

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA**

PEDRO PAULO PAULINO DOS SANTOS

**MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DO REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO**

**UBERLÂNDIA
10 DE AGOSTO DE 2017**

PEDRO PAULO PAULINO DOS SANTOS

**MODELAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DO REGULADOR
ELETROMAGNÉTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Carlos Eduardo Tavares

**UBERLÂNDIA
10 DE AGOSTO DE 2017**

PEDRO PAULO PAULINO DOS SANTOS

Modelagem e Análise de Desempenho do Regulador Eletromagnético

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Banca de Avaliação:

Prof. Carlos Eduardo Tavares – UFU
Orientador

Prof. Adélio José de Moraes – UFU
Membro

Prof. Arthur Costa de Souza – UFU
Membro

Uberlândia (MG), 10 de Agosto de 2017

RESUMO

O controle de tensão das redes de distribuição constitui-se em tema de grande relevância e tem merecido a atenção dos mais distintos agentes associados ao fornecimento, consumo e controle do setor elétrico. Neste contexto, em nível de Brasil, a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, define os níveis de tensão de suprimento e as variações admissíveis em tornos dos valores nominais ou de operação. Não obstante já existam, no mercado, diversas propostas de solução para o problema, a busca por dispositivos de compensação de tensão que considere aspectos como: simplicidade operacional, custos competitivos, relação custo benefício atrativo, etc., ainda oferecem desafios importantes a serem transpostos. Portanto, à luz destes fatos, surge esta proposta de TCC, voltada para a modelagem computacional e análise de desempenho do Regulador Eletromagnético de Tensão – RET que ira proporcionar injeções série e ou subtrativas de tensão às unidades de potência. O presente trabalho mostra a estrutura física do equipamento, apresenta resultados computacionais extraídos do simulador ATP, Alternative Transients Program, estabelece uma modelagem no domínio da frequência, compara os desempenhos teoricamente obtidos com medições realizadas com um protótipo de regulador em escala reduzida validando, assim, a afirmação aqui feita.

Palavras chave: ATPDraw. Regulado de Tensão. Qualidade de Energia. Modelagem Computacional.

ABSTRACT

The voltage control of the distribution networks is a subject of great relevance and has deserved the attention of the most different agents associated with the supply, consumption and control of the electric sector. In this context, at the Brazilian level, ANEEL defines the levels of supply voltage and the permissible variations in lathes of nominal or operating values. Although there are already several solutions to the problem in the market, the search for voltage compensation devices that considers aspects such as: operational simplicity, competitive costs, attractive cost benefit ratio, etc., still present important challenges to be overcome . Therefore, in the light of these facts, this proposal of CBT is presented, focused on the computational modeling and performance analysis of the Voltage Electromagnetic Regulator - RET which will provide series and or subtractive voltage injections to the power units. The present work shows the physical structure of the equipment, presents computational results extracted from the ATP simulator, establishes a modeling in the frequency domain, compares the performances theoretically obtained with measurements performed with a small scale regulator prototype, thus validating the statement made here .

Words-key: ATP Draw. Voltage Regulation. Power Quality. Computacional Modeling.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP: Alternative Transient Program
CCT: Capacitores chaveados a Tiristores
DVR: Dynamic Voltage Regulator
RET: Rregualador Eletromagnético
RCT: Reatores controlados a Tiristores
STATCOM: Static Synchronous Compensator
SIPCON: Siemens Power Conditioner – Parallel
UPFC: Unified Power Flow Controller

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura2. 1 - ESTRUTURA FÍSICA DO RET COM MUDANÇAS DE TAPES DISCRETOS SOB CARGA	7
Figura2. 2 - Diagrama fasorial ilustrando o funcionamento do regulador	8
Figura2. 3– Diagrama de blocos para o controle do RET	9
Figura2. 4- Topologia do RET – modo elevador.....	11
Figura2. 5– Fluxo de corrente no transformador de excitação – modo elevador	12
Figura2. 6– Circuito simplificado do RET – modo elevador	13
Figura 3. 1– CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DOIS ENROLAMENTOS – NÃO LINEAR – ATP	16
Figura 3. 2 – Circuito elétrico equivalente do RET no sistema.....	18
Figura 3. 3– Transformado saturável (Modelo: Trafo_S) - ATPDraw	19
Figura 3. 4– Arquivo ATP-file do transformador saturável	19
Figura 3. 5- Arquivo DBM representativo do transformador série	20
Figura 3. 6- Declaração de argumentos referentes a nomes de nós.....	21
Figura 3. 7- Declaração de argumentos relacionados a valores numéricos.....	22
Figura 3. 8- Template representativa dos enrolamentos do transformador série e curva de saturação	23
Figura 3. 9- Execução do ATP Launcher	23
Figura 3. 10- Cartão (*.lib) do transformador série.....	24
Figura 3. 11- Curva de saturação – Transformador série	24
Figura 3. 12- Novo elemento criado no ATPDraw – TSERIE.sup	25
Figura 3. 13- Autotransformador [46]	26
Figura 3. 14- Autotransformador no ATPDraw	27
Figura 3. 15- Controle do RET no ATPDraw	28
Figura 3. 16- Regulador Eletromagnético de Tensão no ATPDraw.....	29
Figura 3. 17- Diagrama unifilar do sistema radial utilizado para os estudos computacionais .	30
Figura 3. 18- Tensão na Barra 1 – variações de tensão adotadas ao longo do período de investigação	31
Figura 3. 19- Tensões nas barras 1 e 2	32
Tabela 3. 1– Indicador de Qualidade do nível de tensão	30
Tabela 3. 2- Tensões de operação adotadas para a Barra 1	31
Tabela 3. 3– Tensão das Barras 1 e 2 – computacional.....	32

LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{I}_{AT}$: Corrente no primário do autotransformador

$\dot{I}_C$: Corrente da carga

$\dot{I}_N$: Corrente de neutro

$\dot{I}_f$: Corrente da fonte de suprimento

$\dot{N}_1$: Enrolamento do primário do transformador monofásico

$\dot{N}_2$: Enrolamento do secundário do transformador monofásico

SUMÁRIO

CAPITULO 1: INTRODUÇÃO	2
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	2
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	3
1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESSE TRABALHO.....	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2: MODELAGEM MATEMÁTICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	6
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
2.2 ESTRUTURA FÍSICA DO REGULADOR	7
2.3 O CONTROLE DO REGULADOR	9
2.4 ESTRATÉGIA PARA MODELAGEM DO REGULADOR	10
2.5 MODELAGEM DO RET NA CONDIÇÃO DE COMPENSAÇÃO POSITIVA	11
2.5.1 TRANSFORMADOR DE EXCITAÇÃO	11
2.5.2 TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO	13
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	14
CAPÍTULO 3: MODELAGEM DO REGULADOR NO SIMULADOR ATP E ESTUDO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO	15
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
3.2 O SIMULADOR ATP	15
3.3 MODELAGEM DO RET NA PLATAFORMA ATP	17
3.3.1 – Transformador Série	18
Figura 3. 5- Arquivo DBM representativo do transformador série	20
3.3.2 Transformador Paralelo ou de Excitação.....	26
3.3.3 Sistema de Controle.....	28
3.4 ESTUDO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO.....	29
3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
3.6 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTE CAPÍTULO	33
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	34
REFERÊNCIAS	36

CAPITULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A busca por melhoras da qualidade de fornecimento de energia elétrica é um processo que vem se desenvolvendo dia após dia, não somente por parte das empresas concessionárias de energia elétrica, como também motivada pelos consumidores e agentes reguladores como a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL [1] e [2]. Neste ambiente, dentre outros indicadores, quando da violação dos níveis preestabelecidos, medidas corretivas devem ser feitas para a restauração do supridor aos padrões exigidos e, neste campo, as questões associadas com a regulação das tensões constituem-se em tema de grande extrema importância nos contextos nacional e internacional.

Em relação a regulamentação brasileira, a ANEEL por meio do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) – Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica, revisão 8 de 01/01/2017 [1], estabelece os procedimentos relativos à qualidade do produto e do serviço prestado. Em relação à qualidade do produto, este módulo determina as terminologias, caracteriza e parametriza os fenômenos, aponta para valores de referência relativos à conformidade da tensão em regime permanente e às perturbações relacionadas à tensão. Com isso o referido módulo estabelece mecanismos que possibilitam definir os padrões de qualidade da energia elétrica através de indicadores específicos como faixas de valores de tensão definidas como adequada, precária e crítica.

Neste contexto, muito embora o reconhecimento de uma extensa gama de produtos destinados à regulação de tensão, disponíveis no mercado, o tema ainda tem motivado pesquisadores para a elaboração de novas concepções de tecnologias, em que pesem desafios como: simplicidade operacional, robustez, custos de investimentos competitivos, instalações físicas com menores níveis de exigências, custos de manutenção reduzidos, maior índice de nacionalização, propriedades operativas compatíveis com os requisitos impostos, dentre outras questões almejadas para qualquer outro seguimento da engenharia.

À luz destes fatos e, ainda, não obstante a existência de uma série de produtos baseados em tecnologias diversas (potências reativas ou compensação direta de tensão), o presente trabalho destina-se a apresentação de um modelo computacional de um dispositivo,

totalmente eletromagnético, e que utiliza o princípio da compensação via injeção série da parcela de tensão necessária ao atendimento dos propósitos da regulação desta grandeza.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A preocupação com a manutenção da qualidade da energia elétrica dentro dos padrões considerados aceitáveis é um dos temas mais abordados nos dias de hoje. Isso ocorre principalmente pelo fato de que à nível de Brasil, os níveis de tensão nas barras que são regulamentados pela agência nacional de energia elétrica (ANEEL), na eventualidade do desvio de tensão a um nível considerado não ideal de suprimento, podem resultar em penalizações para as concessionárias de energia elétrica e também em prejuízos para os consumidores.

Focando a estratégia da potência reativa, surge a técnica clássica do emprego de bancos de capacitores e/ou reatores, fixos ou variáveis [8]. No que tange aos mecanismos que proporcionam alterações das respectivas potências, fornecidas ou consumidas, há ainda de se reconhecer o emprego de recursos mecânicos, eletromagnéticos e eletrônicos. O tema, de modo geral, é bastante clássico e os dispositivos comercialmente em uso dispensam comentários adicionais, a não ser pela menção que os arranjos mecânicos se caracterizam pelo emprego de contadores, chaves ou disjuntores; os eletromagnéticos se baseiam na não linearidade dos materiais utilizados e os eletrônicos nos recursos tecnológicos amplamente difundidos. Não obstante tal reconhecimento vale ressaltar que, em se tratando dos equipamentos com controle eletrônico, uma das tecnologias mais comumente difundidas na atualidade se apresenta na forma dos conhecidos RCTs (reatores controlados a tiristores) e CCTs (capacitores chaveados a tiristores), já em uso há décadas e com eficácia comprovada [3].

