap-changer in transformers. **IET Electric Power Applications**, v. 2, n. 6, p. 362-373, 2008. ISSN 1751-8660.

_____. **Electronic tap-changer for distribution transformers**. Springer, 2011. p. 184.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6th edition. 2003. 688.

FOURIE, R.; MOUTON, H. D. T. Development of a MV IGBT based solid-state tap changer. AFRICON '09, 2009. p.1-6.

FRÍAZ, P.; PLATERO, C. A.; SOLER, D.; BLAZQUEZ, F. High-Efficiency Voltage Regulator for Rural Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 3, p. 1666-1672, 2010. ISSN 0885-8977.

FRY, M. G. J. **Voltage or current regulator apparatus**. USA: Brentford Electric Limited. Patent U.S. 3195038: 1-10 p. 1965.

GAO, C.; REDFERN, M. A. A review of voltage control techniques of networks with distributed generations using On-Load Tap Changer transformers. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010. p.1-6.

_____. Automatic Compensation Voltage Control strategy for on-load tap changer transformers with distributed generations. International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011, 16-20 Oct. 2011. p.737-741.

GAO, D. A novel thyristor assisted diverter switch for on load transformer tap changer. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific*, 2002. p.297-300 vol.1.

GARCIA, S. M.; RODRIGUEZ, J. C. C.; JARDINI, J. A.; LOPEZ, J. V.; SEGURA, A. I.; CID, P. M. M. Feasibility of Electronic Tap-Changing Stabilizers for Medium Voltage Lines - Precedents and New Configurations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 3, p. 1490-1503, 2009. ISSN 0885-8977.

GELLINGS, C. W.; SAMOTYJ, M.; HOWE, B. The future's smart delivery system [electric power supply]. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 2, n. 5, p. 40-48, 2004. ISSN 1540-7977.

GILKER, C.; INDUSTRIES, C.; EPRI. **Project 2763-2: Study of Improved Load-Tap-Changing for Transformers and Voltage Regulators**. EPRI Rep. April. 1990

GOMEZ-EXPOSITO, A.; MONROY BERJILLOS, D. Solid-State Tap Changers: New Configurations and Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 4, p. 2228-2235, 2007. ISSN 0885-8977.

GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. 2nd edition. John Wiley & Sons, 1991. p. 384.

GRIGSBY, L. L. **The electric power engineering handbook**. Boca Raton - Florida: CRC Press LLC, 2001. p. 1496.

HINGORANI, N. G. Introducing custom power. *IEEE Spectrum*, v. 32, n. 6, p. 41-48, 1995. ISSN 0018-9235.

International Electrotechnical Commission. **IEC 60214 - 1**: Tap-changers – Part 1: Performance requirements and test methods: International Electrotechnical Commission: 1-119 p. 2003.

_____. **IEC 60214 - 2**: Tap-changers – Application guide: International Electrotechnical Commission: 1-44 p. 2004.

_____. **IEC 60099-5 2.0**. Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations: International Electrotechnical Commission: 1-145 p. 2013.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. Standard Requirements for Tap Changers. **IEEE Std C57.131-2012 (Revision of IEEE Std C57.131-1995)**, p. 1-73, 2012.

IXYS. **Breakover diodes**:. Application note H-6: 1-8 p. 2000.

_____. **High Voltage IGBT IXGH25N250**: 1-5 p. 2007.

_____. **High Voltage IGBT IXGH10N300**: 1-6 p. 2009.

JAUCH, E. T. Possible Effects of Smart Grid Functions on LTC Transformers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 47, n. 2, p. 1013-1021, 2011. ISSN 0093-9994.

KADUREK, P.; COBBEN, J. F. G.; KLING, W. L. Smart transformer for mitigation of voltage fluctuations in MV networks. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2011 10th International Conference on, 2011, 8-11 May 2011. p.1-4.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering**, v. 82, n. Series D, p. 35-45, 1960.

KLINGBIEL, A. G. **Tap switching protection circuit**. USA: Oneac Corporation. Patent U.S. 4860145: 1-10 p. 1989.

KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer engineering: design and practice**. Marcel Dekker, 2004. p. 451.

LARSSON, T.; INNANEN, R.; NORSTROM, G. Static electronic tap-changer for fast phase voltage control. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, 1997. p.TC3/4.1-TC3/4.3.

LAVIEVILLE, J. P.; WEBER, W.; RYADI, M.; SARAVOLAC, M. **On-load transformer tap changing system**. USA: Areva T&D SA. Patent U.S. 7355369 B2: 1-11 p. 2008.

LE, A. D. T.; MUTTAQI, K. M.; NEGNEVITSKY, M.; LEDWICH, G. Response coordination of distributed generation and tap changers for voltage support. *Power Engineering Conference*, 2007, 9-12 Dec. 2007. p.1-7.

LI, X.; LIAO, Q.; YIN, X.; XIE, J. A new on-load tap changing system with power electronic elements for power transformers. *International Conference on Power System Technology*, 2002. p.556-559.

LITTELFUSE. **Industrial High Energy Disc Varistors - BA-BB Series**: 5 p. 2013.

LOPEZ, J. V.; RODRIGUEZ, J. C. C.; FERNANDEZ, S. M.; GARCIA, S. M.; GARCIA, M. A. P. Analysis of fast onload multitap-changing clamped-hard-switching AC stabilizers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 2, p. 852-861, 2006a. ISSN 0885-8977.

_____. Synthesis of fast onload multitap-changing clamped-hard-switching AC stabilizers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 2, p. 862-872, 2006b. ISSN 0885-8977.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. Rio de Janeiro: 2005.

MCNUTT, P.; HAMBRICK, J.; KEESEE, M. Effects of photovoltaics on distribution system voltage regulation. *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009. p.001914-001917.

METALTEX. **Relé de uso geral e RF LPOX3RC3**. 2013.

MEYER, A. S.; VAN COLLER, J. Electronic tap changers for use with ultra-light rural distribution lines. *IEEE Africon*, 1999. p.909-912 vol.2.

MONROY-BERJILLOS, D.; GOMEZ-EXPOSITO, A.; BACHILLER-SOLER, A. A Lab Setup Illustrating Thyristor-Assisted Under-Load Tap Changers. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 3, p. 1203-1210, 2010. ISSN 0885-8950.

MONROY, D.; GOMEZ-EXPOSITO, A.; ROMERO-RAMOS, E. Improving the voltage regulation of secondary feeders by applying solid-state tap changers to MV/LV transformers. 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. p.1-6.

MOZINA, C. J. Impact of Smart Grids and Green Power Generation on Distribution Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 3, p. 1079-1090, 2013. ISSN 0093-9994.

NELSON, J. K. Some steps toward the automation of the design of composite dielectric structures. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 1, n. 4, p. 663-671, 1994. ISSN 1070-9878.

PASTEN, C.; SANTAMARINA, J. C. Energy and quality of life. **Energy Policy**, v. 49, n. 0, p. 468-476, 2012. ISSN 0301-4215. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512005617>>.

RIBEIRO, F. S. **Eletrificação rural de baixo custo**. 1993. p. 157 (Tese - Livro Docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ROBERTS, M. E.; ASHMAN, W. E. A thyristor assisted mechanical on-load tap changer. IEE Power Thyristor and their applications conference, 1969. p.185-192.

SHUTTLEWORTH, R.; TIAN, X.; FAN, C.; POWER, A. New tap changing scheme. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, v. 143, n. 1, p. 108-112, 1996. ISSN 1350-2352.

SIEMENS. **Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems**: 128 p. 2011.

SPATTI, D. H. **Sistema inteligente para controle de relés reguladores de tensão**. 2007. p. 119 (Dissertação de mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

WOODWARD, G. History of a single-phase high-voltage distribution system. **IEE Proceedings Science, Measurement and Technology**, v. 140, n. 3, p. 207-214, 1993. ISSN 0960-7641.

YOUSEF-ZAI, F. Q.; O'KELLY, D. Solid-state on-load transformer tap changer. **Electric Power Applications, IEE Proceedings -**, v. 143, n. 6, p. 481-491, 1996. ISSN 1350-2352.

APÊNDICE A – SISTEMA DE PROTEÇÃO

Os sistemas de proteção são atualmente um dos principais desafios à implementação de comutadores eletrônicos de *taps* em sistemas de distribuição. Isso muito se deve aos eventos extremos associados à operação das redes elétricas, sujeitas a: curtos-circuitos e manobras de sistemas de proteção, surtos de tensão devido à inclusão ou retirada de equipamentos indutivos ou bancos de capacitores e também descargas atmosféricas. Tais eventos são complicadores do desenvolvimento do sistema de proteção, uma vez que não existem dispositivos de proteção que aliem altas capacidades de extinção e as altas velocidades de atuação necessárias, a fim de proteger as chaves semicondutoras. Dessa forma, faz-se necessária uma operação coordenada de dispositivos rápidos de baixa energia de extinção, associados a dispositivos de alta energia e de operação mais lenta.

De modo a permitir a adequada operação dos comutadores eletrônicos de *taps*, os circuitos de proteção possuem por propósito: (i) garantir a partida do comutador eletrônico de *taps* quando da energização do transformador; (ii) proteger as chaves semicondutoras do comutador eletrônicos de *taps* contra sobrecorrentes quando da ocorrência de um de curto-circuito no secundário do transformador; (iii) proteger as chaves semicondutoras do comutador eletrônicos de *taps* contra sobretensões devido ao bloqueio sob corrente (*spikes* de tensão), sobretensões provenientes da rede de alimentação e sobretensões por operação inadequada do comutador eletrônicos de *taps*; e (iv) proteger os circuitos de potência e controle do comutador eletrônico de *taps* contra sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas ocorridas no lado de alta e/ou baixa tensão do transformador.

A topologia proposta neste trabalho é apresentada na Figura A.1, tendo por objetivo atender as especificações necessárias para o funcionamento do comutador eletrônico de *taps*. É possível identificar nesta figura a presença de proteções contra descargas atmosféricas tanto no lado primário quanto secundário do transformador, o circuito de partida e proteção contra curto-circuito no secundário é realizado por um relé de comutação sem carga (R_1), a proteção contra *spikes* é feita por capacitores em paralelo com as bobinas de *tap*, a proteção contra sobretensões é feita por um circuito de *crowbar* e a proteção contra surtos de tensão é realizada por um MOV conectado em paralelo com o circuito de *crowbar*. O projeto dos circuitos de proteção é apresentado a seguir, sendo baseado na análise da tensão e corrente sobre as chaves semicondutoras apresentada na seção 4.3.

