UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO MONOFÁSICOS COM 32 DEGRAUS PARA ESTUDOS EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO

Jordana Rodrigues Felício

Uberlândia
2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO MONOFÁSICOS COM 32 DEGRAUS PARA ESTUDOS EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO

Dissertação apresentada por Jordana Rodrigues Felício à Universidade Federal de Uberlândia, para a obtenção do título de Mestre em Ciências aprovada em 24/02/06 pela Banca Examinadora:

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. (Orientador) – UFU

Euler Bueno dos Santos, Dr. – UFG

José Roberto Camacho, PhD. – UFU

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

F311m Felício, Jordana Rodrigues, 1980-

Modelagem em reguladores de tensão monofásicos com 32 degraus para estudos em regime permanente e transitório / Jordana Rodrigues Felício. - Uberlândia, 2006.

163f. : il.

Orientador: Marcelo Lynce Ribeiro Chaves.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Pro-grama de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade - Teses. 2. Reguladores de voltagem - Teses. I. Chaves, Marcelo Lynce Ribeiro. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elé-trica. III. Título.

CDU: 621.316.1.025

MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO MONOFÁSICOS COM 32 DEGRAUS PARA ESTUDOS EM REGIME PERMANENTE E TRANSITÓRIO

Jordana Rodrigues Felício

Dissertação apresentada por Jordana Rodrigues Felício à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr. (Orientador) – UFU	Prof. Darizon Alves de Andrade, PhD Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO À MINHA FAMÍLIA, EM ESPECIAL À MINHA MÃE, VANIA, À MINHA IRMÃ ROBERTA, PELA COMPREENSÃO E INCENTIVO À MIM DEDICADOS PARA A REALIZAÇÃO DO MESMO E PELA COMPREENSÃO NOS MOMENTOS AUSENTES.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, pois foi através de seus exemplos e ensinamentos que pude superar os momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. **Marcelo Lynce Ribeiro Chaves** meus sinceros agradecimentos pelo apoio, paciência, incentivo e colaboração durante esta convivência profissional. Agradeço também, pela amizade e confiança dispensada, que, com toda certeza, estão além da conclusão do curso de mestrado.

Ao meu namorado**: Fernando,** pela atenção, companheirismo e imenso carinho à mim dispensado durante a realização do trabalho, sendo sempre um porto seguro.

Aos amigos**: Hélder, Adeon, João Felício, Roger, Danièlle,** pelo companheirismo e importante apoio que me deram durante toda a dissertação.

Ao amigo **André Roger** pelo apoio tão essencial nos trabalhos experimentais e por seu enorme companheirismo nos momentos de dificuldades.

À amiga **Elise** por sua amizade, paciência e sabedoria, com os conselhos certos nos momentos oportunos.

Aos demais colegas e professores de pós-graduação, pelo incentivo e apoio que em muito contribuíram para a conclusão desta dissertação.

À **Marli e Valéria** pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da Pós Graduação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

O grande crescimento do setor elétrico associado ao fato de a qualidade da energia elétrica fornecida estar se tornando um fator de extrema importância, tanto para os consumidores como para as empresas concessionárias de energia, fez com que os órgãos regulamentadores do setor passassem a se preocupar mais com, por exemplo, os níveis de tensão de uma rede de distribuição. Sob esse ponto de vista, o regulador de tensão tem sido um dos equipamentos mais utilizados no sentido de correção, ou adequação dos níveis de tensão de uma rede de distribuição, seja ela rural ou urbana. Esse equipamento, na sua forma mais usual, é constituído de um autotransformador com um mecanismo automático comutador de tap´s que, por ser mecânico, é lento e não atende às exigências das variações de tensão de curta duração (VTCD) impostas pelas normas vigentes. Visando adequar o regulador de tensão às exigências do mercado, ou seja, minimizar o seu tempo de resposta a qualquer variação de tensão, estudos sobre situações transitórias de comutação de tap´s devem ser elaboradas. Neste sentido, surge esta dissertação, com o objetivo de desenvolver uma modelagem para representar um regulador de tensão monofásico com 32 degraus no programa ATP (EMTP). A modelagem é baseada nas características do circuito magnético do núcleo e é constituída de indutores lineares representando o fluxo através do ar e indutores não lineares representando o fluxo através do núcleo de ferro. Tendo-se em vista as dificuldades laboratoriais para fazer medições em um equipamento de média tensão (13,8 kV), foi construído um modelo reduzido do regulador de tensão, semelhante ao regulador comercial típico, em baixa tensão (220 V). Ensaios laboratoriais foram realizados com o intuito de validar o modelo computacional em baixa tensão.

PALAVRAS CHAVES – ATP, Princípio da Dualidade, Regulador de Tensão, Modelagem, Projeto de Transformadores.

ABSTRACT

In recent years, the growth of the electrical system associated with non ideal conditions can compromise the normal operation devices. This fact is becoming extremely important, as much the consumers as for the electric utilities. In this way, the electrical agencies are more concerned about, for example, the distribution voltage levels. With this in mind, the voltage regulation device has been one of the more used equipment with the purpose of voltage levels correction or adequacy, either agricultural or urban site. This equipment, in its usual structure, is composed by an autotransformer with a tap automatic mechanism that presents a high time delay and does not apply to the short-duration voltage variations requirements, imposed by electrical standards. Aiming at adjusting the voltage regulator to the distribution requirements, that is, to minimize its time delay to any voltage variation, transitory studies of tap commutation must be elaborated. This work aims at modelling a single-phase 32 step voltage regulator in a computational simulator called ATP (EMTP). This modelling is based on the core magnetic characteristics and it is constituted of linear and non linear inductances representing the flux through the air and through the steel core. By considering the laboratory difficulties to make measurements in a voltage medium equipment (13.8 kV), a typical voltage regulator prototype was constructed (220 V) and a laboratory arrangement was used to validate the corresponding modelling.

INDEX TERMS – ATP, Duality, Voltage Regulator, Modelling, Design of transformers.

Lista de Figuras

2.1 Ligação para redução da tensão..... 015

2.2 Ligação para elevação da tensão..... 016

2.3 Inserção da chave inversora no circuito do regulador..... 016

2.4 Atuação do reator de comutação evitando a interrupção do circuito..... 017

2.5 Operação do reator conduzindo a corrente de carga apenas por uma extremidade..... 017

2.6 Circuitos: (a) onde o reator está com os dois contatos no mesmo *tap* e, portanto, não há tensão aplicada no reator e (b) onde o reator está com os dois contatos em *tap´s* diferentes e, portanto, há tensão aplicada no reator..... 018

2.7 Circuito com a bobina de equalização inserida junto ao reator..... 019

2.8 Foto mostrando um banco de reguladores monofásicos..... 019

2.9 Distribuição de fluxo fasorial num regulador de tensão monofásico..... 020

2.10 Circuito magnético representativo dos caminhos de fluxo no núcleo do regulador de tensão monofásico..... 023

2.11 Marcação de pontos no circuito magnético, para aplicação do princípio da dualidade..... 025

2.12 Interligação dos pontos para aplicação do princípio da dualidade..... 026

2.13 Circuito elétrico dual do regulador de tensão monofásico..... 027

2.14 Circuito elétrico dual do regulador de tensão monofásico simplificado e com as resistências representativas das perdas nas bobinas e no ferro..... 029

2.15 Corte longitudinal no núcleo do regulador de tensão, mostrando os comprimentos médios dos circuitos magnéticos de coluna e culatra..... 034

2.16 Corte transversal na coluna central do regulador de tensão, mostrando as dimensões das bobinas existentes..... 034

2.17 Distribuição de fluxo magnético no núcleo do reator, com suas dimensões..... 039

2.18 Circuito magnético do reator..... 040

2.19 Interligação dos pontos para aplicação do princípio da dualidade..... 040

2.20 Circuito elétrico equivalente do reator de comutação..... 041

2.21 Dimensões das bobinas do reator de comutação..... 041

2.22 Modelo simplificado do reator de comutação..... 043

3.1 Circuito com a divisão da tensão entre as bobinas do reator e da bobina equalizadora..... 048
3.2 Caminhos das correntes para redução da tensão..... 049
3.3 Caminhos das correntes para elevação da tensão..... 050
3.4 Comprimento médio do circuito magnético..... 056
3.5 Correntes nos enrolamentos com conexão para elevação da tensão..... 060
3.6 Correntes nos enrolamentos com conexão para redução da tensão..... 060
3.7 Distribuição das camadas de cada bobina em torno do núcleo..... 067
3.8 Configuração da montagem das chapas do núcleo do regulador..... 069
3.9 Comprimento das chapas do circuito magnético..... 072
3.10 Configuração da montagem das chapas do núcleo do reator..... 074
3.11 Corte longitudinal no núcleo do regulador..... 075
3.12 Corte longitudinal no núcleo do reator..... 075

4.1 Foto mostrando a vista frontal do regulador de tensão construído..... 080
4.2 Foto mostrando a parte interna do equipamento..... 081
4.3 Esquema de ligação para o ensaio em vazio do transformador do regulador..... 083
4.4 Forma de onda da corrente de excitação..... 084
4.5 Esquema de ligação para o ensaio de magnetização..... 085
4.6 Curva de magnetização do transformador do regulador de tensão..... 087
4.7 Esquema de ligação para o ensaio em vazio..... 088
4.8 Forma de onda da corrente de excitação no ensaio em vazio do regulador..... 089
4.9 Forma de onda da corrente de excitação no ensaio em vazio do regulador subexcitado..... 090
4.10 Forma de onda da corrente de excitação no ensaio em vazio do regulador sobrexcitado..... 090
4.11 Esquema de ligação para o ensaio em curto circuito..... 091
4.12 Tensão aplicada à bobina de excitação no ensaio em curto circuito..... 092
4.13 Esquema de ligação para o ensaio com carga..... 093
4.14 Tensão na carga quando se comuta da posição 0 para a posição 1..... 096
4.15 Esquema de ligação para o ensaio de corrente de circulação..... 097

4.16 Esquema para determinação das resistências do enrolamento de *tap´s*..... 098
4.17 Corte longitudinal no núcleo do modelo reduzido do regulador de tensão monofásico, mostrando as medidas do mesmo..... 102
4.18 Corte transversal na coluna central do modelo reduzido do regulador de tensão, mostrando as dimensões das bobinas existentes..... 102
4.19 Diagrama elétrico das ligações internas do protótipo do regulador de tensão..... 111

5.1 Corrente na bobina de excitação..... 116
5.2 Corrente na bobina de excitação no ensaio em vazio do regulador..... 118
5.3 Corrente de circulação na bobina de equalização..... 118
5.4 Corrente de excitação para o regulador subexcitado..... 120
5.5 Corrente de excitação para o regulador sobrexcitado..... 120
5.6 Tensão aplicada na bobina de excitação..... 121
5.7 Corrente nas bobinas de *tap´s*..... 122
5.8 Correntes de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) a vazio..... 123
5.9 Correntes de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) a vazio do regulador de tensão..... 125
5.10 Correntes de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) a vazio do regulador de tensão subexcitado..... 127
5.11 Correntes de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) a vazio do regulador de tensão sobrexcitado..... 128
5.12 Tensões de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) em curto circuito do regulador de tensão..... 129
5.13 Correntes na bobina de *tap´s* obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) em curto circuito do regulador de tensão..... 130

Lista de Tabelas

3.1 Dados nominais do protótipo do regulador de tensão..... 058
3.2 Tabela para dimensionamento dos condutores..... 064
3.3 Tipos de chapas e suas dimensões..... 069
3.4 Dados nominais do protótipo do reator de comutação..... 069
3.5 Tipos de chapas e suas dimensões..... 074
3.6 Tabela resumo do projeto do modelo reduzido..... 076

4.1 Resultados do ensaio em vazio do transformador do regulador de tensão..... 083
4.2 Características do transformador..... 086
4.3 Resultados do ensaio em vazio do regulador de tensão..... 088
4.4 Resultados do ensaio em vazio do regulador de tensão subexcitado e sobrexcitado..... 089
4.5 Valores medidos para o ensaio em curto circuito..... 092
4.6 Condições iniciais para o ensaio com carga..... 095
4.7 Valores medidos no ensaio com carga..... 095
4.8 Valores medidos no ensaio de corrente de circulação..... 097
4.9 Resistências medidas no enrolamento de *tap´s*..... 099
4.10 Resistências medidas no enrolamento de *tap´s*..... 100
4.11 Resistências medidas na bobina do reator..... 101
4.12 Pontos (λ, I) para coluna e culatras utilizadas pelo indutor tipo 98 no modelo do protótipo do regulador de tensão..... 105
4.13 Parâmetros do modelo do protótipo do regulador de tensão monofásico..... 109
4.14 Parâmetros do modelo do protótipo do reator de comutação..... 111

5.1 Descrição dos casos simulados..... 115
5.2 Resultados da simulação a vazio do transformador do regulador de tensão..... 117
5.3 Resultados da simulação a vazio do regulador de tensão sob condição nominal.. 119
5.4 Resultados da simulação a vazio do regulador de tensão..... 119
5.5 Valores obtidos na simulação em curto circuito..... 122
5.6 Comparação entre os resultados de ensaio e simulação da operação a vazio do

transformador do regulador de tensão..... 124
5.7 Descrição dos casos verificados..... 125
5.8 Comparação entre os resultados de ensaio e simulação no ensaio a vazio..... 126
5.9 Comparação entre os resultados de ensaio e simulação no ensaio a vazio subexcitado..... 127
5.10 Comparação entre os resultados de ensaio e simulação no ensaio a vazio sobrexcitado..... 128
5.11 Comparação entre os resultados de ensaio e simulação em curto circuito..... 130

Sumário

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 001
1.2. OBJETIVO 003
1.3. ESTADO DA ARTE 004
1.4. ESTRATÉGIAS PARA A MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO 007
1.5. PROGRAMA ATP 008
1.6. CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO 009
1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 009

CAPÍTULO II – MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO DE 32 DEGRAUS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 012
2.2. REGULADORES DE TENSÃO DE 32 DEGRAUS 014
2.3. DISTRIBUIÇÃO DE FLUXOS MAGNÉTICOS NO NÚCLEO DOS REGULADORES DE TENSÃO 020
2.4. CIRCUITO MAGNÉTICO EM REGULADORES DE TENSÃO 022
2.5. O PRINCÍPIO DA DUALIDADE E O CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE REGULADORES DE TENSÃO 024
2.6. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO .. 029
2.6.1. DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS NÃO LINEARES 029
2.6.2. DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS LINEARES 033
(a) INDUTÂNCIA L_1 035
(b) INDUTÂNCIA L_2 036
(c) INDUTÂNCIA L_3 037
2.6.3. DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELATIVAS ÀS PERDAS NO FERRO 038
2.7. MODELAGEM DO REATOR DE COMUTAÇÃO 039
2.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS 044

CAPÍTULO III – PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MODELO REDUZIDO DE REGULADOR DE TENSÃO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 046

3.2. PROTÓTIPO DO REGULADOR DE TENSÃO 047

3.2.1. CÁLCULOS INICIAIS 047

3.2.2. CÁLCULO DOS NÚMEROS DE ESPIRAS DOS ENROLAMENTOS 051

3.2.3. DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES 052

3.2.4. GEOMETRIA DAS BOBINAS 053

3.2.5. GEOMETRIA DO NÚCLEO 053

3.3. PROTÓTIPO DO REATOR DE COMUTAÇÃO 055

3.3.1. DIMENSIONAMENTO DO ENTREFERRO 056

3.4. EXEMPLO DE CÁLCULO 058

3.4.1. CÁLCULOS INICIAIS DO REGULADOR 058

(A) TENSÃO NO ENROLAMENTO DE TAP´S 058

(B) TENSÃO NO ENROLAMENTO DE EQUALIZAÇÃO 059

(C) CORRENTE DE CIRCULAÇÃO 059

(D) POTÊNCIA ELETROMAGNÉTICA 059

(E) SEÇÃO MAGNÉTICA DO NÚCLEO (ESTIMADA) 061

3.4.2. CÁLCULO DOS NÚMEROS DE ESPIRAS DOS ENROLAMENTOS 061

(A) ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO 061

(B) ENROLAMENTO DE TAP´S 061

(C) ENROLAMENTO DE EQUALIZAÇÃO 062

3.4.3. DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES 063

(A) ENROLAMENTO DE TAP´S 063

(B) ENROLAMENTO DE EQUALIZAÇÃO 065

(C) ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO 065

3.4.4. GEOMETRIA DAS BOBINAS 066

3.4.5. GEOMETRIA DO NÚCLEO 067

3.4.6. CÁLCULOS DO REATOR 069

(A) NÚMERO DE ESPIRAS DO ENROLAMENTO 070

(B) DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES 070

(C) GEOMETRIA DA BOBINA 071

(D) GEOMETRIA DO NÚCLEO 071

(E) DIMENSIONAMENTO DO ENTREFERRO..... 072
3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 077

CAPÍTULO IV – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... 079
4.2. CARACTERÍSTICAS DO MODELO REDUZIDO DO REGULADOR DE TENSÃO..... 079
4.3. ENSAIOS LABORATORIAIS..... 081
4.3.1. ENSAIO EM VAZIO NO TRANSFORMADOR DO REGULADOR DE TENSÃO..... 082
4.3.2. ENSAIO DE MAGNETIZAÇÃO..... 084
4.3.3. ENSAIO EM VAZIO NO REGULADOR DE TENSÃO..... 087
4.3.4. ENSAIO EM CURTO CIRCUITO..... 091
4.3.5. ENSAIO COM CARGA..... 093
4.3.6. ENSAIO DE CORRENTE DE CIRCULAÇÃO NO REATOR DE COMUTAÇÃO..... 096
4.3.7. ENSAIO DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS ENROLAMENTOS.... 097
(A) MEDIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DOS ENROLAMENTOS DE TAP´S... 098
(B) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA NA BOBINA DE EXCITAÇÃO..... 100
(C) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA NA BOBINA DE EQUALIZAÇÃO..... 100
(D) MEDIÇÃO NA RESISTÊNCIA NA BOBINA DO REATOR..... 100
4.4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS CÁLCULOS..... 101
4.4.1. DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DE MAGNETIZAÇÃO DOS INDUTORES NÃO LINEARES..... 101
4.4.2. DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS LINEARES..... 105
(A) INDUTÂNCIA L_2..... 107
(B) INDUTÂNCIA L_3..... 107
4.4.3. CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS RELATIVAS ÀS PERDAS NO FERRO..... 108
4.5. CÁLCULOS DOS PARÂMETROS DO REATOR DE COMUTAÇÃO..... 110
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 112

CAPÍTULO V – COMPARAÇÕES ENTRE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... 114

5.2. DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS 115
5.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 116
5.3.1. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO EM VAZIO DO TRANSFORMADOR DO REGULADOR DE TENSÃO 116
5.3.2. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO EM VAZIO DO REGULADOR 117
5.3.3. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO EM CURTO CIRCUITO 121
5.4. COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS 122
5.4.1. SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES DA OPERAÇÃO EM VAZIO DO TRANSFORMADOR DO REGULADOR DE TENSÃO 123
5.4.2. SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES DA OPERAÇÃO EM VAZIO DO REGULADOR DE TENSÃO 124
(A) REGULADOR SOB CONDIÇÕES NOMINAIS 125
(B) REGULADOR SUBEXCITADO 127
(C) REGULADOR SOBREXCITADO 128
5.4.3. SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES DA OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO 129
5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 131

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES GERAIS

CONCLUSÕES GERAIS 133

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 138

ANEXOS

ANEXO I 140
ANEXO II 141

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

À medida que cresce um sistema elétrico, aumenta, na mesma proporção, a necessidade de dispositivos para a regulação dos distúrbios de tensão que nele acontecem, de controles que auxiliem na monitoração para que seja possível detectar e distinguir se, por exemplo, uma queda de tensão pode ser atribuída a uma falha no sistema, como um curto-circuito, ou se trata apenas de um acréscimo normal de carga.

Além do fato de que a qualidade intrínseca da energia elétrica fornecida vem se firmando como um fator extremamente importante, os órgãos regulamentadores do setor elétrico orientam para uma contínua necessidade da melhoria dos serviços. Estes elementos somados a uma política de preços adequados aos consumidores finais, e o equilíbrio econômico-financeiro das distribuidoras, são alvos naturais das pesquisas aplicadas direcionadas às soluções dos problemas vivenciados pelas empresas do setor elétrico.

Existem diversos recursos que têm por objetivo amenizar os problemas relacionados à manutenção da qualidade da energia entregue aos consumidores, porém, alguns deles podem ter custos bastante elevados para os fins a que se destinam, além de proporcionarem mais perdas e possibilitarem a introdução de problemas relacionados a distorções harmônicas no sistema supridor. Alguns

exemplos desse tipo de equipamento são os sistemas UPS (*Uninterrupted Power Supply*), transformadores ferroressonates, entre outros [1]. Neste contexto, um dos equipamentos de extrema importância para os sistemas de distribuição de energia elétrica são os reguladores de tensão. Estes dispositivos são destinados à manutenção dos níveis de tensão em uma rede, em conformidade com os limites especificados pela Resolução 505/2001 da ANEEL. Este documento contempla as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente [2]. Este recurso passou a ser empregado desde a década de 40, principalmente, em locais com grande extensão territorial, onde, tipicamente, muitos pontos de consumo se encontram distantes da geração de energia, visando compensar principalmente a queda de tensão. Adicionalmente, o aumento do uso de cargas sensíveis às oscilações de tensão no sistema de transmissão despertou a consciência do direito dos consumidores em relação à qualidade do fornecimento de energia [3,4]. Por estes e outros motivos, os reguladores de tensão se posicionam como um dos dispositivos mais comuns utilizados pelas concessionárias de energia elétrica, para assegurar uma boa qualidade de fornecimento de tensão a seus consumidores [5].

Como não poderia ser diferente, os reguladores de tensão são largamente utilizados no Brasil. Dentre os tipos mais comumente empregados ressaltam-se os equipamentos com comutadores automáticos, constituídos por sistemas mecânicos que permitem uma ação sob carga quando da regulação de tensão em alimentadores de distribuição. Devido à eficácia e sucesso destes produtos na sua forma original quanto à estratégia de comutação, a busca por aprimoramentos, em particular no que tange ao seu tempo de resposta, foi o principal motivo que levou ao estudo deste tema.

Dentro desta ótica, o domínio da tecnologia é iniciado através de estudos e modelagem de um equipamento comercial típico, o qual consiste de um regulador de tensão monofásico com 32 degraus, 13,8 kV.

Uma vez conhecido seus princípios físicos, torna-se viável sua modelagem e implementação no programa ATP (*Alternative Transient Program*). Assim procedendo, tornar-se-á possível o domínio da técnica e a obtenção de uma ferramenta computacional confiável para a realização de estudos de desempenho e a obtenção de importantes informações necessárias à modernização da tecnologia.

No desenvolvimento da modelagem do regulador de tensão é de extrema importância para a validação da mesma através da comparação dos resultados de medições em campo ou em laboratório do equipamento modelado. Nesse sentido, devido a dificuldades em termos de instalações laboratoriais para medições em média tensão (13,8 kV), fez-se necessário a construção de um modelo reduzido em baixa tensão (220 V) com características semelhantes ao equipamento comumente utilizado.

1.2. OBJETIVO

A principal finalidade desta dissertação é construir uma ferramenta computacional que represente um regulador de tensão, de forma a permitir estudos tanto em regime transitório quanto em regime permanente.

No caso de regime permanente, o modelo pode ser utilizado para analisar, através de resultados de simulações, o comportamento de uma rede de distribuição, rural ou urbana, com e sem a presença do regulador de tensão, por exemplo, quando existe uma reclamação de um consumidor junto à concessionária no sentido de variações da tensão ocorrida em sua propriedade.

Para o regime transitório, o modelo deve, principalmente, ser capaz de analisar os fenômenos transitórios originados em decorrência das comutações de *tap´s*. Além disso, o modelo também pode ser utilizado para estudar novos arranjos magnéticos buscando aperfeiçoar o sistema de comutação de *tap´s*

sendo que, atualmente o mais utilizado é mecânico, o qual utiliza um intervalo de tempo relativamente grande entre a ocorrência de um evento e a resposta do equipamento.

1.3. ESTADO DA ARTE

Como todo trabalho de pesquisa, este se iniciou com um levantamento bibliográfico sobre diversos assuntos relacionados a reguladores de tensão monofásicos e sua modelagem, através do qual obteve-se um conjunto de informações que orientam sobre diversos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento. Na seqüência apresenta-se uma síntese dos trabalhos considerados mais relevantes.

Assim, a referência [6] mostra a configuração convencional dos reguladores de tensão de 32 degraus na rede elétrica. Nesta referência o regulador é composto, basicamente, de um autotransformador dotado de oito derivações em série, uma chave reversora de polaridade que permite adicionar ou subtrair a tensão no enrolamento série e um controle de componentes estáticos que possibilita os ajustes necessários à regulação da tensão ao nível pretendido.

Para a obtenção do circuito elétrico equivalente, em [7] é descrita uma metodologia que parte do circuito magnético, utilizando o princípio da dualidade, assim, as relutâncias do circuito magnético são transformadas em indutâncias e as fontes de f.m.m. em fontes de tensão com o uso de transformadores ideais. O modelo do regulador se completa com a inclusão das resistências representativas das perdas nos enrolamentos e no núcleo do transformador.

As referências [8, 9] apresentam a utilização do princípio da dualidade para determinar o circuito elétrico equivalente de um transformador. Em [8] são

apresentadas regras para obtenção dos “circuitos elétricos equivalentes” derivados do circuito magnético estabelecidos pela disposição física dos possíveis caminhos para o fluxo magnético. Nem sempre é possível encontrar tais circuitos elétricos equivalentes, mas sob determinadas condições, as quais possibilitam a aplicação do princípio da dualidade, estes circuitos podem ser determinados e representam o transformador com as características magnéticas inclusas.

Um modelo para o transformador trifásico com cinco colunas obtido a partir do conceito de dualidade entre os circuitos magnéticos e elétricos é apresentado na referência [9]. A saturação, as perdas no núcleo e as capacitâncias das bobinas são incluídas no modelo. As perdas no núcleo são representadas no modelo por resistências lineares. Essa abordagem tem sido aplicada para modelar transformadores trifásicos do tipo núcleo envolvido, resultando em modelos mais corretos, pois consideram o acoplamento magnético entre as fases. Os fluxos de dispersão são considerados em cada fase, entre o enrolamento de baixa tensão e o núcleo e entre os enrolamentos de baixa e alta tensão. Os parâmetros do modelo implementado no Programa para Transitórios Eletromagnéticos (EMTP) são obtidos através de medições usando a combinação de testes a vazio e testes de curto-circuito, além de informações obtidas do projeto do fabricante do transformador. Um osciloscópio com memória digital foi usado para registrar as formas de onda da tensão aplicada, corrente de magnetização e a tensão induzida nas outras duas fases abertas.

Na referência [10] a representação do transformador utiliza o circuito elétrico equivalente, com o fenômeno da histerese não sendo considerado, e as perdas no núcleo modeladas por uma resistência fixa conectada em paralelo com a indutância de magnetização. A curva de magnetização do núcleo é representada por uma curva obtida ponto a ponto, com base nos dados fornecidos pelo fabricante das chapas de ferro do núcleo do transformador.

Em [11] o transformador é modelado empregando a mesma metodologia utilizada em [10] porém, a não linearidade do circuito magnético é determinada pelo ciclo de histerese. Este ciclo é obtido com o auxílio da sub-rotina "HYSTERESIS" que o programa ATP disponibiliza. Esta não linearidade é associada aos entreferros existentes devido às junções das chapas. O modelo desenvolvido, evita a realização de ensaios considerados impraticáveis em algumas situações, como o levantamento da característica de saturação do transformador. Este levantamento leva à uma boa aproximação do modelo físico real.

As referências [12,13] fazem uso da simulação digital, usando a análise no domínio do tempo, para obter as correntes na energização do transformador. Estes trabalhos empregam o simulador SABER, onde as equações do circuito elétrico e magnético do transformador são agrupadas para formar um único sistema. Modelos de transformadores com diferentes configurações de núcleos magnéticos e tipos de ligações de enrolamentos podem ser derivados facilmente. Os modelos obtidos utilizando-se o equivalente eletromagnético permitem, de modo bastante simples, a visualização das grandezas elétricas e magnéticas calculadas em qualquer segmento ou parte do transformador. Os parâmetros envolvidos na simulação são obtidos com base na geometria das bobinas e partes do núcleo do transformador e nas características elétricas e magnéticas dos mesmos.

O procedimento de cálculo para projetos de construção de transformadores é apresentado nas referências [14,15]. Esta metodologia foi aplicada na determinação do projeto do modelo reduzido de regulador de tensão que foi projetado e construído para verificar a eficiência da modelagem empregada.

1.4. ESTRATÉGIA DA MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO

A crescente disponibilidade de computadores digitais com elevado desempenho, associada a programas computacionais ricos em análise e geração de resultados em diversas formas, tem direcionado as estratégias de pesquisa para a maior utilização da simulação digital. O uso da simulação digital requer que o dispositivo, no caso, o regulador de tensão monofásico, seja representado por modelos matemáticos precisos, e faz uso de métodos numéricos para a solução do problema.

A modelagem adotada é feita através de equações matemáticas obtidas de um circuito elétrico equivalente que é derivado direto e unicamente do circuito magnético, sendo este último extraído do modelo físico do regulador. Para obtenção do circuito magnético, os enrolamentos, nos quais circulam a corrente elétrica, são representados por sua força magnetomotriz (f.m.m.), e os caminhos magnéticos, por onde se estabelecem os fluxos magnéticos, estão representados por suas correspondentes relutâncias.

Para a obtenção do circuito elétrico equivalente, as relutâncias do circuito magnético são transformadas em indutâncias e as fontes de f.m.m. em transformadores com relações de transformação apropriadas [7]. A principal característica dessa estratégia está no detalhamento da determinação da indutância de magnetização e da indutância de dispersão dos diversos *tap´s* do regulador. O modelo do regulador se completa com a inclusão das resistências dos enrolamentos. Outro aspecto importante é que a não linearidade do circuito magnético pode ser representada unicamente com base na característica de magnetização do material magnético que compõe o núcleo e suas dimensões físicas, evitando assim ensaios laboratoriais algumas vezes impraticáveis.

1.5. O PROGRAMA ATP

O programa ATP (*Alternative Transient Program*) é uma ferramenta de grande flexibilidade e de grande importância na realização de estudos sobre transitórios em sistema de potência, ou mesmo de estudos em regime permanente, onde a topologia da rede ou o problema a ser estudado não permite uma simples representação monofásica.

O programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitâncias de barras. A formulação matemática baseia-se no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

O programa permite a representação de dispositivos com parâmetros concentrados ou distribuídos e componentes não lineares, tais como: transformadores, reatores, sendo disponíveis diversas alternativas para esta finalidade.

De um modo geral, as informações necessárias para o processamento de casos no ATP envolvem o fornecimento de um arquivo de dados contendo informações gerais tais como, por exemplo: passo de integração, tempo máximo de simulação e informações específicas que descrevem a rede elétrica, chaves, fontes de tensão ou corrente e ainda uma especificação de saída de resultados [16].

1.6. CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento e implementação de um modelo computacional de reguladores de tensão monofásicos de 32 degraus, baseado nas características do circuito magnético do núcleo.

Com esse modelo, torna-se possível realizar estudos computacionais do comportamento do equipamento, em regime transitório ou permanente, em redes de distribuição, e ainda, permite a realização de estudos de novos arranjos magnéticos objetivando realizar a substituição da usual comutação mecânica de *tap´s* para uma nova tecnologia onde se utilizem chaves estáticas, ou seja, comutação eletrônica de *tap´s*.

1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo, este trabalho encontra-se assim estruturado:

Capítulo II - Modelagem de Reguladores de Tensão de 32 Degraus

Este capítulo faz uma análise detalhada dos parâmetros do regulador de tensão de forma a possibilitar a construção do circuito magnético equivalente, incluindo as relutâncias não lineares (núcleo de ferro) e as relutâncias lineares (ar). Montados os circuitos magnéticos, e utilizando o princípio da dualidade exposto nas referências [7,8,9], chega-se ao circuito elétrico equivalente a ser implementado no ATP [10,12,13]. Tal circuito teve suas convenientes simplificações e foram

acrescentadas resistências para evitar instabilidades numéricas próprias do método de integração trapezoidal utilizado pelo ATP nas simulações computacionais [16].

Capítulo III - Projeto e Construção de um Modelo Reduzido de Regulador de Tensão

Com o objetivo de criar condições de medições e registrar os efeitos transitórios devido à comutação de *tap´s* produzidos pelo regulador de tensão e, também para verificar a eficácia da modelagem realizada para o equipamento, buscou-se o desenvolvimento de um modelo reduzido, com o qual serão realizados testes e ensaios, os quais poderão ser comparados com resultados de simulação para fins de validação do modelo proposto. Neste capítulo apresentam-se detalhes do projeto para a determinação das dimensões físicas para a construção do modelo reduzido, sendo mostrado todo um procedimento para a realização de tais cálculos [14,15].

Capítulo IV - Determinação dos Parâmetros do Modelo Reduzido

De posse do modelo reduzido construído segundo os dados obtidos no capítulo anterior, os seguintes procedimentos são efetuados:

- Ensaios laboratoriais aos quais o regulador de tensão em questão é submetido com os objetivos de obter parâmetros para a modelagem, simulação e posteriormente possibilitar a validação dos resultados computacionais;
- Exemplo de cálculo dos parâmetros, onde são aplicados os dados do projeto do regulador de tensão

obtidos no capítulo III e os resultados de ensaios, utilizados nas equações e procedimentos determinados nos capítulos II. Os resultados obtidos serão utilizados na implementação computacional.

Capítulo V - Comparações entre Simulações Computacionais e Ensaios Experimentais

Neste capítulo serão apresentados os resultados das comparações entre as simulações e os ensaios laboratoriais realizados a fim de validar o modelo proposto. As seguintes condições de operação dos reguladores foram simuladas: operação em vazio apenas do transformador do regulador de tensão, operação em vazio do regulador e operação em curto. As comparações são realizadas de forma quantitativa e qualitativa, através de tabelas comparativas e figuras das formas de onda para cada caso de operação do regulador.

Capítulo VI - Conclusões Gerais e Sugestões para Trabalhos Futuros

Finalmente este capítulo tem por objetivo apresentar as principais discussões e conclusões finais dos capítulos que formam essa dissertação. Além disso, serão ressaltadas as principais contribuições deste trabalho.

CAPÍTULO II

MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO DE 32 DEGRAUS

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Objetivando a modelagem do dispositivo foco da presente dissertação, este capítulo visa descrever, de forma minuciosa, os passos para se alcançar o modelo representativo de reguladores de tensão.

A modelagem de reguladores de tensão com 32 degraus tem como base a distribuição de fluxos magnéticos no núcleo, considerando as diversas possibilidades de caminhos pelos quais estes podem percorrer.

O fluxo magnético associado a tais caminhos dá origem ao chamado circuito magnético, que é formado por relutâncias lineares e não lineares associadas às fontes de forças magnetomotrizes (f.m.m.) produzidas pelos enrolamentos do regulador de tensão [12].

As relutâncias lineares são representativas do caminho pelo qual o fluxo magnético se estabelece através do ar existente entre a bobina interna e a coluna do núcleo, ou entre as bobinas, ou até mesmo pelo pequeno entreferro formado pela junção das chapas oriundos da montagem do núcleo [10]. Já as relutâncias não lineares representam o caminho do fluxo pelo material ferromagnético que constitui o núcleo do regulador. Tal material é geralmente do tipo aço-silício de

grãos orientados e, geralmente, possui uma característica acentuadamente não linear quando o fluxo supera o valor nominal.

Por possuir grandezas magnéticas (relutâncias, f.m.m.'s e fluxos), o circuito magnético não pode ser implementado no programa ATP na forma como é construído, visto que, esse software trabalha com modelos de circuitos elétricos. Sendo assim, pela aplicação do princípio da dualidade no circuito magnético, o qual faz as devidas correspondências entre parâmetros magnéticos e elétricos, pode-se obter um circuito elétrico equivalente, a ser implementado no programa ATP [7, 8].

Pelo princípio da dualidade, cada fonte de força magnetomotriz do circuito magnético é representado por um transformador ideal, e cada relutância por uma indutância no circuito elétrico equivalente. Dessa forma, o circuito elétrico assim obtido, representa o comportamento do núcleo magnético e o seu acoplamento com a rede elétrica é feito pelos transformadores ideais que representam cada enrolamento. Observa-se que tal circuito é formado apenas por elementos não dissipadores de potência e o núcleo magnético apresenta perdas de potência, as chamadas perdas no ferro. Essas perdas poderão ser incluídas no circuito elétrico equivalente acrescentando-se resistências em paralelo com os indutores não lineares representativos do material magnético. As indutâncias não lineares poderão ser obtidas de acordo com a curva de magnetização B×H do material magnético, fornecida pelo fabricante [10]. Estas deverão representar, com maior fidelidade possível, o comportamento do material magnético do núcleo.

Um fenômeno característico dos materiais ferromagnéticos que, geralmente, constituem os núcleos de transformadores é o conhecido ciclo de histerese, o qual representa uma parte das perdas no ferro. A outra parte dessas perdas são oriundas das correntes parasitas ou correntes de "Foucault" que são minimizadas pela laminação do núcleo. Sabe-se que a partir de uma determinada intensidade de fluxo magnético (Ponto de Saturação), o ciclo de histerese se

confunde com a curva de magnetização. Assim, para o objetivo proposto anteriormente, a curva de magnetização é suficiente para representar a não linearidade do circuito magnético, não sendo necessária a implementação do ciclo de histerese.

2.2. REGULADORES DE TENSÃO DE 32 DEGRAUS

O regulador de tensão é um equipamento destinado a manter um determinado nível de tensão em uma rede de distribuição urbana ou rural, quando esta fica submetida a uma variação de tensão fora dos limites especificados.

É importante salientar que esse equipamento é um dos mais úteis para as concessionárias de energia elétrica que objetivam manter uma boa qualidade de fornecimento de energia a seus consumidores na forma de tensão, com razoável estabilidade. A escolha sobre o estudo de reguladores de tensão de 32 degraus com núcleo enrolado e envolvente foi feita em virtude de serem estes os reguladores de tensão mais utilizados nos sistemas de distribuição de energia e de ter os dados construtivos fornecidos pelo fabricante.

O princípio de funcionamento deste equipamento é semelhante ao de um autotransformador com *tap´s* variáveis, ou seja, além do acoplamento magnético existente entre os enrolamentos (*tap´s*, excitação e equalização), há também um acoplamento elétrico [6].

As normas atuais comentam sobre a existência de dois tipos de reguladores de tensão: o **Tipo A**, chamado regulador com excitação variável porque a bobina de excitação sente qualquer variação que ocorra na tensão da fonte e, o **Tipo B**, chamado de regulador de excitação constante porque a bobina de excitação se localiza do lado da carga, não sentindo as variações de tensão da fonte [17].

Para fins desta dissertação o enfoque será todo direcionado ao regulador Tipo B, sendo este apresentado em duas configurações [17]. A figura 2.1 apresenta a primeira configuração, como redutor de tensão, onde a ocorrência de uma variação de tensão na fonte que cause elevação da tensão na carga é regulada de forma a manter a mesma tensão que existia antes da ocorrência do fenômeno.