Ainda no contexto da filosofia de compensação da tensão fundamentada no fornecimento ou consumo de potências reativas, não se pode deixar de mencionar os conhecidos compensadores síncronos, em uso há longa data e ainda, oferecendo, para aplicações específicas, uma alternativa bastante atrativa [4].

Por fim e ainda inserido nos mesmos princípios supramencionados, na atualidade, através dos recursos disponibilizados pela eletrônica de potência, surgiu um novo conceito, já materializado na forma de produtos comerciais. Nesta categoria incluem-se dispositivos

diversos, com as denominações distintas, conforme seus fabricantes, os quais atuam no sentido de propiciar injeções ou consumos de potências reativas através de equipamentos eletrônicos que se apresentam fisicamente constituídos por arranjos conversores capazes de atuar como dispositivos que oferecem meios para a adequação dos níveis de tensão utilizando, para tanto, o princípio do controle da magnitude da tensão e respectivo ângulo de fase através de disparos programados para as chaves eletrônicas que compõem as unidades inversoras. Este é o caso dos denominados recursos comerciais STATCOM, SIPCON P, dentre outros [5], [6] e [7]. Tais produtos encontram-se embasados numa filosofia construtiva e operacional em consonância com o denominado UPFC [8].

Alternativamente, o processo da compensação da tensão, como anteriormente referido, pode empregar dispositivos capazes de atuar diretamente sobre esta grandeza através da alteração direta da mesma com vistas a promover a sua adequação aos padrões exigidos. Isto pode ser conseguido pela alteração manual ou automática de tapes ou pela inserção de tensões controladas, aditivas ou subtrativas, àquelas disponibilizadas pela rede supridora. Inserido neste contexto se apresentam produtos comerciais bastante clássicos, a exemplo dos reguladores eletromagnéticos: Toshiba TB-R1000, também os reguladores de fabricação brasileira COOPER VR-32 e o ITB RAV-2.

Ainda dentro do cenário dos dispositivos atuantes diretamente sobre os níveis das tensões surgiram, há relativamente pouco tempo, linhas mais modernas de produtos que empregam recursos da eletrônica de potência. Estes equipamentos possuem como filosofia básica a produção e injeção de tensões complementares à de suprimento, de forma aditiva ou subtrativa, que proporcionam incrementos de tensões com valores e posicionamentos angulares eletronicamente controláveis. Tais recursos, caso desejado, podem ainda viabilizar a compensação de forma independente por fase, contribuindo, concomitantemente, para o equilíbrio do suprimento.

1.3 CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESSE TRABALHO

Tendo contextualizado o tema e estabelecidas às diretrizes que nortearam a concepção e o desenvolvimento da presente pesquisa, vale ressaltar que este trabalho apresenta as

seguintes contribuições direcionadas à análise de desempenho computacional do RET, (Regulador Eletromagnético de Tensão):

- Modelagem computacional do equipamento de regulação e da sua concepção de controle e chaveamento;
- Avaliação computacional do desempenho da estratégia de compensação.
- Modelar os dispositivos que perfazem o equipamento como um todo através de técnicas fundamentadas no domínio do tempo;
- Caracterizar as faixas de controle, estratégia para variação dos tapes e unidades de medição;
- Desenvolver modelos matemáticos para representação do regulador eletromagnético no ATP;
- Implementar computacionalmente as propostas e avaliar o desempenho das mesmas diante de situações típicas das redes elétricas atrelados com as variações de tensão;
- Realizar estudos de fenômenos associados com a operação do controlador e validação do software;

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta-se estruturado, além deste capítulo introdutório, pelas seguintes unidades:

Capítulo 2: Estrutura Física do Regulador e sua Modelagem no Domínio da Frequência

Esta unidade é dedicada a uma descrição física do arranjo computacional que compõe a unidade de potência do RET, sua filosofia de controle e chaveamento e sua modelagem matemática através de técnicas de representação no domínio da frequência.

Capítulo 3: Modelagem do Regulador no Simulador ATP e Estudo Computacional de Desempenho.

Este capítulo apresenta a estratégia para o processo de modelagem que tem por base a utilização dos recursos oferecidos pelo ATP. A representação em questão envolve as unidades de potência e de controle, resultando em um modelo computacional do dispositivo RET. Por fim é realizado um estudo avaliativo do programa obtido através de um caso estudo de regulação de um alimentador elétrico sujeito a variações discretas programadas para a tensão do supridor.

Capítulo 4: Resultados e Conclusões

Por fim, é apresentada uma síntese dos principais pontos e resultados relacionados ao trabalho e ainda sugestões para futuros desenvolvimentos relacionados a este trabalho.

CAPÍTULO 2: MODELAGEM MATEMÁTICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo visa apresentar um modelo computacional do Regulador Eletromagnético de Tensão (RET), que é composto por arranjos físicos totalmente eletromagnéticos.

Dentre os pontos explorados, esta unidade contempla aspectos gerais relacionados com a estrutura do regulador proposto, a concepção de uma estratégia de controle e sua modelagem.

A caracterização da estrutura dos componentes que perfazem o regulador aqui considerado evidencia, com clareza, tratar-se de uma filosofia de equipamento totalmente eletromagnético, com propriedades e princípios operacionais similares aos modernos

dispositivos que se apoiam na injeção série de incrementos de tensão para a restauração desta grandeza nos moldes requeridos pela legislação aplicável.

2.2 ESTRUTURA FÍSICA DO REGULADOR

O arranjo físico focado neste trabalho, apresenta-se constituído por duas unidades eletromagnéticas: uma destinada a extração de energia da rede, sendo representada por um autotransformador conectado em paralelo com o circuito (transformador de excitação); e uma segunda, sob a forma de um transformador em série com o alimentador principal, direcionada à inserção de uma tensão compatível ao enquadramento do suprimento conforme a legislação vigente (transformador de acoplamento). A estrutura em análise encontra-se indicada na Figura 2.1, onde é possível observar que o transformador de excitação está instalado a montante do transformador de acoplamento.

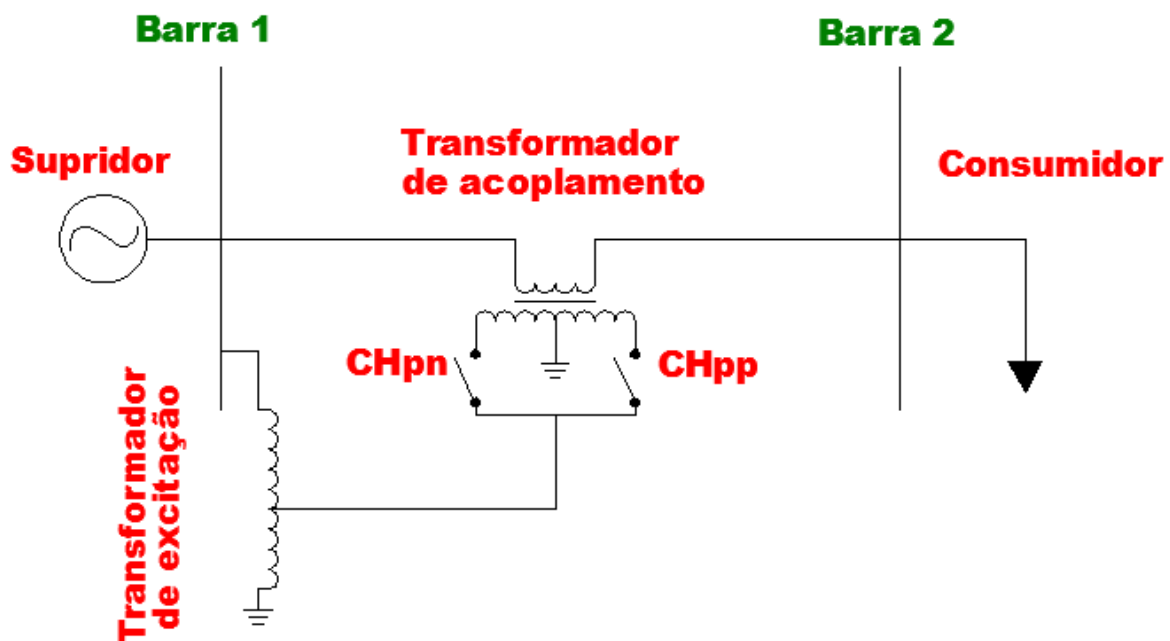


Figura2. 1 - ESTRUTURA FÍSICA DO RET COM MUDANÇAS DE TAPES DISCRETOS SOB CARGA

Além das unidades de potência propriamente ditas, a figura deixa evidente também as seguintes chaves:

- CHpn – a chave de polaridade negativa responsável pela regulação de uma sobretensão através da compensação negativa de tensão;

- CHpp – a chave de polaridade positiva responsável pela regulação de uma subtensão através da compensação positiva de tensão.

Dentre as propriedades que influenciaram na opção pelo arranjo apresentado, ressaltam-se:

- Fundamentação operacional baseada em componentes eletromagnéticos, sem a obrigatoriedade de utilização de dispositivos complementares (fontes e chaves) eletrônicos;
- Estratégia de controle simples e efetiva;
- Equipamento factível de aplicação monofásica ou trifásica;
- Potências envolvidas no processo de compensação em proporções inferiores à da carga suprida;
- Dispositivos de chaveamentos mecânicos em níveis de tensão inferiores à nominal ou de operação;
- Processo de compensação de tensões sem interrupções da corrente de carga;

Por fim, visando a uma maior compreensão têm-se forma bastante simples, na Figura 2.2, a ação esperada para o compensador em questão. Nesta se pode observar que a polaridade da compensação de tensão, se positiva ou negativa, é determinada a partir da escolha entre as chaves CHpp ou CHpN, que conectam o autotransformador às extremidades do enrolamento secundário do transformador série, permitindo, assim, a compensação de elevação ou redução da tensão a jusante do ponto de instalação do equipamento.

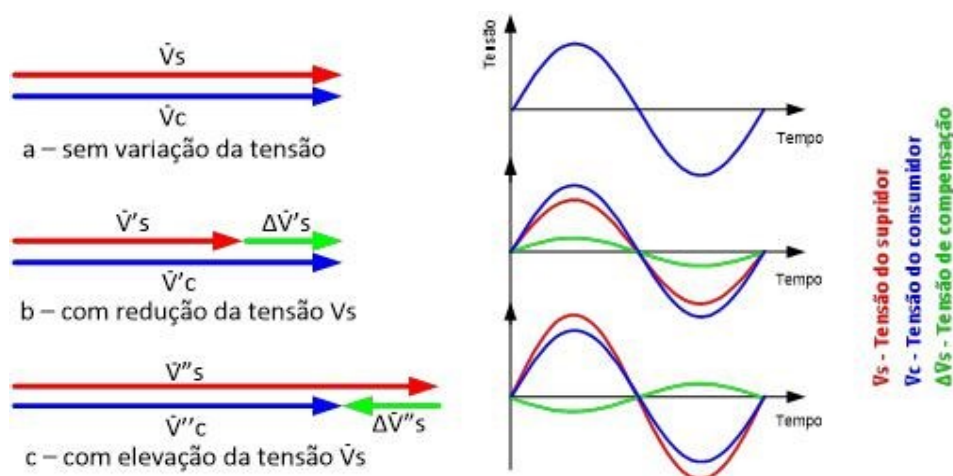


Figura2. 2 - Diagrama fasorial ilustrando o funcionamento do regulador

2.3 O CONTROLE DO REGULADOR

A estratégia do controle do RET, esta direcionada à seleção da respectiva polaridade da tensão de compensação, essa se encontra sintetizada no diagrama de blocos da Figura 2.3.