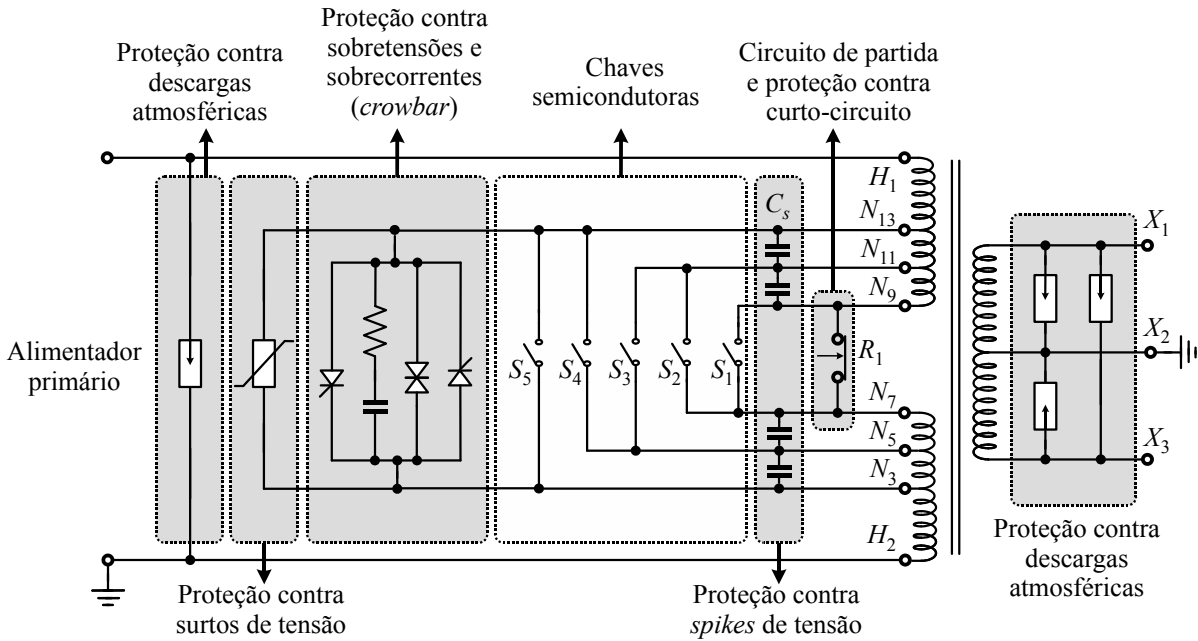


Figura A.1 – Esquemático das proteções do comutador eletrônico de *taps*.

A.1 Circuito de partida e proteção contra curto-circuitos no secundário

O circuito de partida e proteção contra curto-circuitos no secundário do transformador, representado na Figura A.1, é composto por um relé com contato NF e tem o propósito de garantir que os *taps* centrais do transformador estejam conectados no momento da energização do mesmo. Assim, evita-se que a tensão integral de alimentação do transformador (7967 V eficazes ou 11267 V de pico) seja aplicada sobre as chaves semicondutoras bidirecionais e também, impede que a corrente de *inrush* do transformador circule pelas chaves. Além disso, esse circuito de proteção tem por propósito realizar um *bypass* das chaves semicondutoras bidirecionais no caso da ocorrência de curto-circuito no secundário do transformador, assumindo a corrente de curto-circuito até que a proteção do alimentador primário atue, evitando desta forma que as chaves semicondutoras tenham de ser projetadas para conduzir a corrente de curto-circuito do transformador.

O acionamento deste relé é feito por um circuito similar ao desenvolvido para acionamento das chaves semicondutoras, porém, com potência maior, sendo que o sinal de controle é realizado através de um canal de fibra óptica. Uma característica da operação deste dispositivo é o fato de realizar a abertura dos contatos sem carga, o que evita a formação de arco elétrico. Pelo exposto, o relé empregado deve ter a capacidade de conduzir a corrente de curto-circuito do transformador e sustentar a tensão igual à observada entre os terminais de *tap* N_9 e N_7 durante a operação das chaves semicondutoras e não a tensão primária total.

A.1.1 Corrente de operação com curto-circuito no secundário do transformador

Curto-circuitos no secundário de transformadores elevam significativamente a corrente primária, sendo que quanto mais próximos do transformador ocorrem, maiores as correntes envolvidas. O pior caso para curto-circuito no secundário do transformador é o que ocorre diretamente nas buchas secundárias, onde as únicas impedâncias que limitam a corrente são aquelas referentes ao próprio transformador. Além disso, a indutância da rede elétrica de alimentação também corrobora na limitação da corrente de curto-circuito. Salienta-se, porém, que em função do desconhecimento *a priori* desse parâmetro, o mesmo será desconsiderado na análise apresentada, caracterizando, assim, uma análise conservativa de projeto.

A corrente de curto-circuito pode ser calculada através do conhecimento dos parâmetros do transformador encontrados na seção 3.4. Utilizando-se do modelo do transformador refletido ao primário, apresentado na Figura 3.6 (b) e desconsiderando-se a resistência de perdas no núcleo, pode-se descrever a corrente eficaz que circula pelo circuito primário em casos de falta no secundário do transformador, quando o relé de proteção R_1 deve entrar em operação. Assim, as impedâncias para o circuito equivalente do transformador para esta condição são dadas pela Tabela 3.6 e o circuito do modelo refletido ao primário com curto-circuito no secundário é apresentado na Figura A.2.

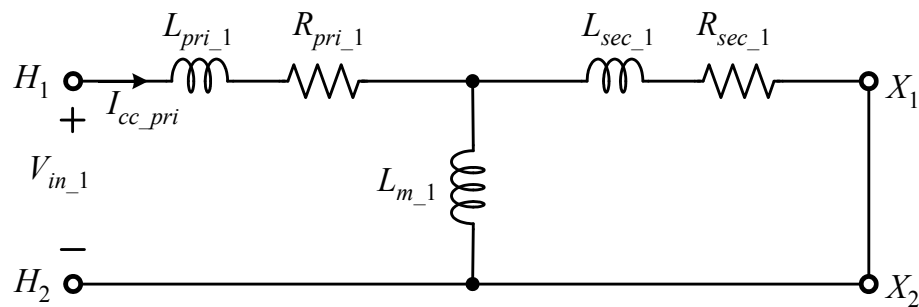


Figura A.2 – Modelo refletido ao primário com curto-circuito no secundário.

Substituindo os parâmetros da Tabela 3.6 no circuito da Figura A.2, pode-se encontrar a corrente de pico primária do transformador (I_{cc_pri}) dada pela equação (5.1).

$$I_{cc_pri} = \left| \frac{\sqrt{2} \cdot V_{in_1}}{\left(R_{pri_1} + j\omega L_{pri_1} \right) + \frac{\left(R_{sec_1} + j\omega L_{sec_1} \right) j\omega L_{m_1}}{\left(R_{sec_1} + j\omega L_{sec_1} \right) + j\omega L_{m_1}}} \right| \quad (5.1)$$

Resolvendo a equação (5.1), onde ω é a velocidade angular da rede cuja frequência é de 60 Hz, tem-se que a máxima corrente que circula pelas chaves é dada pela equação (5.2).

$$I_{cc_pri} = 35,51 \text{ A} \quad (5.2)$$

A.1.2 Tensão sobre o relé

Conforme comentado, o relé empregado deve sustentar a mesma tensão observada entre os terminais de *tap* N_9 e N_7 durante operação normal do transformador, ou seja, a tensão que aparece sobre a chave S_1 . Dessa forma, a tensão sobre o relé pode ser calculada como apresentado na seção 4.3.1. Considerando a equação (4.1), a máxima tensão de pico sobre o relé (V_{rele}) em operação normal é dada por (5.3), ocorrendo quando a chave S_5 está fechada.

$$V_{rele} = \frac{\sqrt{2} \cdot 7967 |5-1| \cdot 1,575}{(2 \cdot 14,9558 + 4 \cdot 1,575) - (5-1) \cdot 1,575} = 2373 \text{ V} \quad (5.3)$$

A.1.3 Especificação do relé de proteção

A partir de uma pesquisa de mercado, constatou-se a inexistência de contadoras com contatos NF para os níveis de corrente e tensão requeridos. Em função das condições de operação requeridas desse dispositivo de proteção, relés podem ser empregados, haja vista que não há exigência de uma câmara de extinção de arco elétrico, uma vez que as chaves semicondutoras são acionadas antes da abertura do mesmo. Assim, a partir dos níveis de corrente e tensão definidos anteriormente, o relé apresentado na Figura A.3 foi selecionado. As principais especificações desse relé são sumarizadas na Tabela A.1.

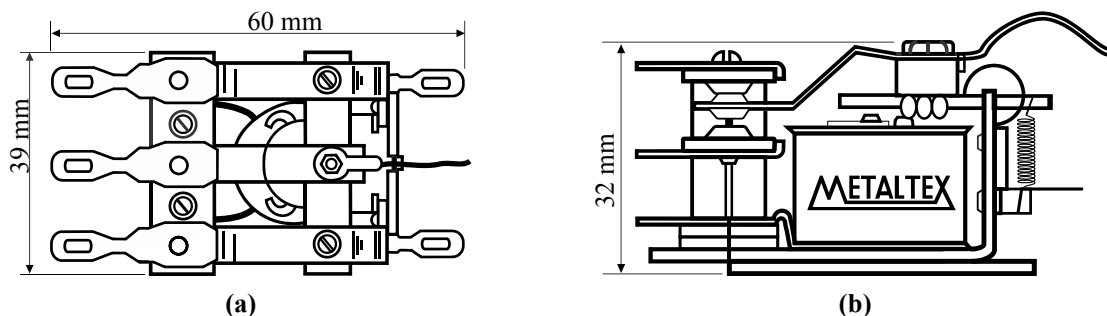


Figura A.3 – Relé de proteção selecionado, modelo LPOX3RC3 (METALTEX, 2013). (a) Vista Superior. (b) Vista lateral.

Tabela A.1 – Especificações do relé modelo LPOX3RC3 (METALTEX, 2013).

| Parâmetro | Valor | Observação |
|--------------------------------------|----------------|------------------|
| Contatos | 03 NA e 03 NF | --- |
| Corrente máxima nos contatos (CA) | 15 A / contato | Valor eficaz |
| Capacidade de bloqueio (CA) | 5000 V | Tensão de pico |
| Tensão de alimentação da bobina (CC) | 24 V | --- |
| Potência consumida pela bobina (CC) | 6,4 W | --- |
| Corrente requerida pela bobina (CC) | 80 mA | --- |
| Tempo para comutação | 10 – 15 ms | Obtido de ensaio |

A.2 Circuito de proteção contra sobretensões de curta duração (*spikes*)

O circuito de proteção contra sobretensões de curta duração tem a finalidade de proteger as chaves semicondutoras do comutador eletrônico de *taps* contra eventos que possam ocorrer no momento da comutação de um *tap* para outro, quando o acionamento do *tap* subsequente ocorre previamente ao bloqueio do *tap* atual (sobreposição de comandos). A sobreposição na comutação ocasiona a circulação de uma corrente entre as chaves semicondutoras envolvidas, a qual é limitada apenas pela indutância de dispersão do transformador e pelo tempo de sobreposição.

Assim, quando a chave em operação for desconectada, essa corrente deverá ser desviada para um circuito que absorva a energia acumulada na indutância de dispersão do enrolamento de *tap*, evitando uma sobretensão nas chaves semicondutoras. Um circuito com esse propósito, composto por capacitores entre os *taps* do transformador foi apresentado em (BAUER e DE HAAN, 1998a) e pode ser visualizado na Figura A.1.

A corrente que circula no enrolamento de *tap* durante a sobreposição tem valor máximo dado por I_{cc_pk} , sendo calculada pela equação (4.57). Considerando um tempo de sobreposição das chaves $\Delta t_{overlap}$ de 10 μ s, a corrente de pico I_{cc_pk} é dada por 0,5627 A. A energia armazenada no enrolamento de *tap*, E_{Ltap} , devido à corrente I_{cc_pk} , é dada por (5.4).

$$E_{Ltap} = \frac{1}{2} L_{tap} \cdot I_{cc_pk}^2 \quad (5.4)$$

Essa energia deve ser absorvida pelo capacitor de proteção contra *spikes* (C_s), o que ocasionará a elevação da tensão de uma razão ΔV_c , conforme (5.5).

$$E_c = \frac{1}{2} C_s \cdot \Delta V_c^2 \quad (5.5)$$

Igualando as equações (5.4) e (5.5) e considerando $\Delta V_c = V_o \cdot (1 + \Delta V_\%)$, o valor mínimo do capacitor de proteção pode ser calculado por (5.6).

$$C_s = L_{tap} \left(\frac{I_{cc_pk}}{\Delta V_c} \right)^2 \quad (5.6)$$

Onde V_o é a tensão sobre o capacitor no momento da comutação dos *taps* e $\Delta V_\%$ é a máxima sobre-elevação percentual de tensão permitida. Uma análise conservativa pode ser feita considerando a tensão V_o como sendo a menor tensão de pico no enrolamento de *tap* em operação normal. Essa consideração indica que quanto menor a tensão sobre o capacitor, maior deve ser o valor da capacitância a fim de absorver a energia armazenada na indutância de dispersão durante o processo de comutação.

