



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ARTHUR WILLIAMS RAMOS DANTAS

ALOCAÇÃO ÓTIMA PARA REGULADOR DE TENSÃO

Campina Grande, Paraíba.
Novembro de 2011

ARTHUR WILLIAMS RAMOS DANTAS

ALOCAÇÃO ÓTIMA PARA REGULADOR DE TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Qualidade da energia elétrica.

Orientador:

Professor Benemar Alencar

Campina Grande, Paraíba.

Novembro de 2011

ARTHUR WILLIAMS RAMOS DANTAS

ALOCAÇÃO ÓTIMA PARA REGULADOR DE TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Qualidade da energia elétrica

Aprovado em / /

Prof. Benemar Alencar de Souza, D.Sc, UFCG
Orientador

Prof^ª. Núbia S.D. Brito, D.Sc, UFCG
Componente da banca

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir este trabalho.

Agradeço ao meu pai e minha mãe, Fernando e Edileuza, por ter se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

RESUMO

A nova regulamentação do setor elétrico tem exigido das concessionárias maior eficiência e qualidade, tanto em termos de continuidade como, da conformidade da energia fornecida. A qualidade, eficiência e vida útil dos aparelhos elétricos dependem diretamente da qualidade da energia fornecida. Além do funcionamento dos equipamentos, o fornecimento da energia, dentro dos limites adequados, é necessário para o desenvolvimento econômico das regiões atendidas.

Desse contexto, as concessionárias de energia investem em melhorias no sistema. Neste trabalho de conclusão de curso é apresentado um estudo para alocação e ajuste ótimo de reguladores de tensão em sistemas de distribuição, com o objetivo principal de proporcionar uma melhoria do nível de tensão entregue ao consumidor final, e redução das perdas e conseqüentemente redução dos custos das concessionárias.

Palavras-chave: Sistema de Distribuição de Energia, Regulador de Tensão, Níveis de Tensão.

ABSTRACT

New electric sector regulations imposed by the National Agency of Electric Energy-ANEEL, has requested a utilities' efficiency and quality both in terms of continuity as the compliance of the energy supplied. The quality, efficiency and service life of electrical appliances directly depend on the quality of energy supplied. In addition to the operation of equipment, supply of energy within the proper limits is necessary for the economic development of the regions served.

Given these factors, in order to improve quality and ensure compliance of the voltage levels along the distribution networks, utilities invest in energy improvements in the system. Carrying this work of completing a study course is presented to allocate and set optimum voltage regulators in distribution systems, with the main objective to provide an improved level of voltage delivered to final consumers and reducing losses and consequently reducing the costs of utilities