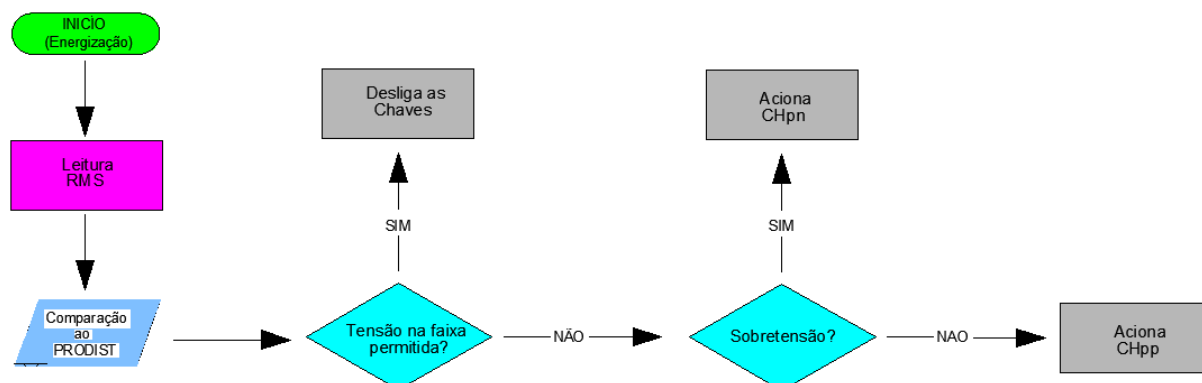


Figura2. 3– Diagrama de blocos para o controle do RET

A lógica estabelecida para a definição da chave destinada à restauração dos padrões de suprimento, de forma resumida, é exposta abaixo:

- Após a energização do regulador e respectivo controle, dá-se então início ao cálculo da tensão eficaz e esse, por sua vez, é correlacionado com os padrões preconizados pelo PRODIST;
- O controle avalia o enquadramento do valor de tensão eficaz calculado dentro da faixa de regulação;
- Se for constatado que a tensão avaliada está dentro da faixa permitida, ambas as chaves ficam abertas; se for notado que há uma sobretensão, a chave CHpn será acionada; se for verificado que há uma subtensão, a chave CHpp que será acionada;
- Por fim, tendo-se acionada a chave escolhida, o processo é repetido como um todo.

2.4 ESTRATÉGIA PARA MODELAGEM DO REGULADOR

Em consonância com procedimentos clássicos, os trabalhos de modelagem de dispositivos e complexos elétricos apresentam-se embasados em duas técnicas de representação. Uma fundamentada nos princípios da representação no domínio do tempo, com suas particularidades e propriedades, e outra, baseada no domínio da frequência. Esta última, conforme previamente exposto, possui atributos que a tornam bastante atrativa para muitas aplicações na medida em que proporciona uma visualização mais direta da operacionalidade dos dispositivos e a interação dos mesmos com a rede elétrica, além de contribuir para simplificação e rapidez de cálculos e melhor performance computacional.

Para fins desta pesquisa, muito embora se reconheça o fato de que modelos no domínio do tempo já tenham sido implementados com sucesso no simulador ATP, fato este que proporcionou recursos para estudos de desempenho transitório, dinâmico e de regime permanente, vale ressaltar que o cerne do processo de representação utilizado nesta dissertação encontra-se alicerçado na modelagem que utiliza os princípios do domínio da frequência.

O modelo proposto apresenta-se com a seguinte fundamentação:

- A fonte de suprimento é tratada na forma de um circuito equivalente de *Thévenin*;
- As unidades físicas constituintes do regulador propriamente dito, com destaque aos componentes eletromagnéticos compostos pelo transformador de excitação e transformador de acoplamento, são modeladas de forma compatível com as técnicas empregadas para a representação de transformadores e reatores no domínio da frequência;
- A carga suprida é tratada na forma de uma impedância constante;
- Os equacionamentos são realizados para uma posição de chaves definida pelo controle e responsável pela injeção de uma determinada tensão de compensação fixa.

Apesar de que o equipamento regulador deverá atuar no sentido de compensar tensões inferiores e superiores à desejada ou de referência, os trabalhos de equacionamento serão

realizados apenas para uma condição operativa, associada com a compensação de elevação de tensão, pois na situação de redução dessa grandeza o procedimento é análogo.

Em atenção a esse modo operacional procede-se, a seguir, à representação do arranjo físico com seu respectivo circuito equivalente e, por fim, à modelagem matemática propriamente dita.

2.5 MODELAGEM DO RET NA CONDIÇÃO DE COMPENSAÇÃO POSITIVA

A Figura 2.4 ilustra a topologia simplificada do regulador quando trabalhando em compensação positivo de tensão. O transformador de excitação foi apresentado contendo apenas um tape conectado ao secundário e o transformador de acoplamento, com apenas dois de seus três enrolamentos.

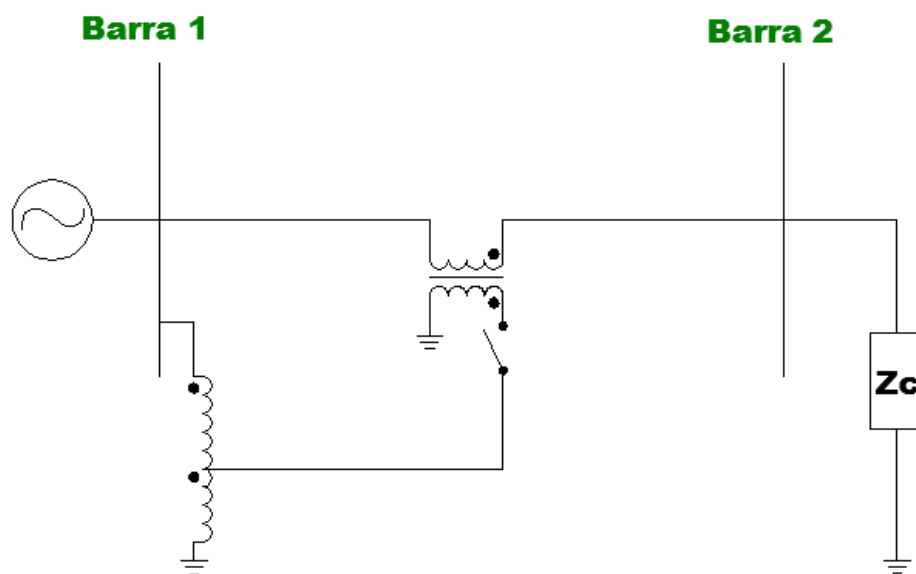


Figura2. 4- Topologia do RET – modo elevador

2.5.1 TRANSFORMADOR DE EXCITAÇÃO

A Figura 2.5 mostra os fluxos de corrente em ambas as unidades eletromagnéticas do RET. No que tange ao transformador de acoplamento, por se tratar de um transformador convencional com mesma relação de espiras entre o primário e secundário, as correntes que

circulam por ambos os enrolamentos devem ser iguais. Portanto, a corrente no secundário do transformador de acoplamento é igual à corrente fornecida à carga pela rede. ($\dot{I}_C$)

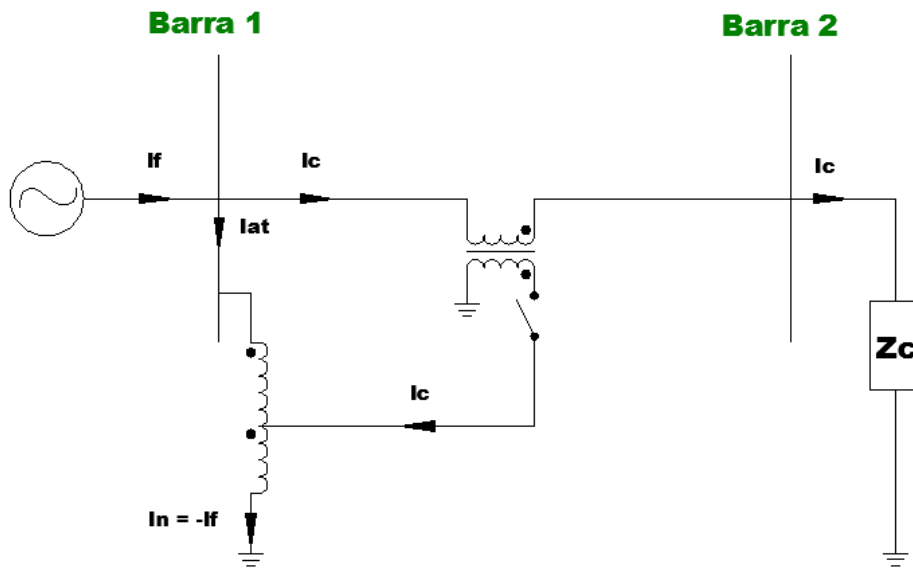


Figura2. 5– Fluxo de corrente no transformador de excitação – modo elevador

Sabe-se que a corrente no primário do transformador é dada pela diferença entre as correntes da fonte ($\dot{I}_f$) e da carga ($\dot{I}_C$). Portanto:

$$\dot{I}_{AT} = I_f - I_c \quad (2.1)$$

Por se tratar de um autotransformador abaixador, a corrente no secundário ($\dot{I}_C$) é maior que aquela no primário ($\dot{I}_{AT}$). Em outras palavras, a corrente que se estabelece no neutro ($\dot{I}_N$) apresenta-se com o sentido indicado na Figura 2.5. Assim:

$$\dot{I}_N = I_A + I_c \quad (2.2)$$

Substituindo a equação (2.2) em (2.1), tem que a corrente no neutro é igual a corrente da fonte:

$$\dot{I}_N = I_f$$

Diante disso, a corrente que circula pelo neutro do autotransformador é igual à corrente da fonte, afirmativa essa para o RET na condição de elevador de tensão.

2.5.2 TRANSFORMADOR DE ACOPLAMENTO

Determinados os parâmetros do transformador de excitação, procede-se à análise do transformador de acoplamento, ou seja, da unidade responsável pela injeção da tensão de compensação em série com o alimentador.