A partir disso, é possível obter-se a mínima capacitância que atende às condições de operação requeridas. Sendo que a condição de menor tensão de pico sobre os enrolamentos de *tap* em operação normal é obtida para a condição de maior relação de transformação primária (chave S_1 está acionada) como mostrado em (5.7). Com isso, (5.6) pode ser reescrita em (5.8).

$$V_o = \sqrt{2} \cdot V_{in_1} \cdot \sqrt{\alpha_3} \quad (5.7)$$

$$C_s = L_{tap} \left(\frac{I_{cc_pk}}{\sqrt{2} \cdot V_{in_1} \cdot \sqrt{\alpha_3} \cdot (1 + \Delta V_\%)} \right)^2 \quad (5.8)$$

Considerando uma máxima elevação percentual da tensão admissível sobre os capacitores de 10%, o valor do capacitor C_s pode ser calculado por (5.9).

$$C_s = 8,7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{0,5627}{\sqrt{2} \cdot 7967 \cdot \sqrt{0,002067} \cdot (1 + 0,1)} \right)^2 = 8,68 \text{ nF} \quad (5.9)$$

A partir do valor calculado em (5.9), pode-se usar um capacitor comercial de 10 nF, o qual deve suportar a maior tensão que aparece nos enrolamentos de *tap* (V_{C_max}), que ocorre para a condição de menor relação de transformação primária (chave S_5 está acionada), dada por (5.10).

$$V_{C_max} = \sqrt{2} \cdot V_{in_1} \cdot \left(\frac{N_t}{N_{total} - K \cdot N_t} \right) = \sqrt{2} \cdot 7967 \cdot \left(\frac{1,575}{36,21 - 4 \cdot 1,575} \right) = 593,3 \text{ V} \quad (5.10)$$

A.2.1 Efeito da inclusão dos capacitores contra *spikes* de tensão

A inclusão de capacitores em paralelo com os enrolamentos de *tap* tem o objetivo de dar caminho à corrente das indutâncias de dispersão destes enrolamentos durante o processo de comutação, drenando a corrente dos enrolamentos e evitando *spikes* de tensão sobre as chaves, como mostrado anteriormente. Entretanto, a inclusão destes capacitores faz com que surjam caminhos de circulação de corrente através dos enrolamentos de *tap* do transformador. Essas correntes circulam continuamente através dos enrolamentos de *tap* e dos capacitores, o que aumenta as perdas nestes enrolamentos. A Figura A.4 mostra os caminhos de circulação de corrente que surgem devido à inclusão dos capacitores contra *spikes* de tensão.

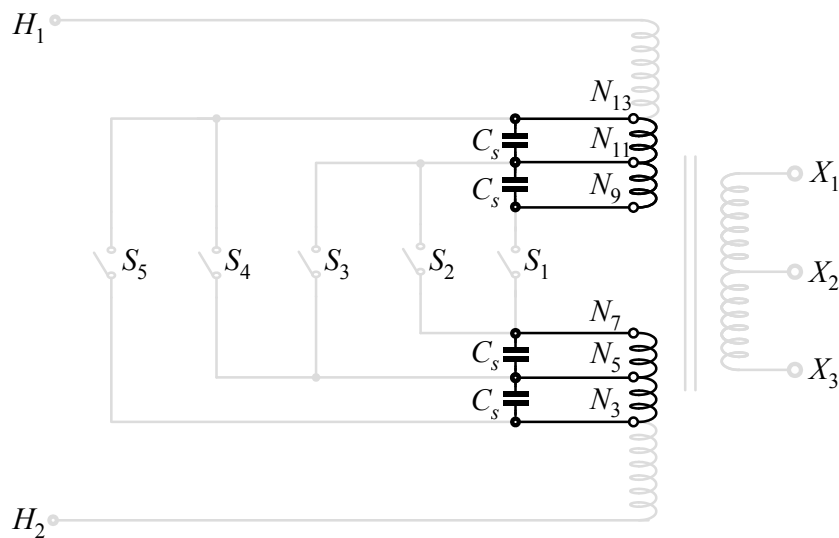


Figura A.4 – Caminhos de circulação das correntes dos capacitores contra *spikes* de tensão.

A condição de maior corrente circulante nos capacitores contra *spikes* (C_s) ocorre quando existe a maior tensão nos enrolamentos de *tap*. Isso ocorre para a condição de menor relação de transformação primária (quando a chave S_5 está fechada). Nesse caso, a corrente eficaz que circula nos capacitores é dada por (5.11).

$$I_C = \frac{V_{in-1} \left(\frac{N_t}{N_{total} - K \cdot N_t} \right)}{R_{tap} + j\omega L_{tap} + \frac{1}{j\omega C_s}} \quad (5.11)$$

Substituindo os valores em (5.11) e calculando o módulo da corrente, tem-se:

$$|I_C| = \sqrt{\frac{\left[V_{in-1} \cdot \left(\frac{N_t}{N_{total} - K \cdot N_t} \right) \right]^2}{R_{tap}^2 + \left(j\omega L_{tap} + \frac{1}{j\omega C_s} \right)^2}} = 1,582 \text{ mA} \quad (5.12)$$

A perda máxima resultante por enrolamento de *tap* devido à corrente circulante no capacitor contra *spikes* é dada por:

$$P_{tap} = I_C^2 \cdot R_{tap} = 15,18 \mu\text{W} \quad (5.13)$$

A.3 Circuito de *crowbar*

O circuito de *crowbar* tem a função de proteger o comutador eletrônico de *taps* contra sobreensões e sobrecorrentes durante a operação do sistema, atuando de forma a desviar o caminho da corrente nesses casos. A utilização de dispositivos semicondutores permite que este circuito apresente rápida atuação contra estes eventos. Neste sentido, duas topologias de *crowbar* são comumente empregadas na proteção de comutadores de *taps*, sendo ambas apresentadas na Figura A.5. O circuito de *crowbar* utilizado no presente trabalho é o mesmo apresentado por (BAUER e DE HAAN, 1997).

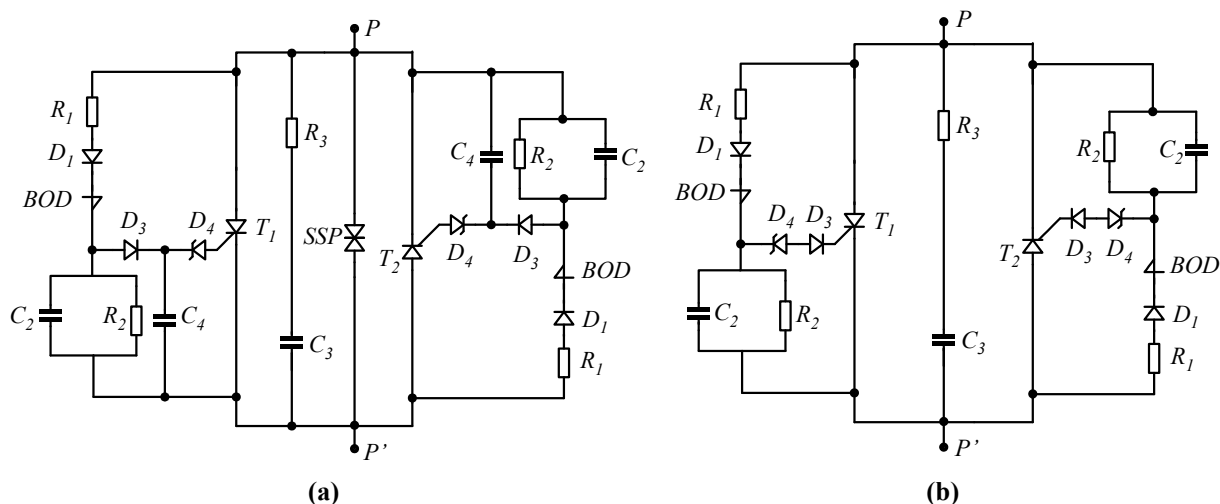


Figura A.5 – Circuitos de *crowbar* empregados em comutadores eletrônicos de *taps*. (a) Circuito apresentado em (BAUER e DE HAAN, 1997). (b) Circuito apresentado em (IXYS, 2000).

A operação do circuito de *crowbar* pode ocorrer de duas maneiras: por atuação externa, acionada por comando do circuito de controle e por atuação automática em casos de sobretensão. A operação por atuação externa ocorre em casos de sobrecorrente sobre as chaves semicondutoras do comutador eletrônico de *taps*, nesse caso, um sinal vindo do sistema de controle aciona o circuito de *crowbar* desviando a corrente dos IGBTs para os tiristores deste circuito. A operação por sobretensão ocorre pela atuação de um *Break Over Diode* (BOD), o qual entra em condução sempre que sua tensão de operação é ultrapassada, desviando assim a corrente dos IGBTs para os tiristores do circuito de *crowbar*.

Quando a tensão sobre o BOD atinge o valor de especificação deste dispositivo, o mesmo entra em condução e uma tensão aparece sobre o resistor R_2 , que resulta no acionamento dos tiristores T_1 ou T_2 , dependendo do ciclo da rede em que ocorra. Entretanto, o BOD não apresenta capacidade de bloqueio de tensão reversa, sendo necessária a inclusão do diodo D_1 em série com o mesmo, o qual geralmente vem encapsulado juntamente com o BOD. Este dispositivo apresenta limitada capacidade de condução de corrente, sendo utilizado apenas para o acionamento dos tiristores T_1 e T_2 , por esta razão, o resistor R_1 é utilizado para limitar a corrente que por ele circula (BAUER e DE HAAN, 1997).

Os componentes R_2 e C_2 são utilizados como proteção contra acionamento parasita, tendo valores entre $100\ \Omega$ e $1000\ \Omega$ e $22\ \text{nF}$ a $47\ \text{nF}$, respectivamente (IXYS, 2000). O resistor R_3 e o capacitor C_3 representam a rede de *snubber* dos tiristores. O diodo D_3 e o diodo Zener D_4 tem a função de proteger o *gate* dos tiristores T_1 e T_2 . Em (BAUER e DE HAAN, 1997) é proposta a utilização do capacitor C_4 , que tem a função de aumentar a velocidade de abertura dos tiristores. Além disso, é utilizado um *Silicon Surge Protector* (SSP) que atua na limitação

da tensão nos terminais P e P' , esse dispositivo apresenta resposta mais rápida que o BOD, dessa forma, o mesmo atua limitando a tensão que aparece no circuito de *crowbar* durante eventos de sobretensão. Essa limitação ocorre até que o BOD entre em operação e acione os tiristores a fim de desviar o caminho da corrente primária pelo *crowbar*.