Nesta figura os índices das bobinas, (A) e (B), representam respectivamente, a bobina de *tap´s* e a bobina de excitação.

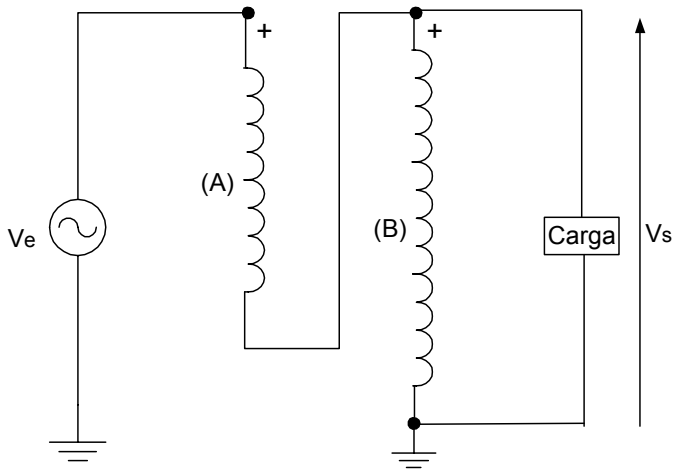


Figura 2.1: Ligação para redução da tensão.

A segunda configuração do regulador é sua ligação como elevador da tensão. Neste caso, um evento qualquer que proporcione queda de tensão na carga faz com que o equipamento reaja, regulando a tensão para o mesmo nível anterior ao evento. A figura 2.2 apresenta o esquema de ligação deste regulador trabalhando como elevador de tensão, onde os índices das bobinas são os mesmos mencionados anteriormente.

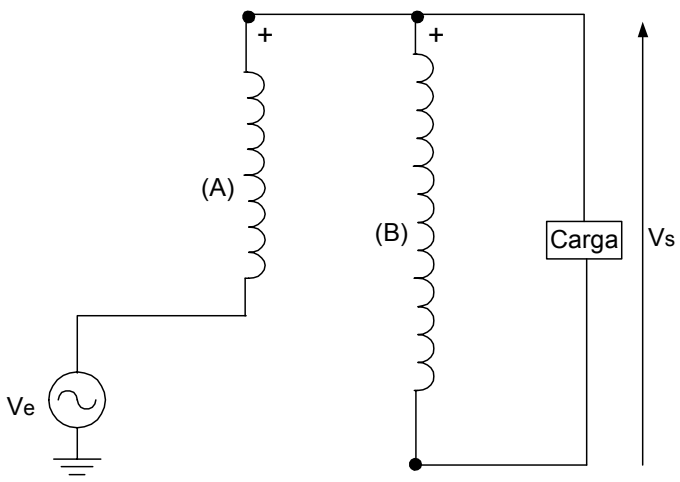


Figura 2.2: Ligação para elevação da tensão.

Observando as figuras 2.1 e 2.2 percebe-se que a ligação como redutor ou elevador são determinadas pela polaridade da conexão da bobina de *tap´*s com a de excitação, assim adicionando uma chave inversora de polaridade no circuito, pode-se fazer com que um mesmo equipamento trabalhe nas duas condições citadas anteriormente. A figura 2.3 apresenta um circuito simplificado do equipamento onde a chave inversora está inserida.

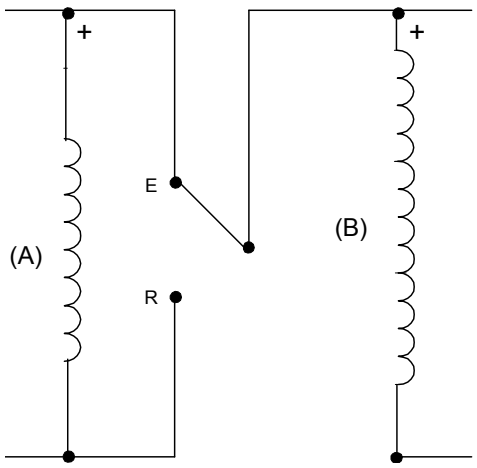


Figura 2.3: Inserção da chave inversora no circuito do regulador.

Note que os índices **R** e **E** representam, respectivamente, redutor e elevador assim, quando a chave estiver conectada no ponto **R**, o regulador estará trabalhando como redutor de tensão e se estiver no ponto **E** será elevador.

A bobina de *tap´s* é composta por diversas derivações de tal forma que passa-se a ter degraus de tensão, também chamados por *tap´s*. Para que haja a comutação de um *tap* para outro a corrente no circuito será obrigatoriamente interrompida, ou seja, o regulador precisaria ser desligado. Para que isso não ocorra, é adicionado um reator de comutação ao circuito, conforme a figura 2.4.

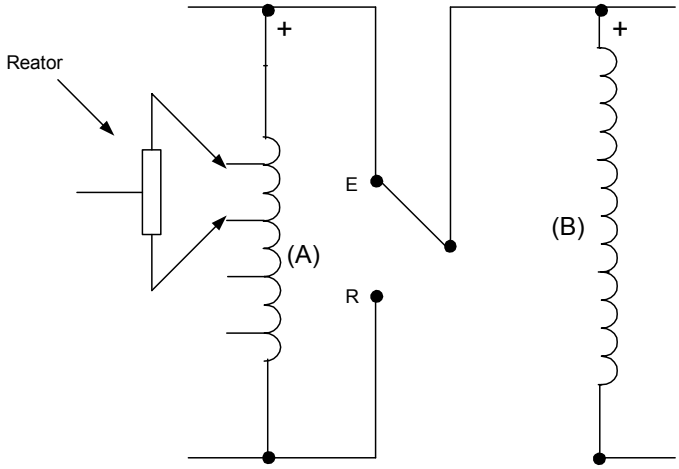


Figura 2.4: Atuação do reator de comutação evitando a interrupção do circuito.

Durante a comutação, enquanto uma das extremidades do reator "viaja" de um *tap* para o outro, a alimentação da carga (I_L) se faz através da outra extremidade do reator, como mostra a figura 2.5. Além disso, ao se aplicar uma tensão sobre os terminais do reator, uma corrente de circulação se estabelece (I_c).

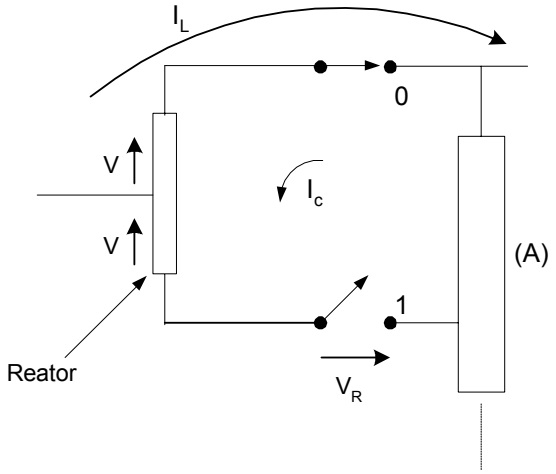
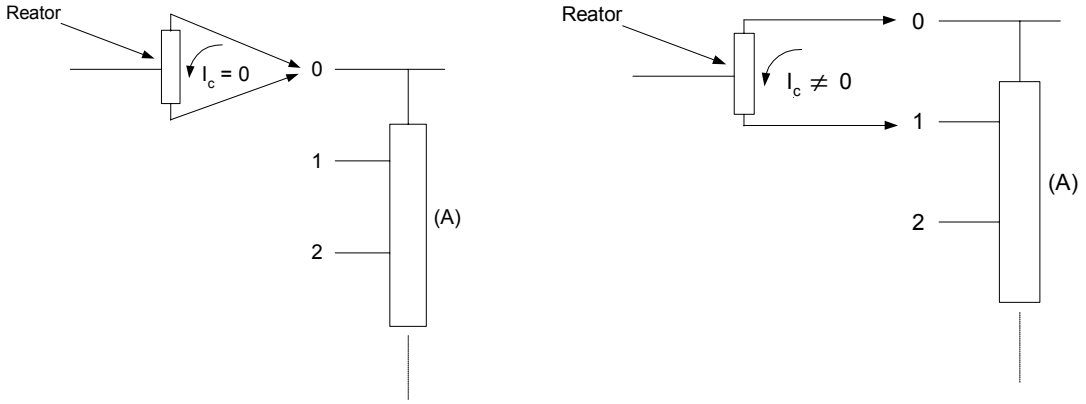


Figura 2.5: Operação do reator conduzindo a corrente de carga apenas por uma extremidade.

Sob esta condição, uma análise mais profunda se torna necessária, isto é, é possível perceber a existência de duas condições atuantes: sem a corrente de circulação e com a corrente de circulação. A figura 2.6 apresenta as duas condições mencionadas.



(a) ***(b)***

Figura 2.6: Circuitos: (a) onde o reator está com os dois contatos no mesmo tap e, portanto, não há tensão aplicada no reator e (b) onde o reator está com os dois contatos em tap´s diferentes e, portanto, há tensão aplicada no reator.

A alternância da corrente de circulação de zero a um determinado valor, comumente 50% da corrente de carga (I_L), causaria um elevado desgaste nos contatos devido a taxa de variação de corrente $\left(L \dfrac{di}{dt} \right)$. Assim, em conjunto com o reator de comutação é colocada a bobina de equalização, a qual tem por finalidade evitar o desgaste dos contatos do reator devido à variação de corrente. Na figura 2.7 é apresentado um esquema onde a bobina de equalização já está inserida.

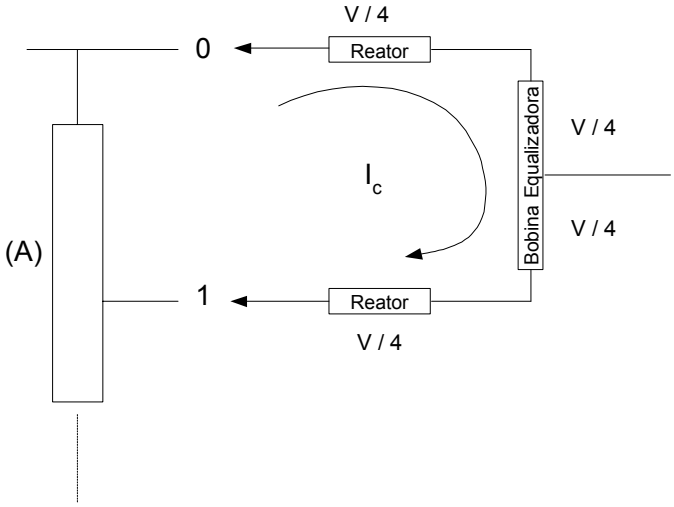


Figura 2.7: Circuito com a bobina de equalização inserida junto ao reator.

Com a bobina de equalização o valor da corrente de circulação no reator será constante independente da posição do comutador sendo que, no caso dos dois contatos estarem em um mesmo *tap*, a corrente de circulação muda o sentido, mas se mantém em módulo.

Na figura 2.8 é mostrada uma fotografia de um banco de reguladores instalados em uma subestação, a fim de estabilizar a tensão de fornecimento de uma rede elétrica.

Figura 2.8: Foto mostrando um banco de reguladores monofásicos.

A modelagem dos reguladores apresentados na figura anterior é o foco principal desta dissertação e toda a metodologia aplicada será desenvolvida nas seções seguintes.

2.3. DISTRIBUIÇÃO DOS FLUXOS MAGNÉTICOS NO NÚCLEO DOS REGULADORES DE TENSÃO

A modelagem aqui descrita é feita para reguladores de tensão monofásicos, sendo seu núcleo do tipo envolvente (enrolado), com três enrolamentos concêntricos na coluna central. A figura 2.9 apresenta um corte transversal do núcleo deste tipo de regulador, mostrando a distribuição fasorial de fluxos magnéticos, quando todos os enrolamentos são excitados por uma fonte de tensão. Nesta figura, também são mostrados os entreferros existentes, representados pelo "*air-gap*", uma vez que os mesmos estão presentes no núcleo do regulador e influenciam na composição do caminho magnético a ser percorrido pelo fluxo no material magnético do núcleo. Portanto, os mesmos também serão considerados no modelo apresentado.

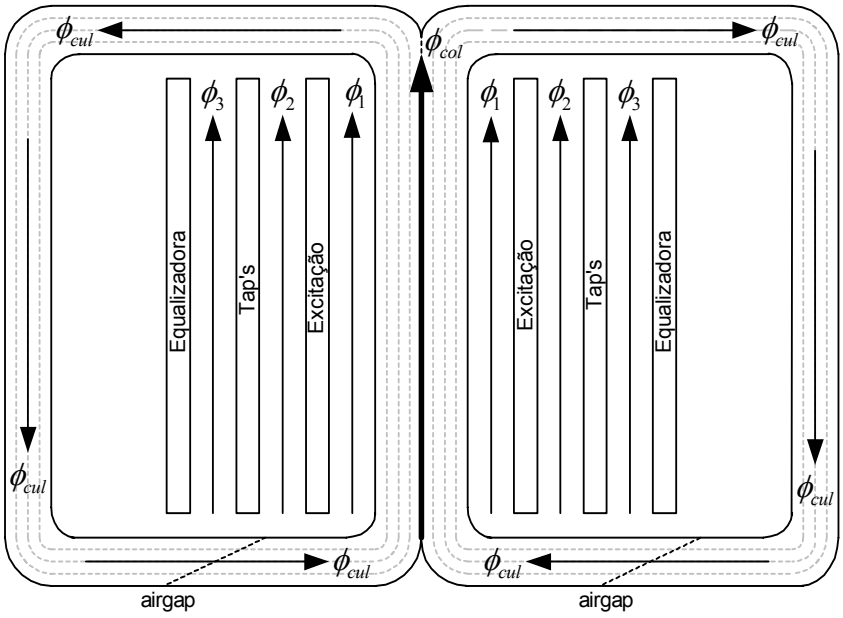


Figura 2.9: Distribuição de fluxo fasorial num regulador de tensão monofásico.

Os fluxos magnéticos existentes no regulador de tensão podem ser agrupados em dois tipos: o fluxo magnético mútuo e o fluxo magnético de dispersão. O fluxo magnético mútuo é aquele fluxo que enlaça todos os enrolamentos, e tem como caminho principal o material ferromagnético que constitui o núcleo do regulador. Considera-se como fluxo mútuo o fluxo total produzido pela bobina de excitação ($\phi_{mútuo} = \phi_{col} + \phi_{l}$) Entretanto, existe uma pequena parcela desse fluxo magnético que tem como caminho o ar entre o enrolamento mais interno e sua coluna ϕ_{l}.

O fluxo magnético de dispersão não envolve todos os enrolamentos, portanto, o seu efeito de indução magnética não se aplica aos enrolamentos não enlaçados. Além disso, por ser um fluxo magnético que circula pelo ar, e sendo constante a relutância do ar, a relação entre o fluxo magnético e a corrente que circula no enrolamento é linear.

Quando a bobina de excitação do regulador é alimentada com uma fonte de tensão alternada, nesta circula uma corrente também alternada. Com a circulação dessa corrente, surge o fluxo magnético gerado pela energização da bobina, cuja forma de onda é também alternada e que tem como caminho principal o material ferromagnético da coluna central do núcleo envolvente. A parcela desse fluxo que flui pelo caminho principal é aqui denotada por ϕ_{col}. Uma outra pequena parcela do fluxo produzido percorre o caminho de ar existente entre a coluna e a bobina de excitação, denotada por ϕ_{l}. Ambas as parcelas de fluxos ϕ_{col} e ϕ_{l} enlaçam as três bobinas, o que os denominam de fluxo mútuo. Essas duas parcelas de fluxo produzido pela bobina de excitação fecha o seu circuito através do material magnético das culatras, aqui denominado ϕ_{cul}, que corresponde ao caminho formado pelas partes externas do núcleo envolvente. Em relação a este aspecto, considera-se que todo o fluxo produzido pelos enrolamentos estabelecerão o circuito magnético através das culatras ϕ_{cul} e, portanto, deverão fluir através dos pequenos entreferros de junção das chapas.

Os fluxos magnéticos produzidos pelos enrolamentos de tap´s e bobina equalizadora terão ainda como caminhos, além dos dois já citados, o espaço de ar entre as respectivas bobinas. As parcelas de fluxos que circulam por esses caminhos não enlaçam a bobina de excitação e, portanto, tais parcelas são consideradas como fluxos de dispersão ϕ_2 e ϕ_3.

Com o conhecimento da distribuição dos fluxos dentro de reguladores de tensão pode-se determinar o circuito magnético para o equipamento.

2.4. CIRCUITO MAGNÉTICO EM REGULADORES DE TENSÃO

Estabelecidos os caminhos dos fluxos magnéticos através do núcleo do regulador, é possível montar o circuito magnético equivalente, mostrado na figura 2.10, que consiste de relutâncias representativas de cada um dos caminhos descritos na seção 2.3. Estas relutâncias são ligadas entre si, de forma a representarem a maneira pela qual os fluxos se estabelecem no núcleo do regulador. Além das relutâncias, em tal circuito, também são representadas as fontes de forças magnetomotrizes referentes a cada bobina do regulador [12].

As relutâncias, neste circuito, são ditas lineares quando representam o caminho do fluxo pelo ar e não lineares quando representam os caminhos do fluxo pelo material magnético do núcleo. Aqui é adotada a representação das relutâncias não lineares preenchidas de forma hachurada, sendo as não preenchidas, lineares.

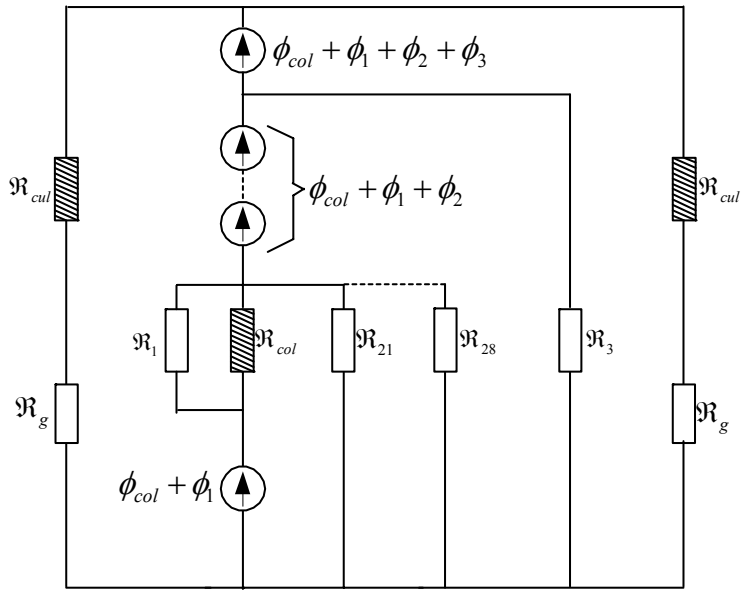


Figura 2.10: Circuito magnético representativo dos caminhos de fluxo no núcleo do regulador de tensão monofásico.

Observando a figura 2.10, o fluxo que enlaça a bobina de excitação é representado por (ϕ_{col} + ϕ_1); já o fluxo que enlaça a bobina de *tap's* é simbolizado por (ϕ_{col} + ϕ_1 + ϕ_2) e por último o fluxo que enlaça a bobina equalizadora é exibido por (ϕ_{col} + ϕ_1 + ϕ_2 + ϕ_3).

A relutância não linear que representa o caminho percorrido pelo fluxo ϕ_{col} é dada por $\Re_{col}$, ou seja, está associada ao caminho magnético da coluna. A relutância não linear que representa o caminho percorrido pelo fluxo ϕ_{cul} é dada por $\Re_{cul}$, que corresponde ao caminho magnético de cada culatra.

Quanto às relutâncias lineares, tem-se em $\Re_1$ a representação do caminho percorrido pelo fluxo ϕ_1, isto é, o caminho dado pelo ar existente entre a bobina de excitação e a coluna central.

As relutâncias lineares ($\Re_{21}$ ... $\Re_{28}$) representam o caminho do espaço de ar entre a bobina de *tap's* e a bobina de excitação e está associada ao fluxo ϕ_2. É interessante notar que cada uma destas relutâncias representam um caminho de fluxo pelo ar entre os diferentes *tap's* e a bobina de excitação.

Finalmente, a relutância linear representada por $\mathcal{R}_3$ está associada ao fluxo de dispersão ϕ_3 que é a relutância do caminho formado pelo espaço de ar entre a bobina equalizadora e a bobina de *tap's*.

A relutância representativa dos entreferros é dada por $\mathcal{R}_g$.

2.5. O PRINCÍPIO DA DUALIDADE E O CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE REGULADORES DE TENSÃO

Como o circuito magnético, obtido na seção 2.4, não pode ser implementado diretamente no programa ATP, uma vez que tal programa foi elaborado para simular circuitos elétricos, é utilizado o princípio da dualidade que estabelece uma correspondência entre os elementos do sistema magnético para um sistema elétrico denominado dual. Desta forma, obtém-se um circuito elétrico equivalente a partir do circuito magnético, que será utilizado na implementação do modelo do regulador de tensão no programa ATP.

Para a aplicação do princípio da dualidade existe um roteiro a ser seguido, que será descrito na seqüência, para melhor entendimento [7]. Inicialmente, marca-se um ponto dentro de cada malha do circuito magnético e um ponto de referência externo às malhas. Como pode ser visto na figura 2.11, os pontos das malhas são “a”, “b”, “c”, “d” e “e”, e “n” é o ponto externo.

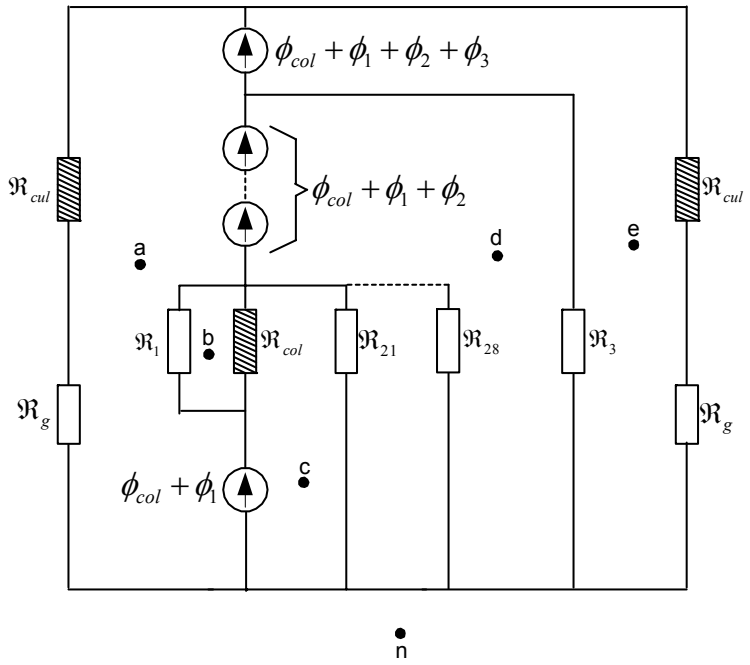


Figura 2.11: Marcação de pontos no circuito magnético, para aplicação do princípio da dualidade.

Cada um desses pontos, dentro das malhas do circuito magnético, dará origem aos nós de mesma nomenclatura, existentes no circuito elétrico equivalente. Para definir as malhas do circuito elétrico, interligam-se os pontos marcados dentro das malhas do circuito magnético por uma linha que deverá passar através de cada elemento existente entre as malhas do circuito magnético, ou seja, entre as malhas dos pontos que serão interligados. Cada um dos elementos existentes no circuito magnético será representado pelo seu dual entre os nós do circuito elétrico. A figura 2.12 mostra a interligação dos pontos.

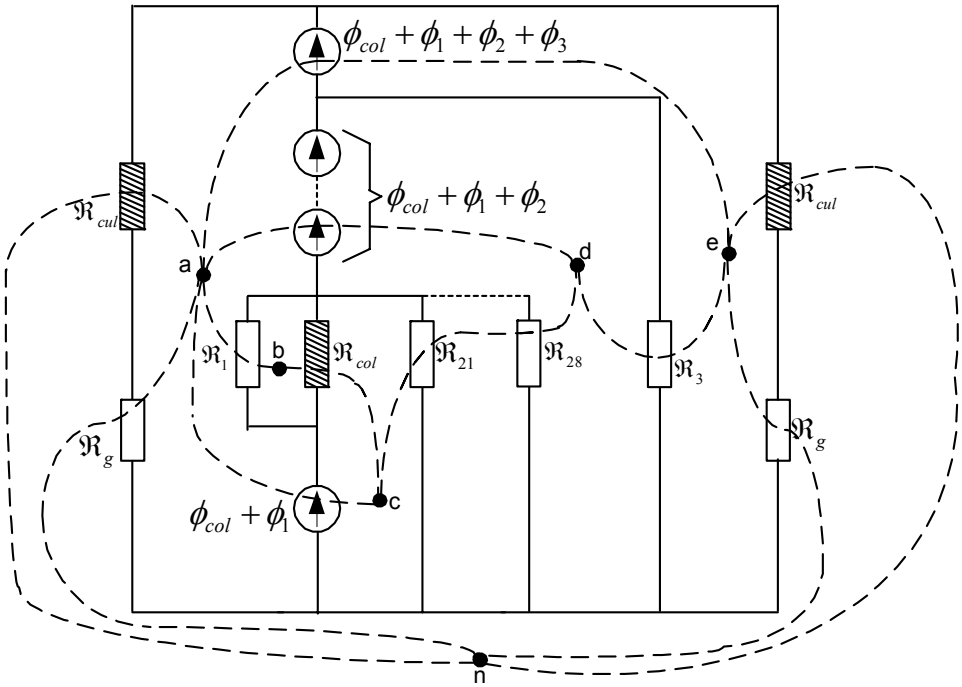


Figura 2.12: Interligação dos pontos para aplicação do princípio da dualidade.

Pelo princípio da dualidade, cada relutância $\Re$ do circuito magnético será representada no circuito elétrico equivalente por uma indutância L, e cada fonte de força magnetomotriz será representada por um transformador ideal para obter tensões induzidas e correntes reais nas bobinas, fazendo-se dessa forma o acoplamento entre as grandezas elétricas e magnéticas. Uma observação que deve ser feita, é que, quando dois elementos estão em série no circuito magnético, seus duais aparecem em paralelo no circuito elétrico, da mesma forma, quando os elementos no circuito magnético estão em paralelo, seus duais aparecem em série no circuito elétrico.

Ao aplicar o princípio da dualidade no circuito magnético do regulador de tensão chega-se ao circuito elétrico equivalente mostrado pela figura 2.13.

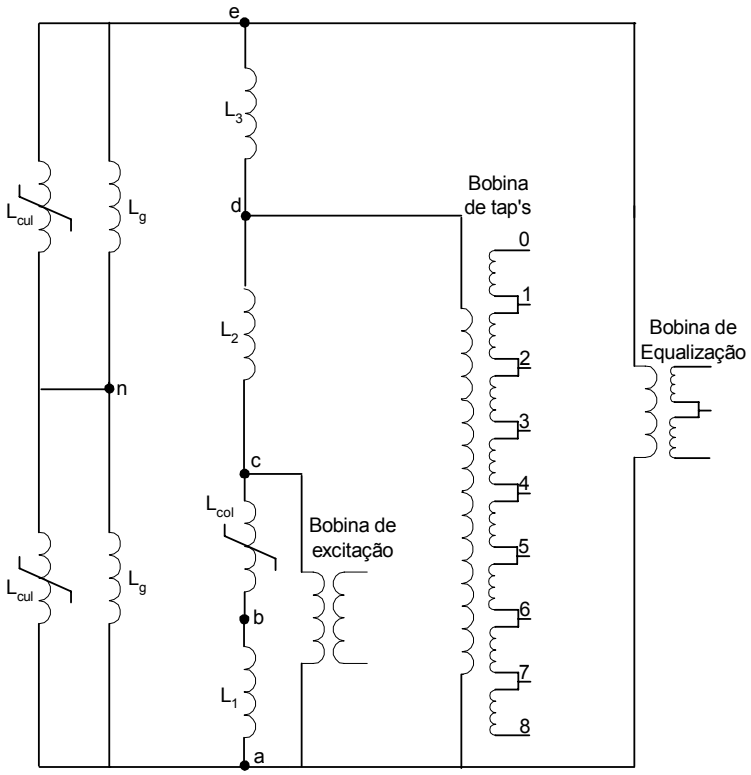


Figura 2.13: Circuito elétrico dual do regulador de tensão monofásico.

Nesta figura, os índices utilizados em cada elemento elétrico, são os mesmos utilizados no circuito magnético. Desta forma, L_1 é a indutância dual da relutância linear do ar entre a bobina de excitação e a coluna ($\mathcal{R}_1$). A indutância L_2 corresponde à indutância equivalente obtida pela dualidade das relutâncias lineares do ar entre a bobina de tap's e a bobina de excitação ($\mathcal{R}_{21}$... $\mathcal{R}_{28}$), nota-se que tais relutâncias encontram-se em paralelo no circuito magnético, logo suas indutâncias representativas ficaram em série no circuito elétrico e foram substituídas por uma única equivalente (L_2). A indutância L_3 está relacionada à relutância linear do espaço de ar entre a bobina equalizadora e a bobina de *tap's* $\mathcal{R}_3$, a indutância não linear L_{col} é oriunda da relutância não linear da coluna $\mathcal{R}_{col}$ e a indutância L_{cul} da relutância não linear da culatra $\mathcal{R}_{cul}$.

As indutâncias relacionadas às relutâncias de entreferros também são mostradas na figura 2.13 e são representadas por L_g.

O circuito obtido pelo princípio da dualidade não apresenta nenhuma perda de potência, a não ser que a mesma seja oriunda do caminho de fluxo pelo material ferromagnético e a indutância representativa desse fluxo incorpore essa perda. Nessa modelagem utilizou-se à curva de magnetização B×H do material do núcleo para representar a não linearidade do circuito magnético, as perdas de potência, tanto no núcleo como nos enrolamentos, são representadas por resistências elétricas acrescentadas ao circuito elétrico obtido pelo princípio da dualidade.

As resistências inseridas no modelo elétrico, dadas por R_{fe_col} e R_{fe_cul} estão associadas às perdas no ferro da coluna central e culatras laterais, respectivamente. Já as resistências dadas por R_1, (R_{21}... R_{28}) e (R_{31}... R_{32}) estão associadas às perdas no cobre na bobina de excitação, na bobina de *tap's* e na bobina equalizadora, respectivamente.

A figura 2.14 mostra o circuito elétrico representativo do regulador monofásico inseridas as resistências de perdas no ferro e no cobre, além de mostrar a utilização simplificada das duas indutâncias das culatras em série, por apenas uma indutância equivalente e, também a simplificação das duas indutâncias de entreferro em uma equivalente. Em destaque na figura (vermelho) é mostrada a parte que representa o circuito magnético, e em preto o acoplamento com a rede elétrica.

Observa-se no circuito da figura 2.13 que se utiliza um transformador "ideal" com dois enrolamentos para representar a bobina de excitação, um transformador com (n +1) enrolamentos, sendo 'n' o número de *tap´s*, e um transformador com três enrolamentos para representar a bobina de equalização. Para a representação desses transformadores no ATP optou-se por utilizar um modelo de transformador saturável.

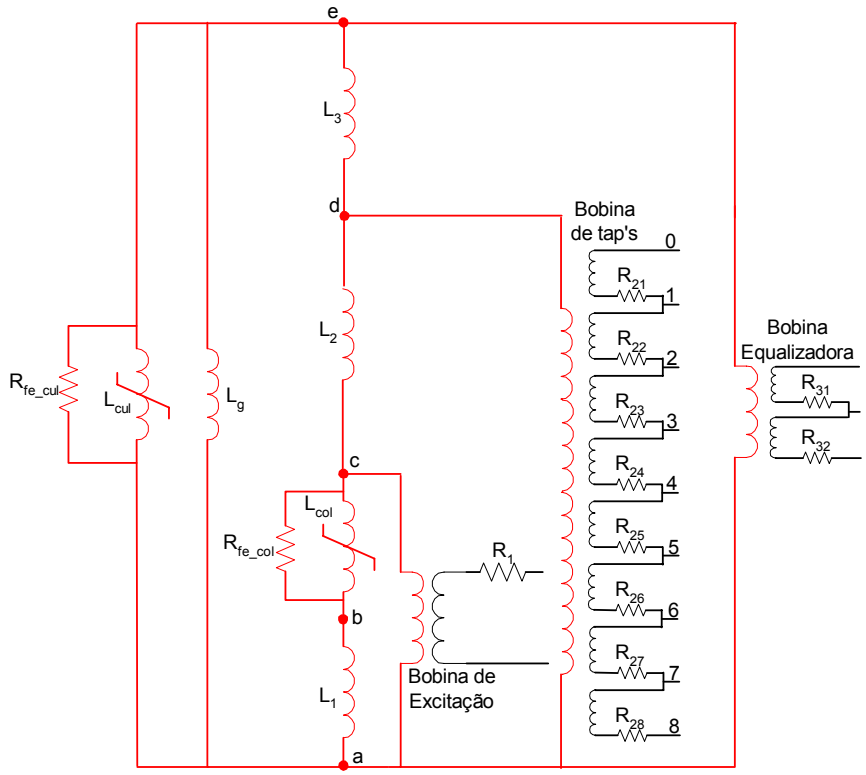


Figura 2.14: Circuito elétrico dual do regulador de tensão monofásico simplificado com as resistências representativas das perdas nas bobinas e no ferro.

2.6. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO

Para o cálculo dos parâmetros do circuito elétrico, são necessários alguns dados de projeto fornecidos pelo fabricante e da curva de magnetização BxH da chapa e alguns dados obtidos através de ensaios laboratoriais que possam substituir eventuais alterações nos dados de projeto.

2.6.1 - DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS NÃO LINEARES

As indutâncias não lineares L_{col} e L_{cul} do circuito elétrico representativo do regulador de tensão são modeladas por um indutor pseudo não linear saturável (tipo 98) disponível no programa ATP [16]. Este indutor utiliza como dado de

entrada o fluxo total concatenado e o valor da corrente correspondente à f.m.m. necessária para estabelecer o fluxo magnético no meio considerado. Em geral, essa relação entre o fluxo e a f.m.m. em um material ferromagnético pode ser obtida pelas conhecidas curvas de densidade de fluxo e campo magnético (B×H), características do material.

Na presente modelagem é utilizada uma curva fornecida pelo fabricante em unidades de [kG] para indução magnética (B) e [VA/kg] para campo magnético (H). Tal curva foi levantada com o núcleo já montado, o que impõe a influência do entreferro de junção incorporada na referida curva de magnetização. Sendo assim, a indutância representativa do entreferro deverá ser desconsiderada no circuito elétrico equivalente.

Uma vez que a indução magnética está relacionada com o fluxo, e o campo magnético relacionado com a corrente no enrolamento, pode-se estabelecer uma correspondência entre esses valores com base na condição nominal de forma que os pontos da curva de magnetização (indução [kG] e campo magnético [VA/kg]) possam ser convertidos em termos de λI (fluxo total [Wb-espira] e corrente [A]).

Como cada enrolamento (excitação, *tap´s* e equalização) está associado a um valor distinto de tensão, conseqüentemente, é fundamental que na representação do circuito magnético, os mesmos sejam referidos a um valor único de tensão. Para tanto, define-se uma base de tensão arbitrária para o circuito elétrico representativo do núcleo do regulador, denominada aqui por V_o. A partir dessa base de tensão pode-se definir um número de espiras N_o, o qual associado à corrente, representará a f.m.m. necessária para a produção de fluxo no núcleo, como mostrado na equação 2.1.

$$N_o = \frac{N \times V_o}{V_n} \tag{2.1}$$

onde:

N → número de espiras de um enrolamento;

N_o → número de espiras relativo à tensão base do núcleo;

V_n → valor nominal da tensão de cada enrolamento;

V_0 → valor da tensão adotado como base para o núcleo do regulador de tensão.

Desta forma, com a curva de magnetização disponível, alguns pontos são retirados em termos de B [kG] e H [VA/kg], sendo o ponto nominal fornecido pelo fabricante.

Para determinar o valor de pico do fluxo nominal utiliza-se a equação 2.2, mostrada abaixo. Este valor de fluxo é o mesmo tanto para a coluna quanto para a culatra, uma vez que as mesmas estão em série no circuito magnético. Observa-se aqui que as duas culatras são representadas no circuito equivalente como sendo uma única.

$$\lambda_n = \frac{V_o}{4,44 \times f} \quad [Wb - espira] \tag{2.2}$$

onde:

λ → valor de crista do fluxo magnético concatenado [Wb-espira];

V_o → valor eficaz da tensão nominal base do circuito magnético[V];

f → freqüência da rede dada em Hz.

Como o indutor pseudo não linear tipo 98 necessita como dado de entrada tanto o valor de pico do fluxo como o valor pico de corrente, estes valores poderão ser obtidos através da curva de magnetização fornecida pelo fabricante, utilizando os respectivos pesos da coluna e culatra.

Como a seção do núcleo magnético ao longo de todo o caminho percorrido pelo fluxo pode ser considerada homogênea (embora as culatras possuam metade da seção da coluna, o fluxo circulante pelas mesmas também é a metade, o que conduz à mesma densidade de fluxo), a massa (peso) total do núcleo ($M_{núcleo}$) pode ser expressa pelo produto da massa específica pelo volume, sendo este dado pelo produto da área da seção magnética pelo comprimento médio. Então, a massa da coluna é determinada pela equação 2.3.

$$M_{col} = \frac{M_{núcleo} \times V_{col}}{V_{núcleo}} = \frac{M_{núcleo} \times l_{col} \times S_m}{l_{núcleo} \times S_m} = \frac{M_{núcleo}}{l_{núcleo}} \times l_{col} \quad [kg] \tag{2.3}$$

Da mesma forma que mostrado na equação anterior, a massa da culatra pode ser determinada através da equação 2.4 abaixo:

$$M_{cul} = \frac{M_{núcleo}}{l_{núcleo}} \times l_{cul} \quad [kg] \tag{2.4}$$

De posse desses resultados, o cálculo dos valores de pico das correntes nominais, para a coluna e a culatra, é facilmente obtido com o auxílio das equações 2.5 e 2.6.

$$I_{col} = \sqrt{2} \times H_n \times \frac{M_{col}}{V_o} \quad [A] \tag{2.5}$$

$$I_{cul} = \sqrt{2} \times H_n \times \frac{M_{cul}}{V_o} \quad [A] \tag{2.6}$$

Onde V_o é a valor da tensão base, dado em [V] do circuito magnético e H é o valor nominal de campo magnético em [VA/kg] extraído da curva de magnetização para a densidade de fluxo nominal (16920 [G]).

Observa-se neste ponto que o fator $\sqrt{2}$ utilizado nas expressões 2.5 e 2.6 é para se obter o valor de pico da corrente a partir do seu valor eficaz. Entretanto, deve-se ter em mente que devido a não linearidade do circuito magnético a forma de onda da corrente não é perfeitamente senoidal e portanto, o fator $\sqrt{2}$ não se aplica a esses casos. O ideal seria que o fabricante, no momento em que determinou a curva de magnetização do núcleo, determinasse também o fator de forma da onda de corrente, ou seja, a relação entre o valor de crista e o valor eficaz, para que o mesmo pudesse ser utilizado na modelagem. Na ausência deste dado será considerado preliminarmente o fator $\sqrt{2}$ das expressões 2.5 e 2.6 e um posterior ajuste, se necessário.