Keywords: Power Distribution System, Voltage Regulator, Voltage Levels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura 1: Classificação normalizada da tensão de atendimento.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2: Disposição dos isoladores na tampa do regulador.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3: Esquemático do RT autoboster configurado como elevador.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4: Esquemático do RT autoboster configurado como abaixador.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5: Regulador de tensão - 32 Degraus Tipo A.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6: Regulador de tensão - 32 Degraus tipo B.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 7: Diagrama do RT com a chave inversora.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8: Diagrama esquemático do RT.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9: Ajuste da Largura de Banda.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 10: Ajuste de temporização.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 11: Compensador de Queda de Tensão.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12: Diagrama com Fluxo de Potência invertível.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 13: Diagrama Simplificado do RT ligado a uma linha.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 14: Regulador de tensão em estrela aterrado.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15: Diagrama fasorial para regulação a 10%.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 16: Ligação em delta fechado a 15 %.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17: Diagrama fasorial para regulação máxima.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 18: Conexão em Delta Aberto.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19: Diagrama fasorial da ligação em Delta Aberto.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20: Componente série de um alimentador </i>	<i>36</i>
<i>Figura 21: Esquema da linha de transmissão ou distribuição.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 22: Modelo Simplificado da linha de distribuição.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 23: Modelo adotado nesse trabalho.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 24: (a) Circuito equivalente do regulador de tensão tipo B com a chave na posição de elevar taps. (b) e o circuito equivalente do autotransformador.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 25: Alimentador da subestação de Jericó - Pb.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 26: Alimentador com identificação nas barras.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 27: Dados específicos do alimentador.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 28: Dados específicos do alimentador.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 29: Distribuição da tensão no alimentador.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 30: Perfil de tensão do alimentador com apenas um regulador instalado.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 31: Possível local de instalação do RT levando em consideração o aumento da carga.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 32: Possíveis locais de instalação dos bancos de reguladores de tensão.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 33: Curva de carga.....</i>	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Tensões nominais padronizadas entre 1 e 69 kV.</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 2: Correspondência entre as nomenclaturas de buchas entre ABNT e ANSI. ...</i>	<i>19</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. JUSTIFICATIVA	12
3. MOTIVAÇÃO.....	13
4. REGULAÇÃO DE TENSÃO	14
4.1 INTRODUÇÃO	14
4.1.1 Resolução N° 505 da ANEEL	15
4.1.1.1 Níveis de tensão.....	15
4.1.1.2 Indicadores que quantificam a Violação dos Limites de Tensão	16
5. REGULADOR DE TENSÃO	18
5.1 Tipos de reguladores de tensão	19
5.1.1 Regulador de Tensão Autobooster.....	19
5.1.2 Line-Drop Compensation - LDC	20
5.1.3 32 Degraus.....	20
5.2 Sistema de controle.....	23
5.2.1 Nível de tensão	24
5.2.2 Insensibilidade (Bandwidth).....	25
5.2.3 Temporização	26
5.2.4 Compensação de Queda de Linha (LDC)	27
5.2.5 Operação em Fluxo Inverso de Potência	28
5.3 Conexões Típicas para Reguladores de Tensão	30
5.3.1 Conexão em Estrela Aterrado	31
5.3.2 Conexão em Delta Fechado	32
5.3.3 Conexão em Delta Aberto	34
6. Fluxo de carga Trifásico.....	35
6.1 Modelagem da linha.....	36
6.2 Modelagem das cargas	38

6.2.1	Modelo de Carga para Potência Ativa e Reativa Constante	39
6.2.2	Modelo para Impedância Constante	39
6.2.3	Modelo de Corrente Constante	40
6.2.4	Modelo ZIP.....	40
6.2.5	Modelagem do regulador de tensão	40
7.	Estudo de caso	44
7.1	Aplicações a Sistemas Reais	44
7.2	Alocação em Sistemas Reais.....	50
8.	Conclusão	55
8.1	Sugestões de trabalhos Futuros	55
9.	Referências Bibliográficas.....	56

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos a energia transformou-se em um produto essencial para o desenvolvimento humano, possibilitando avanços tecnológicos que contribuíram para o bem estar das pessoas. Até a década de noventa, o serviço relacionado à produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica era provido por empresas de Caráter estatal e monopolista. Com o início da reestruturação mundial do setor elétrico, foi imposta a necessidade de tratar a energia como um produto associado a serviços para prover a sua entrega aos consumidores com requisitos de qualidade, continuidade e segurança, sujeita a regras de mercado e de investimentos privados. Isso tornou imperativa a criação de novos paradigmas e regras para o funcionamento do setor relacionado à chamada indústria de energia elétrica. Em decorrência disso, o Setor Elétrico Brasileiro viu-se submetido a um acelerado ritmo de mudanças de estrutura e processos nos diversos segmentos da sua indústria de energia elétrica.

As alterações necessárias para adequar o setor elétrico a esta nova realidade, principalmente representado pela imposição de leis e normas de regulação bastante exigentes, imprimiram uma velocidade de mudanças que, muitas vezes, terminaram por comprometer a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Para agir neste sentido, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, a qual passou a ser a responsável pela legislação e fiscalização das empresas de energia e pela relação entre os consumidores e as concessionárias.

Dentre os vários aspectos que são regulados e devem ser fiscalizados pela ANEEL está o do nível e qualidade da tensão disponibilizada aos consumidores. Este quesito é regulado pela Resolução ANEEL N° 505 de novembro de 2001, a qual estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente.