Para o projeto dos dispositivos utilizados no circuito de *crowbar*, as tensões de atuação do SSP e do BOD devem ser inferiores à tensão suportada pelos IGBTs (3 kV neste caso) e pelos tiristores T_1 e T_2 , mas não devem ser inferiores à tensão normal de operação da chave S_5 do comutador eletrônico de *taps* – que tem o valor de 1,96 kV como mostrado em (5.14).

$$V_{SS} = \frac{\sqrt{2} \cdot 7967 |1-5| \cdot 1,575}{(2 \cdot 14,9558 + 4 \cdot 1,575) - (1-1) \cdot 1,575} = 1960 \text{ V} \quad (5.14)$$

Outro fator importante a ser considerado no projeto dos dispositivos utilizados no circuito de *crowbar* é a capacidade de condução de corrente de T_1 , T_2 , a qual deve ser superior à condição de curto-circuito no circuito-secundário do transformador, cuja corrente é dada pela equação (5.2), com valor de 35,51 A. Com isso, é possível definir os dispositivos a serem empregados no circuito de *crowbar* conforme apresentado na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Especificações dos dispositivos do *crowbar*.

| Dispositivo | Características | Modelo |
|-----------------------|------------------------------|------------------------|
| T_1 e T_2 | 2x(2500 V, 18 A – 90°C) | IXYS - CS 20-25 MOF1 |
| BOD | 2300 V | IXYS - IXBOD 1 -23R(D) |
| SSP | 2400 V, 260 A/10 μ s | ABB - 5SSB 26X2300 |
| R_1 | 24 V, 3x15 A | --- |
| R_2 , C_2 e C_4 | 470 Ω , 47 nF, 470 nF | --- |
| D_3 | 80 mA | --- |
| D_4 | 5 V | --- |
| R_3 e C_3 | 100 k Ω , 470 nF | --- |

O nível de tensão dos componentes do circuito de *crowbar* é apresentado na Figura A.6, apresentando a faixa de atuação de cada componente do circuito e os limites de tensão a serem observados, seja para a proteção dos tiristores do circuito de *crowbar*, quanto para os IGBTs do comutador eletrônico de *taps*.

Para o BOD selecionado, o mesmo possui diodo interno, não necessitando sua inclusão para o correto funcionamento do mesmo. Quanto ao SSP, as principais características

de operação deste dispositivo são apresentadas na Tabela A.3 e sua curva característica corrente x tensão é apresentada na Figura A.7.

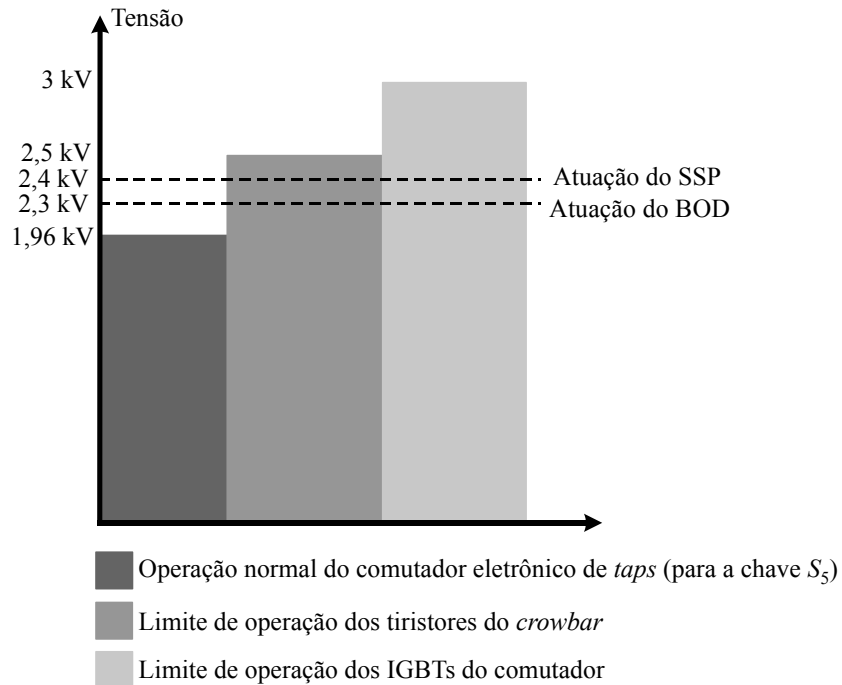


Figura A.6 – Tensões de operação dos dispositivos do *crowbar*.

Tabela A.3 – Especificações do SSP 5SSB 26X2300 (ABB, 1995b).

| Tensão simétrica de avalanche (V_R) | Máxima corrente para meio ciclo de onda senoidal (I_{RM}) | | | | Máxima corrente de avalanche para 10 pulsos de 100 μ s |
|---|---|---------------|--------|---------|--|
| | 1x10 μ s | 1x100 μ s | 1x1 ms | 1x10 ms | |
| 2350 \pm 50 V | 260 A | 67 A | 18 A | 3,6 A | 41 A |

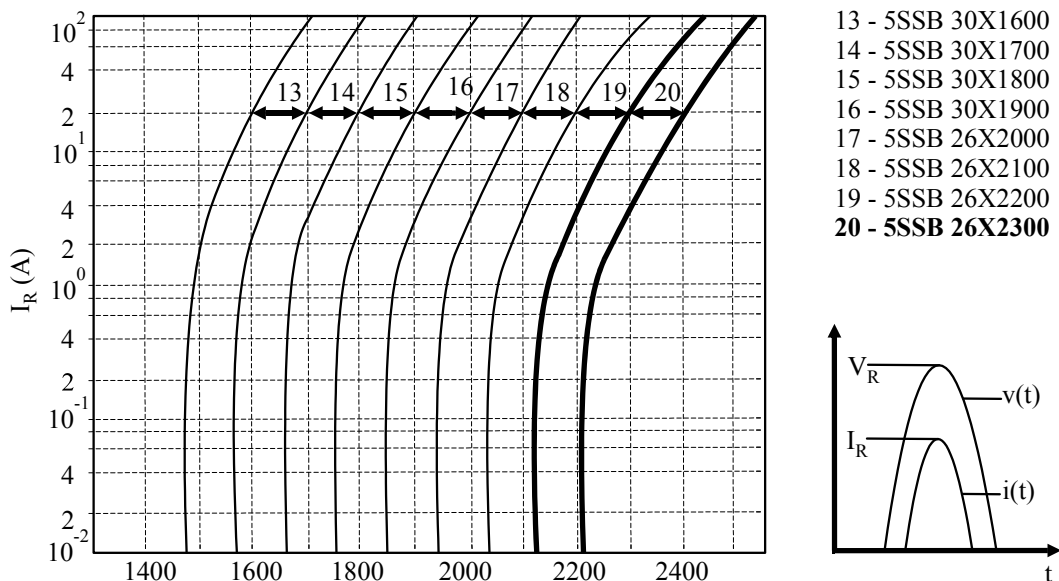


Figura A.7 – Corrente de avalanche (I_R) em função da tensão de avalanche (V_R) para pulsos senoidais com período $t_p \leq 20 \mu$ s. Alterado de (ABB, 1995b).

A.4 Causas de sobretensões na rede de distribuição primária

O sistema de proteção contra sobretensões na rede primária tem por objetivo principal a proteção do comutador eletrônico de *taps* contra eventos causados por: descargas atmosféricas, ligação ou desligamento de cargas indutivas e capacitivas ao longo da rede e manobras de dispositivos de proteção que ocasionem elevação da tensão da rede. Tais eventos possuem grande potencial de danos a dispositivos eletrônicos, sendo assim, a consideração dos mesmos para o desenvolvimento de um sistema de proteção é de grande importância.

A.4.1 Sobretensões causadas por descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas são uma das principais causas da queima de equipamentos conectados aos sistemas de distribuição. A alta energia característica desses eventos faz com que circulem elevadas correntes em direção à terra através de dispositivos de proteção, que têm a função de restabelecer o funcionamento normal do sistema. Entretanto, a dissipação de energia não ocorre instantaneamente, resultando em elevações dos níveis de tensão. Em casos onde a descarga atmosférica não atinge diretamente a rede de distribuição, mas as vizinhanças desta, as correntes que se propagam pelo solo podem causar elevações dos níveis da tensão de referência de terra dos transformadores e demais equipamentos das redondezas. Além disso, outros efeitos podem ser verificados, como geração de campos elétricos e magnéticos, ocasionando acoplamentos indutivos e capacitivos, que resultam em sobretensões na rede (GRIGSBY, 2001).

Os transformadores de distribuição são projetados para suportar certos limites de sobretensão por determinado período de tempo. Sendo assim, a proteção por supressor de surtos geralmente é suficiente nesses casos. No entanto, para comutadores eletrônicos de *taps*, essa proteção pode não ser suficiente para garantir o funcionamento do sistema após sofrer uma descarga atmosférica, necessitando, assim, de proteções complementares que limitem os níveis de tensão sobre os dispositivos eletrônicos.

A.4.2 Sobretensões ocasionadas por manobras na rede elétrica

As manobras realizadas na rede elétrica, envolvendo ligação e desligamento de equipamentos indutivos ou capacitivos também podem causar sobretensões na rede. No caso de

cargas indutivas, sua saída de operação pode elevar os níveis de tensão no PAC devido à redução da corrente e da queda de tensão resultante. No caso dos capacitores, pode haver a excitação de frequências de ressonância com a indutância da linha na conexão ou retirada de bancos de capacitores, o que pode elevar significativamente o nível de tensão (GREENWOOD, 1991).

Além disso, a ação de dispositivos de proteção, como disjuntores e fusíveis e dispositivos de seccionamento sob carga, também causam elevações instantâneas do valor da tensão (GRIGSBY, 2001). Essas sobretensões se propagam ao longo da rede, podendo causar danos aos equipamentos a ela conectados. Desse modo, faz-se necessário um sistema de proteção que garanta a integridade da operação do comutador de *taps* eletrônico também para estes eventos.

A.4.3 Proteções contra sobretensões de modo comum e modo diferencial

As sobretensões podem ocorrer de duas formas: sobretensão de modo comum e de modo diferencial. Sobretensões de modo comum podem aparecer nos condutores de fase e neutro da rede elétrica. Estas tensões são referenciadas à terra e portanto, todos os sistemas de aterramento estão sujeitos a sua presença. Sobretensões de modo diferencial ocorrem entre fases, ou entre fase e neutro; possuem grande potencial de causar danos aos equipamentos conectados à rede, especialmente em equipamentos sensíveis (eletro-eletrônicos, por exemplo).

Um surto de tensão causado por uma descarga atmosférica inevitavelmente causa uma sobretensão de modo comum e pode também gerar uma sobretensão de modo diferencial. A forma de solucionar tal problema é através da aplicação de proteções de modo comum e diferencial de maneira combinada. A Figura A.8 apresenta os métodos de proteção em sistemas monofásicos contra sobretensões.

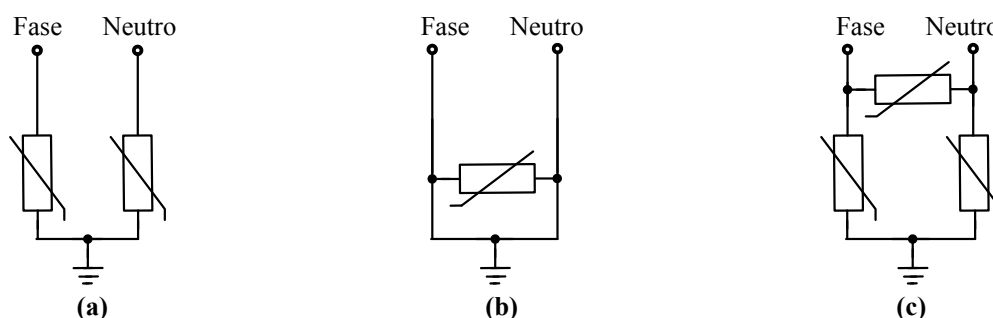


Figura A.8 – Métodos de proteção contra sobretensões. (a) Modo comum, (b) Modo diferencial, (c) Modo comum e diferencial.