Haja visto que os dois enrolamentos primários (inferiores), conectados às chaves de polaridade positiva e negativa, têm o mesmo número de espiras que o enrolamento secundário (superior e conectado em série com o alimentador) e, ainda, que esses não operam simultaneamente, pode-se afirmar que o transformador de acoplamento sempre possui relação de transformação unitária, como observado na Figura 2.1.

Desprezando inicialmente as quedas de tensão em ambas as unidades de transformação, a tensão extraída pelo tape do transformador de excitação é a mesma imposta sobre o primário do transformador de acoplamento e induzida no seu secundário.

A Figura 2.6 ilustra o circuito simplificado do RET atuando como elevador de tensão e as correntes que se estabelecem entre as partes.

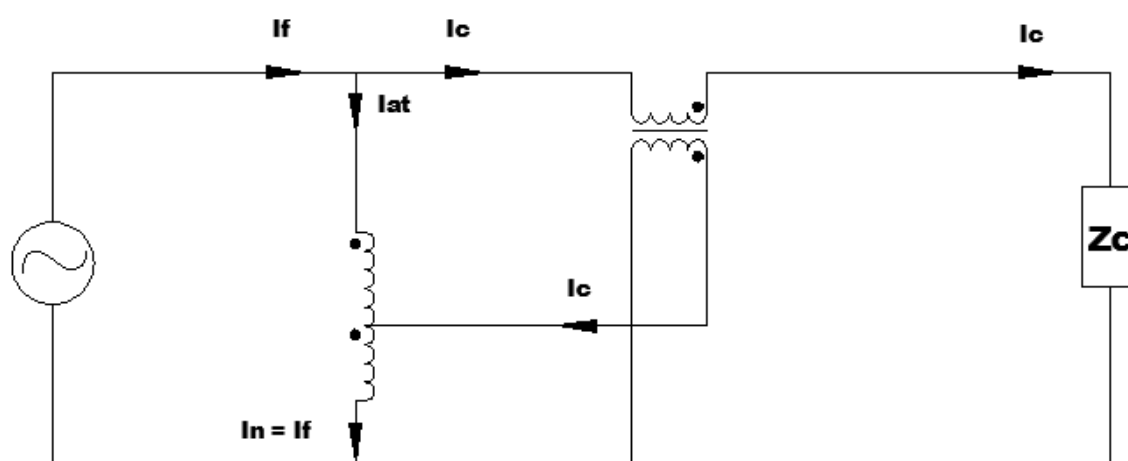


Figura2. 6– Circuito simplificado do RET – modo elevador

Conforme dito anteriormente, a corrente da carga ($\dot{I}_c$) circula pelo enrolamento superior do transformador de acoplamento e é igual à corrente fornecida pelo secundário do transformador de excitação, como apresentado na Figura 2.6. Além do mais, essa corrente é igual a subtração da corrente de suprimento ($\dot{I}_f$) pela corrente do autotransformador ($\dot{I}_{AT}$). Portanto:

$$\dot{I}_{AT} = \dot{I}_f \frac{N2}{N1}$$

Por isso, a corrente $\dot{I}_c$ pode ser calculada por:

$$\dot{I}_c = \dot{I}_f \frac{(N1 + N2)}{N2}$$

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Capítulo 2 teve por fim tanto a apresentação conceitual do dispositivo regulador, denominado RET, quanto o desenvolvimento do seu modelo matemático no domínio da frequência.

Dessa maneira, apresentou-se a estrutura física do regulador, composto por suas duas unidades eletromagnéticas básicas e seus módulos de chaveamento, assim como sua estratégia de controle visando à troca de chaves e consequente variação da tensão de compensação a ser utilizada para o fim da regulação. Foi desenvolvido um modelo matemático somente para o modo de operação no sentido de elevação da tensão.

CAPÍTULO 3: MODELAGEM DO REGULADOR NO SIMULADOR ATP E ESTUDO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez apresentados os conceitos básicos e a estrutura do regulador em foco, assim como uma proposta de modelagem do equipamento no contexto operacional, o presente capítulo encontra-se centrado num processo avaliativo do desempenho da proposta de modelagem do dispositivo por meio do ATP, empregando-se, para tanto, a seguinte lógica:

- Num primeiro momento, é apresentado uma síntese dos recursos utilizados pelo ATP para que a modelagem dos transformadores de excitação e acoplamento, assim como o controle do modelo, pudesse ser realizado;
- Obtenção do modelo computacional completo do dispositivo RET devidamente inserido no programa ATP;
- Por fim, é realizada uma avaliação do desempenho do modelo computacional do regulador, fato este que conduz a resultados que são prontamente correlacionados com os estudos experimentais e computacionais no domínio do tempo.

3.2 O SIMULADOR ATP

O *Alternative Transients Program* (ATP) consiste numa plataforma computacional destinada à modelagem e simulação de circuitos elétricos no domínio do tempo. Esse programa é amplamente conhecido e difundido no setor elétrico nacional e internacional, tendo em vista que o mesmo corresponde a um software de domínio livre. Como o próprio nome sugere, essa ferramenta permite a realização de estudos investigativos não apenas em regime permanente, mas apresenta também a potencialidade de permitir a reprodução, via simulação computacional, dos mais variados eventos transitórios e dinâmicos factíveis de manifestação nos sistemas elétricos [9].

Essa plataforma computacional apresenta ainda em sua biblioteca modelos elétricos correspondentes a uma série de dispositivos e componentes presentes nos sistemas elétricos, tais como: fontes de alimentação, chaves, linhas de transmissão, cabos, máquinas elétricas, cargas, transformadores, etc. Tais modelos encontram-se representados por parâmetros concentrados ou distribuídos, apresentando, ainda, possibilidades de inserção de eventuais não linearidades, dentre várias outras propriedades e recursos [9].

A representação de transformadores no programa ATP através de modelos elétricos equivalentes possibilita a reprodução dos mais variados tipos de equipamentos, desde os mais simples, até as configurações mais complexas para os mesmos, as quais são constituídas por unidades trifásicas do tipo núcleo envolvido ou envolvente, com dois ou mais enrolamentos por fase.

Focando uma exemplificação diretamente afeita aos interesses deste trabalho, a Figura 3.1 apresenta o circuito elétrico equivalente de um transformador monofásico, não linear, de dois enrolamentos, também conhecido por “*Saturable Transformer*”. Esse recurso encontra-se disponibilizado na biblioteca do ATP [9].

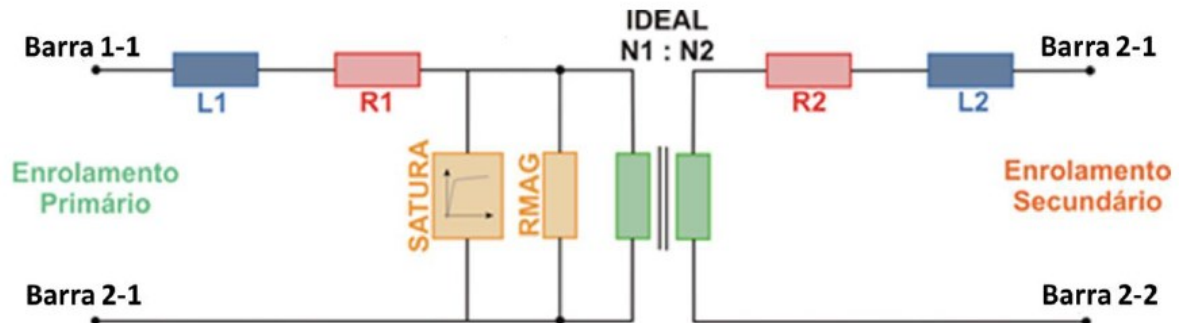


Figura 3. 1– CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE DOIS ENROLAMENTOS – NÃO LINEAR – ATP

Conforme se pode observar, o modelo é composto basicamente por um transformador ideal de dois enrolamentos ($N1:N2$), sendo esse o responsável pela representação da relação de transformação entre os enrolamentos primário e secundário. Adicionado a isso, o mesmo ainda apresenta as impedâncias dos enrolamentos do equipamento, na forma de resistências e indutâncias de dispersão dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente ($R1$ e $L1$ – enrolamento primário) e ($R2$ e $L2$ – enrolamento secundário). Além disso, o circuito

equivalente mostra um ramo responsável pela representação do efeito de saturação do transformador (SATURA), sendo esse conectado no circuito que representa o enrolamento primário. Por fim, as perdas associadas com o processo de magnetização, também conhecidas por perdas no núcleo, são representadas através de um elemento resistivo linear (RMAG). Esse último é conectado no circuito representativo do enrolamento primário, paralelamente ao ramo de saturação.

É dentro deste norte que foram desenvolvidas e implementadas as unidades magnéticas que perfazem o regulador contemplado neste trabalho, como poderá ser visto a seguir. Também, em vista da necessidade da inserção do controle do dispositivo, esse, em sintonia com procedimentos usuais, utiliza, diferentemente dos transformadores, recursos disponibilizados pela rotina TACS, a qual auxilia à representação de funções de controle, modelos matemáticos de dispositivos, dentre outros.

3.3 MODELAGEM DO RET NA PLATAFORMA ATP

Os trabalhos descritos nesta seção apresentam-se com o objetivo central de correlacionar o arranjo físico exposto no Capítulo II com os recursos existentes na plataforma ATP, visando, sobretudo, à modelagem do dispositivo, nos termos requeridos para a realização de estudos envolvendo a operação do mesmo sob, como já mencionado, situações de sub e sobretensão.

Para tanto, a Figura 3.2 sintetiza o arranjo físico que compõe o complexo das unidades de potência, formada pelos transformadores em paralelo e em série, e também o sistema de controle. Também, visando oferecer uma ideia de conjunto, nessa figura o regulador encontra-se inserido num alimentador elétrico simplificado, constituído de uma fonte de tensão, linha e carga.

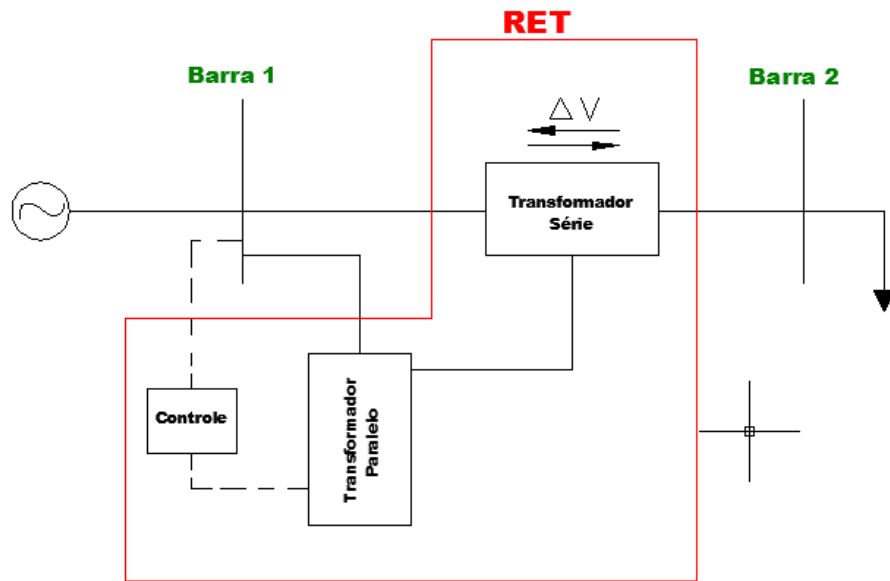


Figura 3. 2 – Circuito elétrico equivalente do RET no sistema

De forma a tornar o texto mais didático, cada componente que perfaz o arranjo físico do RET é tratado separadamente, a seguir.