Desta forma são obtidos os dois pontos nominais em termos de λI, sendo um para a coluna (λ_{col}, I_{col}), e outro para a culatra (λ_{cul}, I_{cul}). Com esses valores e com os demais pontos extraídos da curva de magnetização, encontram-se os

valores de fluxo e corrente (λ,I) para serem utilizados nas modelagens dos indutores não lineares. As equações 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10 generalizam tal procedimento.

$$\lambda_{col\text{-}i} = \frac{B_i}{B_n} \times \lambda_{col} \ [Wb] \tag{2.7}$$

$$i_{col\text{-}i} = \frac{H_i}{H_n} \times I_{col} \ [A] \tag{2.8}$$

$$\lambda_{cul\text{-}i} = \frac{B_i}{B_n} \times \lambda_{cul} \ [Wb] \tag{2.9}$$

$$i_{cul\text{-}i} = \frac{H_i}{H_n} \times I_{cul} \ [A] \tag{2.10}$$

Nestas equações, os valores do campo magnético H_n e de indução magnética B_n são os valores nominais, fornecidos pelo fabricante. O índice "i" indica um ponto qualquer na curva de magnetização. Aplicando estas equações para cada ponto retirado da curva de magnetização obtêm-se os dados que serão utilizados pelo ATP, na implementação dos indutores não lineares.

2.6.2 - DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS LINEARES

Para a determinação das indutâncias lineares procurou-se utilizar dados obtidos através da geometria do núcleo do regulador, visando sempre apresentar uma metodologia prática de fácil execução.

A geometria do núcleo pode ser visualizada pelas figuras 2.15 e 2.16. Na figura 2.15 é mostrado um corte longitudinal no núcleo, destacando os comprimentos médios dos circuitos magnéticos da coluna e culatra. Na figura 2.16 é mostrado um corte transversal na coluna central, incluindo cada uma das bobinas existentes na mesma. Tais figuras darão suporte para os cálculos das indutâncias lineares.

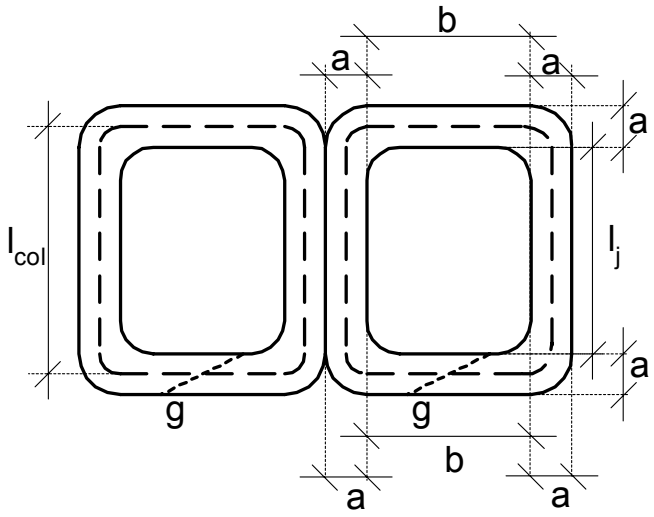


Figura 2.15: Corte longitudinal no núcleo do regulador de tensão, mostrando os comprimentos médios dos circuitos magnéticos de coluna e culatra.

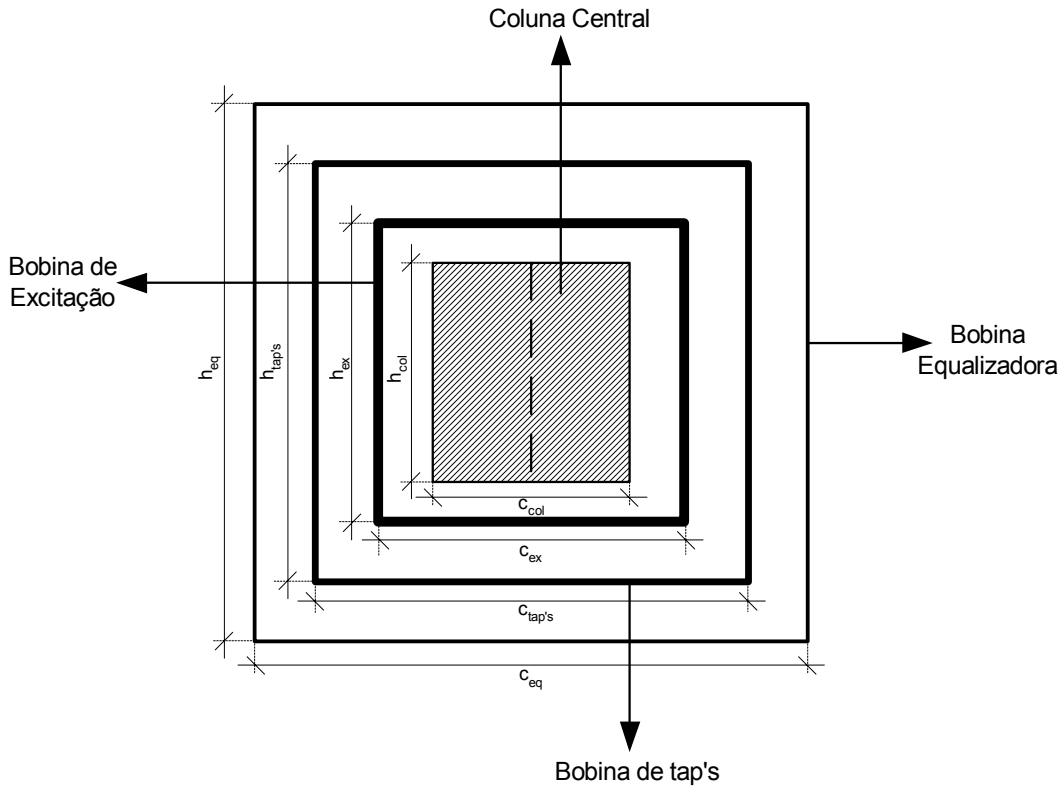


Figura 2.16: Corte transversal na coluna central do regulador de tensão, mostrando as dimensões das bobinas existentes.

(A) - INDUTÂNCIA L_1

A indutância L_1 é representativa da parcela do fluxo mútuo através do ar entre a coluna e a bobina de excitação, e, para a sua determinação, optou-se por utilizar os dados geométricos do regulador, fornecidos pelo fabricante. A partir destes dados, pode-se determinar a relutância do caminho magnético pelo ar entre a coluna e a bobina de excitação como descrito a seguir.

A área que a bobina de excitação S_{ex} envolve é dado pela equação 2.11, onde h_{ex} e c_{ex} são as dimensões externas da bobina, como pode ser visualizado na figura 2.16.

$$S_{ex} = h_{ex} \times c_{ex} \ \ [m^2] \tag{2.11}$$

Para o cálculo da relutância $\mathfrak{R}_1$ necessita-se conhecer a área S_1 entre a bobina de excitação e a coluna. S_1 é obtida subtraindo da área S_{ex}, a área da coluna S_{col}, como mostrado na equação 2.12.

$$S_1 = S_{ex} - S_{col} \ \ [m^2] \tag{2.12}$$

Para a coluna, deve-se considerar somente a área líquida de material ferromagnético, que é obtida considerando o fator de empilhamento das chapas f_{ep}. Sendo assim, a área da coluna S_{col} é obtida através da equação 2.13.

$$S_{col} = h_{col} \times c_{col} \times f_{ep} \ \ [m^2] \tag{2.13}$$

A partir da área obtida em 2.12 e conhecendo o valor da permeabilidade magnética do ar ($\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7} \ H/m$) pode-se calcular a relutância $\mathfrak{R}_1$ do caminho de ar entre a bobina de excitação e o núcleo pela equação 2.14.

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{l_j}{\mu_0 \times S_1} \ \ [H^{-1}] \tag{2.14}$$

Onde o comprimento do caminho magnético de ar entre a bobina de excitação e a coluna é o comprimento da janela l_j.

Para calcular a indutância linear representativa do espaço de ar entre a coluna e a bobina de excitação deve-se utilizar o valor de $\mathfrak{R}_1$ e o número de espiras da mesma N_1. Entretanto, o valor obtido deve ser referido à base de tensão V_o adotada para o núcleo, ou seja, o mesmo deverá ser multiplicado pela relação (V_o/V_1) elevada ao quadrado. Isto equivale a utilizar o número de espiras do enrolamento relativo à tensão base do núcleo N_o, como mostra a equação 2.15.

$$L_1 = \frac{N_0^{\ 2}}{\Re_1} \times 10^3 \quad [mH] \tag{2.15}$$

Onde o fator (10^3) é utilizado para expressar a indutância L_1 em [mH].

(B) - INDUTÂNCIA L_2

O procedimento adotado para determinar a indutância de dispersão L_2 é idêntico ao utilizado para a determinação da indutância L_1.

A área que a bobina de *tap's* envolve é dado pela equação 2.16.

$$S_{tap's} = h_{tap's} \times c_{tap's} \quad [m^2] \tag{2.16}$$

A área de ar S_2 por onde o fluxo ϕ_2 deverá fluir é obtida por 2.17.

$$S_2 = S_{tap's} - S_{ex} \quad [m^2] \tag{2.17}$$

A relutância $\mathfrak{R}_2$ é calculada com a ajuda da equação 2.18, idêntica a equação 2.14, só que aplicada na área específica S_2.

$$\Re_2 = \frac{l_j}{\mu_0 \times S_2} \quad [H^{-1}] \tag{2.18}$$

Novamente o comprimento do caminho magnético de ar entre a bobina de *tap's* e a bobina de excitação é considerado como sendo o mesmo valor do comprimento da janela l_j.

O valor de L_2 é obtido com a equação 2.19.

$$L_2 = \frac{1}{n} \times \frac{N_0^{\ 2}}{\Re_2} \times 10^3 \ \ [mH] \tag{2.19}$$

Onde n é o número de derivações do enrolamento de *tap´s* e N_0 é o número de espiras da bobina de *tap'*s relativo à tensão base no núcleo.

Observa-se que o valor L_2, calculado da forma apresentada, refere-se ao valor equivalente de todas as indutâncias relativas a cada *tap* do enrolamento.

(C) - INDUTÂNCIA L_3

O cálculo da indutância de dispersão L_3 seguindo os mesmos passos dos cálculos das indutâncias L_1 e L_2, pode ser visto a seguir.

A área que a bobina equalizadora envolve é dado pela equação 2.20.

$$S_{eq} = h_{eq} \times c_{eq} \ \ [m^2] \tag{2.20}$$

A área S_3 entre a bobina equalizadora e a bobina de *tap's* é mostrada na equação 2.21.

$$S_3 = S_{eq} - S_{tap's} \ \ [m^2] \tag{2.21}$$

A relutância $\Re_3$ é calculada com a ajuda da equação 2.22.

$$\Re_3 = \frac{l_j}{\mu_0 \times S_3} \ \ [H^{-1}] \tag{2.22}$$

Mais uma vez o comprimento do caminho magnético de ar entre a bobina equalizadora e a bobina de *tap'*s tem o mesmo valor do comprimento da janela l_j.

O valor de L_3 é obtido com a equação 2.23, onde N_0 é o número de espiras da bobina equalizadora relativo à tensão base no núcleo.

$$L_3 = \frac{1}{2} \times \frac{N_0^{\ 2}}{\Re_3} \times 10^3 \ \ [mH] \tag{2.23}$$

2.6.3 - DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELATIVAS ÀS PERDAS NO FERRO

As perdas no ferro são distribuídas entre a coluna e culatra na proporção de suas massas e representadas no circuito elétrico equivalente por resistências em paralelo com os indutores não lineares.

Como o valor da perda do núcleo, aqui representada por $W_{fe_núcleo}$, é um dado fornecido pelo fabricante e como a massa da coluna M_{col} e da culatra M_{cul} também são conhecidas, determinam-se às perdas nas colunas e nas culatras, como indicado em 2.24 e 2.25.

$$W_{fe_col} = W_{fe_núcleo} \times \frac{M_{col}}{M_{total}} \; [W] \tag{2.24}$$

$$W_{fe_cul} = W_{fe_núcleo} \times \frac{M_{cul}}{M_{total}} \; [W] \tag{2.25}$$

As resistências associadas a estas perdas são determinadas aplicando as equações 2.26 e 2.27 abaixo apresentadas.

$$R_{fe_col} = \frac{V_o^{\,2}}{W_{fe_col}} \; [\Omega] \tag{2.26}$$

$$R_{fe_cul} = \frac{V_o^{\,2}}{W_{fe_cul}} \; [\Omega] \tag{2.27}$$

Onde V_o é o valor da tensão base, já referido anteriormente.

2.7. MODELAGEM DO REATOR DE COMUTAÇÃO

O reator de comutação terá seu modelo desenvolvido adotando-se, como base, o mesmo princípio utilizado para representar o regulador de tensão.

A figura 2.17 mostra o núcleo do reator de comutação e a distribuição de fluxo existente no mesmo, definindo suas dimensões, fornecidas pelo fabricante.

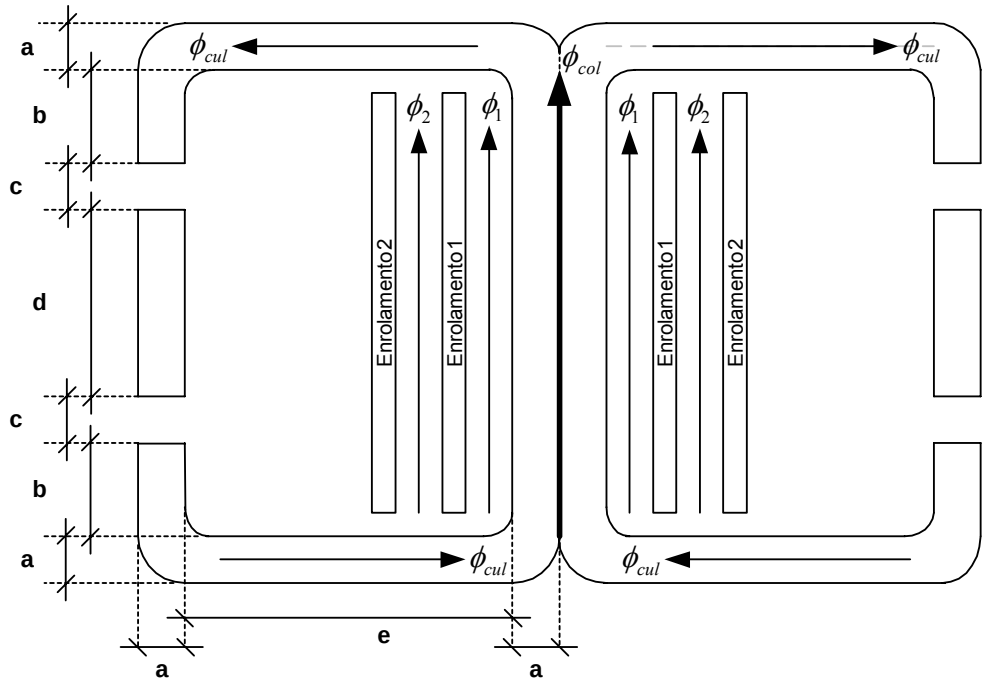


Figura 2.17: Distribuição de fluxo magnético no núcleo do reator, com suas dimensões.

A partir de tal distribuição de fluxo no núcleo do reator pode-se obter o circuito magnético, como mostrado na figura 2.18.

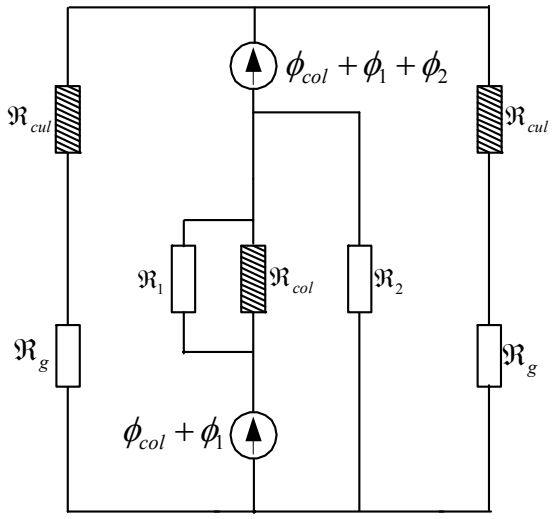


Figura 2.18: Circuito magnético do reator.

Para se obter o circuito elétrico equivalente de reator, que será implementado no programa ATP, necessita-se aplicar o princípio da dualidade no circuito da figura 2.18, como foi apresentado na seção 2.6 para o regulador. A figura 2.19 mostra a interligação dos pontos para a aplicação do princípio da dualidade.

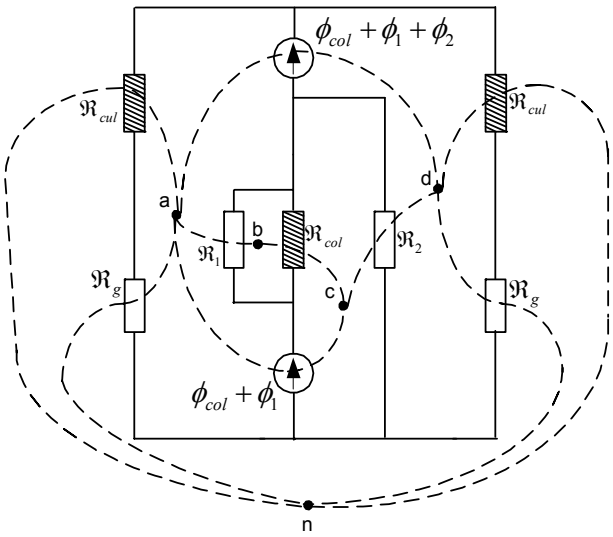


Figura 2.19: Interligação dos pontos para aplicação do princípio da dualidade.

Após este procedimento, é encontrado o circuito elétrico equivalente para o reator de comutação apresentado na figura 2.20. Note que neste circuito já estão inclusas as resistências representativas de perdas no ferro e no cobre e,

também, a simplificação para as culatras, isto é, forma substituídas as indutâncias que ficaram em série no circuito elétrico por uma única equivalente (L_{cul}).

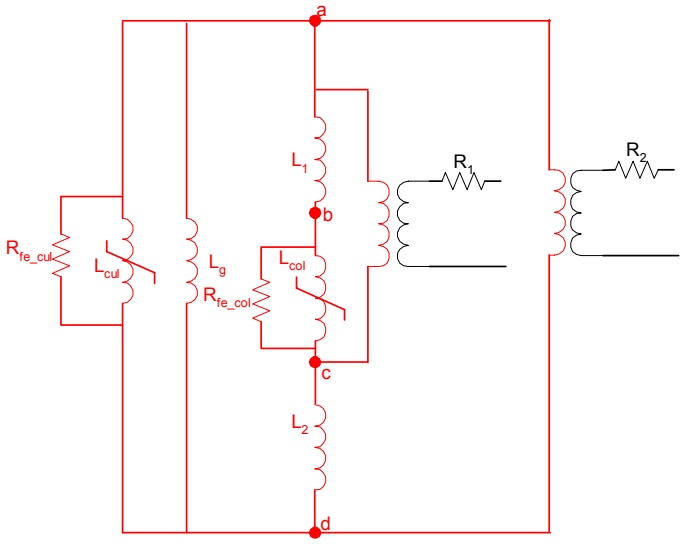


Figura 2.20: Circuito elétrico equivalente do reator de comutação.

Dentre os dados fornecidos pelo fabricante em relação ao reator de comutação estão presentes, as dimensões finais das bobinas interna e externa. A partir das dimensões finais e sabendo-se que essas bobinas tem o mesmo número de espiras poder-se-á estabelecer as dimensões de cada uma, fazendo uma distribuição eqüitativa dos enrolamentos. A figura 2.21 mostra tais dimensões.

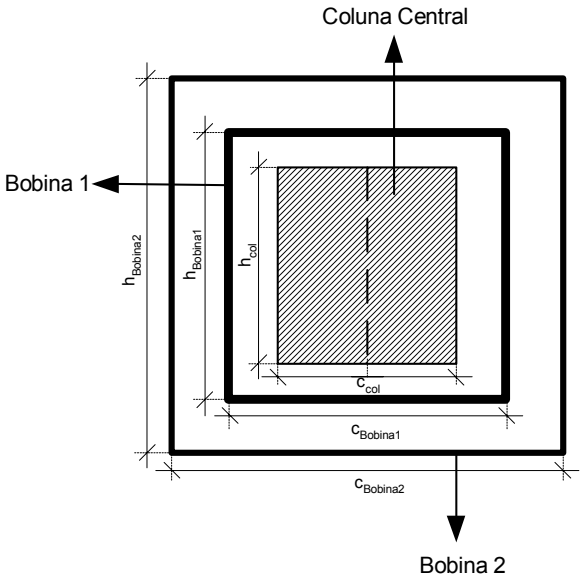


Figura 2.21: Dimensões das bobinas do reator de comutação.

Além dos dados já mencionados anteriormente, o fabricante também fornece a densidade de fluxo magnético nominal do reator de comutação B_n e o peso do núcleo $M_{núcleo}$. Para utilizar o valor de indução magnética nominal (B_n), que geralmente corresponde a um ponto que não consta na curva de magnetização dada, determina-se através de extrapolação linear o valor do respectivo campo magnético H_n.

Para se determinar o modelo do reator, inicialmente, é necessário conhecer os comprimentos da coluna e da culatra. Da figura 2.17, podem ser extraídos os dados requeridos em tais cálculos. Na equação 2.28 e 2.29 são mostrados os procedimentos para o cálculo do comprimento da coluna e da culatra, respectivamente.

$$l_{col} = \frac{a}{2} + \frac{a}{2} + 2b + 2c + d \quad [cm] \tag{2.28}$$

$$l_{cul} = 3a + 2b + d + 2e \;\; [cm] \tag{2.29}$$

É importante verificar que na determinação do comprimento da culatra os entreferros não são contados. Assim o comprimento médio de todo circuito magnético constituído pelo material ferromagnético é determinado pela equação 2.30.

$$l_{núcleo} = l_{col} + l_{cul} \;\; [cm] \tag{2.30}$$

Com este dado, a corrente requerida nas bobinas para fazer circular o fluxo no material magnético da coluna e culatra pode ser determinada pela distribuição de seus respectivos pesos, como já mostrado nas equações 2.3 e 2.4, uma vez que o peso total do núcleo do reator é também fornecido pelo fabricante.

Com tais resultados, as correntes serão calculadas da mesma forma como foram calculadas nas equações 2.5 e 2.6 para o regulador de tensão. Adotando o próprio valor da tensão aplicada nas bobinas como o valor base V_0.

Sabendo-se que o entreferro deverá ser ajustado para fazer circular pelas bobinas uma corrente igual a metade da corrente de carga I_L, quando a mesma estiver submetida à tensão V_o, então, a f.m.m. necessária para fazer o fluxo magnético fluir requer uma corrente de $I_L - (I_{col} + I_{cul})$ $[A]$. Realizando este cálculo perceber-se-á que praticamente toda a f.m.m. é utilizada para a circulação do fluxo no reator requerida pelo entreferro.

Esse fato, associado à característica linear do material magnético devido à baixa indução magnética, permite concluir que a representação do núcleo magnético por uma indutância linear é satisfatória. Assim, o modelo do reator pode ser simplificado como mostrado na figura 2.22, na qual é desconsiderado o efeito não linear do núcleo.

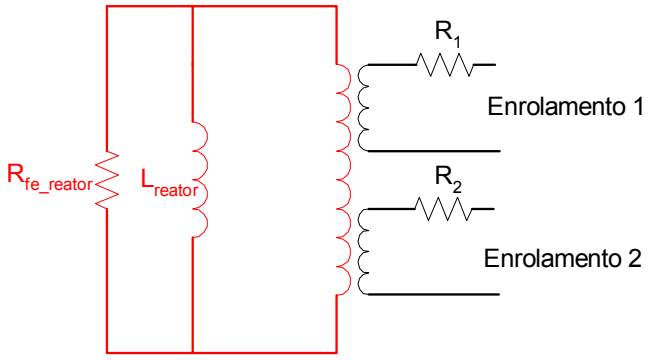


Figura 2.22: Modelo simplificado do reator de comutação.

Com a definição do modelo do reator, os cálculos da indutância L_{reator}, bem como da resistência representativa da perda no ferro R_{fe_reator}, são efetuados com a ajuda das equações 2.31 e 2.32 abaixo.

$$L_{reator} = \frac{V_{reator}}{(2 \times I_L) \times 2\pi \times f} \times 10^3 \quad [mH] \tag{2.31}$$

$$R_{fe_reator} = \frac{V_{reator}^{\ 2}}{W_{fe_reator}} \quad [\Omega] \tag{2.32}$$

Desta forma, o modelo do reator de comutação fica determinado por esses dois parâmetros associados a um transformador de três enrolamentos.

2.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi descrita uma metodologia para a modelagem de reguladores de tensão com vários degraus especialmente desenvolvida para ser implementado no programa ATP. A modelagem em questão leva em consideração os vários caminhos de fluxos magnéticos existentes no núcleo do regulador, os quais dão origem ao circuito magnético, que por sua vez é transformado num circuito elétrico através da aplicação do princípio da dualidade.

Na distribuição de fluxos mostrada, foram considerados fluxos mútuos que percorrem a coluna e as culatras enlaçando todos os enrolamentos existentes, além de se considerar os fluxos de dispersão, que percorrem o ar existente entre os enrolamentos.

Depois de estabelecer os caminhos dos fluxos magnéticos através do núcleo do regulador é possível determinar o circuito magnético equivalente. Esse circuito é composto por relutâncias, que representam cada caminho por onde os fluxos se estabelecem, e por fontes de forças magnetomotrizes referentes a cada enrolamento do regulador.

O programa ATP não trabalha com equações nem parâmetros magnéticos assim, com a aplicação do princípio da dualidade, princípio este que estabelece uma relação de correspondência entre os elementos do circuito magnético para um sistema elétrico chamado dual, chega-se ao circuito elétrico equivalente.

Para a determinação dos parâmetros do circuito elétrico são utilizados dados fornecidos pelo fabricante, tais como a curva de magnetização B×H da chapa do material magnético empregado no núcleo, dados geométricos, além da utilização de resultados de ensaios laboratoriais, realizados também pelo fabricante, tais como: ensaio a vazio e ensaio em curto circuito.

A curva de magnetização B×H fornecida foi levantada com o núcleo já montado, o que implica que a influência do entreferro de junção já está

incorporado nesta curva. No caso desta modelagem o ciclo de histerese não foi incluído, pois como é sabido, a partir do ponto de saturação o ciclo de histerese se confunde com a curva de magnetização. Assim, para o caso em estudo a curva de magnetização é suficiente para representar a não linearidade do núcleo.

Observa-se que o circuito equivalente proposto para representar o regulador de tensão é formado por indutores lineares e não lineares devidamente associados conforme o circuito magnético estabelecido para o núcleo. A não linearidade dos indutores pode propiciar variações abruptas de corrente que por sua vez poderão provocar oscilações numéricas nos indutores lineares. Tais oscilações são facilmente eliminadas utilizando resistências de alto valor em paralelo com os indutores lineares. Tais resistências podem ser determinadas por: $R = k \times \frac{2L}{\Delta t}$, onde: '$k$' é o fator para o cálculo da resistência em paralelo. Um valor aplicado comumente para o 'k' é 7,5. 'L' é o valor da indutância em [mH] e Δt é o valor do passo de integração utilizado. Nesse caso a maior preocupação fica relacionada com as perdas no ferro, pois as mesmas não poderão exceder o valor real definido pelo fabricante.

A meta para os próximos capítulos é verificar se a modelagem apresentada é satisfatória para o equipamento, buscando assim, a validação do modelo.

CAPÍTULO III

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MODELO REDUZIDO DE REGULADOR DE TENSÃO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O regulador de tensão de 32 degraus, para o qual apresentou-se, no capítulo 2, uma metodologia de modelagem, é um equipamento utilizado para regular a tensão em sistemas de distribuição em média tensão, na maioria das vezes 13,8 kV. Tal nível de tensão se apresenta bastante inviável para a realização de ensaios laboratoriais e medições em campo, exigindo para tanto sensores de tensão e/ou corrente devidamente posicionados no equipamento que na maioria das vezes não estão disponíveis.

Com o objetivo de criar condições de medições e registrar os efeitos transitórios devido às comutações de *tap´s* produzidos durante a operação de regulação de tensão, e também, para verificar a eficácia da metodologia de modelagem apresentada para o equipamento, buscou-se o desenvolvimento de um modelo reduzido do regulador de tensão em baixa tensão, com o qual serão realizados testes e ensaios, os quais poderão ser comparados com resultados de simulações, buscando, desta forma, realizar a validação da modelagem proposta.

Neste capítulo será apresentado todo o projeto para a determinação dos parâmetros de construção do modelo reduzido, sendo detalhado desde os

cálculos iniciais das tensões nos enrolamentos de *tap´s*, bobina de *tap*, determinação da seção magnética do núcleo, até os cálculos dos números de espiras dos enrolamentos, dimensionamento dos condutores e cálculo do reator de comutação. A partir desses dados do projeto serão determinados os parâmetros do circuito equivalente e construído o modelo.

Nas seções seguintes serão apresentados, com maiores detalhes, o procedimento do projeto do modelo reduzido do regulador de tensão.

3.2. MODELO REDUZIDO DO REGULADOR DE TENSÃO

O objetivo principal que levou à construção do protótipo foi buscar um meio de analisar os fenômenos transitórios devido à comutação de *tap´s* aos quais estão sujeitos os reguladores de tensão tentando assim, minimizar custos com os testes e facilitar a realização destes testes em laboratório, já que, com o equipamento em sua tensão típica, isto é, 13800 V, tais testes não seriam possíveis de serem realizados sem a utilização de sensores de tensão e corrente especialmente colocados no equipamento para tal fim.

A proposta do projeto é para um regulador de tensão com tensão nominal de 220 V, com corrente de carga de 10 A, obtendo uma faixa de regulação de tensão de ± 40 % da tensão nominal com 8 *tap´s* e 32 degraus de regulação.

3.2.1– CÁLCULOS INICIAIS

O passo inicial é a determinação das tensões nos enrolamentos de *tap´s*, bobinas de *tap* e bobina do enrolamento de equalização.

A equação 3.1 mostra como calcular a tensão nos enrolamentos de *tap´s*, tensão que representa a percentagem de regulação de tensão para a qual o regulador está sendo projetado.

$$V_{tap's} = F_R \times V_n \quad [V] \tag{3.1}$$

Onde:

$V_{tap's}$ → tensão nos enrolamentos de *tap´s*;

F_R → faixa de regulação de tensão;

V_n → tensão nominal.

Como foi especificado, o número de *tap´s* ($N_{tap's}$), foi definido como oito, desta forma, para definir a tensão em cada bobina de *tap* (V_T) aplica-se a equação 3.2 abaixo:

$$V_T = \frac{V_{tap's}}{N_{tap's}} \quad [V] \tag{3.2}$$

Já a tensão nos enrolamentos da bobina de equalização V_{eq} é calculada a partir do circuito de comutação. Sabe-se que este circuito é formado por duas bobinas do enrolamento de equalização mais duas bobinas do reator de comutação fechando na bobina de *tap*. A figura 3.1 apresenta a estrutura da bobina de equalização e o reator, mostrando a divisão da tensão entre as bobinas.

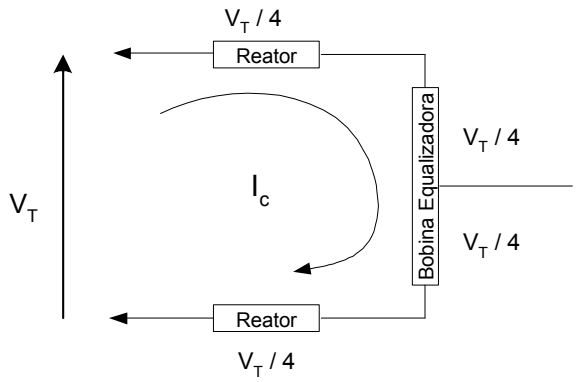


Figura 3.1: Circuito com a divisão da tensão entre as bobinas do reator e da bobina equalizadora.

Como a tensão nas bobinas do enrolamento de equalização e reator de comutação devem ser iguais, então a tensão em cada bobina é dada pela equação 3.3.

$$V_{eq} = \frac{V_T}{4} \ [V] \tag{3.3}$$

Ao se aplicar tensão ao reator de comutação haverá uma corrente de circulação I_c que deverá ser limitada para que não ocorra o desgaste excessivo dos contatos do comutador e a vida útil dos mesmos seja preservada [6]. Assim, a corrente de circulação é definida a partir da equação 3.4.

$$I_c = 0{,}5 \times I_L \ [A] \tag{3.4}$$

Onde I_L é a corrente de carga.

Após esses cálculos preliminares é necessário definir a potência eletromagnética P_{emg} para o equipamento. Para isso, devem-se determinar os valores das correntes nos enrolamentos, tanto para a situação de abaixador como elevador de tensão, e a potência eletromagnética.

Inicialmente, considerando o regulador como redutor de tensão, como mostra a figura 3.2, determinam-se as relações de correntes.

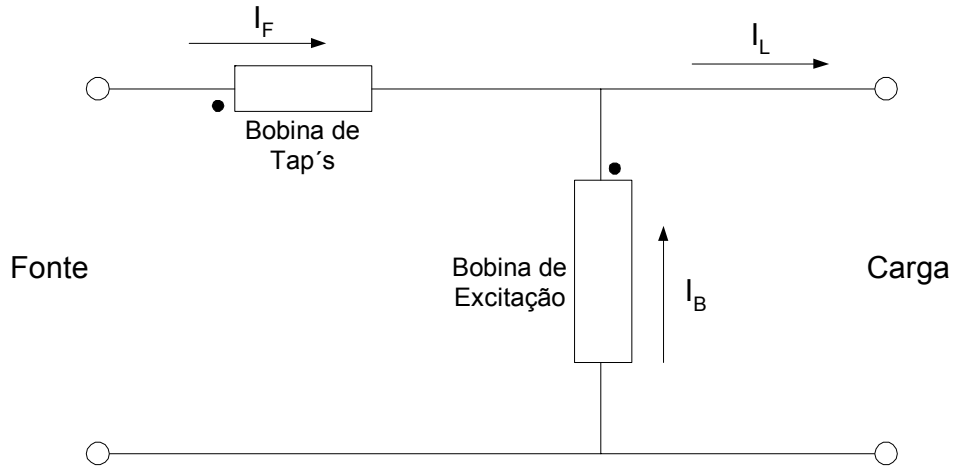


Figura 3.2: Caminhos das correntes para redução da tensão.

A equação 3.5 define a relação entre as tensões na bobina de *tap´s* ($V_{tap´s}$) e de excitação (V_{ex}) com as suas respectivas correntes I_F *e* I_B.

$$\frac{V_{ex}}{V_{tap´s}} = \frac{I_C}{I_B} \tag{3.5}$$

Do circuito da figura anterior pode-se extrair, ainda, que a relação de correntes é dada pela equação 3.6 abaixo. É importante verificar que, para esse caso, as correntes I_F e I_C são iguais, ou seja é a corrente de circulação.

$$I_F = I_L - I_B \quad [A] \tag{3.6}$$

Com as equações 3.5 e 3.6 é possível calcular todas as correntes requeridas.

Agora, considerando o regulador como elevador de tensão, ter-se-á as mesmas relações anteriores, a única diferença é que a corrente na bobina de excitação inverte seu sentido, desta forma, na equação 3.5 coloca-se o valor da corrente I_B com sinal negativo. A figura 3.3 mostra o esquema.

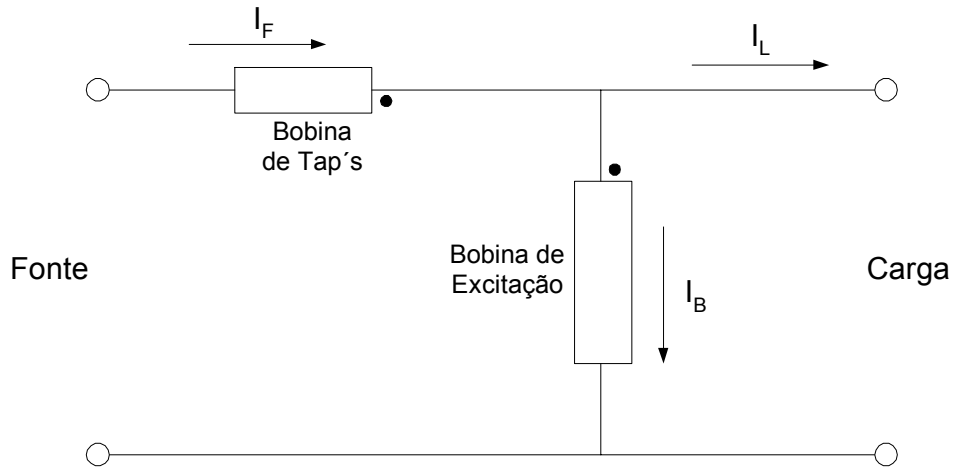


Figura 3.3: Caminhos das correntes para elevação da tensão.

Após os cálculos das correntes, já se tem condição de determinar o valor da potência eletromagnética P_{emg} do equipamento, para tal, escolhe-se o maior valor de I_B, que será a pior situação aplicada à bobina de excitação, e através da equação 3.7 calcula-se a potência.

$$P_{emg} = V_n \times I_B \quad [VA] \tag{3.7}$$

É importante salientar que o processo de determinação das correntes descrito acima foi apresentado com o intuito de esclarecer todo o procedimento, porém, pode-se observar que sempre ocorrerá um maior I_B quando se referir a

uma condição de elevação, assim, não é necessário realizar todo o cálculo, basta determinar as correntes para essa situação (elevação).

A seção magnética S_m requerida pode ser calculada com a aplicação da equação empírica 3.8, onde f é a freqüência do sistema em Hz [14,15].

$$S_m = 7{,}5 \times \sqrt{\frac{P_{emg}}{f}} \quad [cm^2] \tag{3.8}$$

3.2.2– CÁLCULO DOS NÚMEROS DE ESPIRAS DOS ENROLAMENTOS

Esta seção apresenta os cálculos relativos aos números de espiras dos enrolamentos de excitação, *tap´s* e equalização.

Para iniciar o processo é importante relembrar algumas expressões eletromagnéticas que serão de grande importância aqui. Sabe-se que o fluxo ϕ é determinado a partir da tensão, número de espiras N_{esp} e freqüência, como mostra a equação 3.9.

$$\phi = \frac{V_n}{4{,}44 \times N_{esp} \times f} \quad [Wb] \tag{3.9}$$

É sabido, também, que o fluxo pode ser definido através da indução magnética nominal B, conforme a equação 3.10.

$$\phi = B \times S_m \quad [Wb] \tag{3.10}$$

Substituindo a equação 3.10 na equação 3.9 e rearranjando os termos, pode-se extrair o valor do número de espiras de acordo com a equação 3.11.

$$N_{esp} = \frac{V_n}{4{,}44 \times B \times S_m \times f} \quad [espiras] \tag{3.11}$$

De posse destas equações é possível determinar o número de espiras para cada enrolamento, bastando para isso que se substitua no lugar de V_n as respectivas tensões de cada enrolamento, por exemplo, para o enrolamento de *tap´*s o valor de $V_{tap'\mathrm{s}}$ e assim, sucessivamente.