A.5 Proteção contra sobretensão por supressor de surto

Supressores de surtos são dispositivos de proteção cuja função é drenar a energia proveniente de sobretensões em direção à terra, evitando a danificação de dispositivos conectados à rede elétrica. Seu funcionamento é comparado ao de um resistor não-linear, como mostra a Figura A.9, comportando-se como um circuito aberto para níveis de tensão normais e como um curto-circuito em condições de sobretensão. A Figura A.10 demonstra a atuação do dispositivo com relação às condições de falta em comparação com a máxima tensão de operação de dispositivos conectados à rede.

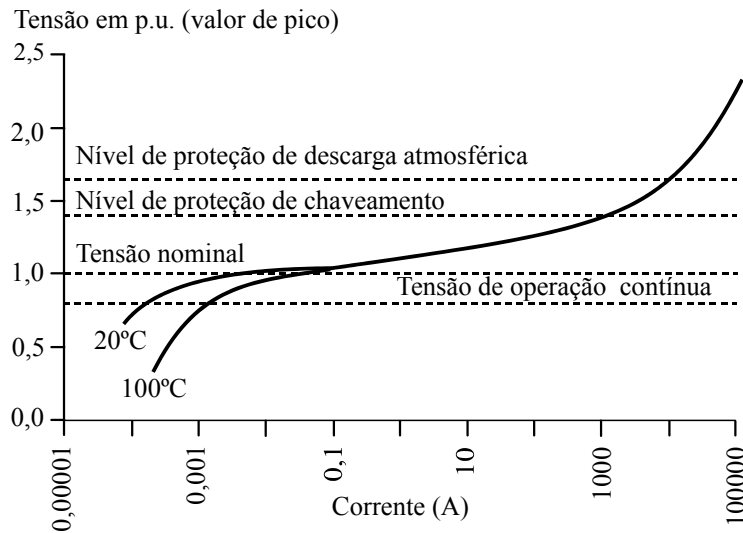


Figura A.9 – Curva VxI típica de um supressor de surtos. Alterado de: (ABB, 1995a).

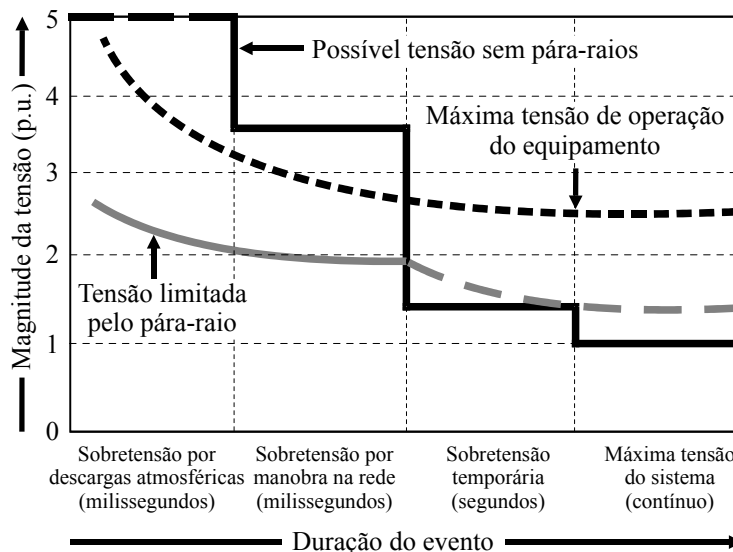


Figura A.10 – Representação das magnitudes da tensão pela duração do evento. Alterado de: (SIEMENS, 2011).

A.5.1 Especificação do supressor de surtos de média tensão

A escolha de supressor de surtos pode ser realizada com base na norma IEC 60099-5 2.0 (IEC, 2013), que traz as especificações mais importantes a serem consideradas na escolha destes dispositivos, sendo elas: a mais alta tensão do sistema (U_s), a frequência da rede, o equipamento a ser protegido (transformador, cabo, gerador, etc.), o nível de isolamento do equipamento a ser protegido, condições ambientais de instalação do equipamento, entre outros (ABB, 2011). De acordo com as características do transformador e da rede em questão, foi selecionado o supressor de surtos modelo POLIM-D 10-03 de fabricação da ABB (ABB, 2013), sendo que o mesmo tem as características principais apresentadas na Tabela A.4.

Tabela A.4 – Especificações do supressor de surtos de média tensão (ABB, 2013).

| Tensão de operação contínua (U_c) | Tensão de proteção (U_p) | Corrente impulsiva (I_{hc} 4/10 μs) | Corrente nominal de descarga (I_n 8/20 μs) |
|---|--|--|---|
| 10 kV (eficaz) | 12,5 kV (eficaz) | 100 kA (pico) | 10 kA (pico) |

A.5.2 Especificação do supressor de surtos de baixa tensão

Em eventos transitórios, sobretensões podem ser refletidas de um lado para outro do transformador, seja por indução magnética da corrente resultante, ou devido aos acoplamentos capacitivos do transformador (ABB, 2011). Isso pode ser crítico em uma rede que emprega um comutador eletrônico de *taps*, sendo assim, faz-se necessária, além da proteção de supressor de surtos no circuito primário, um sistema de proteção equivalente no lado secundário do transformador, evitando que eventos ocorridos neste lado possam causar danos sobre os dispositivos instalados no primário.

Seguindo a mesma metodologia empregada para a determinação do supressor de surtos do circuito primário, foram especificados dispositivos a serem empregados no circuito secundário do transformador (ver Figura A.1). Para proteção fase-terra, foi definido o modelo LOVOS – 5/280 e para proteção fase-fase, o modelo LOVOS – 5/440, ambos de fabricação da ABB (ABB, 2009), os quais possuem as principais características resumidas na Tabela A.5.

Tabela A.5 – Especificações do supressor de surtos de baixa tensão (ABB, 2009).

| Modelo | Tensão de operação contínua (U_c) | Nível de tensão de proteção (U_p) | Corrente máxima de descarga (8/20 μ s) | Corrente nominal de descarga (8/20 μ s) |
|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---|
| 5/280 | 280 V (eficaz) | 1100 V (eficaz) | 25 kA | 5 kA |
| 5/440 | 440 V (eficaz) | 1800 V (eficaz) | 25 kA | 5 kA |

A.6 Proteção contra surtos por *Metal Oxide Varistor* (MOV)

Os supressores série de surto de tensão CA são varistores industriais de alta energia (MOV), utilizados com o intuito de proteger equipamentos. Esses dispositivos suportam elevadas correntes, na ordem e dezenas de milhares de Ampères, tendo funcionamento comparável aos supressores de surtos, porém, geralmente possuem atuação mais rápida e tendem a suportar menor energia de desvio, apesar de apresentarem tensão de operação significativamente menor (LITTELFUSE, 2013). Dessa forma, a atuação do MOV acaba sendo complementar ao supressor de surtos, que possui atuação mais lenta, mas que absorve maior energia do evento de sobretensão.

O dispositivo MOV a ser instalado em paralelo com o circuito de *crowbar* do comutador eletrônico de *taps* deve operar nos mesmos níveis de tensão deste circuito, ou seja, tensões superiores a 1,96 kV e inferiores a 2,5 kV, de modo a não interferir na operação do transformador em regime normal e não permitir a queima dos tiristores do *crowbar* e das chaves semicondutoras. Os dispositivos MOV de alta energia, geralmente, apresentam resposta mais lenta que o SSP, porém, apresenta maior capacidade de eliminação de distúrbios. Dessa forma, ambos os dispositivos atuam de maneira complementar e ao mesmo tempo redundante na extinção de surtos de tensão e limitação da tensão sobre o *crowbar*, permitindo assim que o BOD coloque os tiristores do *crowbar* em operação.

Dos dispositivos disponíveis no mercado, o modelo V242BB60 - BB Series[®], de fabricação da Littelfuse (LITTELFUSE, 2013), pode ser empregado para essa aplicação, apresentando tensão de operação nominal de 2400 V. As principais características de operação deste dispositivo são sumarizadas na Tabela A.6. A curva característica que relaciona a máxima tensão de pico com a máxima corrente de pico de operação deste dispositivo é apresentada na Figura A.11. A curva de capacidade de surto repetitiva, que

relaciona a corrente de surto para um dado período de duração do evento é apresentada na Figura A.12.

Tabela A.6 – Especificações do MOV - V242BB60 (LITTELFUSE, 2013).

| Tensão de operação contínua (U_c) | Energia drenada (2 ms) | Máxima corrente de pico (8/20 μ s) | Máxima tensão de grampeamento a 200 A (8/20 μ s) | Capacitância típica (a 1 MHz) |
|---------------------------------------|------------------------|--|--|-------------------------------|
| 2400 V (eficaz) | 8600 J | 70 kA | 6200 V (pico) | 1000 pF |

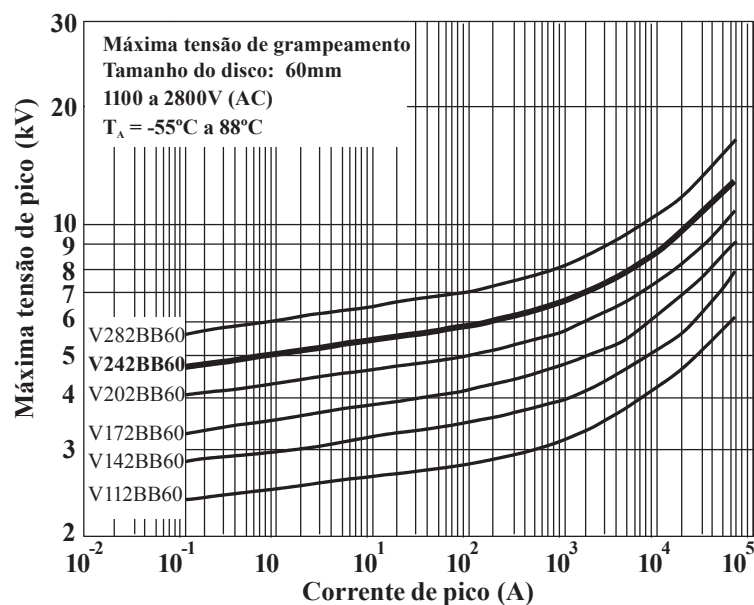


Figura A.11 – Curva característica $V \times I$ do dispositivo MOV. Alterado de (LITTELFUSE, 2013).

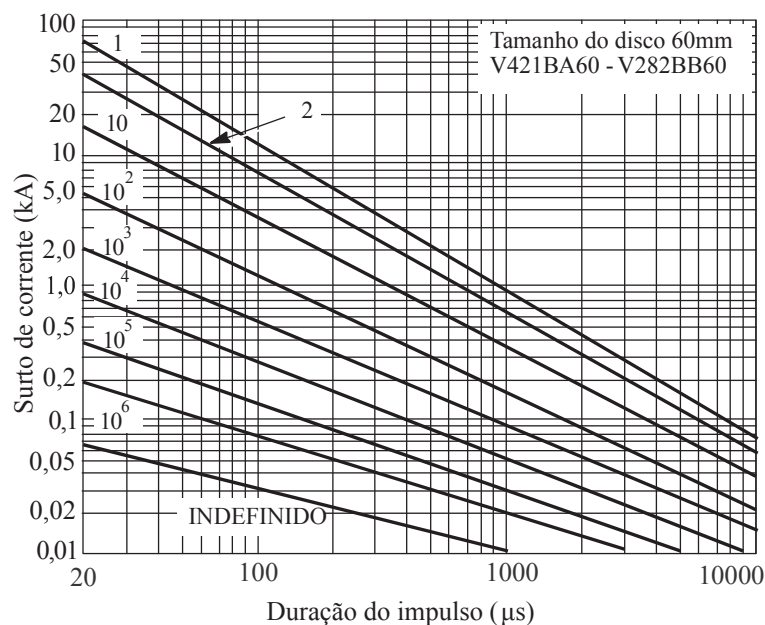


Figura A.12 – Capacidade de surto repetitivo do dispositivo MOV. Alterado de (LITTELFUSE, 2013).