3.3.1 – Transformador Série

As Figuras 3.3 (a) e (b) ilustram os elementos representativos do transformador saturável existente no ATPDraw, enquanto a Figura 3.4 apresenta o respectivo arquivo “*ATP-file*”. Vale enfatizar que esses recursos encontram-se na biblioteca do simulador e são suficientemente flexíveis para a adequação a configurações diversas para o equipamento quanto ao arranjo eletromagnético, parametrização dos componentes, etc.

Edição do arquivo ATP-file

O ATP oferece a possibilidade de se trabalhar com módulos de seções da rede elétrica, ou *templates*, permitindo, assim, a combinação entre elementos de valores fixos ou variáveis com argumentos. Nesse particular, vale lembrar que os valores correspondem a entidades numéricas, enquanto que os argumentos referem-se a “nós” elétricos. Essa ferramenta corresponde à rotina “DATA BASE MODULE”, mais conhecida por DBM, presente no referido programa.

A criação do modelo do transformador série com tape central foi, pois, embasada na edição do cartão do transformador monofásico saturável ora apresentado e o resultado dessa etapa de desenvolvimentos encontra-se mostrado na Figura 3.5.

```

Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG, P1XXXX, P2XXXX, S1XXXX, S2XXXX, S3XXXX
ARG, IOXXXX, FOXXXX, RMXXXX, RPXXXX, LPXXXX, VPXXXX
ARG, RSXXXX, LSXXXX, VSXXXX
NUM, IOXXXX, FOXXXX, RMXXXX, RPXXXX, LPXXXX, VPXXXX
NUM, RSXXXX, LSXXXX, VSXXXX
/BRANCH
TRANSFORMER
                                TX0001RMXXXX
0.195941                        0.047
0.312987                        0.094
0.420253                        0.141
0.556012                        0.164
1.132785                        0.188
2.406431                        0.199
16.715527                       0.217
130.982391                      0.235
529.619298                      246.
9999
1P1XXXXP2XXXX                   RPXXXXLPXXXXVPXXXX
2S1XXXXS2XXXX                   RSXXXXLSXXXXVSXXXX
3S2XXXXS3XXXX                   RSXXXXLSXXXXVSXXXX
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH, tstested.lib
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
$EOF

```

FIGURA 3. 5- ARQUIVO DBM REPRESENTATIVO DO TRANSFORMADOR SÉRIE

De acordo com o modelo editado pode-se constatar que o mesmo possui argumentos enquadrados em duas categorias:

- ARG: que representam nomes de nós externos;
- NUM: que representam nomes de variáveis com valores numéricos.

A Figura 3.6 ilustra os nomes de argumentos de nós (ARG).

```
ARG, P1XXXX, P2XXXX, S1XXXX, S2XXXX, S3XXXX
ARG, I0XXXX, F0XXXX, RMXXXX, RPXXXX, LPXXXX, VPXXXX
ARG, RSXXXX, LSXXXX, VSXXXX
```

Figura 3. 6- Declaração de argumentos referentes a nomes de nós

No que tange à legenda dos respectivos nomes de argumentos de nós, esses são:

- P1XXXX: Entrada do enrolamento primário do transformador série (ponte de conexão com o alimentador);
- P2XXXX: Saída do enrolamento primário (ponto de conexão com a carga);
- S1XXXX: Entrada do enrolamento secundário (ponto de conexão do reforço negativo);
- S2XXXX: Saída dos enrolamentos secundário e terciário (terminal do tape central);
- S3XXXX: Entrada do enrolamento terciário do transformador (ponto de conexão do reforço positivo);
- I0XXXX e F0XXXX (corrente e fluxo): Pares de pontos usados para definir a indutância linear do ramo de magnetização no primário;
- RMXXXX (Rmag): Resistência linear e constante do ramo magnetizante;
- RPXXXX (R1): Resistência do enrolamento primário;
- LPXXXX (L1): Indutância de dispersão do enrolamento primário;
- VPXXXX (VN): Tensão nominal do enrolamento primário;
- RSXXXX (R2): Resistência do enrolamento secundário e terciário;
- LSXXXX (L2): Indutância de dispersão do enrolamento secundário e terciário;
- VSXXXX (VN): Tensão nominal do enrolamento secundário e terciário;

Como visto, o modelo aqui proposto apresenta-se na forma de três enrolamentos em uma única coluna, onde o enrolamento primário é conectado em serie com o alimentador principal enquanto o secundário e terciário são utilizados na conexão com o autotransformador.

Uma vez caracterizados os nomes dos argumentos do tipo (ARG), faz-se necessária a declaração dos mesmos em termos de valores numéricos. A Figura 3.7 apresenta os referidos argumentos tipo (NUM).

```
NUM, IOXXXX, FOXXXX, RMXXXX, RPXXXX, LPXXXX, VPXXXX
NUM, RSXXXX, LSXXXX, VSXXXX
```

Figura 3. 7- Declaração de argumentos relacionados a valores numéricos

Os nomes de argumentos de valores numéricos encontram-se identificados a seguir:

- IOXXXX e FOXXXX (corrente e fluxo): Pares de pontos usados para definir a indutância linear representativa do ramo de magnetização do enrolamento primário devem ser expressos na forma de valores de pico (corrente e fluxo) em [Ampère] e [Weber-volta];
- RMXXXX (Rmag): Valor da resistência de magnetização em [Ohm];
- RPXXXX (R1): Resistência do enrolamento primário em [Ohm];
- LPXXXX (L1): Indutância de dispersão do enrolamento primário em [mH] ou [Ohm], dependendo do valor de XOPT;
- VPXXXX (VN): Tensão nominal do enrolamento primário em [V];
- RSXXXX (R2): Resistência do enrolamento secundário e terciário em [Ohm];
- LSXXXX (L2): Indutância de dispersão do enrolamento secundário e terciário em [mH] ou [Ohm], dependendo do valor de XOPT;
- VSXXXX (VN): Tensão nominal do enrolamento secundário e terciário em [V];

Após a declaração dos nomes de argumentos de nós (ARG) e dos valores numéricos (NUM), obtém-se o (*template*) ou modelo elétrico do transformador série do regulador proposto.

A Figura 3.8 apresenta a referida (*template*), onde pode ser observada, além da curva de saturação, a conexão elétrica entre o final da bobina do secundário com o início da bobina do terciário, representando assim o ponto de acoplamento do tape central.

TRANSFORMER		TX0001RMXXXX
0.195941	0.047	
0.312987	0.094	
0.420253	0.141	
0.556012	0.164	
1.132785	0.188	
2.406431	0.199	
16.715527	0.217	
130.982391	0.235	
529.619298	246.	
9999		
1P1XXXXP2XXXX	RPXXXXLPXXXXVPXXXX	
2S1XXXXS2XXXX	RSXXXXLSXXXXVSXXXX	
3S2XXXXS3XXXX	RSXXXXLSXXXXVSXXXX	

Figura 3. 8- Template representativa dos enrolamentos do transformador série e curva de saturação

Cartão do transformador série

A obtenção do arquivo representativo do transformador série, ou seu cartão, consiste na execução do arquivo ATP recém-criado. Isso é feito através do “ATP Launcher”, cuja janela encontra-se ilustrada na Figura 3.9.

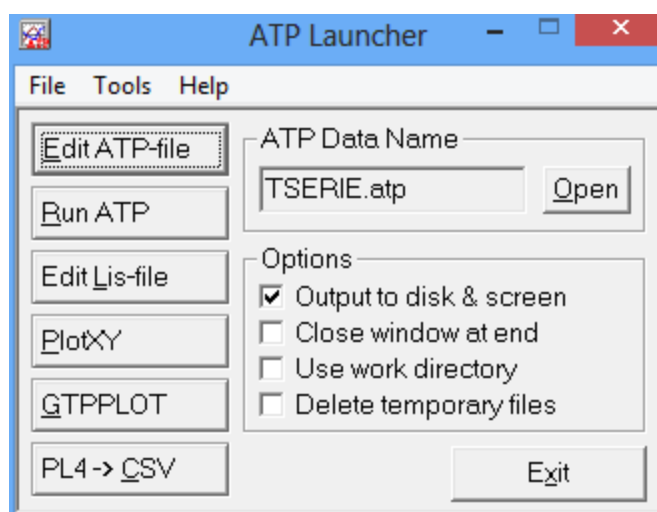


Figura 3. 9- Execução do ATP Launcher

O resultado obtido está indicado na Figura 3.10, na qual se pode constatar os meios utilizados para a inserção das informações próprias às características elétricas dos enrolamentos e da curva de saturação. A título de exemplificação, para a situação ilustrada, foram utilizados os dados associados a um transformador série de relação 1:1, com potência de 1,5 kVA e tensão nominal de 50V.

```

KARD 3 14 14 14 14 14 15 15 15 15 15 16 16 16 16 16
KARG 8 1 2 9 10 11 3 4 12 13 14 4 5 12 13 14
KBEG 45 3 9 27 33 39 3 9 27 33 39 3 9 27 33 39
KEND 50 8 14 32 38 44 8 14 32 38 44 8 14 32 38 44
KTEX 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0
$ERASE
/BRANCH
  TRANSFORMER
    1.959410 0.470
    3.129870 0.940
    4.202530 1.410
    5.560120 1.640
    11.32785 1.880
    24.06431 1.990
    167.15527 2.170
    1309.82391 2.350
    5296.19298 2.460
    9999
  1P1XXXXP2XXXX RPXXXXLPXXXXVPXXXX
  2S1XXXXS2XXXX RSXXXXLSXXXXVSXXXX
  3S2XXXXS3XXXX RSXXXXLSXXXXVSXXXX
$EOF user-supplied header cards follow. 20-Jul-17 15:29:31
ARG,P1XXXX,P2XXXX,S1XXXX,S2XXXX,S3XXXX
ARG,IOXXXX,FOXXXX,RMXXXX,RPXXXX,LPXXXX,VPXXXX
ARG,RSXXXX,LSXXXX,VSXXXX
NUM,IOXXXX,FOXXXX,RMXXXX,RPXXXX,LPXXXX,VPXXXX
NUM,RSXXXX,LSXXXX,VSXXXX

```

Figura 3. 10- Cartão (*.lib) do transformador série

Diante dos dados empregados, a Figura 3.11 indica a correlação ilustrativamente implementada para a relação fluxo *versus* corrente.