Para fins de projeto é importante notar que após se calcular os números de espiras de cada enrolamento, é necessário fazer o arredondamento dos mesmos, uma vez que números de espiras fracionários não são fáceis de se executar, observando que o arredondamento deve ser na mesma proporção para todas as bobinas.

3.2.3– DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES

Na seção anterior apresentaram-se os procedimentos para definir os números de espiras de cada enrolamento a partir da seção magnética estimada, da indução magnética adotada e da tensão aplicada a cada enrolamento. Nesta seção será apresentado o procedimento de cálculo para dimensionar os condutores com os quais serão confeccionados os enrolamentos.

O primeiro passo é definir qual o valor da densidade de corrente (σ) que será adotada para os condutores. A densidade de corrente é dada pela relação entre a corrente e a área da seção transversal do condutor (A/mm^2). Esse valor está relacionado com a perda de potência na bobina, a qual se transforma em calor devido ao efeito joule. Portanto, a temperatura admissível pelo isolante do condutor (esmalte) e o sistema de arrefecimento do regulador de tensão são parâmetros que definirão a densidade de corrente mais adequada. A experiência prática tem mostrado que para enrolamentos de transformadores a seco com fios esmaltados e em baixa tensão, a densidade de corrente de 2,5 A/mm^2 tem apresentado excelentes resultados no dimensionamento dos condutores, assim, este será o valor adotado neste projeto.

O outro dado importante é a corrente máxima que atravessa cada enrolamento (I_{max}). Essas correntes já foram definidas na seção 3.2.1.

A equação 3.12 apresenta como se determina a seção do condutor.

$$Seção\ do\ Condutor = \frac{I_{\max}}{\sigma}\ [mm^2] \qquad (3.12)$$

Com o resultado obtido do cálculo feito com a expressão anterior e de posse de um catálogo de condutores, define-se qual o condutor mais conveniente.

3.2.4– GEOMETRIA DAS BOBINAS

Nesta seção apresentar-se-á a configuração geométrica das bobinas. Para tal é preciso, inicialmente, adotar um tipo de núcleo no qual elas serão enroladas. Na prática existem dois tipos de núcleos, o núcleo envolvido, onde os enrolamentos estão envolvendo o material do núcleo e, os do tipo núcleo envolvente, que são aqueles em que o núcleo é que envolve os enrolamentos.

Para o projeto aqui proposto adotar-se-á o modelo tal como o regulador encontrado comercialmente, ou seja, com núcleo envolvente, sendo os enrolamentos colocados na coluna central.

A primeira etapa é determinar, a partir do número de espiras de cada enrolamento, o número de camadas que serão necessárias para compor a bobina. Uma questão determinante para o número de camadas é a altura da bobina. Este valor é estabelecido de acordo com as dimensões do núcleo.

Um dado prático encontrado nas tabelas de condutores esmaltados, que é muito útil para ajudar na definição da geometria das bobinas e do núcleo, é o número de espiras por centímetro, referido como bobinamento do condutor. Com esse dado determina-se o número de camadas e a altura da bobina.

3.2.5– GEOMETRIA DO NÚCLEO

Na seção 3.2.1 foi feita uma previsão quanto à seção magnética do núcleo a partir da potência eletromagnética e da freqüência que possibilitou o cálculo do número das bobinas. Observa-se, porém, que os números de espiras foram arredondados implicando em um ajuste na seção magnética. Por isso, nesta

etapa, será determinada a seção do núcleo utilizando o número de espiras arredondado.

A expressão que determina a seção magnética do núcleo pode ser extraída da equação 3.11, apresentada anteriormente. Fazendo as devidas modificações é possível determinar a equação 3.13.

$$S_m = \frac{V_n}{4,44 \times B \times N_{esp} \times f} \times 10^4 \quad [cm^2] \tag{3.13}$$

Com o valor da seção magnética e considerando que a mesma é quadrada pode-se calcular a altura do empilhamento a, determinado na equação 3.14 abaixo.

$$a = \sqrt{S_m} \quad [cm] \tag{3.14}$$

A altura do empilhamento é um dado importante porque é através dele que se determina o número de chapas que deverão ser colocadas para montar o núcleo magnético. A equação 3.15 mostra essa situação.

$$N_{chapas} = \frac{a}{e_{ch}} \quad [chapas] \tag{3.15}$$

Onde e_{ch} é o valor da espessura da chapa fornecida pelo fabricante.

Considera-se no projeto um fator de empilhamento k_e, fator este que se justifica porque para a montagem, é sabido que acabam existindo alguns espaços entre as chapas, levando sempre a um valor de seção maior que o real.

A partir dessa consideração são definidas as seções, magnética S_m e geométrica S_{geo}, e também, a indução magnética que realmente estará submetido o núcleo. As equações 3.16 e 3.17 apresentam, na seqüência, como se determinam a seção magnética e a geométrica.

$$S_m = l_c \times a \quad [cm^2] \tag{3.16}$$

O termo l_c representa a largura da chapa.

$$S_{geo} = l_c \times l_c \quad [cm^2] \tag{3.17}$$

3.3. PROTÓTIPO DO REATOR DE COMUTAÇÃO

Nas seções anteriores foi descrita uma metodologia para calcular os parâmetros necessários ao regulador de tensão, sendo apresentado o procedimento de forma detalhada. Iniciar-se-á neste tópico a metodologia para o dimensionamento do reator de comutação, peça de grande importância para o funcionamento do regulador de tensão convencional.

O reator de comutação tem como principal função não permitir a interrupção do circuito durante a comutação de *tap´s*.

Para dar início aos cálculos do reator de comutação serão necessários alguns dados que já foram definidos anteriormente. O primeiro valor importante é a tensão aplicada em cada bobina do reator V_{reator}. Observa-se que a queda de tensão na bobina do reator deve ser igual à tensão na bobina de equalização V_{eq} quando o mesmo for percorrido pela metade da corrente de carga I_L. Esses são os dados nominais que deverão nortear o projeto do reator de comutação, ou seja, $V_{reator} = V_{eq}$; $I_{reator} = 0,5 \times I_L$.

Com esses dados é possível determinar a potência magnética do reator de comutação e fazer a estimativa inicial da seção magnética do núcleo.

Após essas definições preliminares, já é possível iniciar o processo de cálculo dos parâmetros do reator de comutação.

O procedimento para determinar os parâmetros para o reator de comutação é, praticamente, o mesmo utilizado no cálculo do regulador de tensão. Sendo assim, para não tornar a leitura muito cansativa, não serão repetidos os passos iguais, apenas será acrescentado o cálculo do entreferro. Qualquer dúvida que possa haver nesta etapa poderá ser sanada posteriormente, na apresentação do exemplo numérico.

3.3.1– DIMENSIONAMENTO DO ENTREFERRO

O dimensionamento do entreferro tem início com o cálculo da indutância do reator de comutação, que é obtida conforme a equação 3.18.

$$L = \frac{V}{2\pi \times f \times I} \times 10^{-3} \quad [mH] \tag{3.18}$$

A relutância do circuito magnético é determinada a partir do número de espiras da bobina e do valor calculado da indutância, a equação 3.19 apresenta essa situação.

$$\Re = \frac{N_{esp}^{\ 2}}{L} \quad [H^{-1}] \tag{3.19}$$

O valor calculado acima é a relutância total do circuito, portanto é necessário determinar o valor da relutância do ferro, pois assim, ter-se-á o valor da relutância do entreferro, necessária para o cálculo do mesmo.

Para determinar a relutância do ferro, primeiramente, é preciso conhecer o comprimento médio do circuito magnético e, portanto a configuração geométrica do núcleo. Adotando a configuração mostrada na figura 3.4, na qual se destaca, pelas linhas tracejadas, o comprimento médio do circuito magnético, pode-se estabelecer a expressão 3.20 a seguir para determinar o comprimento médio do circuito magnético na parte de ferro.

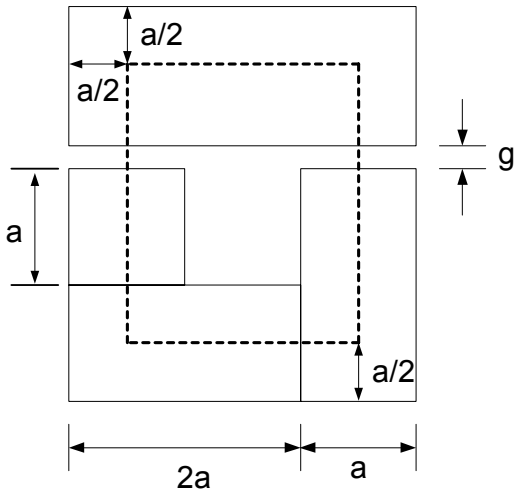


Figura 3.4: Comprimento médio do circuito magnético.

$$l = 4 \times 2a \quad [cm] \tag{3.20}$$

Extraindo da curva de magnetização B×H os valores para *B* e *H*, substituindo esses valores na equação 3.21 determina-se a permeabilidade magnética do ferro.

$$\mu_{FE} = \frac{B}{H} \quad [H/m] \tag{3.21}$$

Sendo *B* dado em [Wb/m^2] e *H* em [Ae/m].

A relutância da parte de ferro é, então calculada, com a equação 3.22.

$$\Re_{FE} = \frac{l}{\mu_{FE} \times S_m} \quad [H^{-1}] \tag{3.22}$$

Subtraindo o valor da relutância do ferro da relutância total obtida em 3.19, obtém-se a relutância do entreferro. Utilizando a mesma equação 3.22 acima, pode-se também determinar o valor da relutância do entreferro, bastando para isso substituir o comprimento *l* pelo comprimento do entreferro *2g* e a permeabilidade do ferro μ_{FE} pela do ar μ_0 e a área total S_m pela área do entreferro S_g, como mostrado pela equação 3.23.

$$\Re_g = \frac{2g}{\mu_0 \times S_g} \quad [H^{-1}] \tag{3.23}$$

Para determinar a área do entreferro utiliza-se a equação 3.24. Vale ressaltar que o fator de espraiamento comumente utilizado é $k_d = 0{,}90$ [14].

$$S_g = \frac{S_m}{k_d} \quad [cm^2] \tag{3.24}$$

O comprimento do entreferro pode ser calculado com a equação 3.23, bastando para tal, apenas que se isole o "*g*".

Observa-se que o valor calculado pode ser alterado em função da montagem das chapas que constituem o núcleo, portanto, o mesmo deve ser ajustado após a construção do reator.

3.4. EXEMPLO DE CÁLCULO

Com base nas seções anteriores, nesta seção serão apresentados todos os passos de cálculo para o projeto do modelo reduzido do regulador de tensão.

3.4.1– CÁLCULOS INICIAIS DO REGULADOR

Conforme citado anteriormente na seção 3.2.1, serão calculadas as tensões em cada enrolamento.

Por razões de melhor entendimento, a tabela 3.1 fornece os dados nominais necessários para iniciar os cálculos.

Tabela 3.1: Dados nominais do protótipo do regulador de tensão.

TENSÃO REGULADA	**220 V**
CORRENTE DE CARGA	**10 A**
FAIXA DE REGULAÇÃO DA TENSÃO	**± 40 %**
NÚMERO DE TAP´S	**8**

(A) TENSÃO NO ENROLAMENTO DE TAP´S

Seguindo o procedimento já descrito para o cálculo da tensão no enrolamento de *tap´s* $V_{tap's}$, basta aplicar a equação 3.1 para se obter tal valor.

$$V_{tap's} = 0,40 \times 220 = 88 \ [V]$$

Para definir a tensão em cada bobina de tap basta aplicar a equação 3.2.

$$V_T = \frac{88}{8} = 11 \ [V]$$

(B) TENSÃO NO ENROLAMENTO DE EQUALIZAÇÃO

Para o cálculo da tensão em cada bobina do enrolamento de equalização utiliza-se a equação 3.3.

$$V_{eq} = \frac{11}{4} = 2,75 \ \ [V]$$

(C) CORRENTE DE CIRCULAÇÃO

O cálculo da corrente de circulação é um fator extremamente importante, e como foi definido anteriormente, com a equação 3.4, pode-se determiná-la.

$$I_c = 0,5 \times 10 = 5 \ \ [A]$$

(D) POTÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

Para determinar a potência eletromagnética do equipamento é preciso conhecer o valor da corrente que circula pelo enrolamento de excitação. Na seção 3.2.1 foi definido o procedimento para determinar essa corrente. Seguindo o procedimento descrito, a figura 3.5 apresenta os valores para tal corrente com o regulador conectado como abaixador de tensão e a figura 3.6 com a conexão como elevador de tensão.

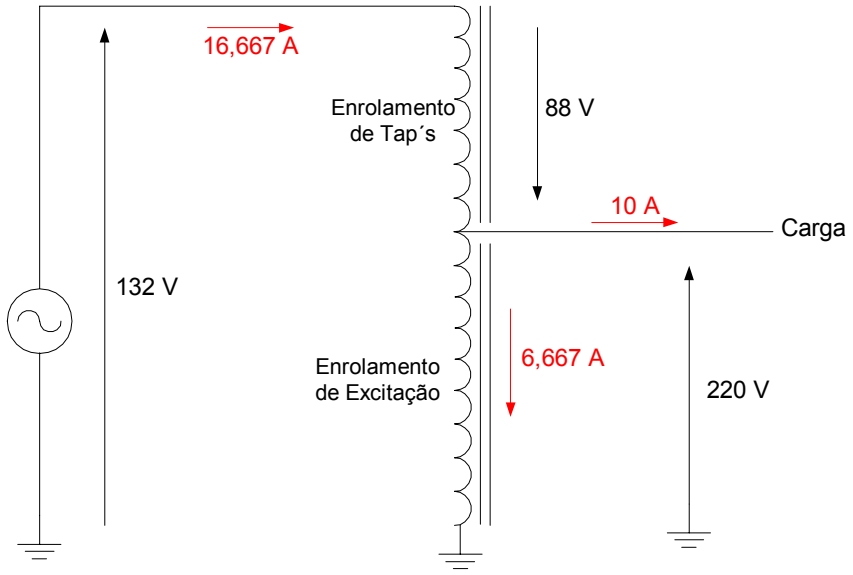


Figura 3.5: Correntes nos enrolamentos com conexão para elevação da tensão.

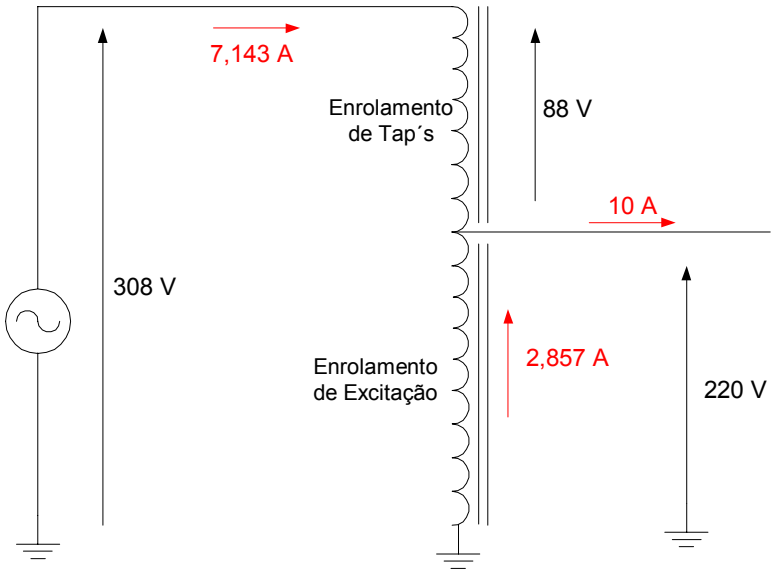


Figura 3.6: Correntes nos enrolamentos com conexão para redução da tensão.

De acordo com o que foi descrito na seção 3.2.1, a corrente que deverá ser utilizada para o cálculo é o maior valor obtido. Assim, com a equação 3.7 determina-se a potência eletromagnética.

$$P_{emg} = 220 \times 6,667 = 1467,6 \ \ [VA]$$

$$P_{emg} \approx 1500 \ \ [VA]$$

(E) SEÇÃO MAGNÉTICA DO NÚCLEO

Com os dados calculados anteriormente e considerando um núcleo magnético de seção quadrada, constituído de chapa de aço silício GO tipo E005 (M05) da ACESITA de 0,3 mm de espessura [18], a área da seção magnética pode ser estimada pela equação 3.8.

$$S_m = 7{,}5 \times \sqrt{\frac{1500}{60}} = 37{,}5 \ [cm^2]$$

3.4.2– CÁLCULO DOS NÚMEROS DE ESPIRAS DOS ENROLAMENTOS

De acordo com a seção 3.2.2, após os cálculos preliminares, é necessário definir o número de espiras dos enrolamentos.

Como já foi mencionado antes, a partir da equação 3.11 podemos determinar o número de espiras de cada um dos enrolamentos, porém é preciso saber qual a indução magnética nominal (*B*). Como o valor da seção magnética do núcleo é um valor estimado, adota-se, então, *B* = 1,6 [T]. Assim, determina-se o número de espiras para cada enrolamento.

(A) ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO

$$N_{esp} = \frac{220}{4{,}44 \times 1{,}6 \times 37{,}5 \times 10^{-4} \times 60} = 137{,}64 \ [espiras]$$

(B) ENROLAMENTO DE TAP´S

$$N_{esp} = \frac{88}{4{,}44 \times 1{,}6 \times 37{,}5 \times 10^{-4} \times 60} = 55{,}06 \ [espiras]$$

(C) ENROLAMENTO DE EQUALIZAÇÃO

$$N_{esp} = \frac{2 \times 2,75}{4,44 \times 1,6 \times 37,5 \times 10^{-4} \times 60} = 3,44 \ [espiras]$$

É sabido que não é prático confeccionar bobinas com valores não-inteiros para o número espiras, por isso, é conveniente realizar os devidos arredondamentos.

O número de espiras do enrolamento de equalização será arredondado para quatro, ficando determinado que serão duas bobinas com duas espiras cada, ou seja, quatro espiras com derivação na segunda espira. Assim fazendo, todas as demais bobinas deverão ter o seu número de espiras alterado na mesma proporção.

Na seqüência, é preciso determinar as espiras do enrolamento de *tap´s*, neste caso, pode-se fazer uma regra de três simples, onde se associam os valores das tensões nos enrolamentos de *tap´s* e de equalização com os números de espiras de cada um deles, como mostrado abaixo:

$$\frac{V_{eq}}{V_{tap´s}} = \frac{N_{espeq}}{N_{esptap}} \Rightarrow \frac{5,5}{88} = \frac{4}{N_{esptap}} \Rightarrow N_{esptap} = 64 \ [espiras]$$

Desta forma fica determinado o valor de 64 espiras para o enrolamento de *tap´s*, sendo que, serão 8 bobinas com 8 espiras cada, ou seja, 64 espiras com derivações em cada grupo de 8 espiras.

O ajuste para o enrolamento de excitação se faz da mesma maneira que o anterior, como mostrado abaixo.

$$\frac{V_{eq}}{V_{exc}} = \frac{N_{espeq}}{N_{espexc}} \Rightarrow \frac{5,5}{220} = \frac{4}{N_{espexc}} \Rightarrow N_{espexc} = 160 \ [espiras]$$

3.4.3– DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES

Conforme mencionado na seção 3.2.3, a próxima etapa é definir a seção dos condutores com os quais serão confeccionados os enrolamentos. Para isso é necessário, em primeiro lugar, adotar um valor para a densidade de corrente (σ). O valor adotado é 2,5 A/mm^2. que é um valor típico utilizado para pequenos transformadores de baixa tensão (a seco).

Além da densidade de corrente é preciso conhecer o valor das correntes máximas que passam em cada enrolamento e possuir um catálogo de condutores de algum fabricante. Como essas correntes já foram determinadas na seção 3.4.1, é possível, então, determinar, a partir da equação 3.12, a seção dos condutores.

(A) ENROLAMENTO DE TAP´S

O valor da corrente máxima do enrolamento de *tap´s* foi calculado e apresentado na figura 3.5, de onde obtemos I_{max} = 16,667 A.

$$Seção\ do\ Condutor = \frac{16,667}{2,5} = 6,667\ [mm^2]$$

De acordo com a tabela 3.2, que apresenta características de condutores esmaltados, a bitola do condutor utilizado será 9 AWG que possui seção igual a 6,63 mm^2 e o bobinamento será de 3,1 espira/cm.

Tabela 3.2: Tabela para dimensionamento dos condutores.

TABELA DE FIOS PARA ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES
BASEADA NA TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA DE 20º CENTÍGRADOS

Número	Diâmetro	Secção	Corrente	Resistência	Pêso	Espiras/cm	
#	(mm)	(mm^2)	(A)	(Ω/m)	(g/m)	DCC	Esmalte
0000	11,68	107,21	400	,000157	1073	....	....
000	10,38	85,02	290	,000197	855	....	....
00	9,36	67,43	240	,000252	675	....	....
0	8,25	53,50	190	,000317	535	1,07	1,09
1	7,34	42,40	150	,00040	400	1,20	1,23
2	6,54	33,63	120	,00050	319	1,35	1,38
3	5,82	26,67	100	,00063	250	1,50	1,55
4	5,18	21,15	80	,00080	191	1,70	1,75
5	4,61	16,76	60	,00101	150	1,90	1,95
6	4,11	13,30	48	,00127	120	2,10	2,15
7	3,66	10,55	38	,00170	95	2,30	2,4
8	3,26	8,36	31	,00203	71	2,60	2,7
9	2,90	6,63	24	,00256	56	3,00	3,1
10	2,58	5,26	19	,00323	45	3,35	3,5
11	2,30	4,17	15	,00407	35,5	3,75	3,9
12	2,05	3,30	12	,00513	28,5	4,2	4,4
13	1,82	2,62	9,2	,00649	23,0	4,8	5,0
14	1,62	2,03	7,4	,00817	18,0	5,3	5,5
15	1,44	1,65	5,9	,01030	14,5	6,0	6,3
16	1,26	1,31	4,5	,01290	11,5	6,8	7,2
17	1,14	1,04	3,6	,01634	9,5	7,6	8,0
18	1,02	0,882	2,9	,02073	7,5	8,3	9,0
19	0,898	0,634	2,3	,02615	6,0	9,1	10,0
20	0,811	0,517	1,85	,03269	4,5	9,9	11,2
21	0,722	0,410	1,45	,04146	4,0	10,8	12,5
22	0,643	0,325	1,17	,0515	3,0	12,0	14,0
23	0,573	0,258	0,94	,0654	2,5	13,0	15,7
24	0,510	0,204	0,74	,0850	2,0	14,0	17,8
25	0,454	0,161	0,57	,1062	1,5	15,5	20,0
26	0,404	0,128	0,45	,1307	1,3	17,0	22,5
27	0,360	0,102	0,37	,1700	1,0	18,5	25,0
28	0,321	0,0806	0,29	,2125	0,8	20,0	28,2
29	0,288	0,0640	0,235	,2656	0,65	21,2	31,5
30	0,254	0,0500	0,182	,3333	0,55	23,2	36
31	0,226	0,0400	0,152	,4245	0,50	25,0	40
32	0,201	0,0316	0,115	,5312	0,45	27,0	45
33	0,179	0,0250	0,102	,6693	0,30	29,5	51
34	0,160	0,0200	0,073	,8458	0,23	32	57
35	0,142	0,0155	0,056	1,060	0,20	34	63
36	0,127	0,0122	0,045	1,338	0,18	37	71
37	0,113	0,00951	0,036	1,700	0,15	39	79
38	0,100	0,00785	0,0275	2,152	0,13	42	88
39	0,0895	0,00630	0,0225	2,698	0,105	45	98
40	0,0790	0,00502	0,0178	3,400	0,100	49	108
41	0,0710	0,00400	0,0144	4,250	0,075	52	120
42	0,0635	0,00307	0,0112	5,312	0,055	55	138
43	0,0565	0,00250	0,0087	6,80	0,046	59	158
44	0,0500	0,00203	0,0069	8,50	0,038	63	180
45	0,0450	0,00156	0,0056	10,10	0,027	68	202
46	0,0380	0,00114	0,0040	15,00	0,020	74	224

(B) ENROLAMENTO DE EQUALIZAÇÃO

Para o enrolamento de equalização a corrente máxima é definida como sendo a metade da corrente que passa pelo enrolamento de *tap´s* somada à corrente de circulação, ou seja:

$$I_{\max} = \frac{I_{\max tap}}{2} + I_c \Rightarrow \frac{16,667}{2} + 5 = 13,333\ [A]$$

Com o valor da corrente máxima definido, basta aplicar a equação 3.12 para encontrar a seção do condutor.

$$Seção\ do\ Condutor = \frac{13,333}{2,5} = 5,333\ [mm^2]$$

Como foi feito anteriormente, procura-se na tabela 3.2 o condutor correspondente a essa seção, sendo este o condutor 10 AWG (5,26 mm^2), porém, como este enrolamento possui um número muito pequeno de espiras e ficará junto ao enrolamento de *tap´s*, é conveniente utilizar uma bitola maior para que o mesmo seja construído com o mesmo condutor do enrolamento de *tap´s*, ou seja, condutor 9 AWG.

(C) ENROLAMENTO DE EXCITAÇÃO

A corrente máxima que passa pelo enrolamento de excitação está mostrada na figura 3.5, de onde obtemos que I_{max} = 6,667 A.

$$Seção\ do\ Condutor = \frac{6,667}{2,5} = 2,667\ [mm^2]$$

Da mesma forma, da tabela 3.2 o condutor utilizado será o 13 AWG que possui seção igual a 2,62 mm^2 e o bobinamento será de 5,0 espira/cm.

3.4.4– GEOMETRIA DAS BOBINAS

Na seção 3.2.4 foi explicado o procedimento para determinar a geometria das bobinas. Nesta seção será aplicado tal procedimento para apresentar de forma mais clara como determinar as dimensões da bobina.

Como já foi relatado que será adotado um núcleo do tipo envolvente, onde as bobinas serão colocadas na bobina central, a seguir se apresenta a seqüência de cálculos das dimensões das bobinas.

Para o enrolamento de excitação serão utilizadas quatro camadas sendo cada uma delas composta por 40 espiras, com isso pode-se determinar a altura e espessura da bobina. A altura H é determinada pela razão entre o número de espiras de cada camada N_{espcam} pelo bobinamento B_{bob} que foi definido na seção anterior.

$$H = \frac{N_{espcam}}{B_{bob}} \Rightarrow \frac{40}{5} \Rightarrow H = 8{,}0 \ [cm]$$

A espessura (e) é determinada pela razão entre o número de camadas (n_{camada}) pelo bobinamento.

$$e = \frac{n_{camada}}{B_{bob}} \Rightarrow \frac{4}{5} \Rightarrow e = 0{,}8 \ [cm]$$

Para os demais enrolamentos o procedimento é o mesmo, lembrando que agora serão considerados os números de espiras do enrolamento de *tap´s* somado ao do enrolamento de equalização, isto é, as 64 espiras do enrolamento de *tap´s* junto com as quatro do enrolamento de equalização, obtendo um total de 68 espiras.

Assim, ter-se-á três camadas, sendo que duas terão 24 espiras e uma com 16 espiras, relativas ao enrolamento de *tap´s* e uma camada com duas bobinas com duas espiras cada, referente ao enrolamento de equalização. O cálculo da altura e espessura está mostrado abaixo.

$$H = \frac{N_{esp\,cam}}{B_{bob}} \Rightarrow \frac{24}{3{,}1} \Rightarrow H = 7{,}8 \ [cm]$$

$$e = \frac{n_{camada}}{B_{bob}} \Rightarrow \frac{4}{3{,}1} \Rightarrow e = 0{,}97 \ [cm]$$

A figura 3.7 abaixo mostra como fica a distribuição dessas camadas em torno da coluna central do núcleo.

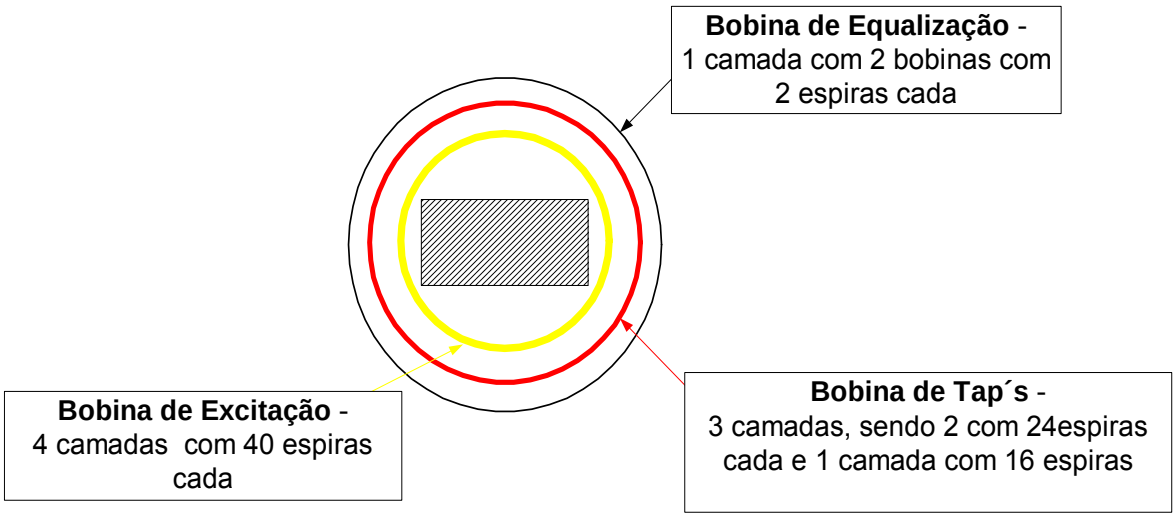


Figura 3.7: Distribuição das camadas de cada bobina em torno do núcleo.

3.4.5– GEOMETRIA DO NÚCLEO

Na seção 3.4.1 foi determinada uma previsão quanto à seção magnética do núcleo a partir da potência eletromagnética e da freqüência, porém é um dado estimado e por isso, nesta etapa, será determinada a seção do núcleo através dos cálculos apresentados na seção 3.2.5.

Para determinar a seção magnética do núcleo, de uma forma menos empírica, utiliza-se a equação 3.13.

$$S_m = \frac{220}{4{,}44 \times 1{,}6 \times 160 \times 60} \times 10^4 \Rightarrow S_m = 32{,}26 \, [cm^2]$$

Com o valor da seção magnética determinado calcula-se a altura do empilhamento (a), aplicando a equação 3.14.

$$a = \sqrt{32,26} \Rightarrow a = 5,68 \ [cm]$$

Com o resultado obtido anteriormente determina-se o número de chapas, utilizando a equação 3.15.

$$N_{chapas} = \frac{5,68}{0,03} \Rightarrow N_{chapas} = 189,32 \ [chapas]$$

Como o valor obtido é não é um número inteiro, procede-se o arredondamento e calcula-se novamente a altura do empilhamento.

$$N_{chapas} = 190 \ [chapas] \Rightarrow a = 5,7 \ [cm]$$

Considerando um fator de empilhamento k_e = 0,85 obtém-se que a largura da chapa será:

$$l_c = \frac{a}{k_e} \Rightarrow l_c = \frac{5,7}{0,85} \Rightarrow l_c = 6,7 \ [cm]$$

Arredondando este valor, será considerada a largura da chapa igual a 7 cm para se ter uma seção geométrica quadrada.

A seção magnética é então determinada conforme a equação 3.16.

$$S_m = 7 \times 5,7 \Rightarrow S_m = 39,9 \ [cm^2]$$

Da mesma forma, a seção geométrica é determinada de acordo com a equação 3.17.

$$S_{geo} = 7 \times 7 \Rightarrow S_{geo} = 49 \ [cm^2]$$

Para finalizar esta etapa é calculado o valor da indução magnética como apresentado na equação 3.13.

$$B = \frac{220}{4,44 \times 39,9 \times 10^{-4} \times 160 \times 60} \Rightarrow B = 1,294 \ [T]$$

A figura 3.8 apresenta como deverá ser a montagem do núcleo do regulador, com o posicionamento das chapas.

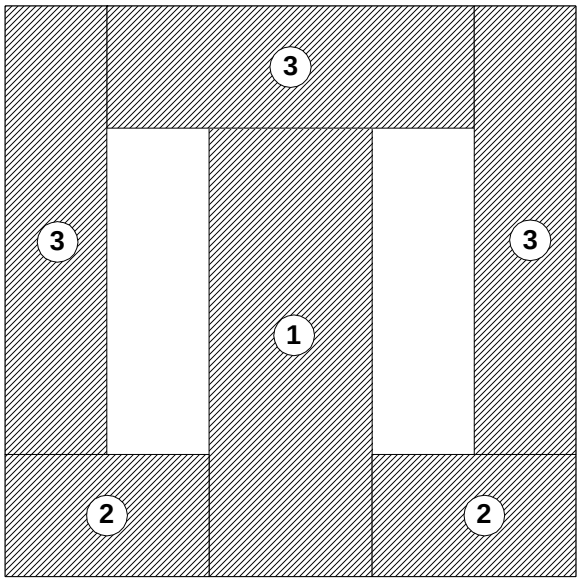


Figura 3.8: Configuração da montagem das chapas do núcleo do regulador.

A tabela 3.3 apresenta os tipos de chapas que devem compor o núcleo com suas respectivas dimensões e quantidades.

Tabela 3.3: Tipos de chapas e suas dimensões.

TIPO DE CHAPA	DIMENSÕES	QUANTIDADE
1	7cm x 14cm	190
2	3,5cm x 7cm	380
3	3,5cm x 14cm	570

3.4.6– CÁLCULOS DO REATOR

Para dar início ao projeto do reator de comutação são necessários alguns dados que são apresentados na tabela 3.4 abaixo.

Tabela 3.4: Dados nominais do protótipo do reator de comutação.

TENSÃO APLICADA	5,5 V
CORRENTE	13,33 A
POTÊNCIA MAGNÉTICA	75 VA

A potência magnética foi determinada da mesma maneira que para o regulador de tensão, ou seja, é a corrente multiplicada pela tensão aplicada ao reator.

$$P_{emg} = 13,33 \times 5,5 \Rightarrow P_{emg} = 73,32 \ [VA]$$
$$\therefore P_{emg} = 75 \ [VA]$$

De posse desses dados o primeiro passo é fazer a estimativa da seção magnética do núcleo do reator, como foi feito para o regulador, utilizando a equação 3.8.

$$S_m = 7,5 \times \sqrt{\frac{75}{60}} = 8,40 \ [cm^2]$$

(A) NÚMERO DE ESPIRAS DO ENROLAMENTO

Adotando o como valor da densidade de fluxo B = 0,87 [T] e fazendo uso da equação 3.11, tem-se o seguinte número de espiras para cada enrolamento do reator.

$$N_{esp} = \frac{2,75}{4,44 \times 0,87 \times 8,40 \times 10^{-4} \times 60} = 14,13 \ [espiras]$$

Fazendo o arredondamento deste valor, determina-se que serão duas bobinas com 15 espiras cada.

(B) DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES

A densidade de corrente adotada será a mesma utilizada para o regulador, ou seja, σ = 2,5 A/mm^2. A corrente máxima que passa pelo reator é a metade do valor que passa pelo enrolamento de *tap´s* somada à corrente de circulação, isto é, I_{max} = 13,33 A.

Com esses valores aplicados à equação 3.12, determina-se a seção do condutor.

$$Seção\ do\ Condutor = \frac{13,333}{2,5} = 5,333\ [mm^2]$$

De acordo com a tabela 3.2 o condutor utilizado será o 10 AWG que possui seção igual a 5,26 mm^2 e o bobinamento será de 3,5 espira/cm.

(C) GEOMETRIA DA BOBINA

Assim como foi feito com as bobinas do regulador, nesta etapa será definida a geometria da bobina do núcleo do reator.

Como definido anteriormente, o número de espiras é 15, desta forma define-se que serão três camadas com cinco espiras cada uma. A seguir calcula-se a altura e espessura da bobina.

$$H = \frac{N_{esp\,cam}}{B_{bob}} \Rightarrow \frac{5}{3,5} \Rightarrow H = 1,5\ [cm]$$

$$e = \frac{n_{camada}}{B_{bob}} \Rightarrow \frac{3}{3,5} \Rightarrow e = 0,86\ [cm]$$

(D) GEOMETRIA DO NÚCLEO

Fazendo uso da equação 3.13 determina-se a seção magnética do núcleo de forma mais exata.

$$S_m = \frac{2,75}{4,44 \times 0,87 \times 15 \times 60} \times 10^4 \Rightarrow S_m = 7,91\,[cm^2]$$

Com o valor da seção magnética determinado calcula-se a altura do empilhamento (a), aplicando a equação 3.14.

$$a = \sqrt{7,91} \Rightarrow a = 2,81\ [cm]$$

A seguir determina-se o número de chapas utilizando a equação 3.15.

$$N_{chapas} = \frac{2,57}{0,03} \Rightarrow N_{chapas} = 93,7\ \ [chapas]$$

Procedendo ao arredondamento e calcula-se novamente a altura do empilhamento.

$$N_{chapas} = 95 \ [chapas] \Rightarrow a = 2{,}85 \ [cm]$$

A seção magnética é então determinada conforme a equação 3.16.

$$S_m = 2{,}85 \times 2{,}85 \Rightarrow S_m = 8{,}12 \ [cm^2]$$

(E) DIMENSIONAMENTO DO ENTREFERRO

A indutância do reator de comutação é calculada conforme a equação 3.18.

$$L = \frac{5{,}5}{2\pi \times 60 \times 13{,}33} \times 10^3 \Rightarrow L = 1{,}09 \ [mH]$$

A equação 3.19 apresenta como calcular a relutância do circuito magnético.

$$\Re = \frac{30^2}{1{,}09 \times 10^{-3}} \Rightarrow \Re = 825.688{,}07 \ [H^{-1}]$$

Para determinar a relutância do ferro é preciso conhecer o comprimento médio do circuito magnético. A figura 3.9 dá os valores do comprimento de cada chapa.

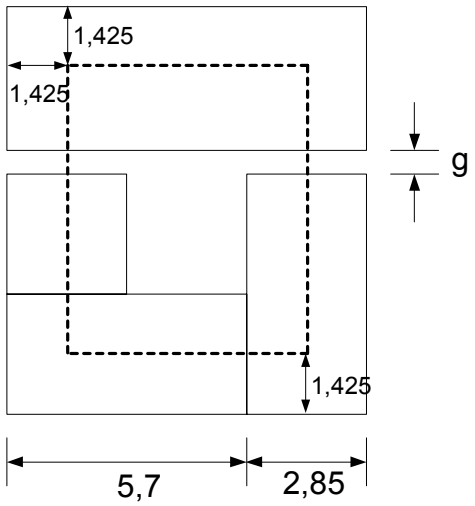


Figura 3.9: Comprimento das chapas do circuito magnético.