A.7 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a topologia de proteção proposta para o comutador eletrônico de *taps*, bem como os principais problemas envolvendo a operação destes sistemas quando conectados aos sistemas de distribuição. Verifica-se que a natureza dos distúrbios que ocorrem nestes sistemas tende a dificultar o projeto do sistema de proteção, uma vez que os dispositivos comerciais aplicáveis na mitigação destes distúrbios muitas vezes não possuem a capacidade de operação necessária. Dessa maneira, faz-se necessário o emprego de dispositivos de ação complementar, aliando dispositivos de alta capacidade de extinção de distúrbios e reduzida velocidade de operação, com dispositivos de menor capacidade de extinção e com velocidade de atuação mais elevada.

Do sistema proposto foram implementados: os dispositivos de proteção que realizam a partida do transformador e a proteção contra curto-circuito no secundário e o sistema de proteção contra *spikes* de tensão entre as chaves. Porém, os dispositivos de proteção contra descargas atmosféricas, surtos de tensão e o sistema de *crowbar* foram apenas dimensionados, não sendo implementados praticamente. Cabe ressaltar que a implementação destes sistemas requer dispositivos especiais para tensão de operação elevada, os quais necessitam um tempo significativo para aquisição e importação. Devido a estes entraves no processo de aquisição destes dispositivos sua implementação não pode ser efetuada a tempo, porém, importantes avanços na definição de uma topologia de proteção foram alcançados neste trabalho.

Outro fator não considerado é a operação coordenada dos dispositivos de proteção, sendo que este estudo depende de condições de ensaio especiais que permitam a avaliação do transformador e dos demais dispositivos envolvidos no sistema de proteção frente às condições estabelecidas nos ensaios aplicáveis aos transformadores de distribuição. Sendo assim, o estudo de operação coordenada dos dispositivos de proteção caracteriza-se como uma necessidade para o emprego de comutadores eletrônicos de *taps* em sistemas de distribuição.

APÊNDICE B – DETALHAMENTO DA ANÁLISE DO PROCESSO DE COMUTAÇÃO

B.1 Análise da corrente de sobreposição das chaves no processo de comutação

Na seção 4.3.3 foi apresentado o circuito de avaliação das correntes sobre as chaves durante o processo de comutação. A partir da análise apresentada, chegou-se ao circuito genérico que representa o comportamento das correntes tanto no primário quanto no terciário do transformador durante o processo de comutação, o qual é dado pela Figura 4.9. Porém, a solução do circuito não é detalhada, de forma que essa seção apresenta a obtenção da equação (4.31), que descreve as correntes do circuito genérico de forma matricial e da equação (4.41) e (4.49), que descrevem, respectivamente, as correntes através do circuito primário e terciário do transformador.

Tomando o circuito da Figura 4.9 como referência, as correntes $I_{1_ref}(s)$, $I_{2_ref}(s)$ e $I_{3_ref}(s)$ podem ser encontradas aplicando-se a LKT nas três malhas do circuito, como mostrado a seguir. Dessa forma, os somatório das tensões nas malhas são dadas como:

$$\left[R_{eq_ref} + s(L_{eq_ref} + L_{m_ref}) \right] I_{1_ref}(s) - sL_{m_ref} \cdot I_{2_ref}(s) = V_{in_ref}(s) \quad (\text{A.1})$$

$$\left[R_{sec_ref} + R_{load_ref} + s(L_{sec_ref} + L_{load_ref}) \right] (I_{2_ref}(s) - I_{3_ref}(s)) + sL_{m_ref} (I_{2_ref}(s) - I_{1_ref}(s)) = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\left[R_{sec_ref} + R_{load_ref} + s(L_{sec_ref} + L_{load_ref}) \right] (I_{3_ref}(s) - I_{2_ref}(s)) + (R_{tap_ref} + sL_{tap_ref}) I_{3_ref}(s) = 0 \quad (\text{A.3})$$

É possível reescrever (A.1) a (A.3) na forma matricial, como expresso em (4.31). A solução das correntes é obtida analiticamente pelo método de substituição de variáveis como segue. Isolando $I_{3_ref}(s)$ em (A.3), chega-se em:

$$I_{3_ref}(s) = \frac{I_{2_ref}(s) \left[R_{sec_ref} + R_{load_ref} + s(L_{sec_ref} + L_{load_ref}) \right]}{R_{sec_ref} + R_{load_ref} + R_{tap_ref} + s(L_{sec_ref} + L_{load_ref} + L_{tap_ref})} \quad (\text{A.4})$$

Isolando $I_{2_ref}(s)$ em (A.1), chega-se em:

$$I_{2_ref}(s) = \frac{-V_{in_ref}(s) + I_{1_ref}(s) \left[R_{eq_ref} + s(L_{eq_ref} + L_{m_ref}) \right]}{sL_{m_ref}} \quad (A.5)$$

Substituindo (A.5) em (A.2) e rearranjando os termos, pode-se chegar em:

$$I_{2_ref}(s) = \frac{I_{1_ref}(s) \cdot (s^2 \cdot d_2 + s \cdot d_1 + d_0)}{s^2 \cdot e_2 + s \cdot e_1 + e_0} \quad (A.6)$$

Onde:

$$\begin{aligned} d_0 &= 0 \\ d_1 &= L_{m_ref} (R_{sec_ref} + R_{load_ref} + R_{tap_ref}) \\ d_2 &= L_{m_ref} (L_{sec_ref} + L_{load_ref} + L_{tap_ref}) \\ e_0 &= R_{tap_ref} (R_{sec_ref} + R_{load_ref}) \\ e_1 &= \left[L_{tap_ref} (R_{sec_ref} + R_{load_ref}) + R_{tap_ref} (L_{sec_ref} + L_{load_ref}) + \right. \\ &\quad \left. L_{tap_ref} (R_{sec_ref} + R_{load_ref} + R_{tap_ref}) \right] \\ e_2 &= L_{m_ref} (L_{sec_ref} + L_{load_ref} + L_{tap_ref}) + L_{tap_ref} (L_{sec_ref} + L_{load_ref}) \end{aligned} \quad (A.7)$$

Substituindo (A.6) em (A.1), é possível encontrar a corrente $I_{1_ref}(s)$, que é dada pela equação (4.41). Substituindo agora (4.41) em (A.6) e posteriormente, substituindo (A.6) em (A.4), é possível isolar a corrente $I_{3_ref}(s)$, a qual é dada por (4.49). Ambas as equações são reescritas abaixo.

$$I_{1_ref}(s) = \frac{(a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0) \cdot V_{in_ref}(s)}{b_3 \cdot s^3 + b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0} \quad (4.41)$$

$$I_{3_ref}(s) = \frac{(c_2 \cdot s^2 + c_1 \cdot s + c_0) \cdot V_{in_ref}(s)}{b_3 \cdot s^3 + b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0} \quad (4.49)$$

APÊNDICE C – LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM MÉDIA TENSÃO

Para a realização dos ensaios do comutador eletrônico de *taps*, foi montado um laboratório para ensaios em média tensão, sendo apresentado na Figura D.1. Com a implementação deste laboratório visou-se contemplar normas de segurança, de maneira a propiciar um ambiente adequado ao trabalho em ambientes com níveis de média tensão.

C.1 Medidas de proteção coletiva

As medidas de proteção coletiva visam garantir a segurança e saúde de todos os envolvidos em trabalhos no laboratório de média tensão, além de pessoas que se encontrem na área de risco (BRASIL, 2004). As medidas de proteção coletiva são elencadas como:

- a) Os ensaios não devem ocorrer enquanto houver pessoas no interior da área de risco;
- b) Desenergização do transformador sempre que não estejam sendo feitos ensaios;
- c) Sinalização da área de risco através de placas;
- d) Sinalização visual, através de lâmpadas intermitentes nas cores: verde, indicando que a subestação está desenergizada e vermelha indicando que o laboratório de média tensão está energizado;
- e) Verificação periódica da resistência de aterramento, como estabelece a NR-10 (BRASIL, 2004);
- f) Gaiola de Faraday devidamente aterrada;
- g) Dispositivo de desligamento automático quando da abertura da porta do laboratório de média tensão;
- h) Aterramento de todas as partes metálicas e objetos próximos aos transformadores;
- i) Barreira de acrílico contra possíveis estilhaços;

C.2 Medidas de proteção individual

As medidas de proteção individual visam garantir a segurança do operador do laboratório de média tensão quando as medidas de proteção coletivas não são suficientes para controlar os riscos. Para isso, são aplicados equipamentos de proteção individual (EPIs)

específicos e adequados às atividades desenvolvidas, atendendo ao disposto na NR-6 - Equipamento de Proteção Individual - EPI, (BRASIL, 2011).

É de fundamental importância que sejam utilizados os EPIs adequados para cada ação a ser realizada, como segue:

- a) É vedado o uso de adornos pessoais na área de risco, em especial, próximo aos condutores de eletricidade, conforme estabelece a NR-10.
- b) Energização e desenergização do laboratório de média tensão através do quadro de comando: é obrigatório o uso de tapete isolador e óculos de proteção;
- c) Variação da tensão aplicada ao transformador através do variac: é obrigatório o uso de tapete isolador e óculos de proteção;
- d) Aterramento do circuito de alta tensão após a desenergização³: é obrigatório o uso de tapete isolador, óculos de proteção e luva de isolamento para média tensão;

C.3 *Layout do laboratório*

A instalação física do laboratório é constituída por dez módulos encaixáveis de um metro de largura por dois metros de altura revestidos com tela de metal com furação de 2x2 cm, sendo que um desses módulos é articulado e serve como porta de acesso. Para o manuseio do quadro de comando bem como para o aterramento do circuito primário, são dispostos tapetes isolantes classe 25 kV. O *layout* da estrutura é apresentado na Figura C.1.

Para a acomodação dos transformadores de distribuição: elevador e abaixador e dos transformadores de medida: de corrente (TC) e de potencial (TP) foi construído uma balcão de madeira com estrutura condizente com o peso dos mesmos. Quando o laboratório encontra-se devidamente desenergizado, o circuito primário é conectado à terra através da garra de aterramento, a qual é mostrada na Figura D.3 (a), para manusear a garra utiliza-se luvas isolantes com classe 15 kV, as quais são apresentadas na Figura D.3 (b).

³ O circuito de alta tensão somente poderá ser aterrado após ser devidamente desenergizado e for certificada a inexistência de qualquer fonte de tensão aplicada ao transformador elevador ou abaixador, e em nenhuma outra hipótese. Tal procedimento é necessário a fim de eliminar cargas armazenadas nas capacitâncias intrínsecas dos transformadores, conforme item 10.9.3 da NR-10, além de evitar acidentes em caso de energização indevida.