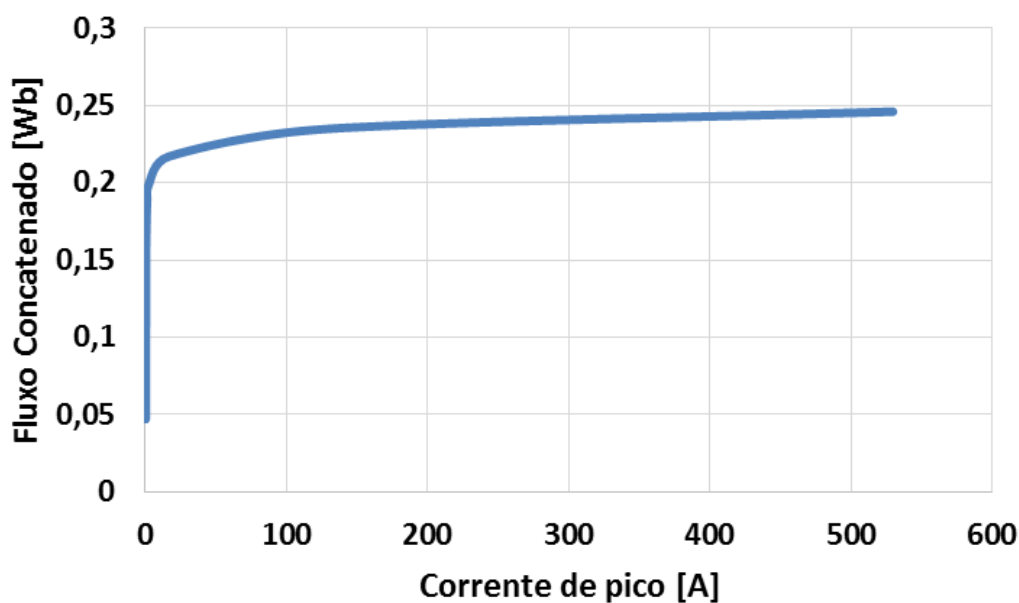


Figura 3. 11- Curva de saturação – Transformador série

Ícone do transformador série

Para a utilização do transformador série na interface do ATPDraw, faz-se necessária a criação de um novo elemento (*.sup). Para tanto, o primeiro passo executado no programa ATPDraw foi a seleção da opção “new sup-file” localizada no seguinte caminho: *Objects* → *User Specified* → *New sup-file*.

As Figuras 3.12 (a) e (b) ilustram, respectivamente, o novo componente produzido e a janela para parametrização elétrica do mesmo. Na Figura 3.12 (b) destaca-se, em vermelho, os parâmetros elétricos numéricos a serem inseridos no modelo. No parâmetro \$INCLUDE, destacado em azul, deve-se inserir o arquivo (*.lib). Vale ressaltar que as informações elétricas para o modelo TSERIE.sup devem ser condizentes com os parâmetros físicos e elétricos utilizados no cálculo da curva de saturação, sendo essa última inserida no arquivo (*.lib) conforme explicitado anteriormente.

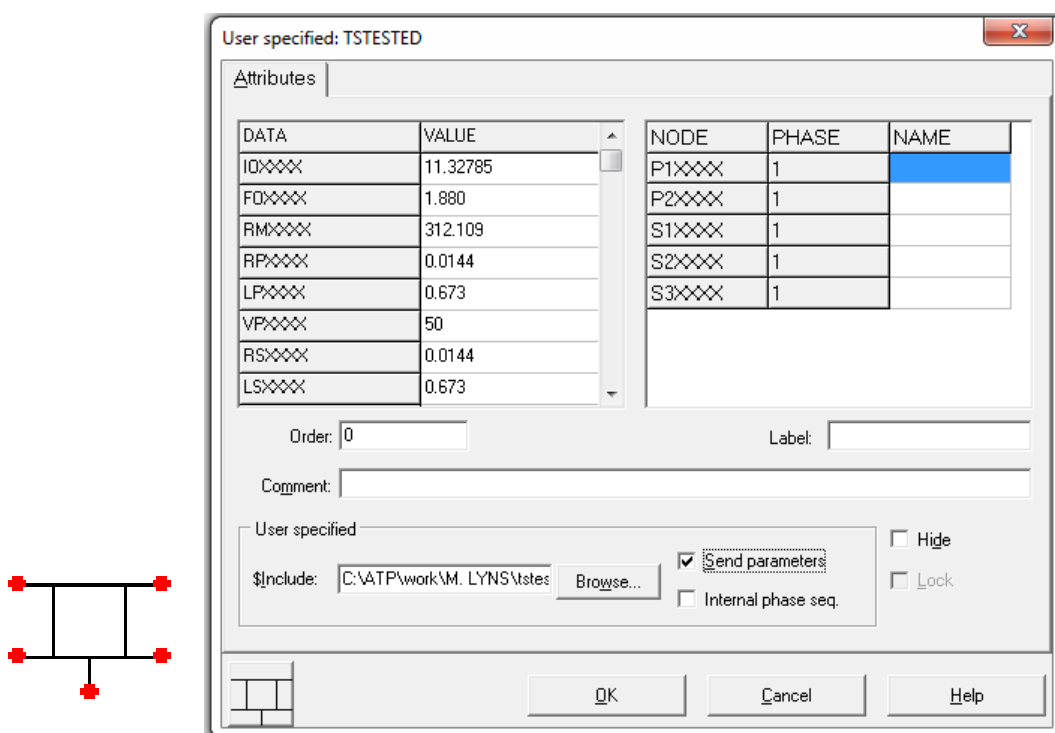


Figura 3. 12- Novo elemento criado no ATPDraw – TSERIE.sup

(a) Elemento criado

(b) Janela de parametrização

3.3.2 Transformador Paralelo ou de Excitação

Em vista do fato que o transformador paralelo ou de excitação apresenta-se construtivamente na forma de um autotransformador, a diferença básica em relação aos desenvolvimentos anteriores é que, para esse componente, há um único enrolamento, como mostra a Figura 3.13.

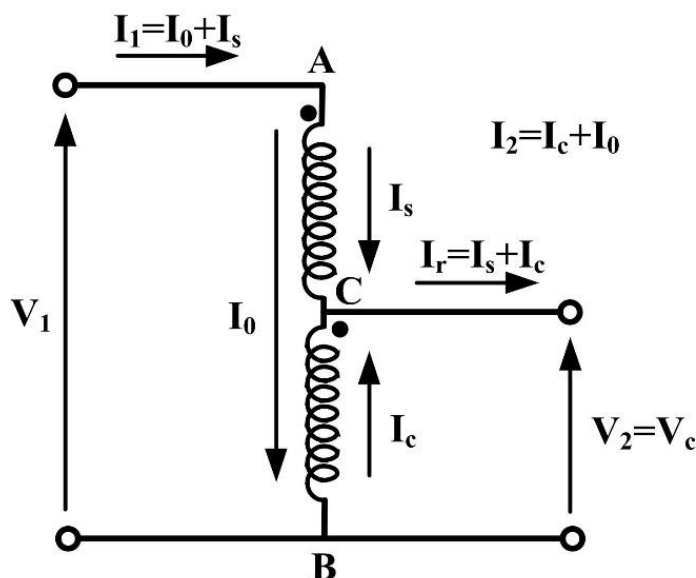


Figura 3. 13- Autotransformador [46]

Onde:

A a C – enrolamento série;

C a B – enrolamento comum;

V1 e V2 – são as tensões do primário e do secundário respectivamente;

Vc – representa a tensão na carga;

I1 – corrente do enrolamento primário;

I2 – corrente resultante unicamente no enrolamento comum;

I0 – representa a corrente de magnetização;

Ic – componente da corrente resultante I2 no enrolamento comum;

Ir – representa a corrente secundária no circuito da carga.

À luz do exposto, segue que a utilização de um modelo pré-existente de um transformador monofásico saturado, identificado por “TRAFO_S” na plataforma ATPDraw, apresenta-se adequada aos objetivos postos. Esse recurso encontra-se ilustrado na Figura 3.14(a).

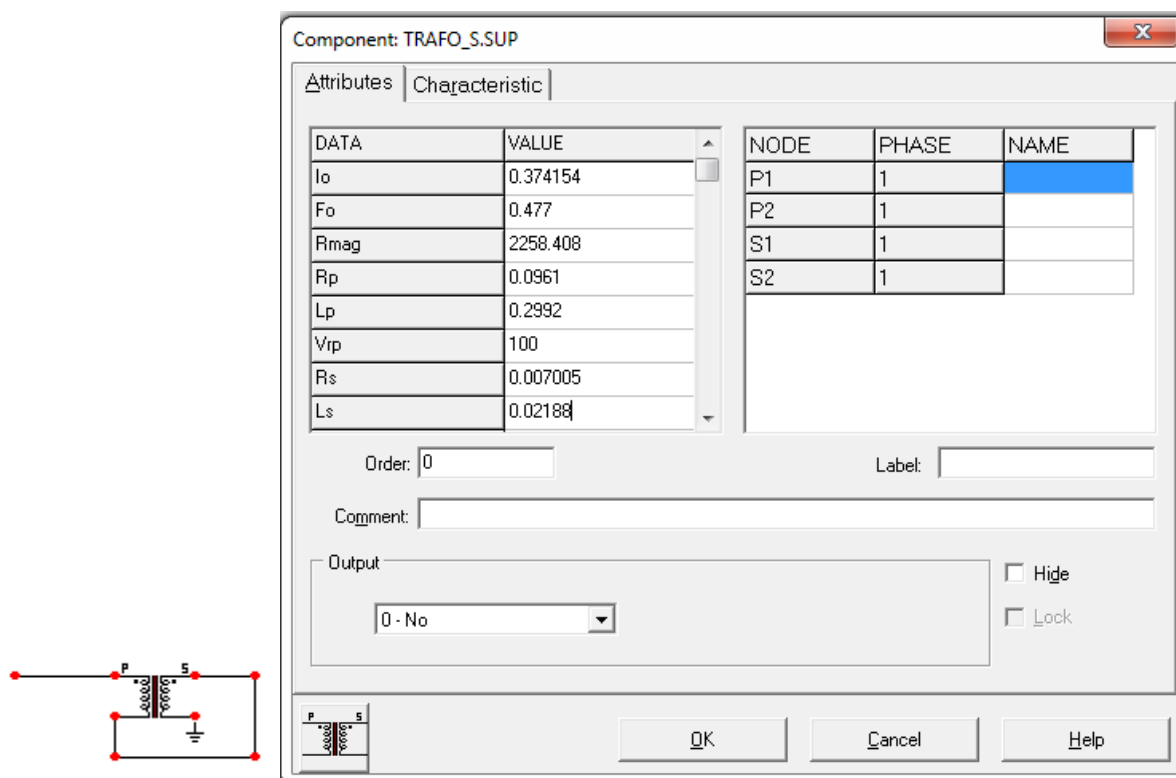


Figura 3. 14- Autotransformador no ATPDraw

(a) Elemento montado

(b) Janela de parametrização

Neste modelo computacional, existe apenas um tape com duas chaves (CHpn e CHpp), com isso, houve a necessidade da criação de um autotransformador para cada uma das duas operações, com características próprias. O circuito completo será oportunamente apresentado. Ademais, para este componente não houve necessidade de adequações para a inserção no simulador ATP.