Pela equação 3.20 determina-se o valor do comprimento médio.

$$l = 4 \times 2 \times 2{,}85 \Rightarrow l = 22{,}8 \quad [cm]$$

Com os valores para B e H determinados a partir da curva de magnetização e com a equação 3.21 determina-se a permeabilidade magnética do ferro.

$$\mu_{FE} = \frac{0{,}87}{0{,}26 \times 79{,}58} \Rightarrow \mu_{FE} = 0{,}042 \quad [H/m]$$

A relutância da parte de ferro é calculada pela equação 3.22.

$$\Re_{FE} = \frac{22{,}8 \times 10^{-2}}{0{,}042 \times 8{,}12 \times 10^{-4}} \Rightarrow \Re_{FE} = 6.685{,}43 \quad [H^{-1}]$$

A relutância do entreferro é determinada pela simples subtração entre a relutância total e a relutância do ferro.

$$\Re_g = 825.688{,}07 - 6.685{,}43 \Rightarrow \Re_g = 819.002{,}64 \quad [H^{-1}]$$

Observa-se que a relutância do núcleo de ferro é praticamente desprezível quando comparada com a relutância do entreferro. Este fato justifica se utilizar somente a indutância relativa ao entreferro.

A área do entreferro é determinada pela equação 3.24, lembrando que o fator de espraiamento foi considerado como $k_d = 0{,}90$.

$$S_g = \frac{8{,}12}{0{,}90} \Rightarrow S_g = 9{,}02 \quad [cm^2]$$

Utilizando equação 3.23 determina-se o valor do entreferro.

$$g = \frac{819.002{,}64 \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 9{,}02 \times 10^{-4}}{2} \times 10^3 \Rightarrow g = 0{,}464 \quad [mm]$$

A figura 3.10 apresenta a configuração que constitui o núcleo, com seus diferentes cortes das chapas.

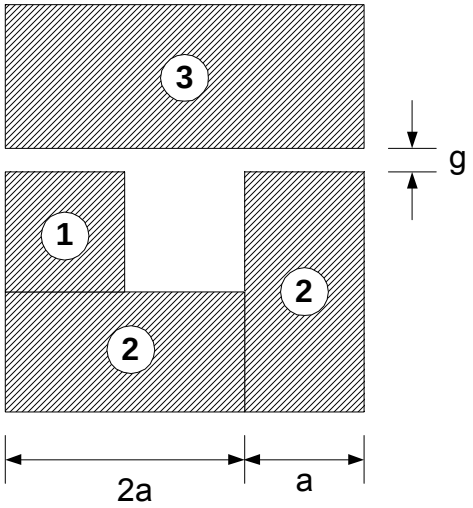


Figura 3.10: Configuração da montagem das chapas do núcleo do reator.

A tabela 3.5 apresenta os tipos de chapas que devem compor o núcleo do reator com suas respectivas dimensões e quantidades.

Tabela 3.5: Tipos de chapas e suas dimensões.

TIPO DE CHAPA	DIMENSÕES	QUANTIDADE
1	**2,85cm x 2,85cm**	**90**
2	**2,85cm x 5,7cm**	**180**
3	**2,85cm x 8,55cm**	**90**

As figuras 3.11 e 3.12 apresentam, respectivamente, o corte longitudinal no núcleo do regulador e do reator mostrando o posicionamento das bobinas nas colunas do núcleo.

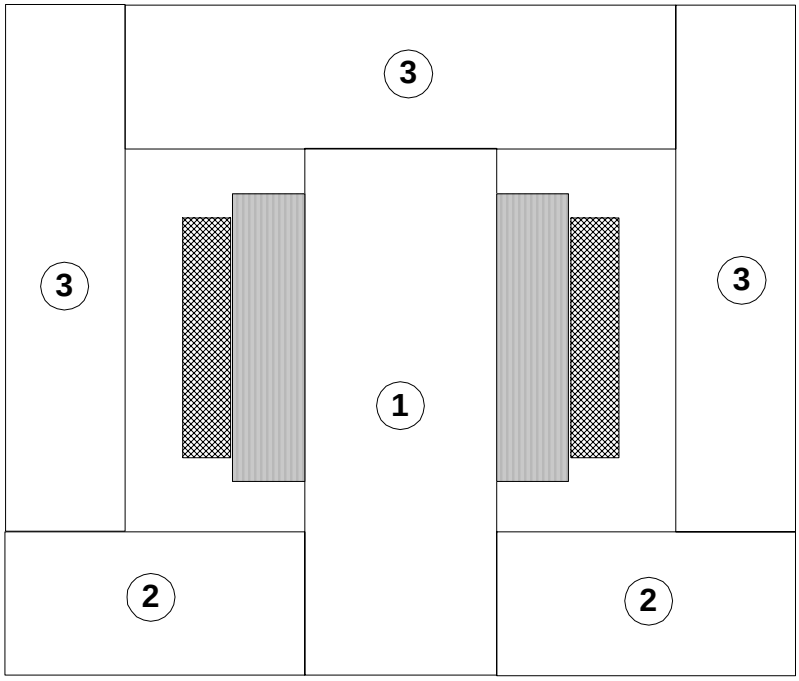


Figura 3.11: Corte longitudinal no núcleo do regulador.

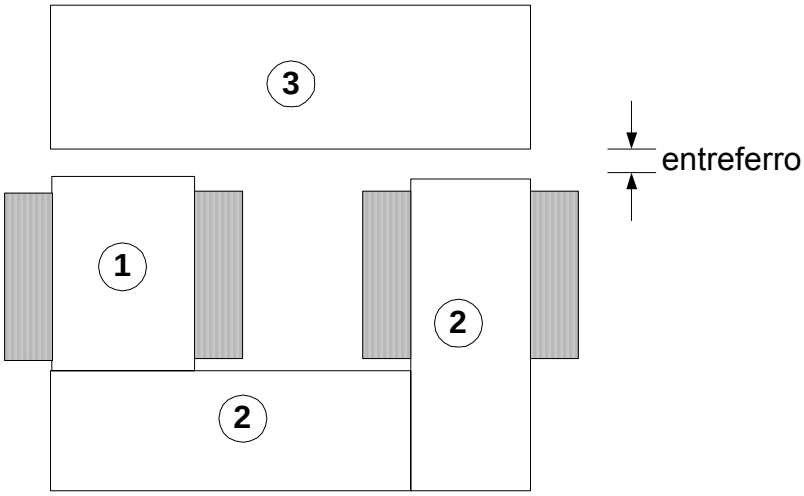


Figura 3.12: Corte longitudinal no núcleo do reator.

A tabela 3.6 apresenta uma síntese dos resultados finais do projeto do regulador de tensão de 32 degraus.

Tabela 3.6: Tabela resumo do projeto do modelo reduzido.

REGULADOR DE TENSÃO COM 32 DEGRAUS						
AUTOTRANSFORMADOR						
Núcleo	**Tipo Envolvente, constituído por três tipos de chapas de aço silício GO E005 – ACESITA – espessura 0,30 mm**					
	Chapa Tipo 1		Chapa Tipo 2		Chapa Tipo 3	
	Dimensões (cm)	Quantidade	Dimensões (cm)	Quantidade	Dimensões (cm)	Quantidade
	7 x 14	190	3,5 x 7	380	3,5 x 14	570
Bobinas	**Enrolamento de Excitação**					
	n° de espiras	n° de bobinas	bitola	Detalhamento		
	160	1	13 AWG	Enrolamento interno com três camadas de 40 espiras cada		
	Enrolamento de Tap´s					
	n° de espiras	n° de bobinas	bitola	Detalhamento		
	8	8	9 AWG	Enrolamento feito sob o enrolamento de excitação, distribuído em 8 bobinas de 8 espiras cada		
	Enrolamento de Equalização					
	n° de espiras	n° de bobinas	bitola	Detalhamento		
	2	2	9 AWG	Enrolamento feito sob o enrolamento de tap´s, distribuído em 2 bobinas de 2 espiras cada		
REATOR DE COMUTAÇÃO						
Núcleo	**Tipo Envolvido com entreferro, constituído por três tipos de chapas de aço silício GO E005 – ACESITA – espessura 0,30mm**					
	Chapa Tipo 1		Chapa Tipo 2		Chapa Tipo 3	
	Dimensões (cm)	Quantidade	Dimensões (cm)	Quantidade	Dimensões (cm)	Quantidade
	2,85 x 2,85	90	2,85 x 5,7	180	2,85 x 8,55	90
Bobinas	**Enrolamento**					
	n° de espiras	n° de bobinas	bitola	Detalhamento		
	15	2	10 AWG	Duas bobinas com 15 espiras cada, sendo montada uma em cada coluna do núcleo		

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No capítulo anterior, foi desenvolvida a metodologia para modelagem do regulador de tensão. Este equipamento é muito utilizado em sistemas de distribuição cuja tensão normal é, geralmente, 13,8 kV. Tendo em vista a dificuldade de conseguir esta tensão em laboratório para a realização de ensaios experimentais com fins de validação do modelo, buscou-se uma solução para tal dificuldade, já que os ensaios são extremamente importantes para a verificação da eficácia do modelo proposto.

Assim, essa necessidade de se obter resultados experimentais para serem comparados aos simulados na busca da validação do modelo de reguladores de tensão proposto nesta dissertação foi fator determinante para a conclusão de que seria importante construir um modelo reduzido.

No desenvolvimento deste capítulo foi apresentado o procedimento para o projeto do modelo reduzido de regulador de tensão, sendo detalhado, passo a passo, todos os cálculos, desde os iniciais como as tensões nos enrolamentos de *tap´s*, bobina de *tap*, determinação da seção magnética do núcleo, até os cálculos dos números de espiras dos enrolamentos, dimensionamento dos condutores, cálculos do reator de comutação, ajustes e arredondamentos finais.

O reator de comutação foi projetado também de acordo com os cálculos desenvolvidos para o regulador de tensão, ou seja, determinou-se a tensão do enrolamento, seu número de espiras, seção dos condutores, geometria da bobina e do núcleo. A diferença aqui foi o dimensionamento do entreferro que está presente no reator de comutação. O entreferro neste caso é de extrema importância, pois o valor da relutância do núcleo frente ao do entreferro é praticamente desprezível, fato este que justifica se utilizar somente a indutância do entreferro.

O regulador de tensão projetado possui tensão nominal de 220 V, com corrente de carga de 10 A, obtendo uma faixa de regulação de tensão de ± 40 % da tensão nominal com 8 *tap´s* e 32 degraus de regulação.

Este equipamento é a base para esta dissertação, ou seja, será através dele que será determinado o modelo computacional de reguladores de tensão e, através dos ensaios experimentais que poderão ser realizados com maior facilidade nos laboratórios, será feita a validação do modelo.

CAPÍTULO IV

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dando continuidade à meta proposta, neste capítulo serão apresentados os resultados de ensaios laboratoriais realizados com o modelo reduzido.

A base para os cálculos dos parâmetros do modelo computacional consiste nos dados de projeto do regulador de tensão de 32 degraus, bem como dos resultados obtidos através de ensaios laboratoriais.

Neste capítulo utiliza-se para a realização dos ensaios o regulador de tensão construído segundo as características determinadas no capítulo anterior as quais são descritas sucintamente no item 4.2. Os ensaios realizados no mesmo e os resultados medidos são apresentados no item 4.3.

Após a apresentação dos resultados de ensaios, são realizados os cálculos dos parâmetros para a modelagem computacional do modelo reduzido seguindo a mesma linha de raciocínio aplicada na modelagem apresentada no capítulo 2.

4.2. CARACTERÍSTICAS DO MODELO REDUZIDO DO REGULADOR DE TENSÃO

O regulador construído para medições laboratoriais foi projetado com características semelhantes à dos reguladores usuais, porém com um nível de

tensão mais baixo. O equipamento possui uma tensão nominal de 220 V, com corrente de carga de 10 A, obtendo uma faixa de regulação de tensão de ± 40 % da tensão nominal, com 8 *tap´*s e 32 degraus de regulação.

O princípio de funcionamento deste equipamento é semelhante ao de um autotransformador, ou seja, além do acoplamento magnético existente entre os dois enrolamentos (*tap´s* e excitação), há também uma ligação elétrica.

A bobina de *tap´*s é composta por 9 derivações, chamados *tap´s*. Para evitar a interrupção da corrente de carga durante a comutação de *tap´s*, o regulador possui um circuito de comutação constituído por um reator de comutação com duas bobinas magneticamente acopladas entre si e uma bobina de equalização com três derivações magneticamente acoplada ao regulador de tensão.

A comutação de *tap´s* é realizada através de chaves comutadoras manuais, facilitando o registro dos fenômenos transitórios de comutação.

A tabela 3.6, apresentada no final do capítulo 3, mostra os dados geométricos do regulador de tensão utilizado.

A figura 4.1 mostra uma fotografia da parte frontal do equipamento construído e a figura 4.2 a parte interna e suas conexões.

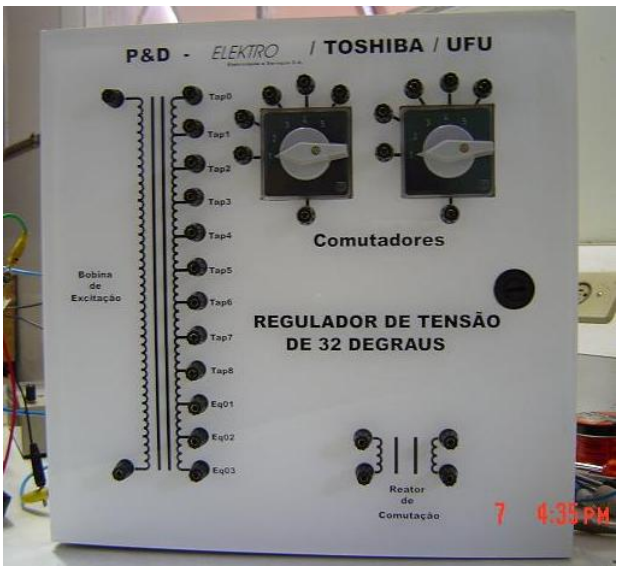


Figura 4.1: Foto mostrando a vista frontal do regulador de tensão construído.

Figura 4.2: Foto mostrando a parte interna do equipamento.

Além dos dados relacionados aos aspectos construtivos citados acima, para realizar os cálculos dos parâmetros é necessário o conhecimento dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais do equipamento. Nesse sentido, a seção a seguir apresenta estes resultados.

4.3. ENSAIOS LABORATORIAIS

Para subsidiar os cálculos dos parâmetros do modelo computacional do protótipo do regulador de tensão, e também, apresentar resultados relativos ao desempenho do equipamento a fim de que os mesmos possam ser utilizados para validação da modelagem, apresentam-se a seguir os ensaios realizados.

- Ensaio em Vazio no Transformador do Regulador de Tensão;
- Ensaio de Magnetização;
- Ensaio em Vazio no Regulador de Tensão propriamente dito;
- Ensaio em Curto-Circuito;
- Ensaio com Carga;

- Ensaio de Corrente de Circulação no Reator de Comutação;
- Ensaio de Medição de Resistência Elétrica dos Enrolamentos.

Para o registro das grandezas desejadas utilizou-se um medidor e registrador RMS de grandezas em tempo real para sistemas elétricos, monofásicos, bifásicos e trifásicos em baixa tensão, (MARH-21) que possui três canais de entrada para sinais de tensão e três canais de entrada para sinais de corrente.

4.3.1. ENSAIO EM VAZIO NO TRANSFORMADOR DO REGULADOR DE TENSÃO

Esse ensaio é realizado com o objetivo de determinar as características comportamentais do núcleo magnético do transformador do regulador de tensão para que a não linearidade característica do material ferromagnético possa ser representada na modelagem com maior fidelidade possível. Os resultados registrados são:

- Corrente no enrolamento de excitação;
- Forma de onda da corrente no enrolamento de excitação;
- Potência total suprida pela fonte ao transformador.

O procedimento para a realização do ensaio seguiu a seguinte metodologia: aplicou-se tensão nominal ao enrolamento de excitação e foram medidas as grandezas desejadas. A figura 4.3 a seguir mostra um diagrama de ligação do regulador de tensão para a realização desse ensaio.

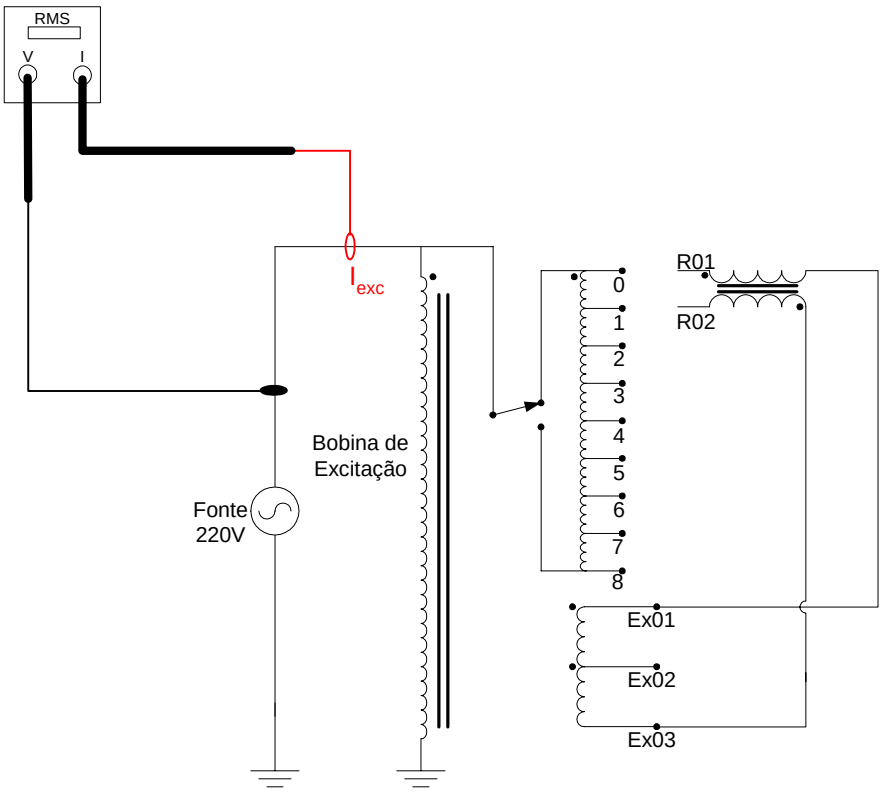


Figura 4.3: Esquema de ligação para o ensaio em vazio do transformador do regulador.

Na tabela 4.1 são apresentados os valores eficazes obtidos no ensaio.

Tabela 4.1: Resultados do ensaio em vazio do transformador do regulador de tensão.

TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (W)
220,0	0,41	18

A forma de onda da corrente na bobina de excitação é apresentada na figura 4.4.

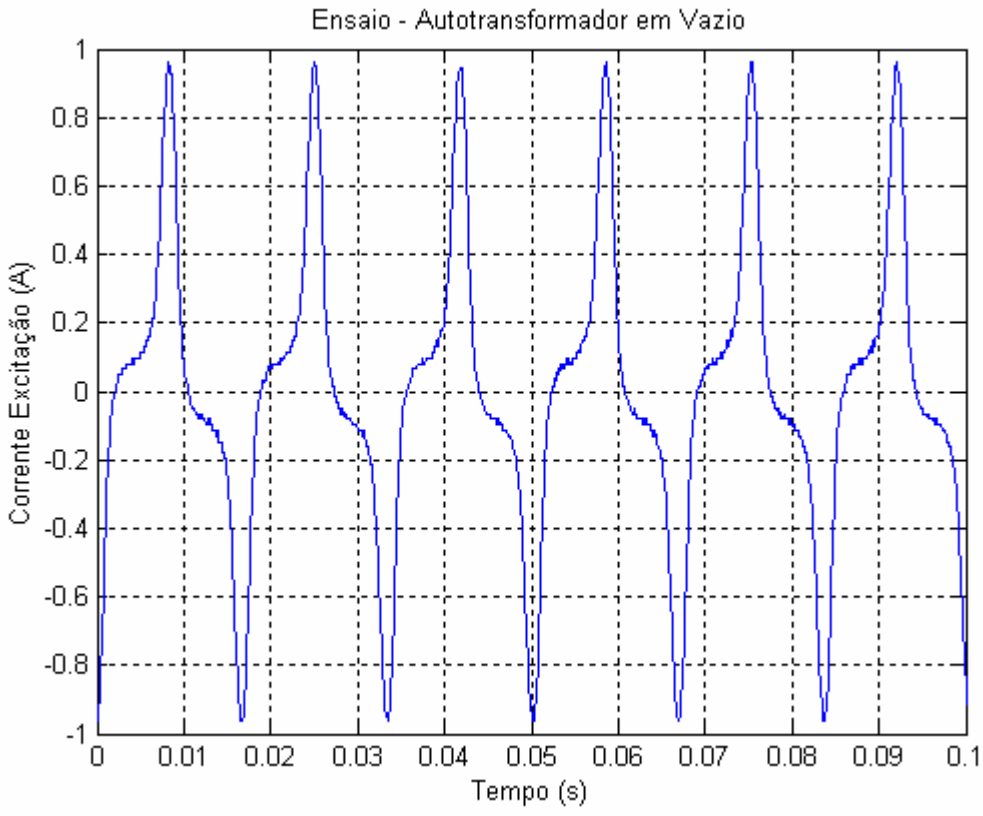


Figura 4.4: Forma de onda da corrente de excitação.

Com base nos valores registrados pode-se determinar o fator de pico da corrente, que é a relação entre o valor de pico mostrado na figura e o valor eficaz.

4.3.2. ENSAIO DE MAGNETIZAÇÃO

Visando levantar a característica de magnetização do núcleo magnético do transformador do regulador de tensão, realizou-se o ensaio de magnetização no qual foram registradas as seguintes grandezas:

- Tensão na bobina de excitação;
- Corrente na bobina de excitação;

O ensaio foi realizado com o auxílio de uma fonte variável de tensão onde foi sendo aplicada tensão ao enrolamento de excitação em degraus até se obter

pontos suficientes para traçar a curva. A figura 4.5 mostra o diagrama de ligação do regulador de tensão para a realização do ensaio de magnetização.

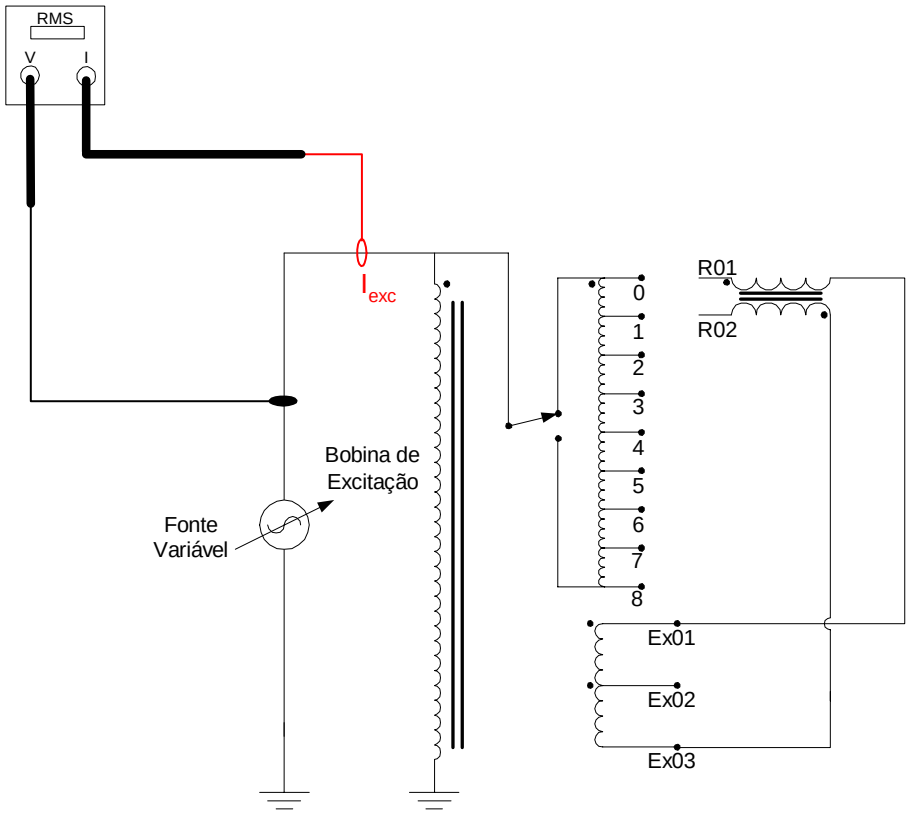


Figura 4.5: Esquema de ligação para o ensaio de magnetização.

A tabela 4.2 apresenta os resultados *rms* registrados no ensaio de magnetização do regulador de tensão.

Tabela 4.2: Características do transformador.

V (Volts)	Iexc (A)
30	0
40	0,01
50	0,01
60	0,01
70	0,01
80	0,02
90	0,02
100	0,03
110	0,04
120	0,04
130	0,05
140	0,06
150	0,07
160	0,07
170	0,10
180	0,12
190	0,14
200	0,20
210	0,28
220	0,41
230	0,60
240	0,84
250	1,07
260	1,28
270	1,55
280	1,83
290	2,15
300	2,39
310	2,72
320	3,11
330	3,46
340	3,90
350	4,22
360	4,75
370	5,30
380	6,00
390	6,81
400	7,51

Com os pontos da tabela acima, levantou-se a curva de magnetização do núcleo do transformador do regulador de tensão, conforme mostra a figura 4.6.

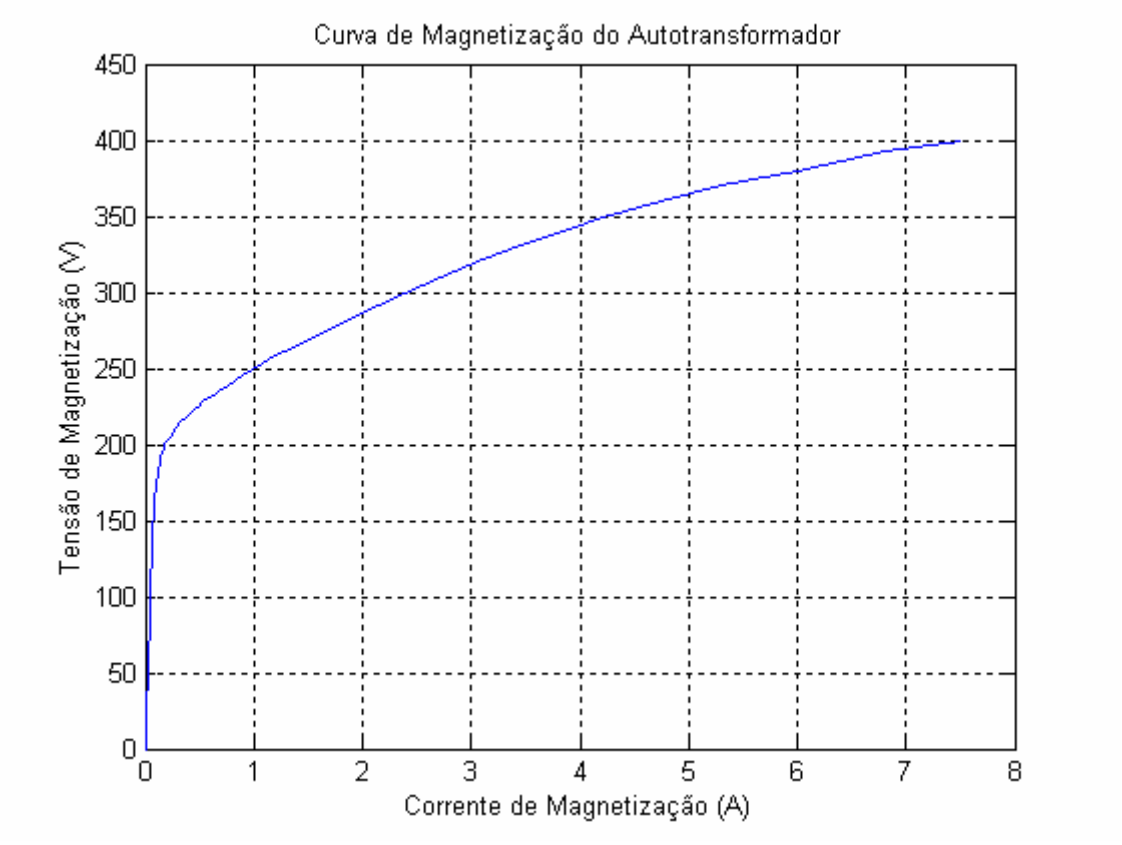


Figura 4.6: Curva de magnetização do transformador do regulador de tensão.

4.3.3. ENSAIO EM VAZIO NO REGULADOR DE TENSÃO

Este ensaio tem por objetivo determinar a corrente e as perdas em vazio em porcentagem. Com vista a se obter um resultado mais preciso foi realizado para esse ensaio três situações: regulador em vazio com tensão nominal e regulador com tensão variando de ±18%, aproximadamente ±40V. A seguir estão enumerados os resultados registrados:

- Corrente no enrolamento de excitação;
- Forma de onda da corrente no enrolamento de excitação;
- Corrente de circulação na bobina de equalização;
- Potência total suprida pela fonte ao regulador.

Seguindo os mesmos padrões dos demais ensaios, aplica-se na bobina de excitação a tensão nominal de 220 V, sendo o reator de comutação conectado de

tal forma que, seus dois terminais, R01 e R02, são ligados ao mesmo ponto, correspondente ao Tap 0. A figura 4.7 mostra o esquema de ligação para a realização do ensaio.

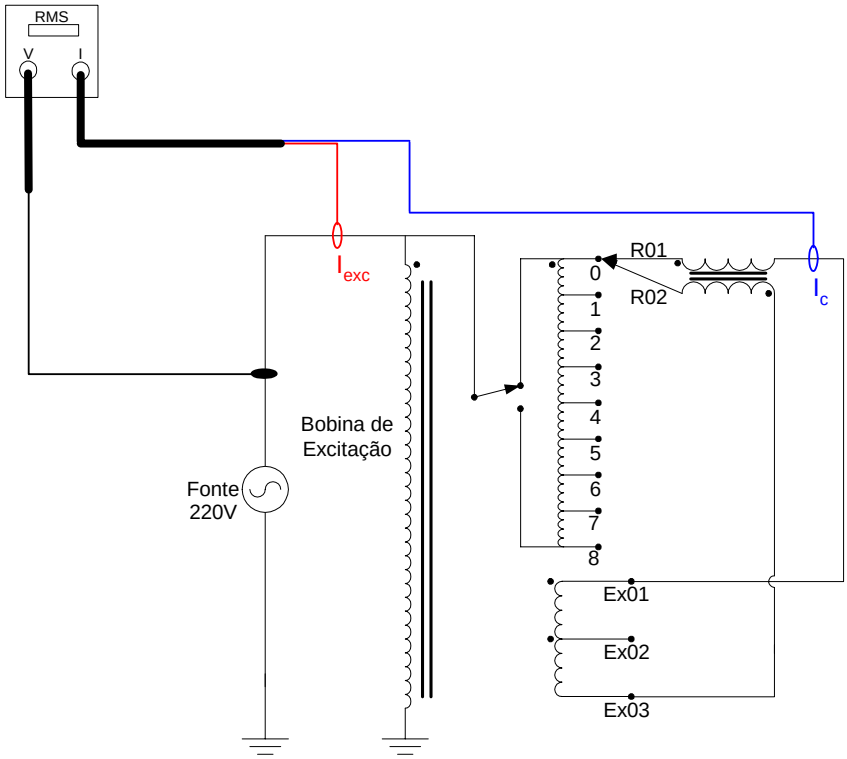


Figura 4.7: Esquema de ligação para o ensaio em vazio.

A tabela 4.3 mostra os valores eficazes de tensão, corrente e potência medidos no ensaio com tensão nominal.

Tabela 4.3: Resultados do ensaio em vazio do regulador de tensão.

TENSÃO (V)	$I_{EXCITAÇÃO}$ (A)	$I_{CIRCULAÇÃO}$ (A)	POTÊNCIA (W)
220,0	0,53	5,13	22

É importante ressaltar que no valor da potência (W_0 = 22W) estão incluidas as perdas no reator de comutação e as perdas nos enrolamentos, ou seja, representam as perdas totais em vazio.

A forma de onda da corrente na bobina de excitação é apresentada na figura 4.8.

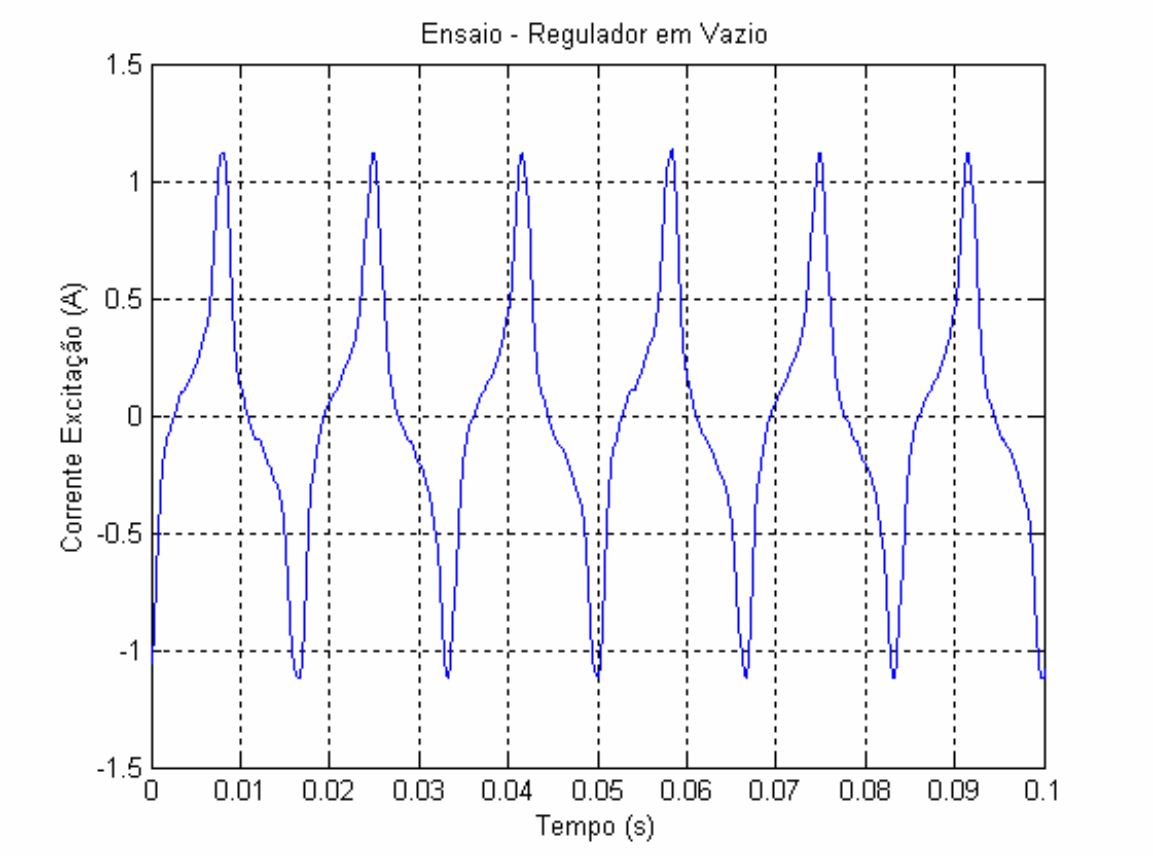


Figura 4.8: Forma de onda da corrente de excitação no ensaio em vazio do regulador.

Os resultados observados para os outros dois ensaios em vazio realizados estão mostrados na tabela 4.4 a seguir, lembrando que, o procedimento para a realização dos ensaios foi o mesmo descrito anteriormente, porém com valores diferentes da tensão aplicada.

Tabela 4.4: Resultados do ensaio em vazio do regulador de tensão subexcitado e sobrexcitado.

TENSÃO (V)	$I_{EXCITAÇÃO}$ (A)
180,4	0,21
261,4	1,60

As formas de ondas registradas nestes ensaios são apresentadas na seqüência. As figuras 4.9 e 4.10 mostram, respectivamente, a corrente de excitação para o regulador subexcitado e sobrexcitado.

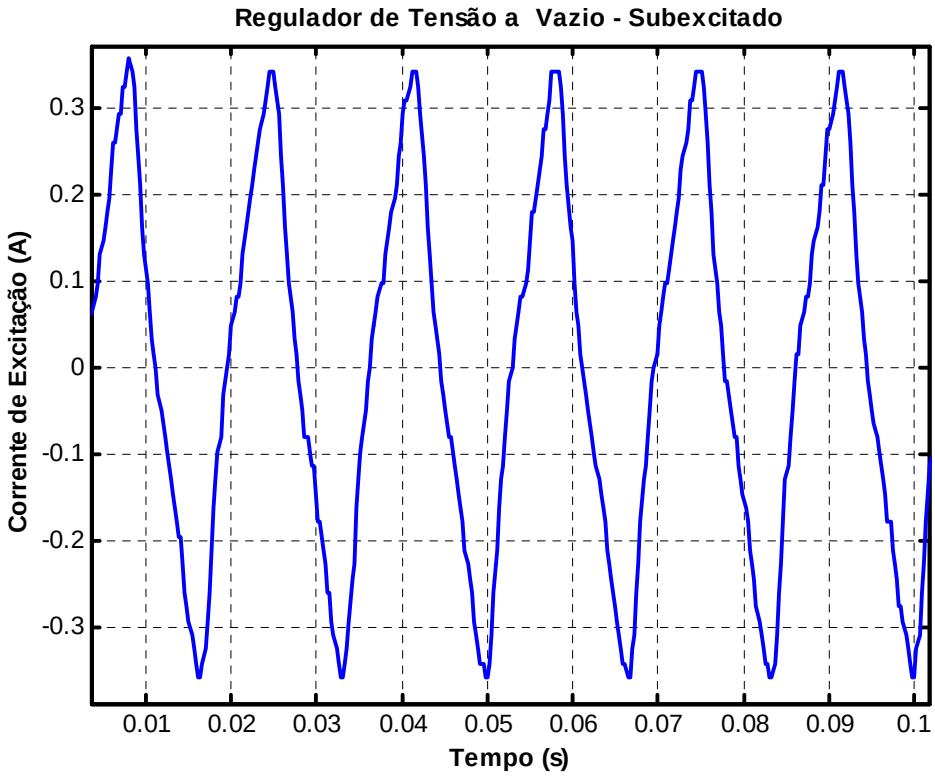


Figura 4.9: Forma de onda da corrente de excitação no ensaio em vazio do regulador subexcitado.