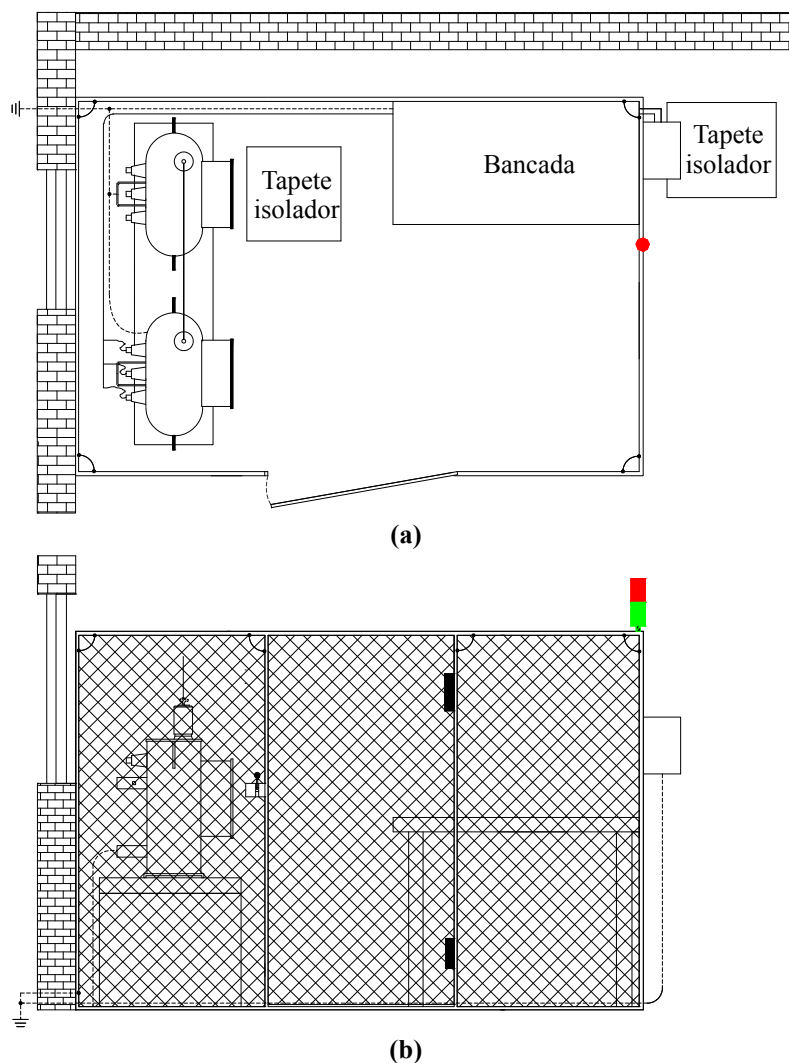


Figura C.1– Laboratório de média tensão, (a) Vista superior, (b) vista frontal.

C.4 Circuito de força do laboratório de ensaios

O circuito de força do laboratório de ensaios foi projetado de modo a atender as condições de operação e segurança requeridas, contando com disjuntores, dispositivos de proteção diferencial residual (DR) e contator com acionamento de emergência. O circuito unifilar de força é apresentado na Figura C.2 (a).

O quadro de distribuição fica fixado na parede do laboratório e é equipado com um DR (63 A, 30 mA, 300 ms) e um disjuntor D_1 de 50 A, a ligação com o quadro de comando é feita através da tomada T_1 (tomada industrial 3P+N, 32 A). O quadro de comando é fixado na própria estrutura da grade de proteção e, referente ao circuito de força, conta com um disjuntor (D_2) de 32 A e uma contatora tripolar (K_1) de 35 A. O variac monofásico tem potência de 10 kVA. O circuito diagrama multifilar do circuito de força do laboratório de ensaios é apresentado na Figura C.2 (b).

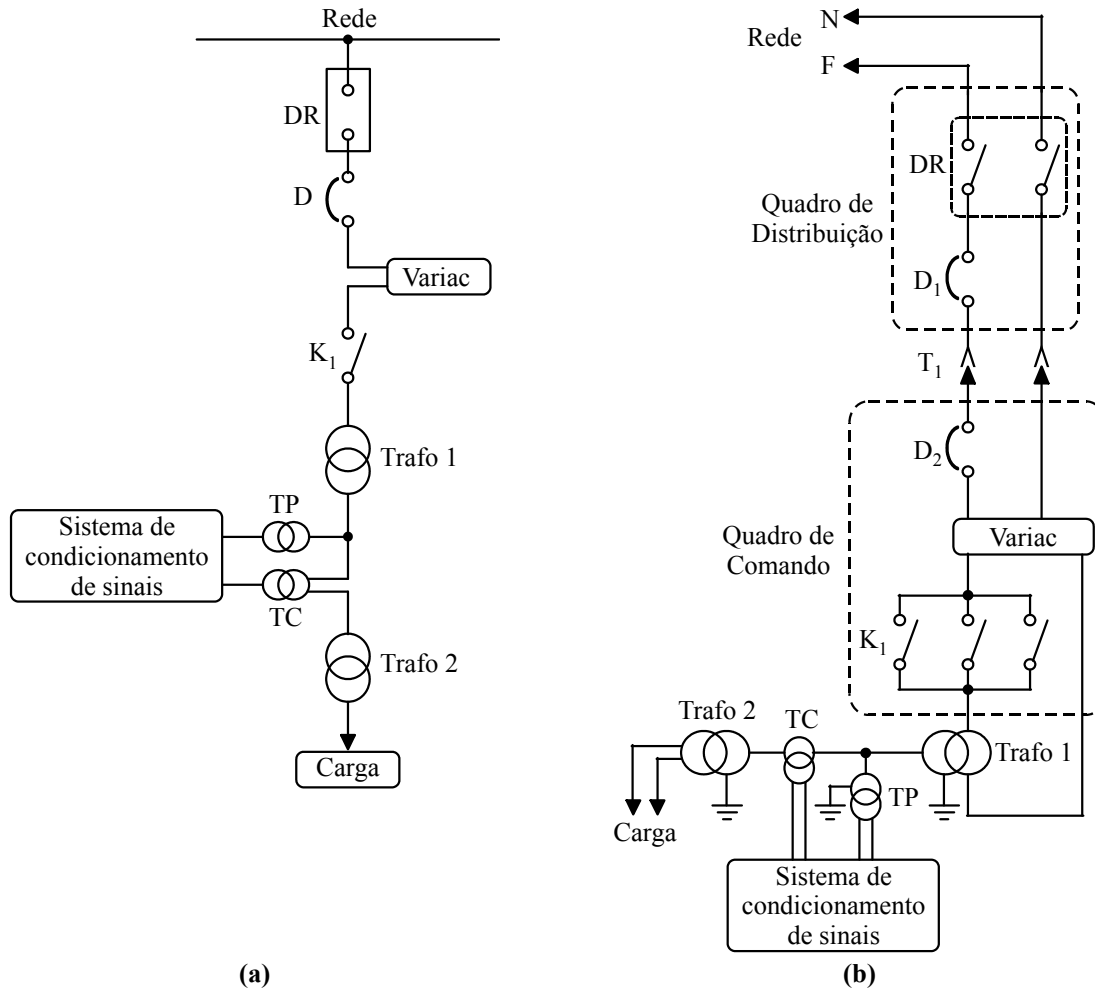


Figura C.2 – Circuito de força do laboratório de ensaios, (a) unifilar, (b) multifilar.

C.5 Circuito de comando do laboratório de ensaios

O circuito de comando é responsável pela ligação e desligamento da contatora K_1 , que por sua vez, liga e desliga o transformador elevador de tensão e todos os equipamentos a ele conectados. O mesmo está acomodado dentro do quadro de comando e consiste de uma retenção e um circuito de sinalização, todos ativados por chaves associadas à contatora K_1 . A Figura C.3 apresenta o circuito de comando instalado no laboratório de ensaios.

C.5.1 Sequência de operação do circuito de comando

Inicialmente retira-se o aterramento dos terminais da MT, fecha-se a porta da subestação e conecta-se a tomada T_1 . Com o circuito energizado coloca-se o variac na posição de mínima tensão. Quando a tomada é conectada à rede, a indicação luminosa L_2 é acionada,

indicando uma sinalização verde intermitentemente, indicando que os transformadores não estão energizados, nessa condição o sistema está pronto para ser ligado.

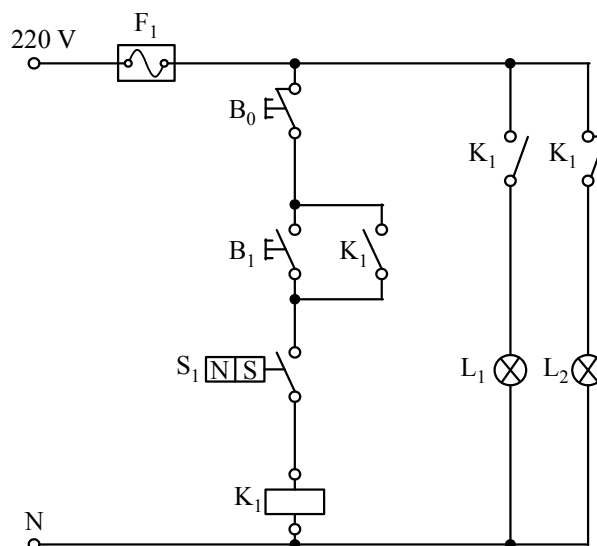


Figura C.3 – Diagrama de comando.

A chave S_1 é um contato NA de um relé associado à chave magnética Smag do tipo *reed switch*, acoplada ao topo da porta da subestação e reproduz o seu estado (porta fechada, S_1 fechada e vice versa), caso o pesquisador tente ligar o circuito com a porta aberta o mesmo não liga pela secção causada por S_1 aberta, nesse momento aciona-se um sinalizador sonoro durante cinco segundos indicando o perigo da ação de entrar-se no laboratório. Esse sinalizado é acionado por uma placa de interface, que é apresentada posteriormente.

Com a porta fechada, pode-se energizar o sistema pressionando-se a botoeira B_1 , nesse momento a luz L_2 verde intermitente se apaga e então passa a piscar intermitentemente uma luz vermelha L_1 . O laboratório está efetivamente operando e pode-se aumentar a tensão do variac, disponibilizando tensão ao sistema de média tensão.

Nessa etapa existem quatro ocorrências que tiram a subestação de operação, são elas:

- o desligamento pela botoeira B_0 ;
- o desligamento pela chave de emergência E_1 ;
- a desligamento por abertura da porta, que causa a abertura de S_1 ;
- ocorrência de uma sobrecarga ou fuga de corrente no sistema, que força a atuação dos disjuntores ou do DR.

O desligamento por B_0 consiste na maneira correta de tirar a subestação de operação, porém, para isso deve-se levar a tensão do variac até o mínimo sempre que possível, de modo a evitar-se sobretensões causadas pela grande indutância de magnetização do transformador

elevador. Caso ocorra um imprevisto e o sistema necessite ser desligado rapidamente isso pode ser feito pressionando-se a chave de emergência E_1 , que tira o sistema de operação abrindo a contatora K_1 à plena carga. Caso a porta da subestação seja aberta durante o seu funcionamento, S_1 secciona o circuito de comando e desliga a contatora K_1 à plena carga.

C.5.2 Circuito de interface do comando

Esse circuito foi projetado para atender a dois requisitos, servir de interface entre a chave que indica o estado da porta, que opera em 12 V e o comando, que opera em 220 V, além de controlar o disparo do sinalizador sonoro quando há a abertura da porta de acesso em momento inadequado. Seu esquemático está representado na Figura C.4.