Vale enfatizar que, diante da utilização de um modelo de transformador já oferecido pelo simulador, não houve necessidade de qualquer detalhamento, nos termos anteriormente feitos, para esse componente. Portanto, descrições a exemplo da criação e parametrização de um novo dispositivo tornam-se desnecessárias nesta etapa. Como mencionado, a única

3.3.4 - Sistema Completo do Compensador RET – Unidades de Potência e Controle

Uma vez descritos os modelos desenvolvidos para os três elementos principais que perfazem a estrutura do regulador, esses são então associados de forma a oferecer, no simulador ATP, a representação completa do dispositivo. Disso resulta a representação completa do RET indicada na Figura 3.16.

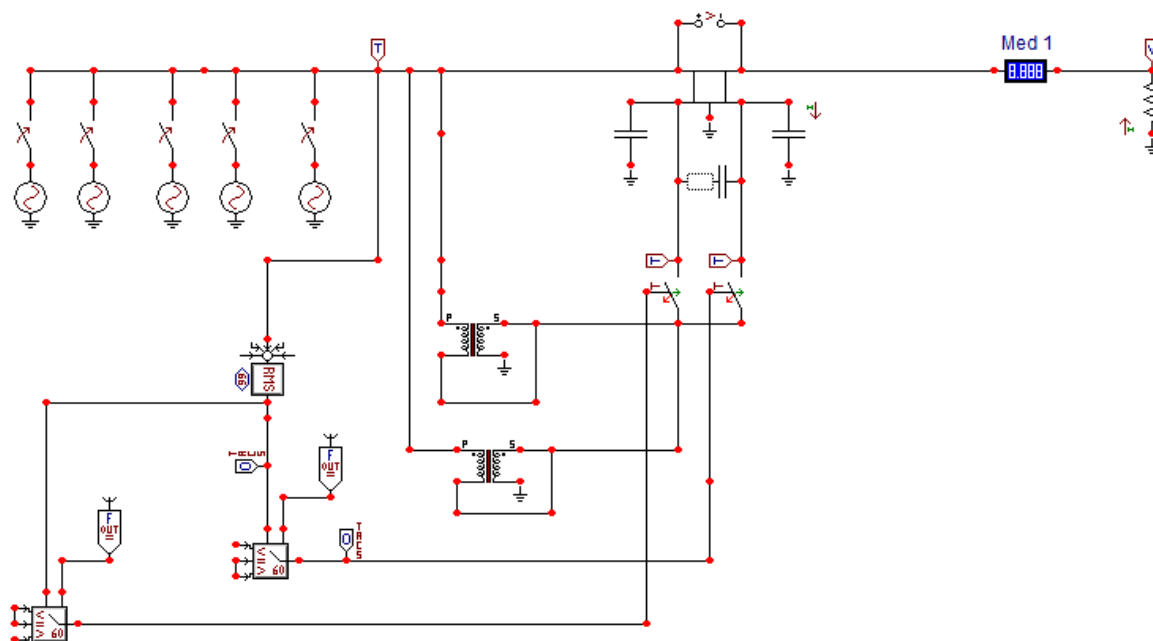


Figura 3. 16- Regulador Eletromagnético de Tensão no ATPDraw

3.4 ESTUDO COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO

Uma vez obtido o modelo computacional do regulador eletromagnético de tensão e sua respectiva inserção na plataforma ATP, o passo seguinte consiste na avaliação de desempenho do modelo frente à uma situação tipicamente encontrada na rede elétrica.

No que tange ao caso considerado para a avaliação computacional foi utilizado uma situação hipotética na forma de degraus sucessivos de variações de tensão envolvendo cinco intervalos de tempo, cada qual atrelado com uma dada condição operativa. Essas variações foram impostas ao modelo unifilar utilizado para os estudos e indicado na Figura 3.17.

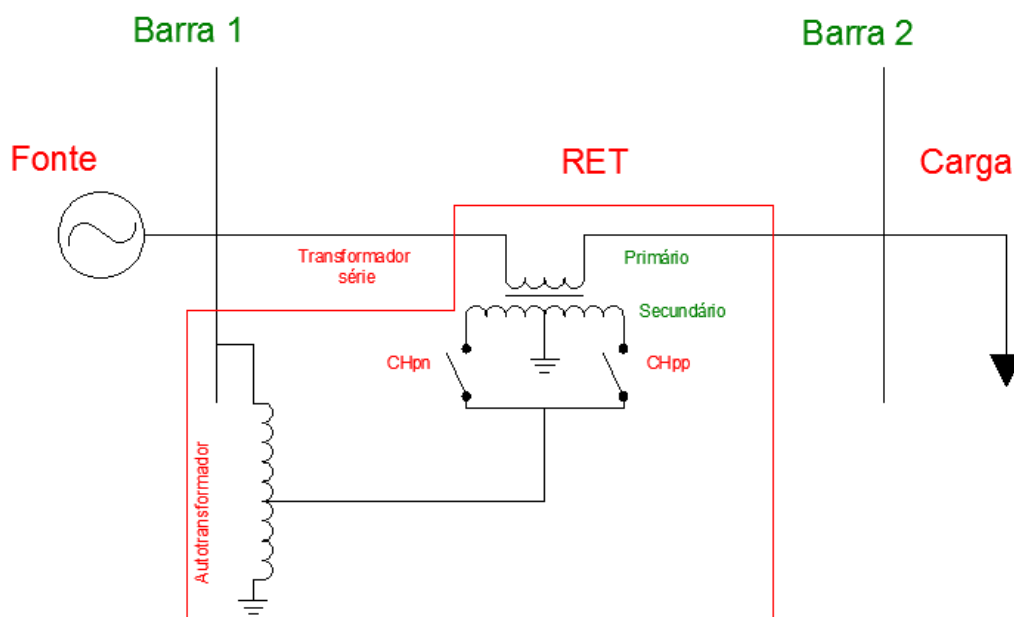


Figura 3. 17- Diagrama unifilar do sistema radial utilizado para os estudos computacionais

Para realizar a regulação de tensão, o autotransformador foi adotado com dois tapes, a saber: 0% e 10%. Os motivos que levaram a tais valores foram as margens de variações requeridas pelos estudos de desempenho propostos.

O tempo total de estudo foi escolhido arbitrariamente como sendo igual a 1 segundo e os intervalos representativos dos diferentes desempenhos do sistema correspondem, cada um, a um fenômeno com duração de 0,2 segundos. Dessa forma, no intervalo de tempo de 0,2 a 0,4 segundos, pode-se constatar, um acréscimo de 10% da tensão de suprimento e, por sua vez, de 0,6 a 0,8 segundos, decréscimos de mesma magnitude em relação a tensão referência.

O estudo teve também como diretriz, as faixas valores de tensão e seus respectivos indicadores de qualidade contidos na Tabela 3.1 do PRODIST – Módulo 8 [1].

Tabela 3. 1– Indicador de Qualidade do nível de tensão

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Nominal (TN)
Adequada	$0,92TN \leq TL \leq 1,05TN$
Precária	$0,87TN \leq TL < 0,92TN$ ou $1,05TN < TL \leq 1,06TN$
Crítica	$TL < 0,87TN$ ou $TL > 1,06TN$

A Figura 3.18 mostra o perfil da tensão imposta pela fonte ideal de tensão que compõe o sistema em estudo. Complementarmente, a Tabela 3.2 fornece os correspondentes valores de tensão para cada intervalo de estudo considerado.

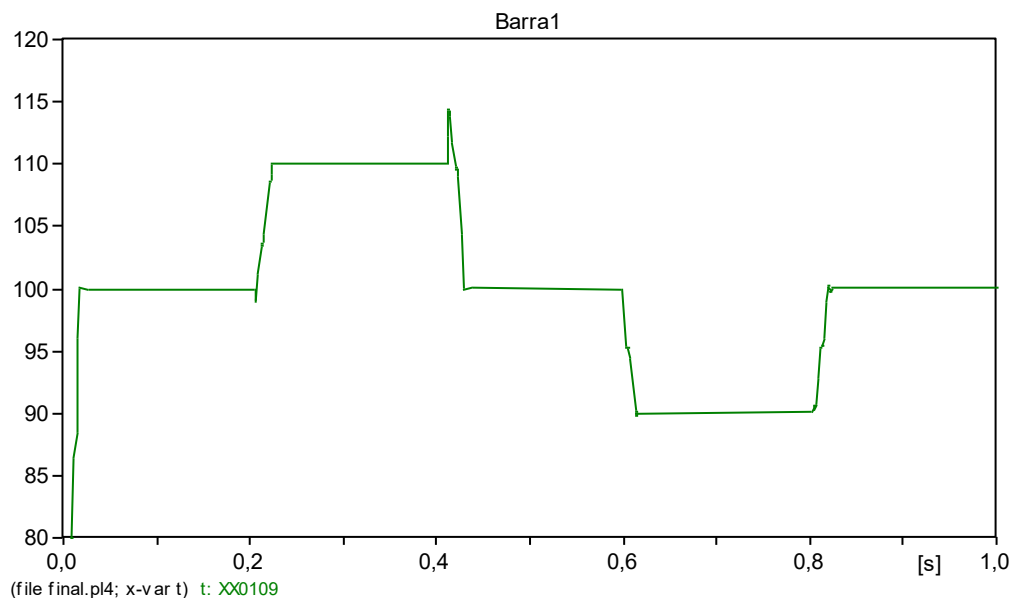


Figura 3. 18- Tensão na Barra 1 – variações de tensão adotadas ao longo do período de investigação

Tabela 3. 2- Tensões de operação adotadas para a Barra 1

INTERVALOS	TEMPOS [s]	TENSÃO [V]	$\Delta V \%$
Intervalo 1	0 a 0,2	100	0
Intervalo 2	0,2 a 0,4	110	-10
Intervalo 3	0,4 a 0,6	100	0
Intervalo 4	0,6 a 0,8	90	10
Intervalo 5	0,8 a 1	100	0

A Figura 3.19 ilustra as tensões nas Barras 1 e 2 para as distintas situações impostas. Os resultados evidenciam que tais comportamentos expressam a operação do arranjo elétrico sob a ação das variações de tensão diante da presença do regulador aqui delineado. Os desempenhos obtidos revelam as tensões impostas pela fonte (Barra1) e na carga (Barra 2). De imediato, pode-se observar, com clareza, a eficácia do processo de regulação proposto por este trabalho.