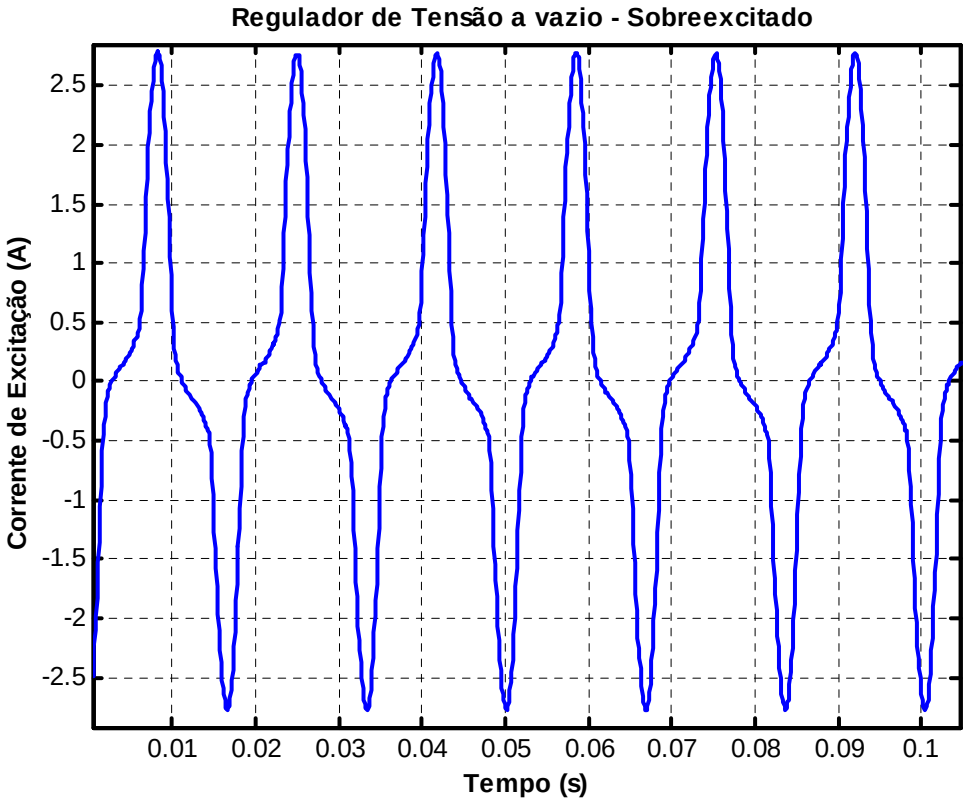


Figura 4.10: Forma de onda da corrente de excitação no ensaio em vazio do regulador sobrexcitado.

4.3.4. ENSAIO EM CURTO CIRCUITO

O objetivo deste ensaio é a determinação da impedância percentual e das perdas nos enrolamentos do regulador de tensão. As grandezas medidas foram:

- Corrente no enrolamento de excitação;
- Corrente no enrolamento de *tap´s*;
- Potência total suprida pela fonte.

Neste ensaio foi aplicada na bobina de excitação uma tensão tal que proporcionou a circulação da corrente de plena carga nos enrolamentos de *tap´s* e excitação.

A figura 4.11 apresenta o esquema de ligação para o ensaio em curto circuito.

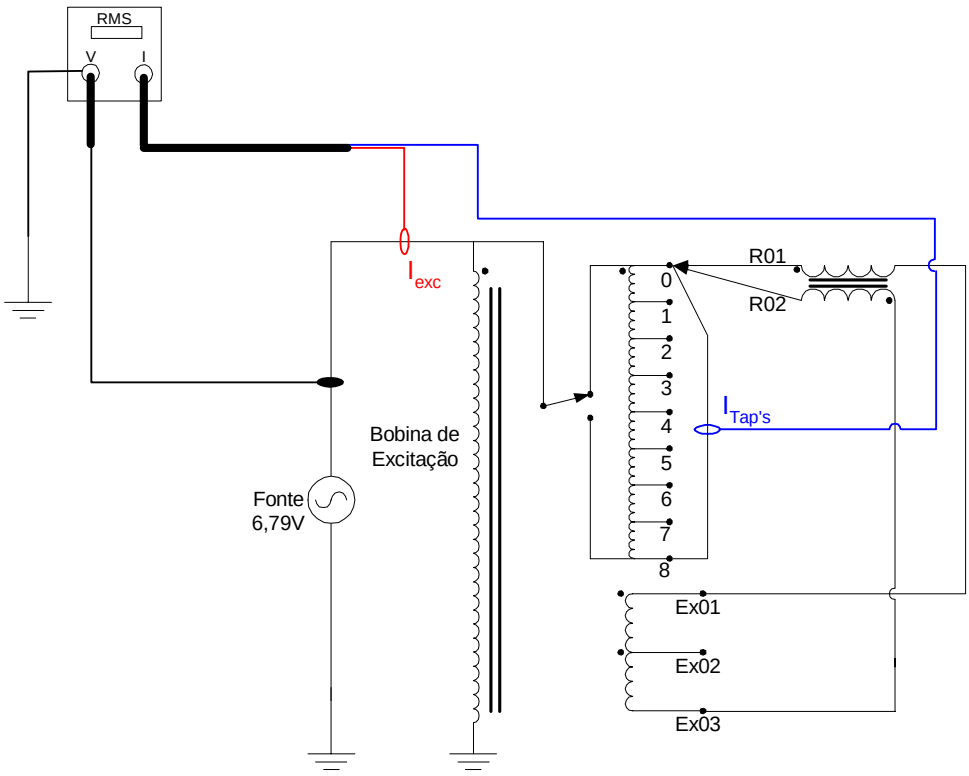


Figura 4.11: Esquema de ligação para o ensaio em curto circuito.

A tabela 4.5 apresenta os resultados medidos, lembrando que, foi utilizado o equipamento RMS para realizar essas medições.

Tabela 4.5: Valores medidos para o ensaio em curto circuito.

V_{cc} (V)	I_{exc}(A)	I_{Taps} (A)	W_{cc} (W)
6,79	6,66	16,66	43,0

A forma de onda registrada para a tensão no ensaio de curto circuito está na figura 4.12.

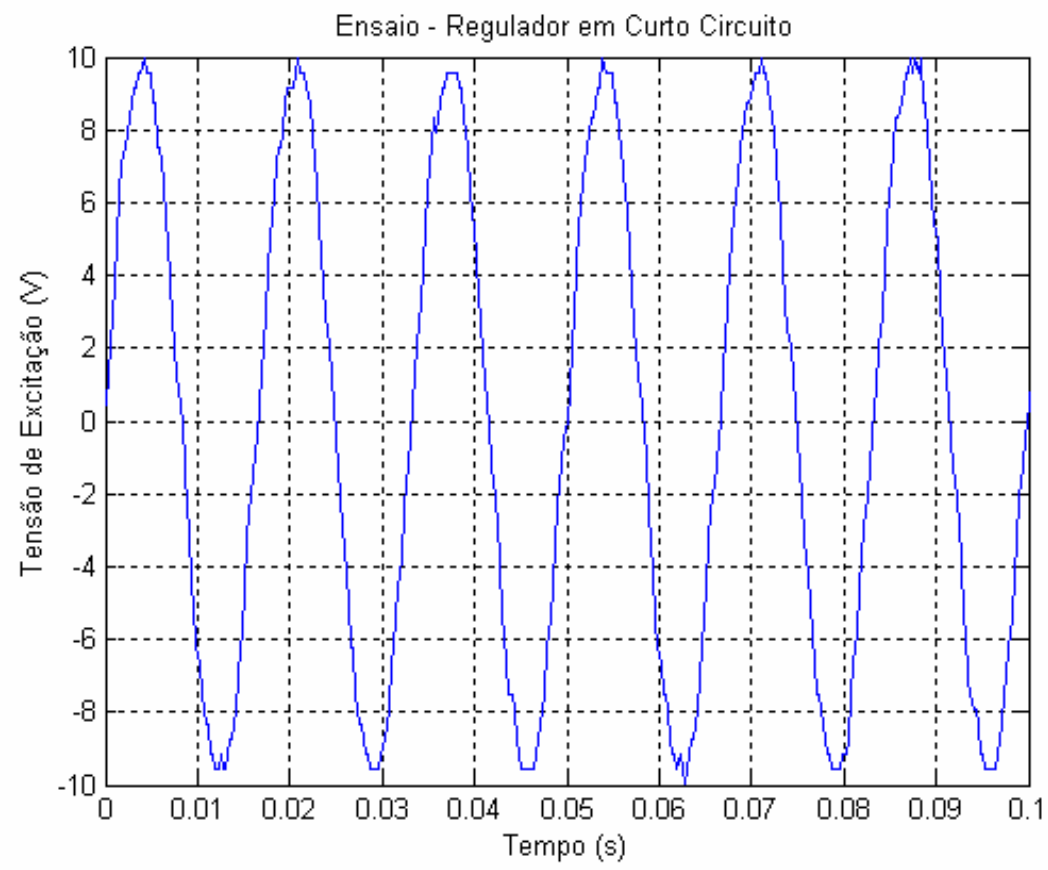


Figura 4.12: Tensão aplicada à bobina de excitação no ensaio em curto circuito.

As pequenas deformações na forma de onda da tensão de excitação mostrada acima podem ser justificadas de duas maneiras: o equipamento utilizado para registrar os pontos utilizados na curva pode fazer a aquisição desses pontos com uma resolução de, no máximo, 128 pontos por ciclo, para o caso em questão essa resolução não foi satisfatória para suprimir essas deformações. Uma outra justificativa seria a poluição da própria rede.

4.3.5. ENSAIO COM CARGA

O ensaio com carga tem por objetivo apresentar o desempenho do regulador de tensão em condição a plena carga e analisar os transitórios oriundos da comutação de *Tap's*. As grandezas observadas foram:

- Corrente e tensão na carga;
- Transitório nas chaves comutadoras.

O regulador foi alimentado com uma tensão de 80% da tensão nominal de tal forma que, com as comutações de *tap´s*, buscou-se alcançar e manter a tensão nominal requerida pela carga (220 V).

A figura 4.13 apresenta o esquema de montagem para a realização deste ensaio.

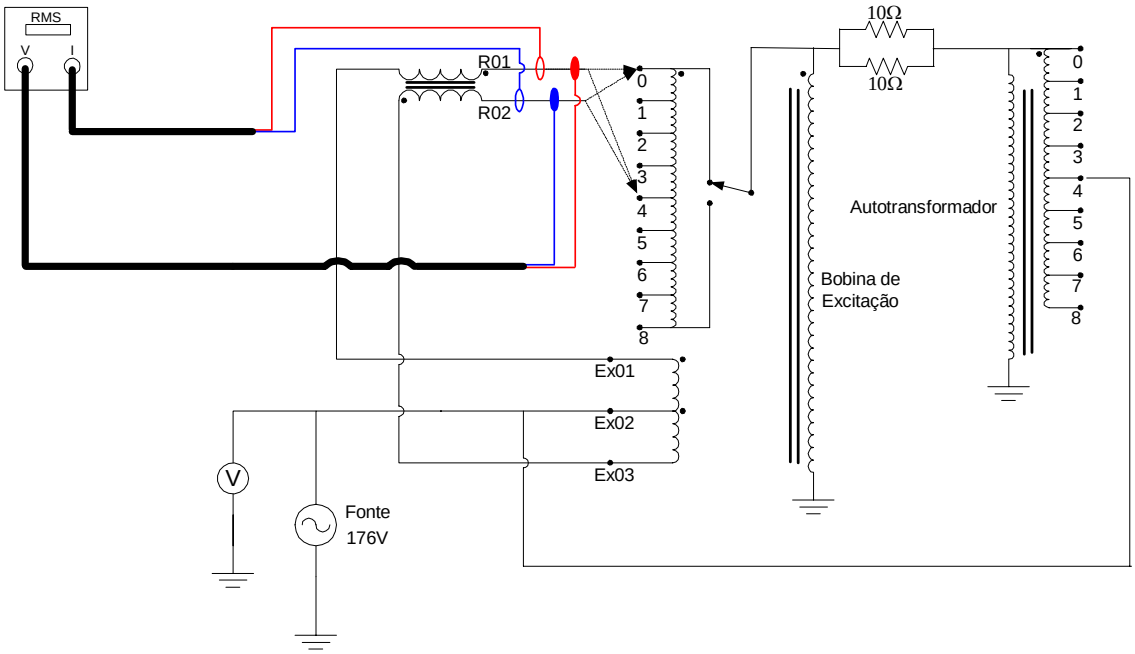


Figura 4.13: Esquema de ligação para o ensaio com carga.

Foram medidas as tensões da fonte e na carga, além das correntes na carga e nos comutadores R01 e R02. Todos os valores medidos são valores eficazes.

A carga foi formada por dois reostatos de potência nominal 500 W e corrente nominal de 7,0 A, ligados em paralelo. A tensão na carga deve ser mantida em 220 Volts e corrente nominal de 10 A.

Nota-se neste esquema que os dois contatos do comutador estão inicialmente na posição "zero", mas os mesmos deverão comutar para as posições adequadas (ambos deverão comutar para o *tap* 4) de forma que a tensão na carga fique igual à nominal (220 V).

A comutação de *tap´s* deve seguir um procedimento padrão, por exemplo, para comutar do *tap* 0 para o *tap* 1 ele irá passar por duas posições (1 e 2). Isto significa que na posição 1 um dos contatos do comutador estará no *tap* 0 e o outro no *tap* 1. Na posição 2 os dois contatos do comutador estarão no *tap* 1. Para comutar do *tap* 1 para o *tap* 2 ele passará pelas posições 3 e 4, e a seqüência é a mesma que a descrita anteriormente, ou seja, na posição 3 um dos contatos do comutador estará no *tap* 1 e o outro no *tap* 2, na posição 4 ambos os contatos estarão no *tap* 2. As demais comutações até chegar ao *tap* 4 seguem o mesmo processo.

Observa-se que os dois reostatos utilizados possuem uma potência muito inferior à potência da carga nominal do regulador, que é de 2200 VA. Portanto, utilizou-se um outro autotransformador alimentado pela mesma fonte de tensão do regulador de forma a criar uma f.e.m. em oposição à circulação da corrente de carga, criando dessa forma uma carga artificial. Ou seja, a potência de carga suprida pela fonte de tensão ao regulador de tensão será parcialmente dissipada no reostato sendo que a restante retorna à fonte de tensão através do autotransformador, da seguinte forma: na condição nominal, tensão na carga é igual a 220 V, corrente na carga é 10 A, o autotransformador deverá produzir uma f.e.m. em oposição de 170 V, assim ter-se-á uma diferença de potencial nos reostatos de 50 V, o que propiciará uma corrente de 5 A em cada reostato totalizando 10 A para a corrente de carga. A potência drenada da fonte é $220 \times 10 = 2200\,W$, a potência dissipada nos reostatos é $2 \times 10 \times 5^2 = 500\,W$

logo, 1700 *W* menos as perdas inerentes ao sistema, retornará à fonte através do autotransformador.

As condições iniciais para a realização do ensaio estão apresentadas na tabela 4.6 abaixo.

Tabela 4.6: Condições iniciais para o ensaio com carga.

Tensão na carga (V_C)	170,0 V
Tensão na Fonte (V_F)	170,6 V
Corrente na carga (I_C)	7,30 A
Corrente no Comutador R01 (I_{R1})	5,13 A
Corrente no Comutador R02 (I_{R2})	5,11 A
F.e.m. do Autotransformador	133,6 V

Após os ajustes para a adequação das condições iniciais foi realizado o ensaio. Abaixo, na tabela 4.7, são mostrados os resultados obtidos na medição.

Tabela 4.7: Valores medidos no ensaio com carga.

POSIÇÃO	TENSÕES (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA DE CARGA (VA)
	V_C	I_C	P_C
0	170,6	7,30	1245
1	174,6	8,16	1425
2	178,6	8,97	1602
3	182,6	9,86	1800
4	186,6	10,73	2002
5	192,0	11,72	2250
6	196,4	12,68	2490
7	200,8	13,7	2751
8	205,2	14,8	3037

A figura 4.14 apresenta a forma de onda da tensão na carga no momento em que é realizada a comutação de *tap´s* da posição 0 para a posição 1.

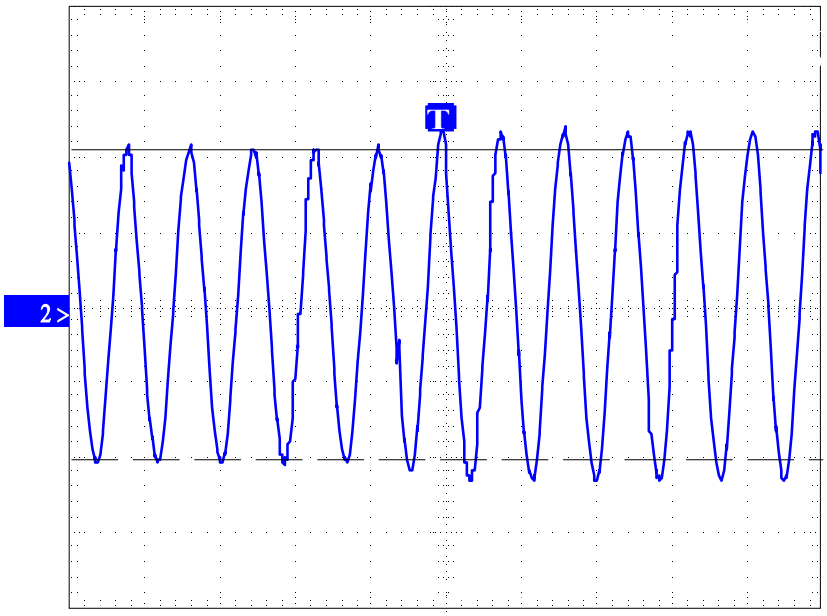


Figura 4.14: Tensão na carga quando se comuta da posição 0 para a posição 1.

A linha preta marcada no gráfico representa valor da antes da comutação. O osciloscópio foi programado para que, quando o regulador ultrapassasse esse nível de tensão o disparo para registrar a forma de onda fosse dado e um pequeno intervalo de tempo antes e depois do instante de disparo do *trigger* fosse registrado.

4.3.6. ENSAIO DE CORRENTE DE CIRCULAÇÃO NO REATOR DE COMUTAÇÃO

O ensaio no reator de comutação tem por objetivo determinar a corrente circulante no reator, bem como as perdas totais no reator. Sendo assim, as grandezas observadas neste ensaio foram:

- Corrente no enrolamento do reator;
- Tensão no enrolamento do reator;
- Potência total suprida pela fonte.

O reator de comutação, com os dois enrolamentos ligados em série e em polaridade aditiva, é submetido à tensão nominal 5.5 V (2x 2.75 V) e em seguida são medidos os valores da corrente de circulação (I_{reator}) e as perdas (W_{reator}). O esquema da figura 4.15 foi utilizado na realização deste ensaio.

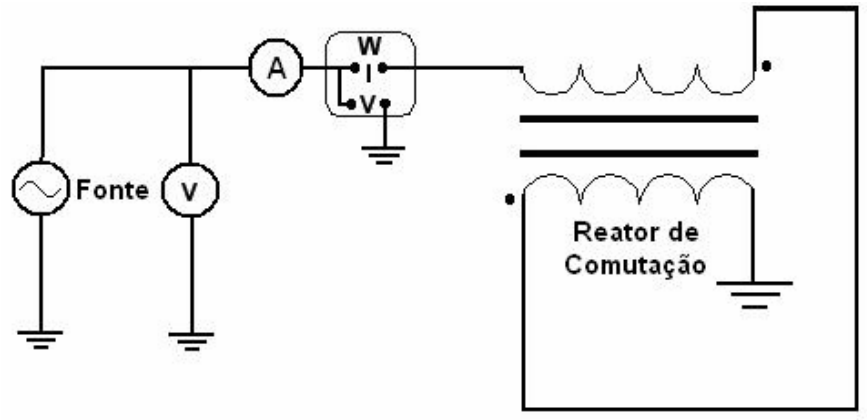


Figura 4.15: Esquema de ligação para o ensaio de corrente de circulação.

Na tabela 4.8 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 4.8: Valores medidos no ensaio de corrente de circulação.

V_{reator}(V)	I_{reator} (A)	W_{reator} (W)
5,52	**5,23**	**3**

4.3.7. ENSAIO DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS ENROLAMENTOS

Este ensaio objetivou a medição da resistência elétrica dos seguintes enrolamentos do regulador de tensão:

- Bobina de excitação;
- Enrolamento de *tap's*;
- Enrolamento de equalização;

- Reator de comutação.

A medição foi realizada utilizando uma Ponte de Wheatstone.

(A) MEDIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DOS ENROLAMENTOS DE TAP´S

Os valores medidos de resistências referentes às bobinas do enrolamento de *tap´s* são apresentados neste tópico. Embutido nos valores dessas medidas de resistência estão as resistências dos cabos, sendo assim, para obter o valor apenas dos enrolamentos é preciso extrair desses valores a parte relativa aos cabos.

A resistência dos cabos consiste na resistência dos fios de conexão da ponte de Wheatstone adicionada à resistência de contato. Esse valor de resistência foi determinado levando em consideração os valores medidos das resistências de cada *tap* e do enrolamento total.

A figura 4.16 mostra o esquema utilizado para determinar as resistências dos cabos e a parte relativa somente ao enrolamento de *tap´s*.

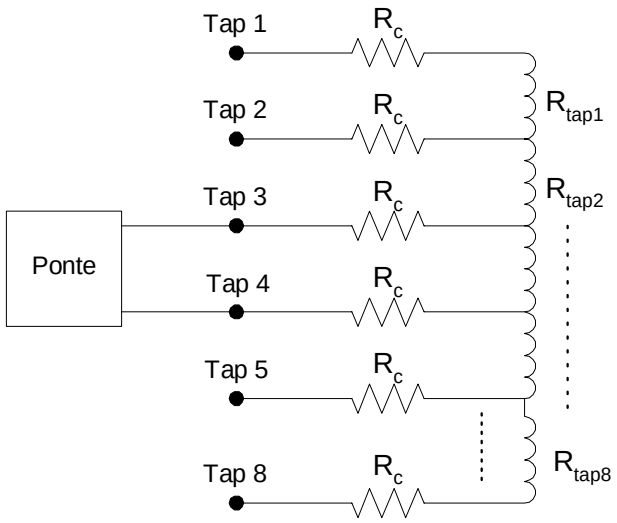


Figura 4.16: Esquema para determinação das resistências do enrolamento de tap´s.

De acordo com a figura anterior, para determinar a resistência que se refere apenas ao enrolamento de *tap´s* é necessário proceder como mostrado a seguir:

$$R_{medido\,1} = R_{tap1} + 2R_c$$

$$R_{medido\,2} = R_{tap\,2} + 2R_c$$

$$\vdots$$

$$R_{medido\,8} = R_{tap8} + 2R_c$$

$$R_{medido\,9} = R_{tap1} + R_{tap\,2} + \ldots\ldots + R_{tap\,8} + 2R_c = \sum_{n=1}^{8} R_{tap_n} + 2R_c$$

$$R_{medido\ \ total} = \sum_{n=1}^{8} R_{tap\ n} + 8 \times [2R_c]$$

$$R_{medido\ \ total} - R_{medido\ \ 9} = 7 \times [2R_c]$$

$$2R_c = 0{,}01843\,\Omega$$

Realizando este procedimento, determinou-se que a resistência dos cabos tem como valor $R_{cabos} = 0{,}009215\ \Omega$. A tabela 4.9 mostra os valores medidos e os valores determinados para as resistências de cada *tap*.

Tabela 4.9: Resistências medidas no enrolamento de tap´s.

TAP'S	R_{medida} (Ω)	$R_{tap´s}$ (Ω)
0 e 1	0,027	0,0086
1 e 2	0,0265	0,0086
2 e 3	0,0275	0,0096
3 e 4	0,0275	0,0096
4 e 5	0,028	0,0096
5 e 6	0,029	0,0106
6 e 7	0,028	0,0096
7 e 8	0,029	0,0106
0 e 8	0,095	0,0768

(B) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA NA BOBINA DE EXCITAÇÃO

A resistência total medida do enrolamento de excitação é de $R_{exc} = 0{,}37\,\Omega$. Neste caso, também é necessário descontar o valor relativo à resistência dos cabos, desta forma, o valor ajustado é $R_{exc} = 0{,}3518\,\Omega$

(C) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA NA BOBINA DE EQUALIZAÇÃO

A medição dessas resistências foi feita seguindo o mesmo procedimento que para o enrolamento de *tap´s*, desta maneira, nas medidas coletadas também está incluída a resistência dos cabos, que neste caso, deram um pouco maior que o anterior. A justificativa para esse fato é que, os condutores que fazem a conexão interna do equipamento possuem comprimentos diferentes e, assim, fazem com que a resistência varie. O valor da resistência dos cabos para essa situação foi de $R_{cabos} = 0{,}0210\,\Omega$.

A tabela 4.10 apresenta os valores medidos e os valores ajustados das resistências na bobina de equalização do protótipo do regulador.

Tabela 4.10: Resistências medidas no enrolamento de tap´s.

Tap's	R_{medida} (Ω)	$R_{ajustada}$ (Ω)
Eq01 e Eq02	0,024	0,003
Eq01 e Eq03	0,028	0,007
Eq02 e Eq03	0,025	0,004

(D) MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA NA BOBINA DO REATOR

A tabela 4.11 apresenta os valores de resistência medidos na bobina do reator de comutação do protótipo do regulador.

Tabela 4.11: Resistências medidas na bobina do reator.

Bobina	Resistência (Ω)
1	0,0365
2	0,0375

4.4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS CÁLCULOS

A metodologia de cálculo apresentada nesta seção se refere à modelagem do regulador de tensão de 220 V ensaiado em laboratório, cujas características construtivas foram apresentadas no capítulo 3.

Para determinação dos parâmetros do modelo serão utilizados dados dos ensaios, apresentados na seção 4.3, em conjunto com dados geométricos do equipamento. Estes dados são, geralmente, fornecidos pelos fabricantes, mas neste caso, foram determinados no capítulo anterior por se tratar de um modelo reduzido do equipamento.

4.4.1. DETERMINAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DE MAGNETIZAÇÃO DOS INDUTORES NÃO LINEARES

As figuras 4.17 e 4.18 apresentam a configuração geométrica do núcleo e das bobinas de tensão do protótipo do regulador. Na figura 4.17 é mostrado o corte longitudinal do núcleo na qual destacam-se as dimensões das chapas que compõem a coluna e a culatra. A figura 4.18 mostra um corte transversal da coluna central, incluindo cada uma das bobinas existentes na mesma, destacando as suas respectivas dimensões com base nos dados do projeto.

Observa-se que para as dimensões das bobinas adotou-se valores médios determinados com base nas dimensões dos condutores, número de espiras e seu fator de bobinamento.

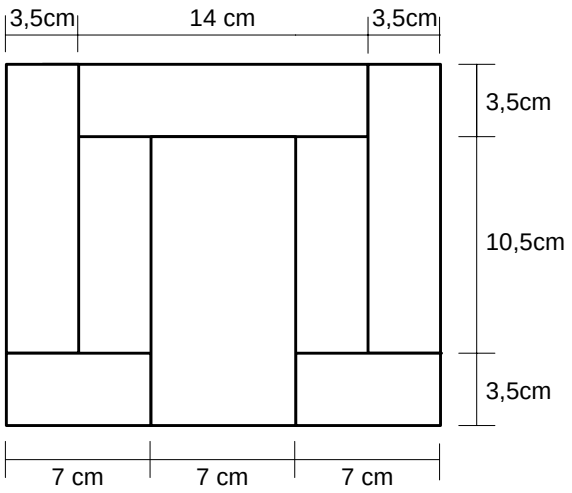


Figura 4.17: Corte longitudinal no núcleo do modelo reduzido do regulador de tensão monofásico, mostrando as medidas do mesmo.

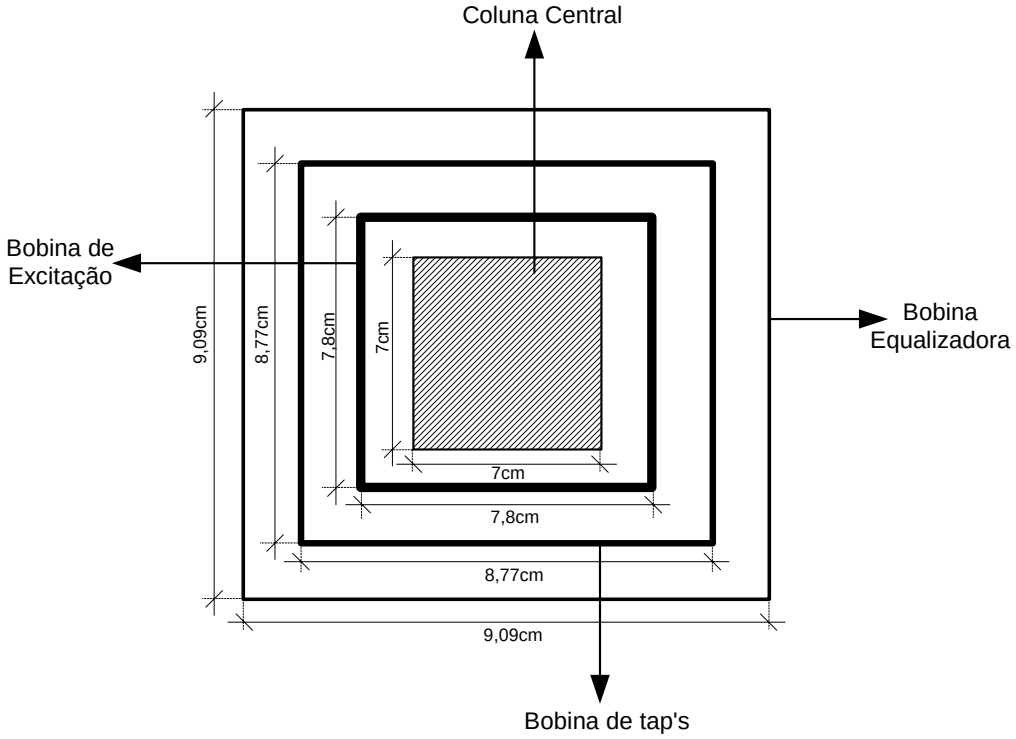


Figura 4.18: Corte transversal na coluna central do modelo reduzido do regulador de tensão, mostrando as dimensões das bobinas existentes.

A partir da figura 4.17, podem ser extraídos os comprimentos médios dos circuitos magnéticos da janela (l_j), da coluna (l_{col}), da culatra (l_{cul}) e a altura da janela, como a seguir.

$$l_{col} = \frac{3,5}{2} + 10,5 + \frac{3,5}{2} \Rightarrow l_{col} = 14,0\,cm \Rightarrow l_{col} = 0,14\,m$$

$$l_{cul} = \frac{3,5}{2} + 3,5 + \frac{3,5}{2} + \frac{3,5}{2} + 10,5 + \frac{3,5}{2} + \frac{3,5}{2} + 3,5 + \frac{3,5}{2} \Rightarrow l_{cul} = 28,0\,cm \Rightarrow l_{cul} = 0,28\,m$$

O circuito magnético do núcleo é formado pela coluna central e as duas culatras laterais, as quais possuem a metade da seção magnética da coluna. Como a distribuição de fluxo magnético nas mesmas também será a metade do valor da coluna central, fica evidente que esse circuito magnético possui a mesma densidade de fluxo (Indução Magnética) em todas as suas partes. Assim, podem-se associar as duas culatras laterais, de forma a se trabalhar com uma única culatra equivalente, com seção magnética igual à da coluna, na qual será estabelecido o mesmo fluxo da coluna. O seu comprimento magnético médio será (l_{cul}), já determinado anteriormente.

O comprimento magnético do núcleo é dado pela soma dos comprimentos da coluna e culatra.

$$l_{núcleo} = l_{col} + l_{cul} \Rightarrow l_{núcelo} = 0,14 + 0,28 \Rightarrow l_{núcleo} = 0,42\,m$$

O comprimento magnético da janela é igual a:

$$l_j = 10,5\,cm \Rightarrow l_j = 0,105\,m$$

A área da seção magnética do núcleo será, então determinada por:

$$S_{col} = 0,07 \times 0,07 \times 0,85 \Rightarrow S_{col} = 0,004165\,m^2$$

$$S_{cul} = 2 \times 0,035 \times 0,07 \times 0,85 \Rightarrow S_{cul} = 0,004165\,m^2$$

Na curva (VxI) obtida através do ensaio de magnetização apresentada conforme figura 4.6 e os dados da tabela 4.2, pode ser transformada em curvas de fluxo x corrente para a utilização na modelagem dos indutores não lineares que representam a coluna e as culatras. Para tanto, adota-se o seguinte procedimento:

i. O fluxo produzido pela tensão é dado por $\lambda = \dfrac{V}{4,44\ f}$;

ii. A corrente deve ser subdividida em duas parcelas, sendo cada uma delas correspondentes à solicitação de f.m.m. para estabelecer o fluxo magnético na coluna e na culatra. Visto que as duas culatras possuem a metade da seção magnética da coluna é conveniente considerar as duas culatras como se fossem uma única, e assim dizer que o fluxo magnético será o mesmo para a coluna e culatra, isto significa a mesma densidade de fluxo (B) e por conseqüência a mesma permeabilidade magnética. Logo, as f.m.m.s requeridas pelo fluxo magnético são proporcionais aos comprimentos dessas partes (l_{col} e l_{cul}), como mostram as equações 4.1 e 4.2 a seguir:

$$I_{col} = k_p \times \frac{l_{col}}{l_{núcleo}} \times I_{Total} \tag{4.1}$$

$$I_{cul} = k_p \times \frac{l_{cul}}{l_{núcleo}} \times I_{Total} \tag{4.2}$$

Sendo: $l_{núcleo} = l_{col} + l_{cul}$

Onde:

I_{Total} = valor genérico de corrente extraído da tabela;

k_p = fator de pico.

Os ensaios apresentados no capítulo anterior mostraram que a corrente é praticamente senoidal para valores de tensão de até 180 V, a partir da qual a mesma começa a apresentar distorções características da saturação do núcleo. À medida que o núcleo vai atingindo maior grau de saturação o fator de pico (k_p) vai aumentando. Em 220 V, o fator de pico é 2,34. Assim, para determinar o valor de pico das correntes apresentadas na tabela 4.12 será considerado o seguinte:

i. Para as correntes correspondentes às tensões inferiores a 210 V inclusive, serão consideradas senoidais nas quais se aplicará o fator de pico igual a $\sqrt{2}$ para determinar os valores de pico;

ii. Para valores de correntes superiores a 210 V será utilizado o fator de pico de 2,34.

A tabela 4.12 mostra tais pontos de (λ, I) obtidos para coluna e culatra.

Tabela 4.12: Pontos (λ, I) para coluna e culatras utilizadas pelo indutor tipo 98 no modelo do protótipo do regulador de tensão.

V	I	Coluna		Culatra	
		Fluxo	Corrente	Fluxo	Corrente
100	0,04	0,3754	0,0189	0,3754	0,0377
120	0,05	0,4505	0,0236	0,4505	0,0471
140	0,06	0,5255	0,0283	0,5255	0,0565
160	0,08	0,6006	0,0415	0,6006	0,0829
170	0,10	0,6381	0,0518	0,6381	0,0829
180	0,11	0,6757	0,0571	0,6757	0,1141
190	0,14	0,7132	0,0726	0,7132	0,1452
200	0,19	0,7508	0,0986	0,7508	0,1972
210	0,27	0,7883	0,2106	0,7883	0,4212
220	0,41	0,8258	0,3198	0,8258	0,6396
230	0,60	0,8634	0,4680	0,8634	0,9360
240	0,82	0,9009	0,6396	0,9009	1,2792
250	1,05	0,9384	0,6941	0,9384	1,3881
260	1,28	0,9760	0,8461	0,9760	1,6922
270	1,56	1,0135	1,0311	1,0135	2,0624
280	1,83	1,0511	1,1511	1,0511	2,3022
290	2,15	1,0886	1,3552	1,0886	2,7048
300	2,51	1,1261	1,9578	1,1261	3,9154
350	4,63	1,3138	3,6114	1,3138	7,2228
400	7,96	1,5015	6,2088	1,5015	12,4176

4.4.2 – DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS LINEARES

A proposta inicial vista no capítulo 2 apresentou uma metodologia para os cálculos das indutâncias lineares baseada nas geometrias do núcleo e das bobinas, a partir das quais determinam-se as áreas dos espaços de ar relativas aos fluxos entre bobinas e a bobina interna e a coluna. Entretanto, essa metodologia não deverá ser eficiente neste caso, visto que o protótipo foi construído de forma artesanal e as bobinas não tem um formato bem definido.

Assim, as indutâncias lineares serão determinadas a partir dos dados obtidos nos ensaios laboratoriais.

No ensaio em curto circuito obtém-se a impedância de dispersão do transformador que é relativa ao espaço de ar entre a bobina de *tap´s* e a bobina de excitação, representada na modelagem pela indutância linear L_2. Essa indutância pode ser determinada diretamente pela reatância obtida no ensaio em curto circuito.

A indutância L_1 deve representar a indutância relativa aos espaços de ar entre a bobina de excitação e a coluna. Porém, a representação dos indutores não lineares foi elaborada com base nos dados obtidos no ensaio de magnetização, no qual, o efeito desses espaços de ar já estavam inclusos. Sendo assim, o valor da indutância L_1 deve ser considerado desprezível.

$$L_1 \cong 0$$

A indutância L_3, que é representativa do fluxo de dispersão entre a bobina de equalização e a bobina de *tap´s*, pode ser determinada com base nas equações 4.3 e 4.4 que determinam as indutâncias do fluxo de dispersão desses enrolamentos, isto é:

$$L_2 = \frac{k}{n_2}\left(N_2\right)^2 \times S_2 \tag{4.3}$$

$$L_3 = \frac{k}{n_3}\left(N_3\right)^2 \times S_3 \tag{4.4}$$

Onde:

k	- é uma constante representativa do meio magnético
n_2 e n_3	- número de enrolamentos
N_2 e N_3	- número total de espiras
S_2 e S_3	- área de espaço de ar entre bobinas

Então, pode-se escrever a equação 4.5 onde se determina L_3 à partir de L_2:

$$L_3 = L_2 \left(\frac{n_2}{n_3}\right) \times \left(\frac{N_3}{N_2}\right)^2 \times \left(\frac{S_3}{S_2}\right) \tag{4.5}$$

As áreas de espaços de ar podem ser extraídas da figura 4.16 que foi elaborada com base nos dados de projeto.