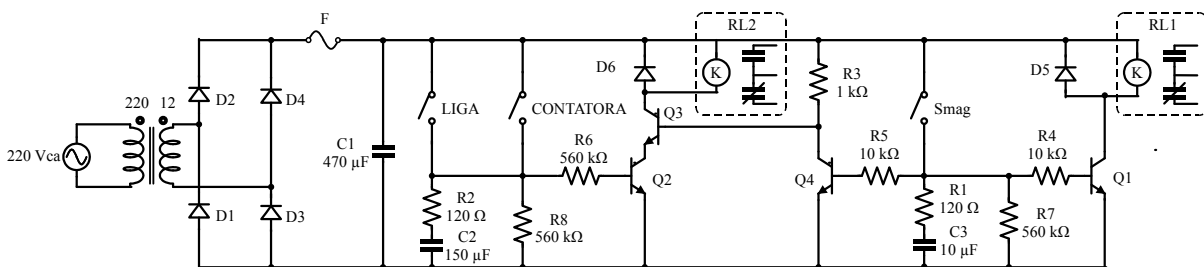


Figura C.4 – Diagrama da placa de interface do comando.

O circuito é formado por um retificador, constituído pelos diodos D1 a D4 e pelo capacitor C1 e por um circuito que recebe o sinal de uma chave magnética do tipo *reed switch* conectada à porta do laboratório e o transforma em um sinal que permite ou não o acionamento da contatora K_1 , dependendo do estado da porta. Permitindo o acionamento quando a porta estiver fechada e bloqueando o acionamento quando esta estiver aberta. O funcionamento do circuito se dá em três possibilidades:

Fechamento da porta do laboratório de testes: o fechamento da porta habilita a chave S_1 , que por sua vez, permite o acionamento do circuito de força do laboratório e a realização dos ensaios caso não haja outras irregularidades de procedimento a serem cumpridas.

Tentativa de acionamento do laboratório com a porta aberta: ao pressionar a botoeira B_1 tem-se uma sinalização audível indicando os riscos da situação e a alimentação do circuito de força é cancelada, necessitando-se fechar a porta para continuar com a energização.

Abertura da porta com o laboratório ligado: a chave Smag abre, ocasionando a abertura de S_1 e causando o desligamento do laboratório e a sinalização audível.

APÊNDICE D – FOTOS DO PROTÓTIPO

A Figura D.1 apresenta o laboratório de ensaios em média tensão montado para a realização dos ensaios e a Figura D.2 apresenta o acesso externo aos terminais de *tap*.



Figura D.1 – Laboratório de ensaios em média tensão.

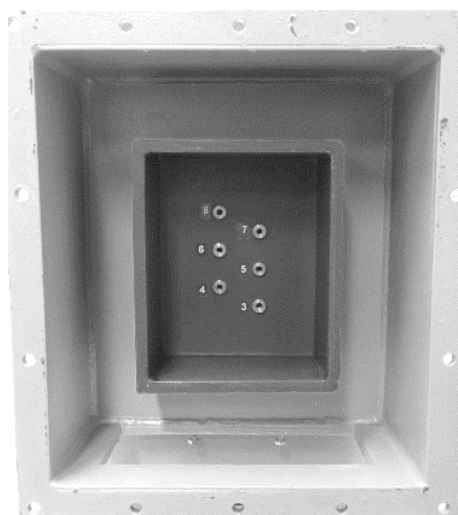
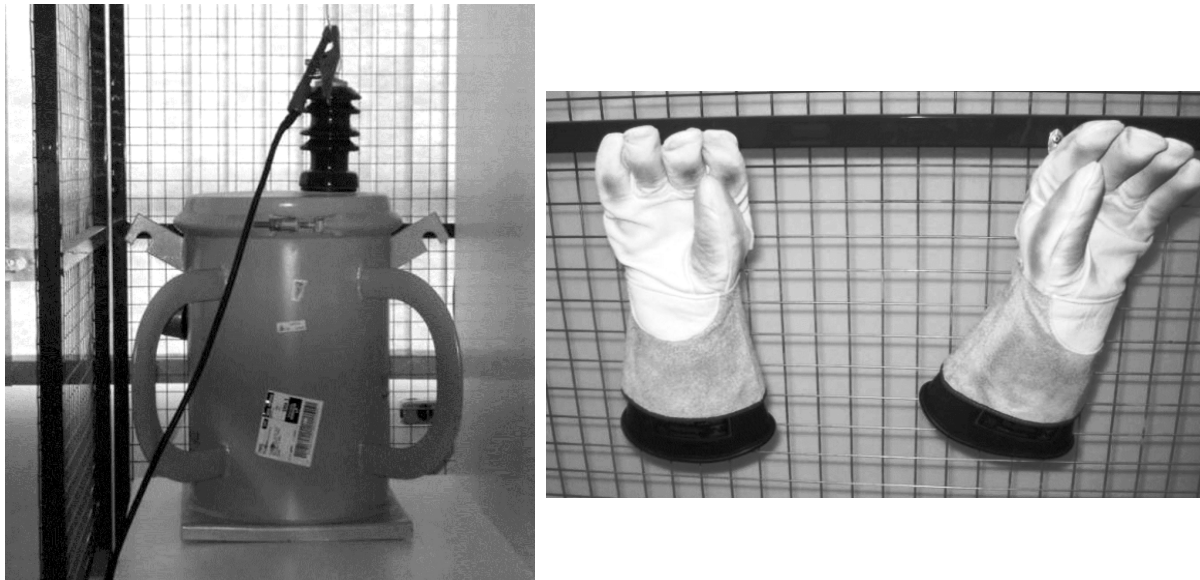


Figura D.2 – Acesso aos *taps* do transformador.

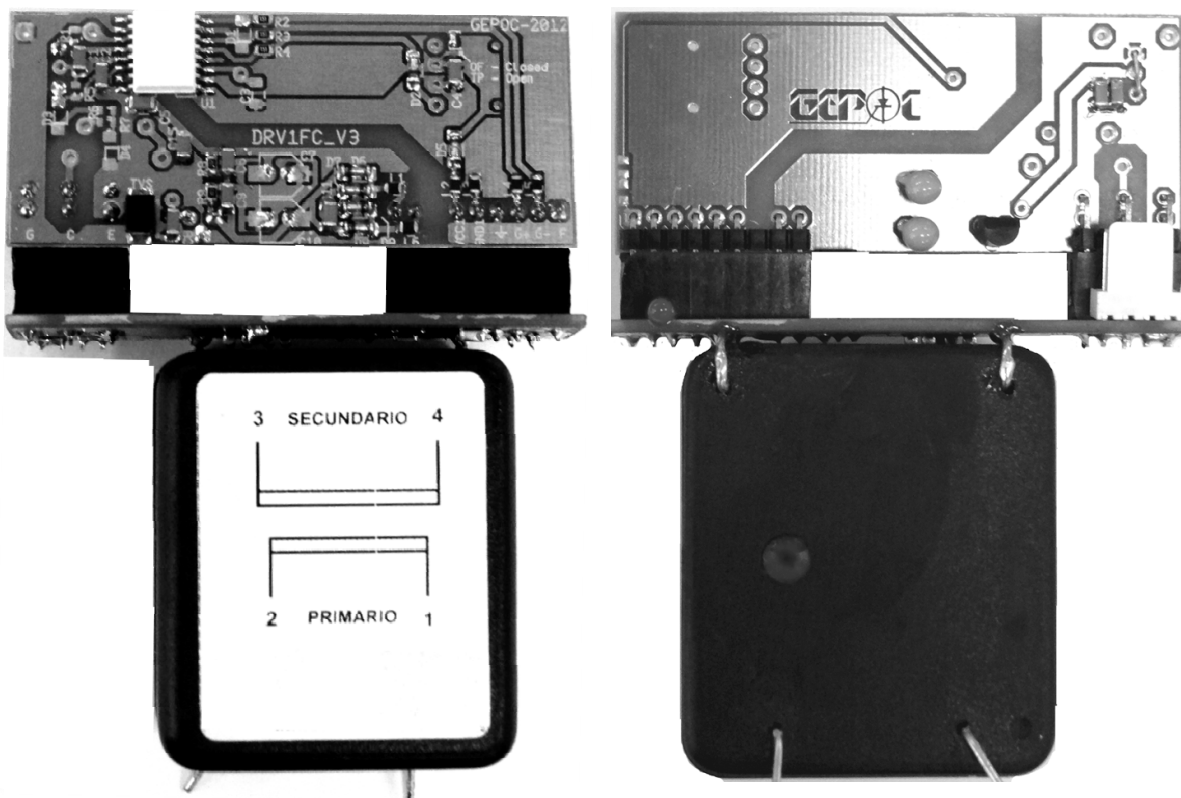
A Figura D.3 (a) apresenta a garra de aterramento de proteção e a Figura D.3 (b) apresenta as luvas de média tensão usadas no aterramento do circuito primário para trabalhos no laboratório. Na Figura D.4 é apresentado o circuito de *gate-driver* desenvolvido. Na Figura D.5 é apresentada a placa de potência.



(a)

(b)

Figura D.3 – Equipamentos de proteção, (a) garra de aterramento, (b) luvas de isolamento classe 15 kV.



(a)

(b)

Figura D.4 – Circuito de acionamento (*gate-driver*), (a) vista frontal, (b) vista traseira.

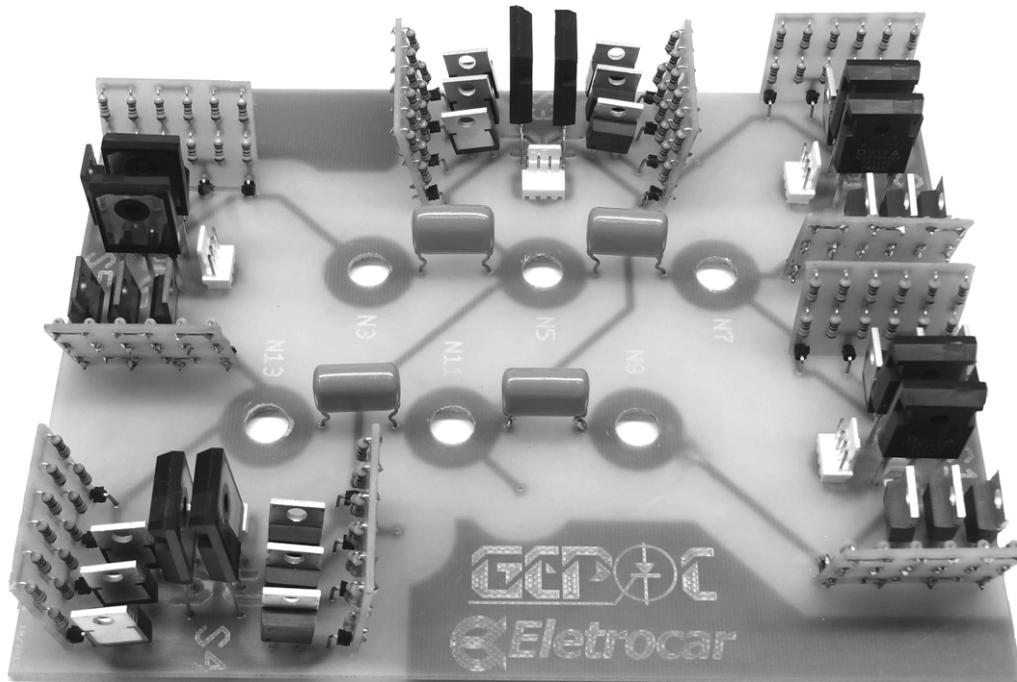


Figura D.5 – Placa de potência desenvolvida.