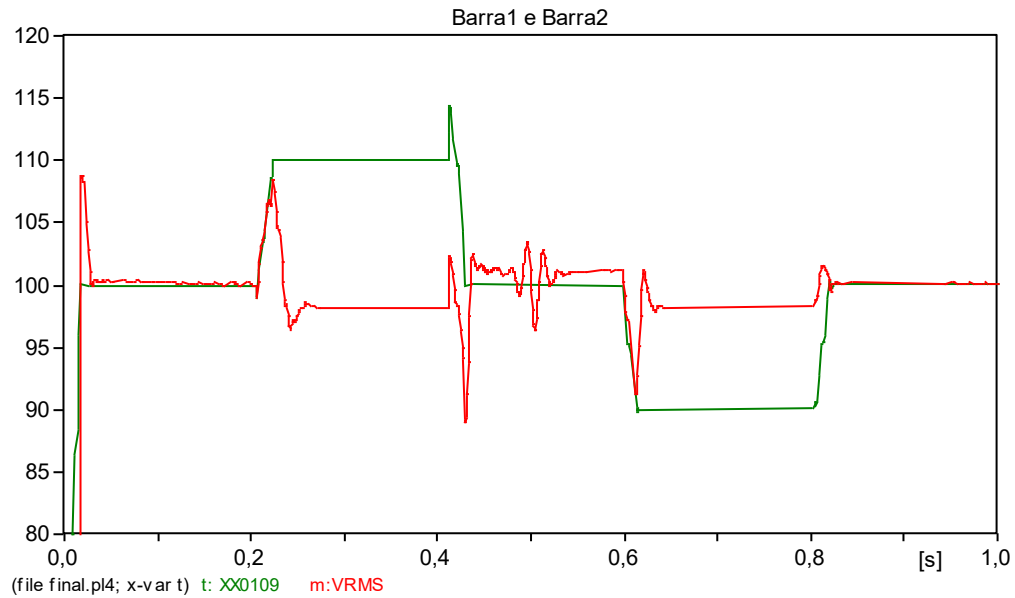


Figura 3. 19- Tensões nas barras 1 e 2

Tabela 3. 3– Tensão das Barras 1 e 2 – computacional

TEMPOS [s]	$\Delta V \%$	Valores das Tensões	
		Barra 1 [V]	Barra 2 [V]
0 a 0,2	0	100	100
0,2 a 0,4	-10	110	100
0,4 a 0,6	0	100	100
0,6 a 0,8	10	90	100
0,8 a 1	0	100	100

Ao se analisar os resultados supra postos, fica evidente uma pequena divergência entre as compensações idealizadas e aquelas que efetivamente ocorreram. Isso se deve a quedas de tensão nas unidades eletromagnéticas e também aos transitórios no momento de chaveamento.

Não obstante as considerações anteriores, de um modo geral, os níveis de regulação atingidos mostram-se bastante satisfatórios.

3.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das bases físicas e operacionais contempladas no capítulo anterior, a proposta de equipamento compensador ora considerada foi, ao longo desta unidade, objeto de representação no simulador ATP.

Para tanto, através de recursos internos disponibilizados na biblioteca dessa plataforma, foi estabelecida a estratégia de modelagem do equipamento, em que pese sua representação via técnicas de modelagem no domínio do tempo. Isso se justifica pelo fato que os trabalhos de pesquisa aqui considerados se destinam à realização de estudos investigativos focando o desempenho do regulador e respectiva rede de conexão sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente de operação.

Em vista do fato que as unidades de potência da proposta de dispositivo apresentam-se na forma construtiva e operacional de transformadores, a inserção do autotransformador paralelo ou de excitação, assim como do transformador série, foi feita a partir de recursos pré-existent na biblioteca do ATP. Não obstante tais modelos disponibilizados apresentem-se como pré-existent, houve necessidades de adequação dos mesmos aos propósitos desta pesquisa. Esses trabalhos culminaram na elaboração e edição de cartões especiais, nos termos apresentados ao longo do texto.

Em relação ao controle, empregando-se a rotina TACS, foi então concluída a modelagem do regulador em pauta. Objetivando a realização de uma primeira etapa de trabalhos para a avaliação do programa computacional assim obtido, a partir da configuração de uma rede elétrica simplificada, na forma de sistema radial e formado por uma fonte de tensão, linha de alimentação, carga e o dispositivo regulador, foram então definidas condições operacionais hipotéticas para os estudos. Essas foram caracterizadas na forma de elevações e reduções da tensão do supridor, em degraus sucessivos discretos de 10%.

Isso posto, foram exploradas as potencialidades da proposta e sua eficácia aos propósitos aqui estabelecidos e, em consonância com essas primeiras investigações, foi ratificado o sucesso computacional do processo da compensação.

3.6 - CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTE CAPÍTULO

As principais contribuições oferecidas por este capítulo são:

- Proposição de um modelo para a representação do regulador eletromagnético de tensão e respectiva inserção no simulador ATP;
- Realização de testes avaliativos de desempenho do modelo empregando-se para tanto um arranjo físico de um alimentador disponibilizado em ambiente computacional.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E CONCLUSÕES

Não obstante as considerações e comentários próprios feitos ao longo de cada capítulo considera-se essencial, neste momento, destacar as principais constatações, resultados e limitações obtidos dos estudos realizados ao longo desta pesquisa, proporcionando, deste modo, uma visão ampla e sucinta das atividades realizadas.

O trabalho foi iniciado com uma síntese dos principais conceitos associados com o problema da qualidade da tensão, focando, de modo especial, aspectos relacionados com a compatibilização dessa grandeza aos requisitos impostos pelos agentes reguladores. À luz desses estudos foi possível traçar um horizonte de trabalhos que se apresentou como cerne da presente pesquisa.

Tendo por foco a utilização de tecnologias de cunho eletromagnético, em que pese a maior isenção de recursos da eletrônica de potência, fato esse atrelado com a busca de meios mais simples, confiáveis, econômicos, manutenção reduzida, dentre outros, foram então explorados os equipamentos comerciais em uso na atualidade que se encontram fundamentados no processo de compensação direta da tensão via unidades de potência totalmente eletromagnéticas. Adicionalmente, foram também tecidos comentários sobre tecnologias alternativas.

Em atenção aos objetivos postos, com destaque à simplicidade construtiva e operacional, foi então feita uma proposta de arranjo físico e de controle de um regulador eletromagnético de tensão monofásico, voltado apenas para correção de valores eficazes de tensão.

O regulador proposto mostrou-se constituído por duas unidades principais de potência e uma unidade de controle, caracterizando-se, assim, por uma estrutura simples, de concepção predominantemente eletromagnética. Estes atributos, indubitavelmente, se mostram compatíveis com os requisitos almejados quando da concepção do dispositivo ora tratado.

Objetivando, sobretudo, oferecer meios para uma avaliação simples da eficácia operacional do dispositivo regulador, e ainda, prover meios para um pré-dimensionamento de suas unidades de potência e de controle, foram ainda realizados trabalhos associados com o desenvolvimento de uma modelagem do complexo, baseado em desenvolvimentos feitos em uma tese de doutorado. Para tanto, fundamentando-se nos recursos oferecidos pela representação no domínio da frequência, o equipamento em pauta representado neste contexto, fato este decisivo para uma melhor compreensão e parametrização do dispositivo diante das necessidades impostas pela sua respectiva rede de conexão e fenômenos responsáveis por variações de tensão e violações dos padrões estabelecidos pela ANEEL.

A partir das bases físicas e operacionais concebidas, o compensador ora considerado foi, na sequência, objeto de representação no simulador ATP. Para tanto, através de recursos internos disponibilizados na biblioteca dessa plataforma, foi estabelecida a estratégia de modelagem do equipamento, em que pese sua representação via técnicas de modelagem no domínio do tempo, opção feita visando à realização de estudos investigativos focando o desempenho do regulador.

De um modo geral, as unidades de potência do RET, por possuírem estruturas físicas e construtivas similares a de transformadores, apoiaram-se em recursos pré-existent na biblioteca do ATP. Não obstante tais modelos, a compatibilização ao produto desta pesquisa exigiu adequações e elaboração de cartões especiais. Complementarmente, a inserção da estratégia de controle elaborada empregou a rotina TACS para o processo decisório e também para os chaveamentos que se fizerem necessários. Por fim, o modelo computacional foi obtido e avaliado através de estudos iniciais de desempenho. Para tanto foi empregada a configuração de uma rede elétrica simplificada na qual foram impostas condições operacionais caracterizadas na forma de elevação e redução da tensão do supridor, em degraus sucessivos de 10%. A potencialidade da proposta e sua eficácia aos propósitos aqui estabelecidos foram ratificadas através dos casos avaliados e também através da compatibilização dos resultados com os valores que a legislação determina como favoráveis

Por fim, fica como sugestão para trabalhos futuros, relacionados a este assunto:

- Incorporação de mais números de taps;
- Levar em consideração o ângulo de fase na operação de regulação;
- Diminuição dos efeitos de transitório nos momentos de chaveamentos;
- Desenvolver uma regulação contínua.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – Prodist – Modulo 8, 2017.
- [2] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica – **Resolução N° 505, de 26 de novembro de 2001.**
- [3] Oliveira, J. C.; Vasconcellos, A. B.; Apolônio, R.; Kawaphara, M. K.; Carvalho, J. E.; Raupp, R. **Compensador Estático de Reativos Controlado a Tiristores: Modelagem e Simulação.** VII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia – VII CBQEE 2007, Santos, São Paulo.
- [4] Santos, C. H. R. R. **Influência do STATCOM na Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Novembro de 2003.
- [5] Zhengping Xi; Parkhideh, B.; Bhattacharya, S.; **Improving Distribution System Performance with Integrated STATCOM and Super capacitor Energy Storage System**, Semicond. Power Electron. Center, North Carolina State Univ., Raleigh, NC, Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008, IEEE.
- [6] Weinhold, M.; Zurowski, R.; Mangold, T.; Voss, L.. **Power Conditioning Equipment for Improvement of Power Quality in Distribution Systems.** II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica 1997 – SBQEE 1997, São Lourenço – Minas Gerais – Brasil.
- [7] Gyugyi, L. “**Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems**”. IEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution, Volume 139, Issue 4, Pag. 323-331. 1992.
- [8] VASCONCELOS, L. E. "**Modelagem e Estudos de Desempenho do Regulador Eletromagnético de Tensão no Domínio da Frequência**". Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado. Uberlândia-MG. (Em fase final de redação).
- [9] ALTERNATIVE Transients Program (APT) Rule Book. Julho de 1987.

- [10] SANTILHO, F.P. **“Proposta, Modelagem e Validação de uma Nova Concepção de Regulado Eletromagnético Através do Reforço Sério de Tensão”**. Universidade Federal de Uberlândia, Tese de Doutorado. Uberlândia-MG.