(A) - INDUTÂNCIA L_2

Utilizando-se os dados obtidos no ensaio em curto circuito (W_{cc} = 43W; V_{cc} = 6,79 V; I_{cc} = 6,66 A) tem-se:

$$R_{cc} = \frac{W_{cc}}{I_{cc}^{\ 2}} \Rightarrow R_{cc} = \frac{43}{(6,66)^2} = 0,9694\ \Omega$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \Rightarrow Z_{cc} = \frac{6,79}{6,66} = 1,0195\ \Omega$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^{\ 2} - R_{cc}^{\ 2}} \Rightarrow X_{cc} = \sqrt{1,0195^2 - 0,9694^2} = 0,3157\ \Omega$$

O valor de (L_2) é obtido a seguir.

$$L_2 = \frac{Xcc}{2\,\pi\ f} \times 10^3 \Rightarrow L_2 = \frac{0,3157}{2\,\pi\ 60} \times 10^3 \Rightarrow L_2 = 0,8373\ mH$$

(B) - INDUTÂNCIA L_3

Conhecendo-se a indutância L_2 pode-se determinar a indutância L_3. A primeira etapa é determinar a área de ar da bobina de *tap´s*, como mostrado abaixo:

$$S_2 = 8,77^2 - 7,8^2 \Rightarrow S_2 = 16,0729\ cm^2$$

A área (S_3) de ar da bobina de excitação é dada por:

$$S_3 = 9,09^2 - 8,77^2 \Rightarrow S_3 = 5,7152\ cm^2$$

O valor de (L_3) é obtido aplicando a equação 4.5, como mostrado na seqüência.

$$L_3 = 0,8373\left(\frac{8}{2}\right)\times\left(\frac{4}{64}\right)^2\times\left(\frac{5,7152}{16,0729}\right)\Rightarrow L_3 = 0,00465\ mH$$

4.4.3. CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS RELATIVAS ÀS PERDAS NO FERRO

Com o valor da perda obtido através do ensaio a vazio(W_{vazio}=18,0 W) e sabendo-se que a mesma refere-se à perda no ferro do núcleo e no enrolamento da bobina de excitação, pode-se determinar como a seguir:

$$W_{fe} = W_{vazio} - R_{ex}\times i_{ex}{}^2 \Rightarrow W_{fe} = 18 - 0,3518\times 0,41^2 \Rightarrow W_{fe} = 17,941W$$

Fazendo a distribuição desta perda no ferro, tendo como base os comprimentos da coluna e culatra e o comprimento total do núcleo, determinam-se as perdas na coluna e na culatra, como mostrado a seguir.

$$W_{fe_col} = \frac{l_{col}}{l_{núcleo}}\times W_{fe} \Rightarrow W_{fe_col} = \frac{0,14}{0,42}\times 17,941 \Rightarrow W_{fe_col} = 5,980W$$

$$W_{fe_cul} = \frac{l_{cul}}{l_{núcleo}}\times W_{fe} \Rightarrow W_{fe_cul} = \frac{0,28}{0,42}\times 17,941 \Rightarrow W_{fe_cul} = 11,961W$$

As resistências associadas a estas perdas são:

$$R_{fe_col} = \frac{220^2}{5,980} \Rightarrow R_{fe_col} = 8.094,59\Omega$$

$$R_{fe_cul} = \frac{220^2}{11,961} \Rightarrow R_{fe_cul} = 4.047,27\Omega$$

A tabela 4.13 mostra um resumo do modelo do protótipo do regulador de tensão a ser implementado no programa ATP.

Tabela 4.13: Parâmetros do modelo do protótipo do regulador de tensão monofásico.

PARÂMETROS DO MODELO DO REGULADOR MONOFÁSICO DE 32 DEGRAUS **W_N = 2200VA (PASSANTE); V_N = 220V; I_{CARGA} = 10 A**		
TRANSFORMADORES REPRESENTATIVOS DAS BOBINAS		
BOBINAS	**TRANSFORMADORES**	
Excitação	1 enrolamento (220V)	
Tap´s	8 enrolamentos (8 x 11V)	
Equalização	2 enrolamentos (2 x 2,75)	
RESISTÊNCIAS ASSOCIADAS ÀS PERDAS NO FERRO		
Coluna	R_{fe_col} = 8.094,59 Ω	
Culatra	R_{fe_cul} = 4.047,27 Ω	
RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS		
Bobina de excitação	R_1 = 0,3518 Ω	
Bobina de tap's	R_{21} = 0,0086 Ω	
	R_{22} = 0,0086 Ω	
	R_{23} = 0,0096 Ω	
	R_{24} = 0,0096 Ω	
	R_{25} = 0,0096 Ω	
	R_{26} = 0,0106 Ω	
	R_{27} = 0,0096 Ω	
	R_{28} = 0,0106 Ω	
Bobina equalizadora	R_{31} = 0,003Ω	
	R_{32} = 0,004Ω	
INDUTORES LINEARES		
Indutância representativa do fluxo mútuo no ar entre a bobina de excitação e a coluna	L_1 = 0 mH	
Indutância devido ao fluxo disperso no ar entre a bobina de tap's e a bobina de excitação	L_2 = 0,8373 mH	
Indutância devido ao fluxo disperso no ar entre a bobina equalizadora e a bobina de tap's	L_3 = 0,00465 mH	
INDUTORES NÃO LINEARES		
Coluna	I_n= 0,3198 A *	λ_n= 0,8258 Wb *
Culatra	I_n = 0,6396 A *	λ_n = 0,8258 Wb *

* Os valores relativos aos indutores não lineares são referenciados na tabela 4.2.

4.5 – CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO REATOR DE COMUTAÇÃO

Para o reator de comutação empregou-se exatamente o mesmo modelo mostrado no capítulo 2, visto que também neste caso, o entreferro é bastante significativo e, portanto, a sua indutância pode ser considerada linear. Os cálculos da indutância (L_{reator}), bem como da resistência representativa da perda no ferro (R_{fe_reator}), são efetuados a seguir.

$$L_{reator} = \frac{V_{reator}}{(2 \times I_c) \times 2\pi \times f} \times 10^3 \Rightarrow L_{reator} = \frac{220}{(2 \times 5,23) \times 2\pi \times 60} \times 10^3 \Rightarrow L_{reator} = 55,790\ mH$$

Com o valor da perda obtido através do ensaio a vazio(W_{vazio}= 3,0 W) e sabendo-se que a mesma refere-se a perda no ferro do núcleo do reator e no enrolamento do mesmo, tem-se que a perda no ferro do reator é dado por:

$$W_{fe_reator} = W_{vazio_reator} - R \times i^2 \Rightarrow W_{fe_reator} = 3 - 0,0188 \times 5,23^2 \Rightarrow W_{fe_reator} = 2,486W$$

Conseqüentemente o valor da resistência que representa tal perda é igual a:

$$R_{fe_reator} = \frac{V_{reator}^{\ 2}}{W_{fe_reator}} \Rightarrow R_{fe_reator} = \frac{220^2}{2,486} \Rightarrow R_{fe_reator} = 19.469,03\Omega$$

Desta forma, o modelo do reator de comutação do protótipo fica determinado por esses dois parâmetros associados a um transformador de três enrolamentos. A tabela 4.14 mostra as grandezas implementadas no ATP.

Tabela 4.14: Parâmetros do modelo do protótipo do reator de comutação.

GRNADEZAS DO MODELO DO REATOR DE COMUTAÇÃO	
TRANSFORMADOR REPRESENTATIVO DA BOBINA	
Bobina do Reator	2 enrolamentos (2 x 2,75V / 5,5V)
PARÂMETROS DO MODELO	
Indutância linear	L_{reator} = 55,790 mH
Resistência das perdas no ferro	R_{fe_reator} = 19.469,03 Ω
Resistência representativa da perda na bobina 1	R_1= 0,0183 Ω
Resistência representativa da perda na bobina 2	R_2= 0,0193 Ω

A figura 4.19 mostra o diagrama elétrico das ligações internas do protótipo do regulador de tensão, vale ressaltar que o circuito elétrico representativo do circuito magnético está em vermelho.

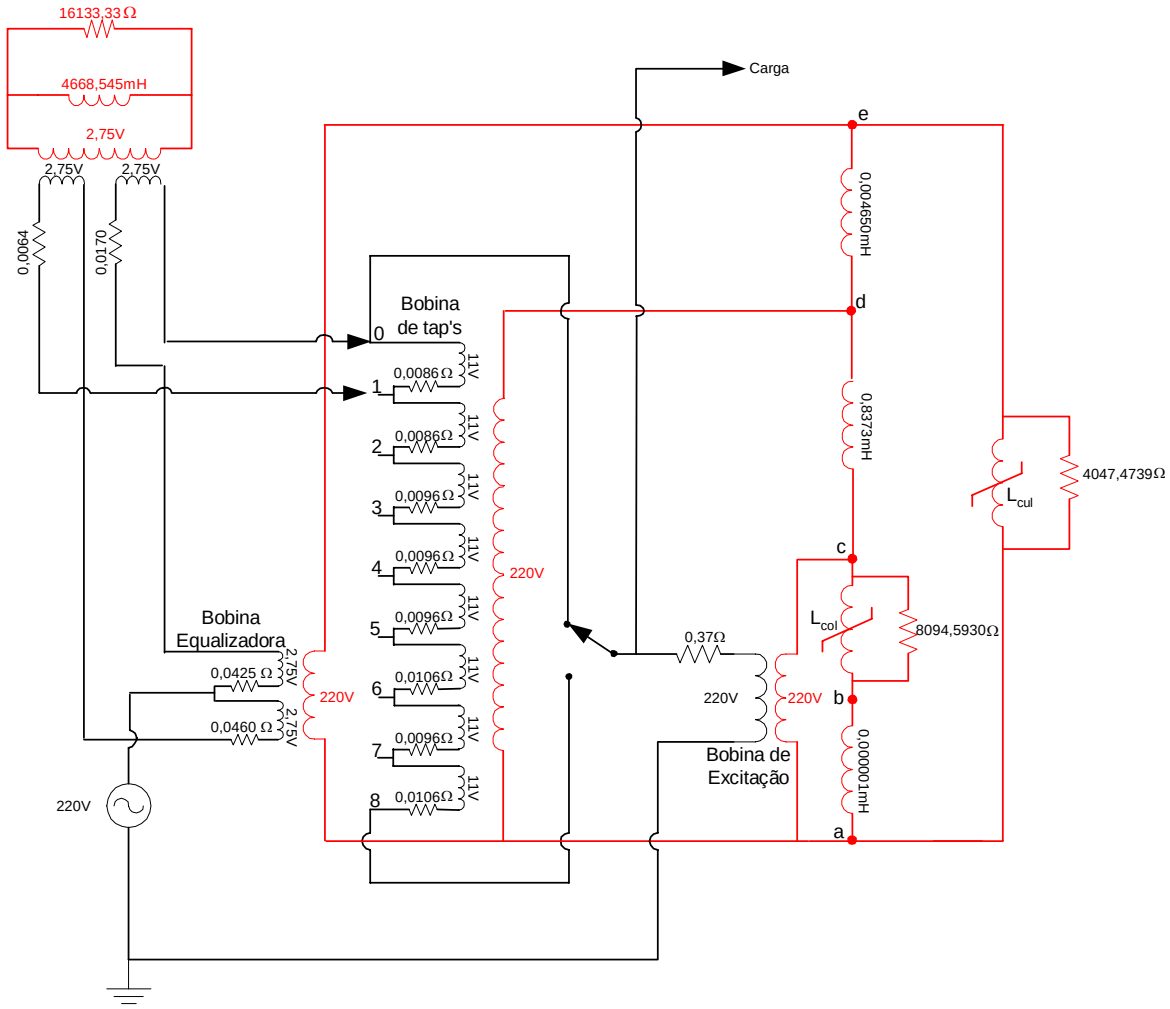


Figura 4.19: Diagrama elétrico das ligações internas do protótipo do regulador de tensão.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como principal meta a determinação dos parâmetros necessários à modelagem de um regulador de tensão de 32 degraus, 220 V, ±40%, utilizado para validar as proposições apresentadas nos capítulos anteriores. Conforme já estabelecido essa determinação é baseada em dados de projeto e nos resultados de ensaios típicos em reguladores. O regulador utilizado é um modelo reduzido dos reguladores convencionais que geralmente possuem tensão nominal de 13,8 kV, foi projetado e executado segundo os padrões estabelecidos. Isto o torna mais apropriado para a utilização como um equipamento de validação da modelagem, em face da facilidade de realização dos ensaios laboratoriais possibilitando medidas diretas das grandezas requeridas.

Os ensaios realizados foram: o ensaio em vazio apenas do transformador do regulador de tensão para o levantamento das características comportamentais do núcleo magnético do transformador do regulador de tensão para que a não linearidade característica do material ferromagnético fosse representada na modelagem com maior fidelidade possível; o ensaio de magnetização onde se buscou levantar a característica de magnetização do núcleo magnético do transformador do regulador de tensão; o ensaio em vazio, para determinação das perdas no núcleo e valores de pico e eficazes da corrente de excitação; o ensaio de curto circuito onde o objetivo foi a determinação da impedância percentual e das perdas nos enrolamentos do regulador de tensão; ensaio de corrente de circulação no reator de comutação com o objetivo de determinar a corrente circulante no reator, bem como as perdas totais medição; e medição das resistências dos enrolamentos. Além desses ensaios, foi realizado o ensaio com carga do modelo reduzido para verificar se o funcionamento do mesmo estava como esperado.

Com a apresentação dos resultados dos ensaios laboratoriais e conjuntamente com os dados construtivos do equipamento fornecidos no capítulo 3 partiu-se para a determinação dos parâmetros do modelo.

Na modelagem apresentada o circuito magnético foi representado por um circuito elétrico, onde cada parâmetro, isto é, indutores lineares e não lineares e as resistências que representam as perdas no ferro, foram determinadas segundo a metodologia aplicada no capítulo 2, com algumas diferenças por se tratar de um modelo reduzido que foi construído de forma artesanal.

Na determinação dos indutores não lineares foi feita uma consideração importante, ou seja, verificaram-se nos ensaios que a corrente é praticamente senoidal para valores de tensão de até 180 V, a partir da qual a mesma começa a apresentar distorções características da saturação do núcleo, isso implica que quanto maior o grau de saturação do núcleo maior será o fator de pico. Desta forma, convencionou-se que para valores de tensão igual ou inferior a 210 V o fator de pico seria $\sqrt{2}$ e para valores superiores a 210 V o fator de pico usado foi 2,34.

As indutâncias lineares foram determinadas a partir de dados de ensaios laboratoriais, por exemplo, o ensaio em curto circuito de onde se extraí a impedância de dispersão do transformador.

Para determinar o valor das resistências foi utilizado o ensaio em vazio, que forneceu o valor das perdas totais no ferro e nos enrolamentos, e os comprimentos da coluna e culatra para determinar apenas a perda no ferro.

Assim, determinaram-se os parâmetros do modelo que será utilizado no programa ATP para fins de validação do modelo, o que será apresentado no capítulo seqüente.

CAPÍTULO V

COMPARAÇÕES ENTRE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a modelagem de reguladores de tensão com 32 degraus descrita anteriormente, cujos parâmetros de representação foram mostrados nas tabelas 4.13 e 4.14, foram realizadas simulações computacionais e seus resultados são apresentados neste capítulo, além das análises para a validação do modelo.

Na busca desta validação serão utilizados os dados obtidos em três ensaios realizados no modelo reduzido do regulador de tensão, cujas características já foram especificadas no capítulo 4. Os ensaios utilizados para a validação foram: o ensaio em vazio somente no transformador do regulador de tensão, o ensaio em vazio do regulador e o ensaio de curto circuito.

No ensaio em vazio serão utilizados, para comparação entre os resultados medidos e simulados, os valores de corrente de excitação e circulação, com suas respectivas formas de ondas, bem como o valor de perda total obtida no referido ensaio. Já no caso do ensaio em vazio apenas do transformador do regulador de tensão, o parâmetro de comparação utilizado será o valor da corrente de excitação. Por fim, no ensaio em curto-circuito a comparação será feita

baseando-se nos valores eficazes das correntes de excitação e *tap´*s, e também da perda total ocorrida.

Os dados obtidos nos ensaios foram apresentados na seção 4.3 do capítulo anterior, onde também foi apresentada a descrição detalhada dos referentes ensaios. Os casos de simulação serão descritos na seção 5.2 e os resultados apresentando os valores e formas de ondas que serão utilizadas na comparação com os dados obtidos nos ensaios serão mostrados na seção 5.3.

5.2. DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

Buscando manter um mesmo padrão quanto à metodologia imposta para a realização dos ensaios laboratoriais no regulador de tensão analisado, os casos simulados reproduzem os ensaios efetuados, os quais são descritos na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Descrição dos casos simulados.

CASOS SIMULADOS	DESCRIÇÃO
Operação em Vazio somente do Transformador do Regulador de Tensão	Alimentação do regulador com fonte de 220 V apenas na bobina de excitação, estando os demais enrolamentos desconectados.
Operação em Vazio	Alimentação do regulador pela bobina de excitação com fonte de tensão de 180 V, 220 V e 260 V, com a bobina de *tap´s* sem carga e os dois contatos do comutador (R01 e R02) na posição zero.
Operação em Curto-Circuito	Alimentação do regulador pela bobina de excitação aplicando corrente nominal (6,6 A), estando a bobina de *tap´s* curto circuitada, ou seja, *tap* 8 conectado ao *tap* 0, e o comutador na posição zero.

5.3. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados obtidos a partir das simulações realizadas na plataforma computacional ATP foram agrupadas em três conjuntos que serão apresentados nas subseções seguintes.

Todos as simulações foram realizadas seguindo a mesma metodologia empregada nos ensaios laboratoriais buscando obter resultados mais precisos em vista da validação almejada.

5.3.1. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO EM VAZIO DO TRANSFORMADOR DO REGULADOR DE TENSÃO

A simulação do regulador de tensão em vazio foi realizado com a bobina de excitação sendo alimentada por uma fonte de tensão de 220 V sendo que, os demais enrolamentos do regulador foram desconectados.

A figura 5.1 mostra a forma de onda da corrente na bobina de excitação obtida através da simulação. Vale ressaltar que no alto de cada figura está apresentado seu respectivo valor de pico.

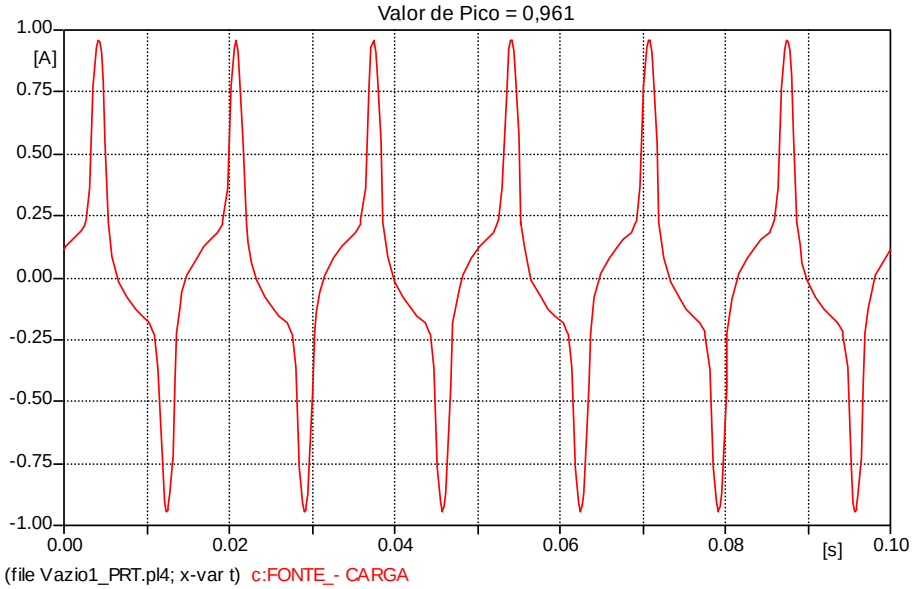


Figura 5.1: Corrente na bobina de excitação.

Os principais resultados obtidos com a simulação do transformador do regulador de tensão a vazio são: tensão aplicada, corrente de circulação e perdas a vazio (representada pela potência), todos valores eficazes, os quais estão resumidos na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Resultados da simulação em vazio do transformador do regulador de tensão.

TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (W)
220,0	0,414	18,03

5.3.2. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO EM VAZIO DO REGULADOR

Assim como mencionado anteriormente, para as simulações em vazio do regulador de tensão buscou-se representar as mesmas condições impostas aos ensaios realizados no laboratório com o equipamento.

Neste caso, o regulador de tensão foi ensaiado sob condições nominais e também, em duas outras situações adversas, ou seja, com ± 18% da tensão nominal (subexcitado e sobrexcitado).

A figura 5.2 mostra a forma de onda da corrente na bobina de excitação do regulador de tensão e a figura 5.3 apresenta a corrente de circulação na bobina de equalização para condições nominais do equipamento, ou seja, com a tensão nominal, 220 V, aplicada.

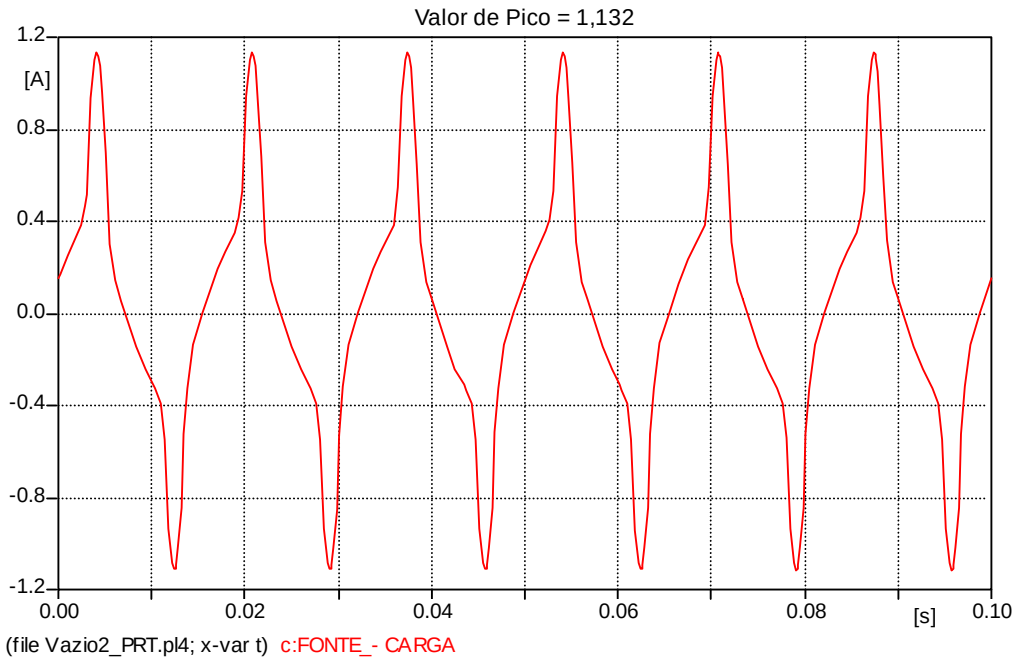


Figura 5.2: Corrente na bobina de excitação no ensaio em vazio do regulador.

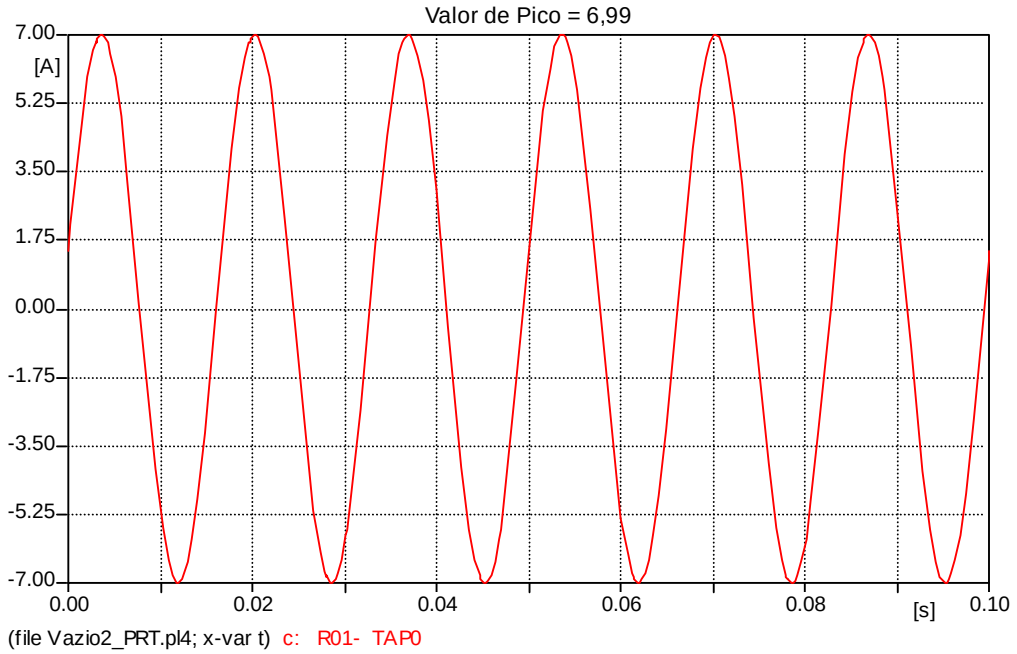


Figura 5.3: Corrente de circulação na bobina de equalização.

A tabela 5.3 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos com a simulação a vazio do regulador sob condições nominais. Pode ser visto na tabela

os valores da corrente de excitação, corrente de circulação e a potência a vazio, sendo que esta representa as perdas a vazio do regulador simulado.

Tabela 5.3: Resultados da simulação em vazio do regulador de tensão sob condição nominal.

TENSÃO (V)	$I_{EXCITAÇÃO}$ (A)	$I_{CIRCULAÇÃO}$ (A)	POTÊNCIA (W)
220,0	0,522	4,95	23,71

Nas demais simulações realizadas isto é, com o regulador subexcitado e sobrexcitado, foram analisadas apenas a tensão aplicada ao equipamento e a corrente de excitação, sendo que, para o último item (corrente) é apresentada a sua forma de onda.

Os resultados obtidos de tensão aplicada ao equipamento e corrente de excitação para as condições subexcitado e sobrexcitado na simulação a vazio do regulador de tensão são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Resultados da simulação em vazio do regulador de tensão.

CONDIÇÃO	TENSÃO (V)	$I_{EXCITAÇÃO}$ (A)
Subexcitado	180,4	0,219
Sobrexcitado	261,4	1,413

As figuras 5.4 e 5.5 mostram, respectivamente, as formas de onda da corrente na bobina de excitação para o regulador de tensão subexcitado e sobrexcitado.

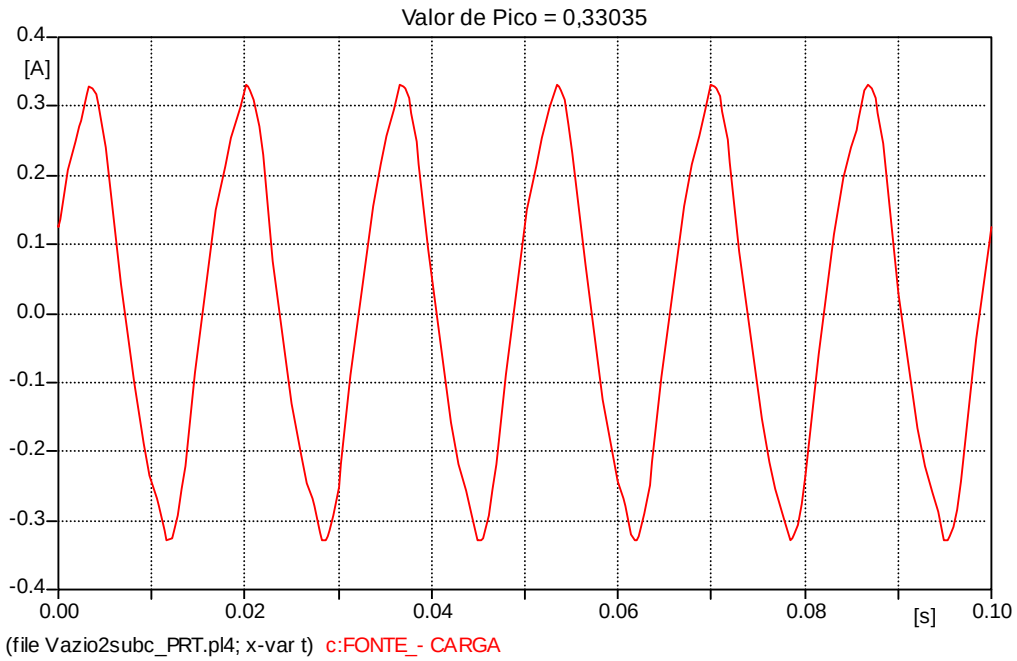


Figura 5.4: Corrente de excitação para o regulador subexcitado.

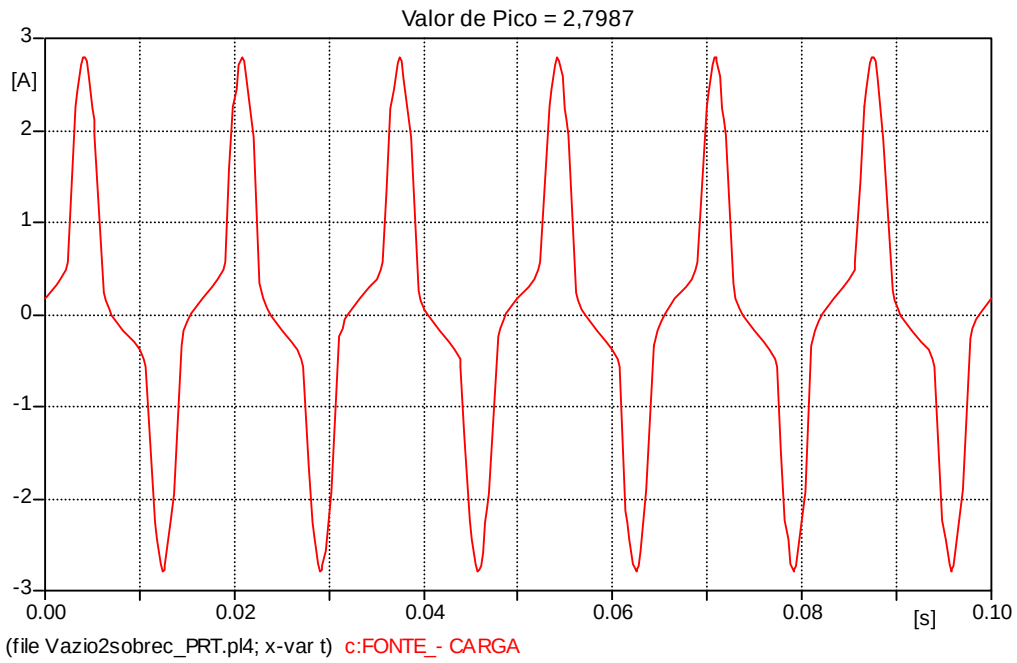


Figura 5.5: Corrente de excitação para o regulador sobrexcitado.

5.3.3. SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO

No ensaio em curto-circuito são verificados os resultados da tensão de curto-circuito (V_{cc}), corrente de excitação (I_{exc}), corrente na bobina de *tap´s* ($I_{Tap´s}$) e perdas (W_{cc}).

Em seguida são apresentados os oscilogramas com os resultados mais relevantes da simulação. A figura 5.6 mostra a tensão aplicada à bobina do regulador. A corrente na bobina de *tap´s* é mostrada na figura 5.7.

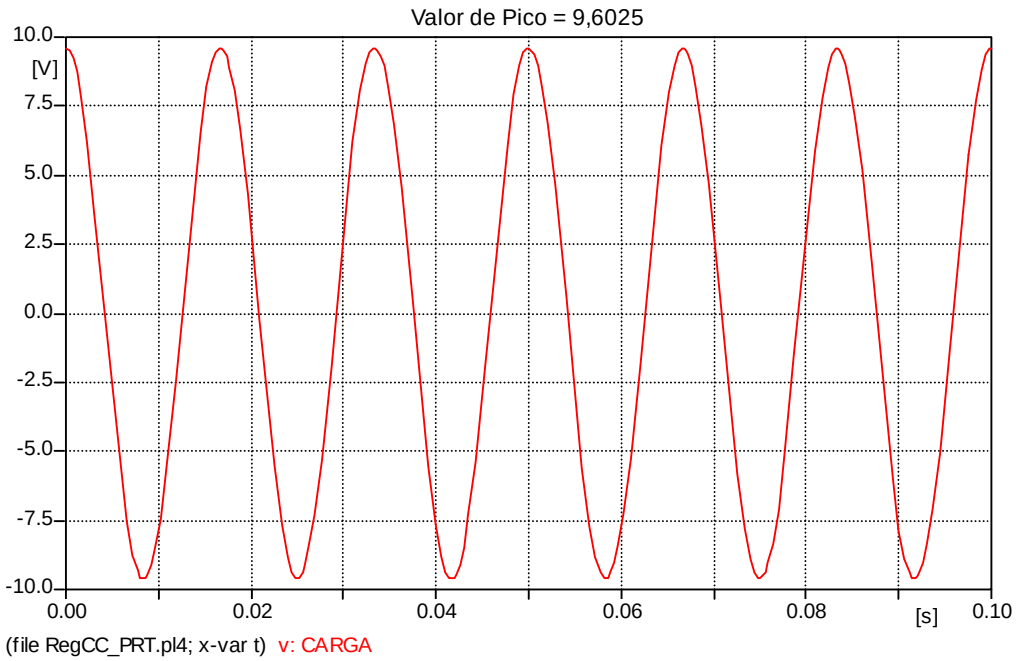


Figura 5.6: Tensão aplicada na bobina de excitação.

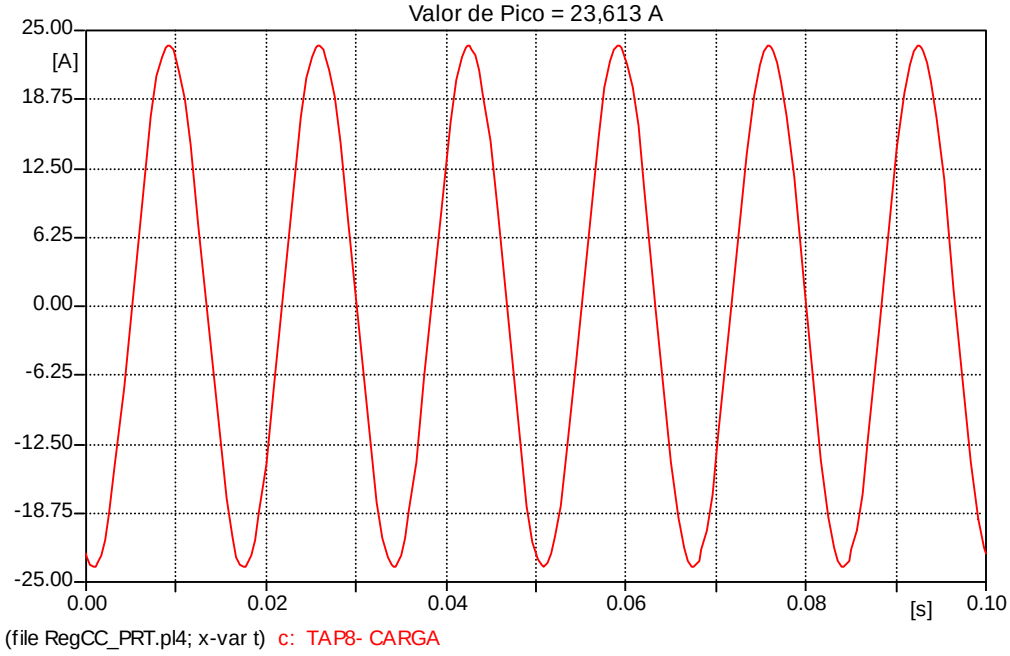


Figura 5.7: Corrente nas bobinas de tap´s.

A tabela 5.5 apresenta todos os valores eficazes das grandezas antes mencionados obtidos na simulação em curto circuito do regulador de tensão.

Tabela 5.5: Valores obtidos na simulação em curto circuito.

V_{cc} (V)	I_{exc}(A)	I_{Taps} (A)	W_{cc} (W)
6,79	6,68	16,70	43,21

5.4. COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de validar o modelo do regulador de tensão de 32 degraus implementado no ATP, esta seção apresenta uma comparação entre os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e nas simulações.

Buscando uma boa visualização qualitativa e quantitativa dos resultados simulados e dos medidos serão utilizadas formas de ondas e tabelas

representativas dos valores obtidos (medidos e simulados) e suas respectivas diferenças percentuais.

Para uma melhor verificação entre os resultados obtidos através de simulação e medição, as formas de ondas obtidas pela simulação serão comparadas, em uma mesma figura, com as formas de ondas obtidas em fase experimental.

5.4.1. SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES DA OPERAÇÃO EM VAZIO DO TRANSFORMADOR DO REGULADOR DE TENSÃO

Para este caso, isto é, operação em vazio apenas do transformador do regulador de tensão, os parâmetros utilizados na comparação entre simulação e ensaio experimental foi a corrente de excitação e as perdas.

A figura 5.8 mostra a forma de onda da corrente de excitação obtida na simulação (curva vermelha) e no ensaio (curva azul).

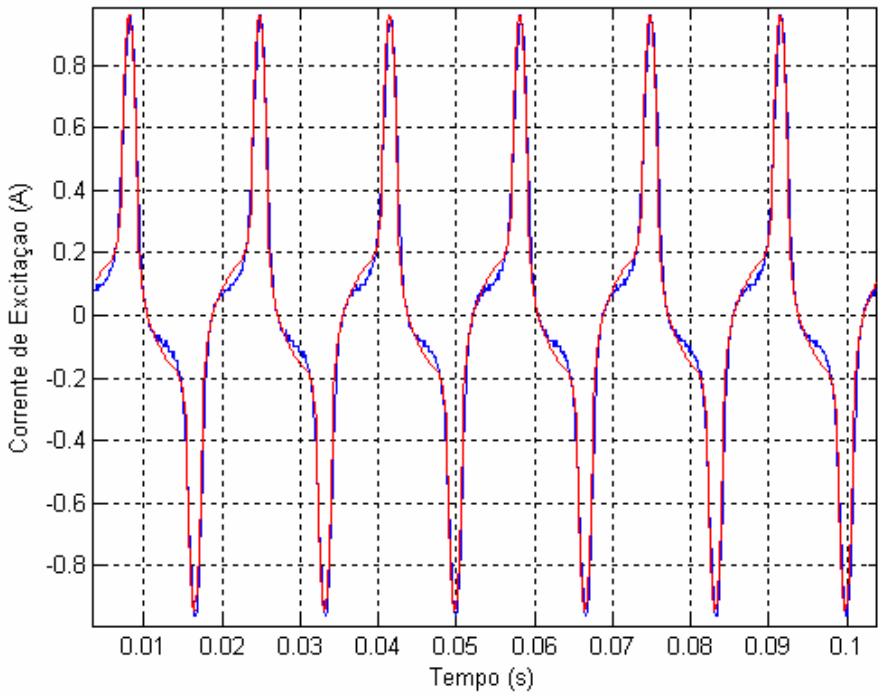


Figura 5.8: Correntes de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) em vazio.

Observa-se nesta figura uma discrepância muito pequena entre as duas formas de onda, que se pode justificar devido a não representação exata do circuito magnético, tal como o ciclo de histerese.

A tabela 5.6 apresenta um resumo dos valores eficazes da corrente e também, os valores de perdas a vazio com uma breve comparação entre os valores medidos e simulados, tomando como referência o valor de simulação.

Tabela 5.6: Comparação entre os resultados de ensaio e simulação da operação em vazio do transformador do regulador de tensão.

GRANDEZAS	ENSAIO	SIMULAÇÃO	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)
I_{EXC} (A)	0,410	0,414	0,97
W_0 (W)	18,0	18,3	1,64

Nas formas de ondas (medidas e simuladas) da corrente de excitação, na figura 5.8, percebe-se uma grande semelhança entre elas. Ao observar os valores eficazes dessa corrente, como visto na tabela 5.6, percebe-se que a diferença percentual entre elas é bastante aceitável.

5.4.2. SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES DA OPERAÇÃO EM VAZIO DO REGULADOR DE TENSÃO

Para a operação em vazio do regulador foram estipulados três casos para a verificação dos resultados assim, a tabela 5.7 apresenta uma descrição de tais casos.

Tabela 5.7: Descrição dos casos verificados.

CASOS VERIFICADOS	DESCRIÇÃO
(A) Operação sob Condições Nominais	Ensaio em vazio do regulador com fonte de alimentação de 220 V.
(B) Operação com Regulador Subexcitado	Ensaio em vazio do regulador com fonte alimentação de 180 V.
(C) Operação com Regulador Sobrexcitado	Ensaio em vazio do regulador com fonte de alimentação de 260 V.

(A) – REGULADOR SOB CONDIÇÕES NOMINAIS

A comparação utilizada neste caso será feita conforme a proposição da operação em vazio apenas do transformador do regulador de tensão, isto é, através da análise da forma de onda da corrente de excitação, além de comparar os valores eficazes dessa corrente e das perdas.

A formas de ondas das correntes simuladas (curva vermelha) e medidas (curva azul) são comparadas com a ajuda da figura 5.9.

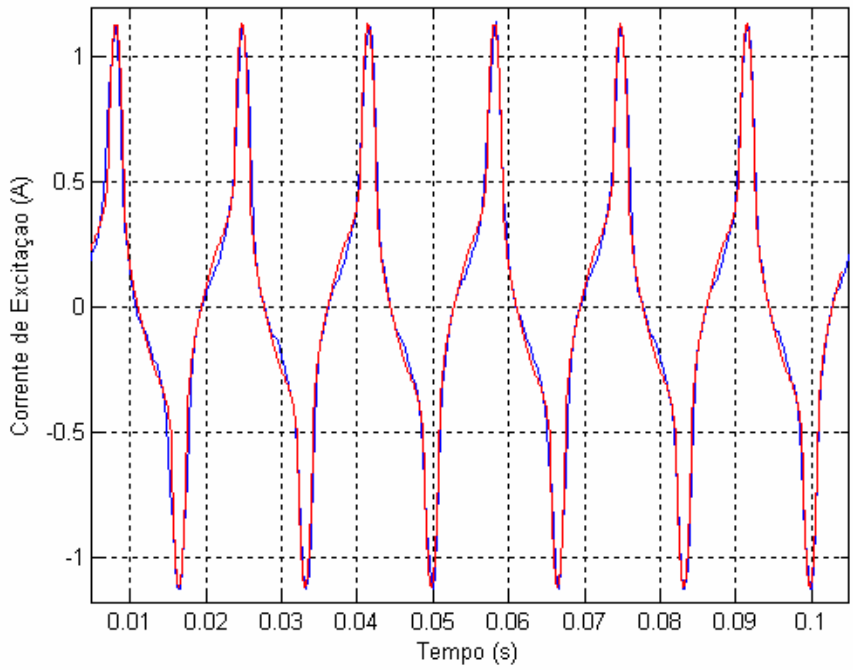


Figura 5.9: Correntes de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) em vazio do regulador de tensão.

A tabela 5.8 é utilizada para comparar os valores eficazes (medido e simulado) da corrente de excitação, de circulação, tensão aplicada e perdas, bem como a diferença percentual entre elas.

Tabela 5.8: Comparação entre os resultados de ensaio e simulação no ensaio em vazio.

GRANDEZAS	ENSAIO	SIMULAÇÃO	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)
I_{EXC} (A)	0,530	0,522	1,51
$I_{circulação}$ (A)	5,13	4,95	3,51
W_0 (W)	22,00	23,71	7,21

Observando a forma de onda da corrente de excitação (medidas e simuladas) na figura 5.9, percebe-se uma boa aproximação entre as mesmas. Utilizando os valores mostrados na tabela 5.8, nota-se diferenças percentuais relativamente pequenas. A maior diferença percentual foi observada nas perdas em vazio. Na operação em vazio do transformador do regulador de tensão observou-se que a perda obtida na simulação (18,3 *W*) era pouco maior que a medida no ensaio em laboratório (18,0 *W*), ou seja, 1,64%. Logo, fica evidente que essa maior discrepância é imposta pelo circuito de comutação. A perda de potência no circuito de comutação é formada pela perda nas resistências dos enrolamentos que o compõem, mais a perda no ferro do reator de comutação. Nesse sentido, devido às dificuldades encontradas nas medições dos pequenos valores das resistências dos enrolamentos, cujos resultados apresentam maior grau de incerteza, atribui-se a esses valores essa maior discrepância na perda em vazio. Entretanto, vale ressaltar que tal discrepância pode ser considerada desprezível para os objetivos a que se propõem.

(B) – REGULADOR SUBEXCITADO

A comparação utilizada para este caso será feita utilizando apenas a forma de onda da corrente de excitação e os valores eficazes dessa corrente e da tensão. A formas de ondas das correntes simuladas (curva vermelha) e medidas (curva azul) são mostradas na figura 5.10.

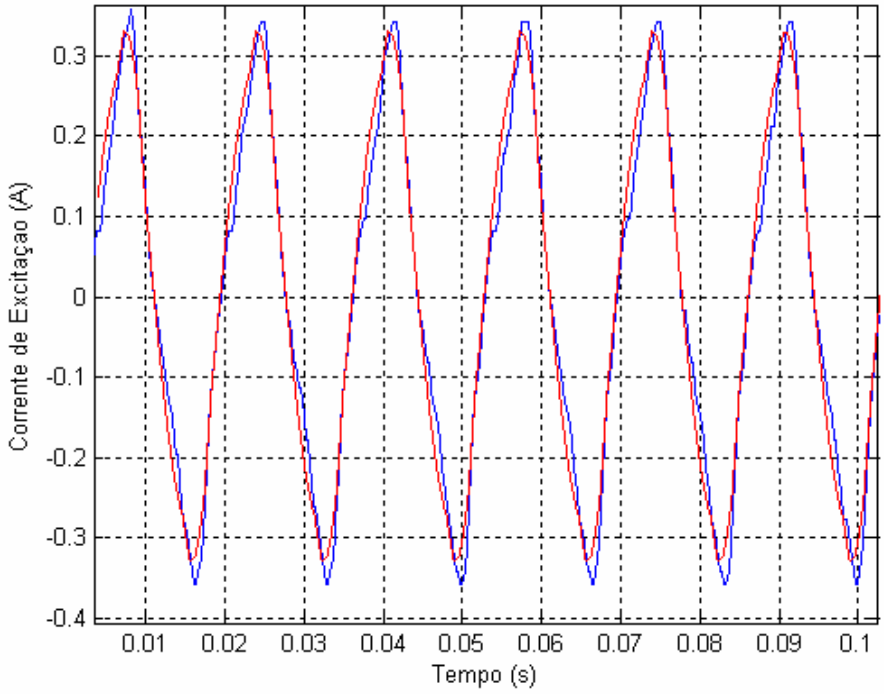


Figura 5.10: Correntes de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) em vazio do regulador de tensão subexcitado.

A tabela 5.9 é utilizada para comparar os valores eficazes (medido e simulado) da corrente de excitação e tensão aplicada, mostrando a diferença percentual entre elas.

Tabela 5.9: Comparação entre os resultados de ensaio e simulação no ensaio em vazio subexcitado

GRANDEZAS	ENSAIO	SIMULAÇÃO	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)
V_0 (V)	180,4	180,4	0
I_{EXC} (A)	0,21	0,219	4,11

(C) – REGULADOR SOBREXCITADO

A comparação utilizada para este caso será feita utilizando apenas a forma de onda da corrente de excitação e os valores eficazes dessa corrente e da tensão. A formas de ondas das correntes simuladas (curva vermelha) e medidas (curva azul) são mostradas na figura 5.11.

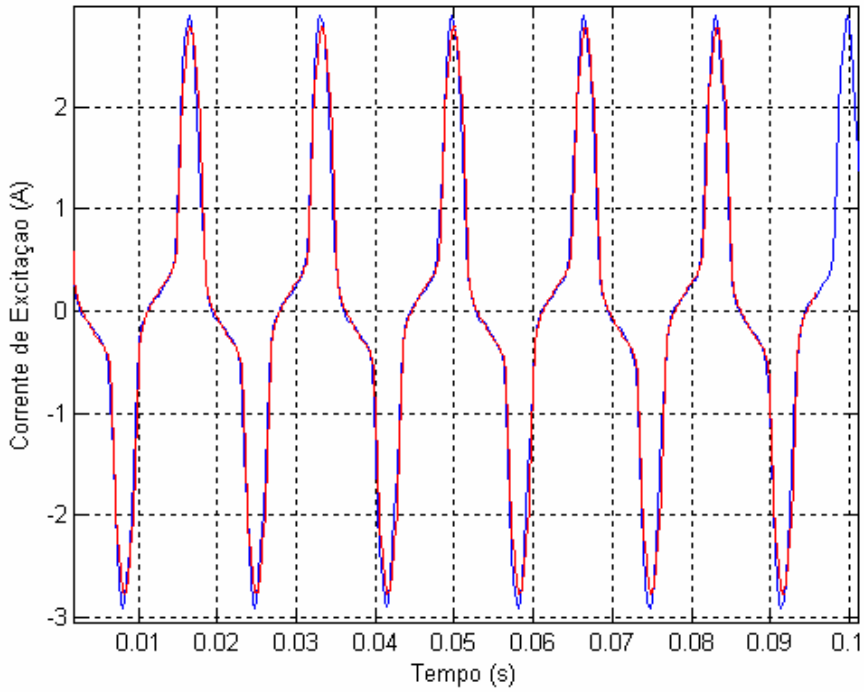


Figura 5.11: Correntes de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) a vazio do regulador de tensão sobrexcitado.

Para comparar os valores eficazes de medição e simulação da corrente de excitação e tensão aplicada e suas respectivas diferenças percentuais é utilizada a tabela 5.10 abaixo.

Tabela 5.10: Comparação entre os resultados de ensaio e simulação no ensaio em vazio sobrexcitado.

GRANDEZAS	ENSAIO	SIMULAÇÃO	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)
V_0 (V)	261,4	261,4	0
I_{EXC} (A)	1,410	1,413	0,212

5.4.3. SIMULAÇÕES E MEDIÇÕES DA OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO

Para a operação em curto-circuito, as grandezas que serão comparadas obtidas de simulação e de medição, serão: os valores eficazes das correntes de excitação, corrente na bobina de *tap´s*, a tensão aplicada, bem como as perdas totais obtidas.

As figuras 5.12 e 5.13 mostram, respectivamente, as formas de onda da tensão de excitação aplicada ao regulador na operação em curto-circuito e a corrente na bobina de *tap´s*.

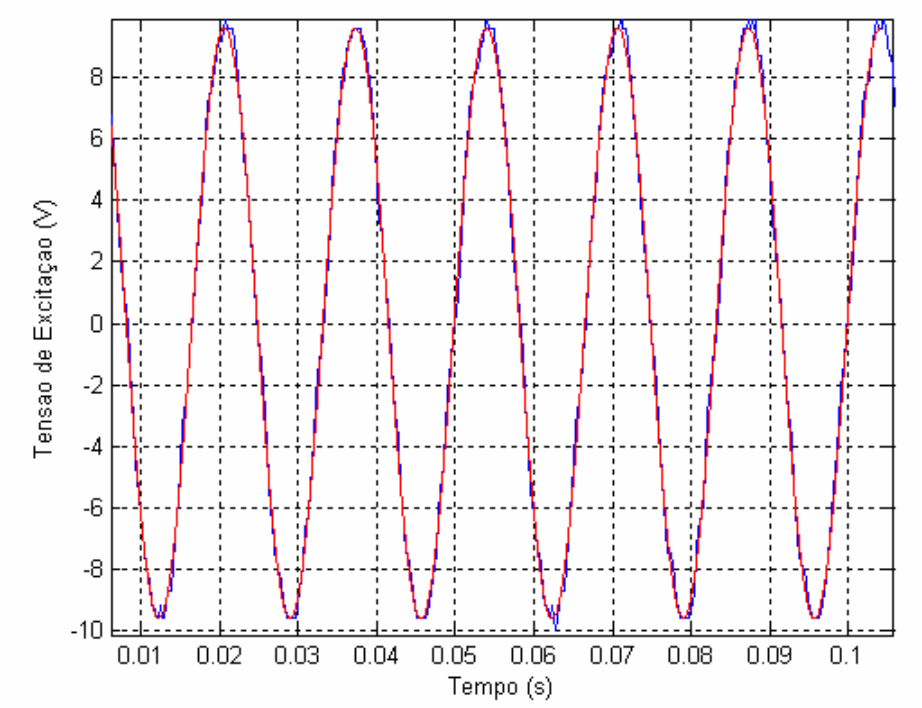


Figura 5.12: Tensões de excitação obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) em curto circuito do regulador de tensão.

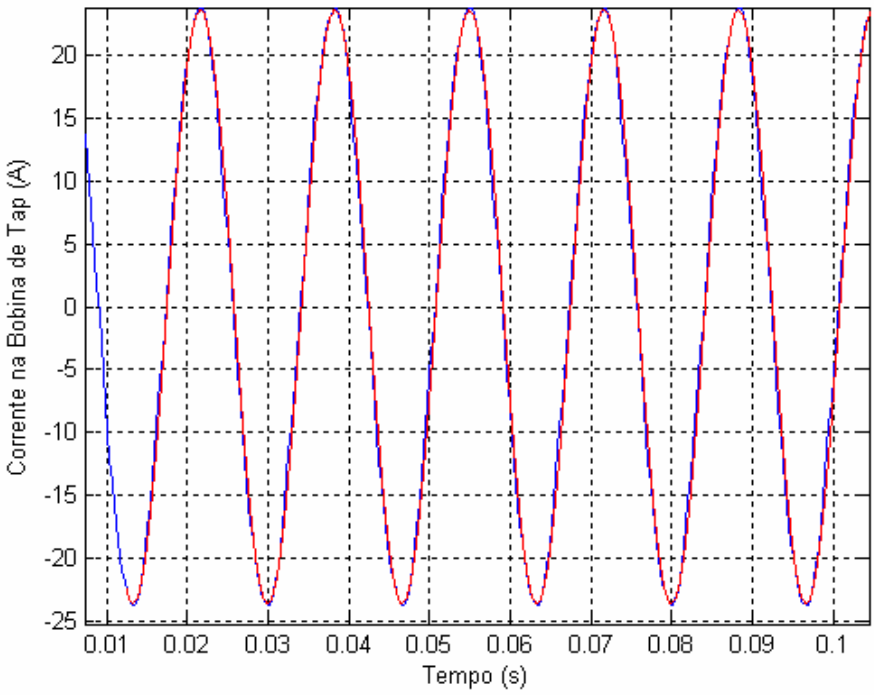


Figura 5.13: Correntes na bobina de tap´s obtidas na simulação (vermelha) e no ensaio (azul) em curto circuito do regulador de tensão.

A tabela 5.11 mostra os valores eficazes da tensão, das correntes e das perdas, além disto, nesta tabela são apresentadas as diferenças percentuais obtidas entre tais valores.

Tabela 5.11: Comparação entre os resultados de ensaio e simulação em curto circuito.

GRANDEZAS	ENSAIO	SIMULAÇÃO	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)
V_{CC} (V)	6,79	6,79	0
I_{EXC} (A)	6,66	6,68	0,30
$I_{tap´s}$ (A)	16,66	16,70	0,24
W_{CC} (W)	43,00	43,21	0,49

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada a validação do modelo de regulador desenvolvido nos capítulos anteriores. A validação foi feita de maneira qualitativa e quantitativa através das comparações dos resultados das simulações do modelo e dos ensaios realizados no modelo reduzido do equipamento.

Em laboratório foram realizados ensaios cujos resultados foram obtidos com o equipamento medidor e registrador RMS de grandezas em tempo real para sistemas elétricos (MARH-21). Os ensaios realizados e que foram utilizados para a validação do modelo foram: ensaio em vazio somente do transformador do regulador de tensão, ensaio em vazio do regulador de tensão, ensaio em curto-circuito, sendo seus resultados apresentados no capítulo 4.

Para realizar a comparação de resultados forma feitas simulações para cada ensaio. Em cada simulação procurou-se estabelecer as mesmas condições que foram impostas aos ensaios laboratoriais para que os resultados pudessem ser analisados com maior confiabilidade.

Ao analisar as formas de onda, medidas e simuladas, da corrente de excitação nas operações em vazio realizadas, isto é, operação em vazio somente do transformador do regulador de tensão, operação em vazio do regulador propriamente dita, sendo este para as três situações já mencionadas anteriormente (com tensão nominal, subexcitado e sobrexcitado), nota-se a existência de uma grande semelhança entre elas.

As perdas encontradas na simulação e no ensaio, para o caso do regulador de tensão em vazio, foi o item onde se obteve a maior diferença percentual (7,21%). A justificativa para tal diferença está na inserção do circuito de comutação. A perda nesse circuito é dada pelas perdas nos enrolamentos somadas às perdas no ferro, devido à dificuldade encontrada nas medições dos pequenos valores das resistências dos enrolamentos, pode-se dizer que estes

apresentam o maior grau de incerteza atribuindo, então, a esses valores a maior diferença no resultado da perda em vazio.

Na operação em curto circuito foram analisadas as formas de onda da tensão de excitação (V_{cc}) e da corrente na bobina de tap´s ($I_{tap´s}$). Os gráficos que apresentam essas grandezas mostram uma grande semelhança entre as formas de onda sendo que, no caso da corrente, as formas de ondas obtidas possuem características senoidais já que neste tipo de ensaio a não linearidade do núcleo não tem influência alguma.

Analisando a questão quantitativa, nota-se que os valores simulados e medidos estão muito próximos demonstrando que a modelagem empregada para o regulador de tensão é satisfatória.

Mesmo apresentando bons resultados, muitas das diferenças percentuais encontradas se justificam pela impossibilidade de representar o ambiente laboratorial com total perfeição, sendo assim, algumas discrepâncias, por menores que sejam, ainda existirão.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A metodologia de modelagem de reguladores de tensão apresentada nesta dissertação foi baseada na distribuição de fluxos no núcleo do equipamento, a partir da qual se obtém o circuito magnético do equipamento. O modelo computacional foi elaborado para ser implementado na plataforma computacional ATP (*Alternative Transients Program*), visto que esse software trabalha com parâmetros elétricos, e não magnéticos, foi necessário utilizar-se do princípio da dualidade para se obter o circuito elétrico equivalente do regulador. O princípio da dualidade estabelece uma correspondência entre os elementos de um circuito magnético para um sistema elétrico, denominado dual. Dessa forma, foi construído um circuito elétrico equivalente para o regulador de tensão, considerando as particularidades do circuito magnético.

Na determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente são utilizados dados de projeto do equipamento, assim como resultados de ensaios laboratoriais tais como: ensaio em vazio, ensaio em curto-circuito, dentre outros.

Tendo-se em vista que o regulador de tensão, para o qual objetiva-se o desenvolvimento da modelagem, é um equipamento para ser utilizado em sistemas de distribuição de energia em média tensão (13,8 kV), e devido às dificuldades encontradas para a realização de ensaios laboratoriais e medições

em campo em tal nível de tensão, houve a necessidade da construção de um modelo reduzido em baixa tensão com características semelhantes ao equipamento de média tensão. Com esse modelo reduzido pôde-se fazer os ensaios necessários e, além disso, efetuar medições em situações de comutação de *tap´s*, o que seria impraticável no equipamento de média tensão devido à deficiência de sensores adequados.

O projeto do modelo reduzido utiliza o princípio de construção de autotransformadores, sendo determinadas as tensões em cada enrolamento bem como a potência eletromagnética do equipamento, a partir da qual determina-se a seção magnética do núcleo. Seguindo o roteiro de cálculo, determinam-se os números de espiras de cada enrolamento, a seção dos condutores e por fim, a geometria das bobinas e do núcleo. O projeto do reator de comutação segue o mesmo roteiro que o do regulador de tensão, entretanto, como o mesmo é constituído de um entreferro deve-se fazer o seu dimensionamento. Desta forma, o equipamento que foi utilizado para a validação da modelagem é um modelo reduzido do regulador de tensão de 32 degraus, com as seguintes características: 220 V, ± 40% e corrente de carga de 10 A.

Para que seja aplicada a metodologia de modelagem no regulador de tensão de 220 V é necessário possuir os dados de projeto e os resultados de alguns ensaios experimentais. Os dados construtivos são conhecidos visto que todo o projeto é apresentado nesta dissertação. Com o equipamento já montado foram realizados os ensaios necessários para a extração dos dados requeridos na modelagem. Foram realizados os seguintes ensaios: ensaio em vazio do transformador do regulador de tensão para levantar as características comportamentais do núcleo magnético; ensaio de magnetização para levantar a característica de magnetização do núcleo; ensaio em vazio para determinar as perdas no núcleo; ensaio em curto-circuito para a determinação da impedância percentual e perdas nos enrolamentos; ensaio de corrente de circulação no reator

com o objetivo de determinar a corrente de circulação no mesmo e as perdas totais; e por fim, medição das resistências dos enrolamentos.

A modelagem do modelo reduzido foi determinada segundo a mesma metodologia desenvolvida para o regulador de tensão em 13,8 kV, com algumas pequenas diferenças por se tratar de um equipamento construído de forma artesanal, como por exemplo, na determinação dos indutores não lineares foi verificado nos ensaios laboratoriais que a corrente era praticamente senoidal para valores de tensão de até 180 V, a partir do qual ela passou a apresentar distorções características da saturação do núcleo magnético, o que implica em valores diferentes para o fator de pico da onda. Como as variações desse fator de pico são crescentes a partir de 180V, convencionou-se utilizar dois valores para o fator de pico: $\sqrt{2}$ para tensões iguais ou inferiores a 210 V e 2,34 para valores maiores que 210 V sendo que , o valor de 2,34 foi determinado para a tensão de 220 V.

Na determinação dos indutores lineares foram utilizados os resultados de ensaios laboratoriais, por exemplo, o ensaio em curto-circuito de onde se obtém a impedância de dispersão do transformador a partir da qual determinou-se a indutância L_2.

Com o modelo do regulador de tensão de 32 degraus implementado no ATP seguiram-se as análises de resultados experimentais com os computacionais para fins de verificação do desempenho do modelo computacional.

Foram efetuadas simulações que permitissem a sua comprovação em ensaios laboratoriais, tais como: operação em vazio somente do transformador do regulador de tensão, operação em vazio e operação em curto-circuito, para a referida validação. É importante salientar que buscou-se impor as mesmas condições dos ensaios laboratoriais para as simulações computacionais visando assim, alcançar uma maior confiabilidade dos resultados.

Analisando qualitativamente os resultados encontrados pôde ser verificado que as formas de onda, medidas e simuladas, possuem uma grande semelhança sendo que, no caso da operação em curto-circuito as formas de onda de corrente obtidas são praticamente senoidais, como era esperado pois, neste tipo de operação, a corrente de magnetização é desprezível.

Com relação à análise quantitativa, nota-se que os valores medidos e simulados estão muito próximos. As maiores diferenças percentuais foram observadas na operação em vazio, no caso as perdas (7,21%). Essa diferença é justificada pelo circuito de comutação, ou seja, as perdas neste circuito são dadas pelas perdas no ferro do reator de comutação somadas às perdas nas resistências dos enrolamentos. Como a medição dessas resistências apresentaram um maior grau de incerteza, devido ao seu baixo valor e a qualidade do equipamento utilizado na medição, atribui-se a esses valores essa maior divergência na perda em vazio. Entretanto, essa divergência não compromete a modelagem.

Assim, é possível dizer que, mesmo possuindo algumas diferenças do modelo físico, o modelo computacional apresenta bons resultados. Tais diferenças podem ser justificadas pela impossibilidade de reproduzir fielmente o ambiente laboratorial.

A principal contribuição desta dissertação é o desenvolvimento e a implementação no ATP de um modelo de reguladores de tensão de 32 degraus baseado nas características do circuito magnético do núcleo para estudos em regime transitório e permanente. Enfim, o modelo desenvolvido tem grande aplicação pois com ele é possível realizar estudos mais profundos no equipamento visando atualizar o modelo atual, com comutação mecânica, para um modelo controlado eletronicamente, o que faria com que ele obtivesse respostas mais rápidas frente a distúrbios como afundamentos de tensão.

Desta maneira, como temas para trabalhos futuros, sugere-se os estudos da operação dos reguladores no sentido de atender os itens de qualidade de

energia; também, estudo dos transitórios de comutação de *tap´s* objetivando a construção de um equipamento no qual a comutação de *tap´s* seja totalmente eletrônica, buscando atender a necessidade de reduzir o tempo de regulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]-DUGAN, R. C., McGRANAGHAN, M. F., Santoso, S., BEATY, H.W. - "Electrical Power Systems Quality", **McGraw Hill**, 2003, 2nd edition.

[2]-ANEEL - "Resolução n° 505, de 26 de novembro de 2001" <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001505.pdf>, **ONLINE**, 12 de julho de 2005.

[3]-BURKE, J. J., GRIFFITH, D. C., WARD, D. J. - "Power Quality – Two Different Perspectives", **IEEE Trans. on Power Delivery**, V.5, nº 03, July/1990.

[4]-BISHOP, M. T., FOSTER, J. D., DOWN, D. A. - "The application of Single-Phase Voltage Regulators on Three-Phase", **IEEE Conference Paper**, paper nº 94 C2, 1994.

[5]-LESZCZYNSKI, T. J. - "Voltage Regulation Selection in Power Distribution Design", **Textile Industry Technical Conference**, IEEE/1988, 1988.

[6]-FILHO, JOÃO M. - "Manual de Equipamentos Elétricos", **Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.**, Rio de Janeiro, 1994, Vol 2, 2ª edição.

[7]-SLEMON, GORDON R. - "Equipamentos Magnetelétricos: Transdutores, Transformadores e Máquinas", **Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.**, 1974, Vol 1.

[8]-CHERRY, E. C. - "The Duality Between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuit", Proc. Of the Physical Society, V. (B) 62, pages 101-111, February/1949.

[9]-MORK, B. A. - "Five legged Wound-Core Transformer Model: Derivation, Parameters, Implementation and Evaluation", **IEEE Trans. on Power Delivery**, V.14, nº 04, October/1999.

[10]-FANDI, J. C. O. - “Modelagem de Transformadores de Três Colunas para Estudos de Corrente de Energização”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/2003.

[11]-SARAIVA, E. - “Modelagem de Transformadores de Três Colunas Com Base na Distribuição de Fluxos Magnéticos no Núcleo, Considerando o Efeito do Ciclo de Histerese ”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/2004.

[12]-R. YACAMINI and H. BRONZEADO - "Transformer inrush calculation using a coupled electromagnetic model", **IEE Proc.Sci.Meas.Technol.**, V.141, nº 06, November/1994.

[13]-A.M. MIRI, C. MÜLLER and C. SIHLER - "Modelling of inrush currents in power transformers by a detailed magnetic equivalent circuit", **Universität Karlsruhe, Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik e Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP).**

[14]-MARTIGNONI, ALFONSO - “Transformadores”, **Editora Globo**, Porto Alegre, 1977, 3ª Edição.

[15]-KUHN, ROBERT - “Pequeños Transformadores”, **Marcombo, S.A., Ediciones Técnicas**, Barcelona, 1971, 2ª Edição.

[16]-LEUVEN EMTP CENTER (LEC) - Alternative Transients Program (ATP) – RULE BOOK, july/1987.

[17]-ABNT, Rio de Janeiro - “NBR11809 – Reguladores de Tensão”, junho/1992.

[18]-ACESITA - Catálogo de Aço ao Silício de Grãos Orientados, tipo E-005.

ANEXOS

ANEXO I

ARTIGOS APROVADOS

[1]-FELÍCIO, J. R., RODRIGUES, A. R., CHAVES, M. L. R., BENICHIO, V. M. - "Modelagem de Reguladores de tensão para Estudos de Transitórios de Comutação Eletrônica", **VII Induscom**, Recife - PE, 9 a 12 de abril de 2006.

[2]- FELÍCIO, J. R., RODRIGUES, A. R., CHAVES, M. L. R., BENICHIO, V. M. - "Modelagem de Reguladores de Tensão para Estudos de Transitórios de Chaveamento Eletrônico", **Cidel**, Buenos Aires, Argentina, 27 a 19 de novembro de 2006.

ANEXO II

MODELO DE REGULADOR DE TENSÃO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO EM VAZIO

```
BEGIN NEW DATA CASE
C ******************************************************************************
C ***  MODELO DE REGULADOR DE TENSAO MONOFASICO - PROTOTIPO 220 +/- 40% E 10 A
C ***  COM 32 DEGRAUS DE AJUSTE DE TENSAO
C ******************************************************************************
C * INSTRUCOES OBRIGATORIAS MISCELANEOUS DATA CARDS FLOATING-POINT
C DELTAT    TMAX    XOPT    COPT EPSILIN  TOLMAT  TSTART
C E8.0 |  E8.0 |   E8.0|  E8.0 |  E8.0 |  E8.0 |  E8.0 |
  1.E-6 100.E-3
C * MISCELLANEUS DATA CARDS INTEGERS TODOS OS CAMPOS COM FORMAT I8
C IOUT | IPLOT |IDOUBL | KSSOUT| MAXOUT| IPUN  | MEMSAV| ICAT  | NENERG| IPRSUP|
   1501      1      1             1                    1
C ******************************************************************************
C * RAMOS LINEARES E NAO LINEARES
C ******************************************************************************
C ******************************************************************************
C          BOBINA DE EXCITACAO - BOBINA INTERNA COM 2 ENROLAMENTOS
C ******************************************************************************
C SPECIAL REQ|REF  |     | AMP.|VxS. |BUS O| Rmag|
C           |          | E6.2| E6.2|  A6 | E6.2|
  TRANSFORMER                        TR1
C AMPERES      | VOLTSxSEG     |   CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
C  ********* CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO x CORRENTE
          9999
C ******** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
```

```
C BUS1 | BUS2|          | RES.|REAT.|Vnom.|
C   A6 |  A6 |          |E6.2 |E6.2 | E6.2|
 1RGTM01RGTM04                .00001  .220
 2 CARGA    0N           0.37  .00001  .220
C ******************************************************************************
C     BOBINA DE TAP'S - BOBINA EXTERNA COM 8 ENROLAMENTOS, 8 TAPS
C ******************************************************************************
C SPECIAL REQ|REF  |     | AMP.|VxS. |BUS O| Rmag|
C           |          | E6.2| E6.2|  A6 | E6.2|
  TRANSFORMER                        TR2
C AMPERES      | VOLTSxSEG     |   CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
C  ********* CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO x CORRENTE
          9999
C ******** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2|          | RES.|REAT.|Vnom.|
C   A6 |  A6 |          |E6.2 |E6.2 | E6.2|
 1RGTM01RGTT02                1.E-07  .220
 2 XTAP0 XTAP1           .0086 1.E-07 .011
 3 XTAP1 XTAP2           .0086 1.E-07 .011
 4 XTAP2 XTAP3           .0096 1.E-07 .011
 5 XTAP3 XTAP4           .0096 1.E-07 .011
 6 XTAP4 XTAP5           .0096 1.E-07 .011
 7 XTAP5 XTAP6           .0106 1.E-07 .011
 8 XTAP6 XTAP7           .0096 1.E-07 .011
 9 XTAP7 XTAP8           .0106 1.E-07 .011
C ******************************************************************************
C      BOBINA EQUALIZADORA - BOBINA EXTERNA COM 3 ENROLAMENTOS
C ******************************************************************************
C SPECIAL REQ|REF  |     | AMP.|VxS. |BUS O| Rmag|
C           |          | E6.2| E6.2|  A6 | E6.2|
  TRANSFORMER                        TR3
C AMPERES      | VOLTSxSEG     |   CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
          9999
C ******** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2|          | RES.|REAT.|Vnom.|
C   A6 |  A6 |          |E6.2 |E6.2 | E6.2|
 1RGTM01RGTE05                1.E-07 .220
 2  EQ01  EQ02           .0460 1.E-07.00275
 3  EQ02  EQ03           .0425 1.E-07.00275
C ******************************************************************************
```

```
C  REATOR SATURAVEL - COLUNA DO NUCLEO MAGNETICO
C ******************************************************************************
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VxS. |
98RGTM01RGTM03          .3025 .82580                          1
C AMPERES     | VOLTSxSEG     |   CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
   .01886          .3754
   .02357          .4505
   .02828          .5255
   .03771          .6006
   .05185          .6757
   .08957          .7508
   .21060          .7883
   .31980          .8258
   .46800          .8634
   .63960          .9009
   .81900          .9384
   1.2168         1.0135
   1.9577         1.1261
   3.6114         1.3138
   6.2088         1.5015
        9999
C ******************************************************************************
C  REATOR SATURAVEL - CULATRA DO NUCLEO MAGNETICO
C ******************************************************************************
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VxS. |
98RGTM01RGTM05          1.2098.82580                          1
C AMPERES     | VOLTSxSEG     |   CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
   .03772          .3754
   .04714          .4505
   .05656          .5255
   .07542          .6006
   .10370          .6757
   .17934          .7508
   .42120          .7883
   .63960          .8258
   .93600          .8634
  1.27920           .9009
  1.63800           .9384
  2.43360         1.0135
  3.91540         1.1261
```

```
  7.22280          1.3138
 12.41760          1.5015
         9999
C ******************************************************************************
C    RAMOS LINEARES DO CIRCUTO MAGNETICO
C ******************************************************************************
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM)    |INDUT( OHM/mH) |  CAP(mMHO/uF) |     |
  RGTM03RGTM04                    0.000001         { L1 }
  RGTM04RGTM02                    0.837300         { L2 }
  RGTM02RGTM05                    0.004650         { L3 }
  RGTM01RGTM05            4047.4739   {PERDA NA CULATRA }
  RGTM01RGTM03            8094.5930   {PERDA NA COLUNA  }
$VINTAGE, 0
C ******************************************************************************
C     REATOR DE COMUTACAO
C ******************************************************************************
C SPECIAL REQ|REF  |     | AMP.|VxS. |BUS O| Rmag|
C            |          | E6.2| E6.2|  A6 | E6.2|
  TRANSFORMER                     TR4
C AMPERES      | VOLTSxSEG     |   CARACTERISTICA DE FLUXO-CORRENTE
C  ********* CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO x CORRENTE
         9999
C ******** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2|          | RES.|REAT.|Vnom.|
C   A6 |  A6 |          |E6.2 |E6.2 | E6.2|
 1  MMM1  MMM2                .0001  .220
 2  EQ01   R01          .0064  .0001.00275
 3   R02  EQ03          .0170  .0001.00275
C ******************************************************************************
C  CIRCUITO MAGNETICO DO REATOR - LINEAR
C ******************************************************************************
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM)    |INDUT( OHM/mH) |  CAP(mMHO/uF) |     |
   MMM1  MMM2                     4668.545
   MMM1  MMM2            16133.33     {PERDAS NO FERRO}
C ******************************************************************************
C       CONECTIVIDADE DO ATP
C ******************************************************************************
C BUS1 |BUS2 | BUS3|BUS4 |RESIT (OHM)    |INDUT( OHM/mH) |  CAP(mMHO/uF) |     |
```

```
  TAP0 XTAP0          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
  TAP1 XTAP1          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
  TAP2 XTAP2          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
  TAP3 XTAP3          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
  TAP4 XTAP4          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
  TAP5 XTAP5          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
  TAP6 XTAP6          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
  TAP7 XTAP7          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
  TAP8 XTAP8          0.009215 {RESISTENCIA DE CONEXÃO DOS ENROLAMENTOS}
 RGTM02               1.E-03
 RGTM01RGTM02          1.E+09
 RGTM01RGTM04          1.E+09
 RGTM01RGTM05          1.E+09
 RGTM05RGTE05          1.E-09
 RGTM02RGTT02          1.E-09
   0N                1.E-03                              1
  MMM1               1.E-03
  MMM1  MMM2          1.E+09
C  TAP6               1.E+09
C  TAP5               1.E+09
C  TAP4               1.E+09
  EQ01  EQ02          1.E+09                              2
   R01  EQ01          1.E+09                              2
  EQ02  EQ03          1.E+09                              2
  EQ03   R02          1.E+09                              2
C  CARGA               22.000        {CARGA 10 A}                  1
  CARGAFLUXO           1.E+09
 FLUXO                                   1.E-03        2
  CABO  EQ02           0.0445
C  TAP8  TAP7          1.E+09                              2
C ******************************************************************************
BLANK ENCERRA OS RAMOS
C ******************************************************************************
C  BUS1  BUS2    TCLOSE     TOPEN   RUPTURA                          X
C * CHAVES (ITEM VI RULE BOOK)
C BUS1 | BUS2|   TCLOSE|    TOPEN|ruptura  |
   R01  TAP0  -1.1667    1.0500                              1
C   R01  TAP1   0.0750    0.1417                              1
C   R01  TAP2   0.1500    0.2167                              1
C   R01  TAP3   0.2250    0.2917                              1
```

```
C    R01  TAP4   0.3000    1.050                                  1
C    R01  TAP5  -1.1667    1.050                                  1
C    R01  TAP6  -1.1667    1.050                                  1
C    R01  TAP7  -1.1667    1.050                                  1
C    R01  TAP8  -1.1667    1.050                                  1
     R02  TAP0  -1.1667    1.0500                                 1
C    R02  TAP1   0.05834   0.1250                                  1
C    R02  TAP2   0.13333   0.2000                                  1
C    R02  TAP3   0.20833   0.2750                                  1
C    R02  TAP4   0.28333   1.050                                  1
C    R02  TAP5  -1.1667    1.050                                  1
C    R02  TAP6  -1.1667    1.050                                  1
C    R02  TAP7  -1.1667    1.050                                  1
C    R02  TAP8  -1.1667    1.050                                  1
C *******COMUTADOR DE ELEVAÇAO OU REDUÇAO*************************************
C BUS1 | BUS2|   TCLOSE|    TOPEN|ruptura  |
    TAP0 CARGA  -1.01667   1.050                                    1
C   EQ01  EQ03  -1.01667   1.050                                    1
C  CARGA        -1.01667   1.050                                   1
C   TAP8 CARGA  -1.01667   1.050                                     1
  FONTE_ CARGA  -1.01667   1.050                                      1
C FONTE_  CABO   1.01667   1.050                                      1
BLANK ENCERRA AS CHAVES
C *FONTES (ITEM VII  RULE BOOK)
C NAME | | VPICO   | FREQ.HZ |  TETA|                    TSTART| TSTOP   |
14FONTE_  311.12698  60.0000      -90                     -1.0
C ****************************************************************************
BLANK ENCERRA FONTES
C * ESPECIFICACAO DE SAIDA (ITEM XII RULE BOOK )
C NO-1 |NO-2 |NO-3 |NO-4 |NO-5 |NO-6 |NO-7 |NO-8 |NO-9 |NO-10|NO-8 |NO-9 |NO-10|
  FONTE_ CARGA  TAP0  TAP1  TAP2  TAP3  TAP4  TAP5  TAP6  TAP7  TAP8
BLANK ENCERRA  ESPECIFICACAO DE SAIDA
BLANK ENCERRA  O CASO
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK  ENCERRA A EXECUCAO DO ATP
```