Para assegurar essa conformidade dos níveis de tensão nos diversos pontos da rede de distribuição, é essencial a utilização de dispositivos que permitam realizar um controle efetivo da tensão, da potência reativa do sistema e do fator de potência. Os equipamentos utilizados para realizar este controle são os Reguladores de Tensão – RTs, os transformadores com mudança de tap, sem e sob carga, localizados nas subestações e na rede de distribuição, os capacitores paralelos e os capacitores série, na

forma de Banco de Capacitores – BC. Para que esta tarefa de regulação de tensão seja realizada de maneira eficaz, ela é dividida em dois subproblemas:

- a. Planejamento, no qual se busca determinar o melhor local de instalação, o Dimensionamento e o ajuste dos equipamentos, levando em consideração os diversos critérios de desempenho;
- b. Operação, o qual trata da coordenação da atuação destes dispositivos após a sua alocação.

No entanto, devido à complexidade da rede e dos alimentadores de distribuição, a escolha adequada dos tipos de dispositivos e de suas localizações e ajustes não é tarefa trivial, pois o problema é de análise combinatorial, variáveis inteiro-mista e restrições não lineares. Dessa forma, torna-se importante desenvolver ferramentas que deem suporte à tomada de decisão do planejador para que ele possa fazer a aplicação mais adequada possível dos recursos destinados à melhoria do sistema de distribuição.

Portanto, este trabalho está focado no subproblema de planejamento, ou seja, na determinação dos melhores locais para a instalação dos reguladores de tensão (RTs) ao longo dos alimentadores, bem como seus dimensionamentos e ajustes.

2. JUSTIFICATIVA

Para um melhor aproveitamento da energia elétrica, entre outros equipamentos, os RTs podem ser utilizados para reduzir as perdas de energia e manter a tensão elétrica dentro dos limites aceitáveis considerando o custo destes equipamentos com relação às outras alternativas possíveis, como o recondutoramento ou a reconfiguração da rede.

Os benefícios fornecidos pela compensação dependem da forma com que os equipamentos são inseridos no sistema, em outras palavras, na localização, capacidade e ajustes dos mesmos. Estas decisões implicam tarefas complexas, pois se lida com valores e dimensões reais de um sistema de distribuição de energia elétrica, fazendo com que as decisões sejam tomadas com base na experiência, através da tentativa e erro, e no conhecimento de especialistas, o que pode não gerar o melhor resultado esperado.

A fim de contornar o empirismo com que muitas concessionárias alocam seus dispositivos de compensação de reativo e de tensão, o trabalho pretende apresentar uma

metodologia de forma a minimizar, entre outras coisas, as perdas elétricas e os desvios de tensão nas redes de distribuição.

3. MOTIVAÇÃO

Com a modernização do modelo energético brasileiro, mudanças têm ocorrido nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Com o novo modelo do setor elétrico brasileiro, o mercado se tornou mais competitivo, fazendo com que pequenas empresas distribuidoras comecem a se preocupar com a qualidade do serviço prestado.

Como forma de competir, as empresas necessitam diminuir o custo, e entre as muitas formas existentes, as formas abordadas para diminuí-lo é a minimização das perdas, das quedas de tensão e da violação dos limites de tensão, tendo em vista ainda, o menor custo na compra de equipamentos.

Além da motivação exposta anteriormente, outras contribuíram para a proposta deste trabalho:

- a. Dar continuidade aos estudos na área de compensação de reativos e regulação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica.
- b. Aprofundar os estudos relativos à regulação da tensão em redes de distribuição com a inclusão dos RTs, junto com banco de capacitores (BCs);
- c. Estudar em profundidade as diferenças que existem nos locais de instalação dos e RTs quando os objetivos são minimizar as perdas elétricas, as quedas e as violações do limites de tensão, para mantê-la dentro de limites preestabelecidos;
- d. Ter em vista o menor custo do investimento na compra de equipamentos para minimização dos objetivos técnicos.

4. REGULAÇÃO DE TENSÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Com relação aos níveis de tensão de atendimento, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL determinou por intermédio da Resolução N° 505, de 26 de novembro de 2001, que o sistema de elétrico deve atender a certos níveis de tensão preestabelecidos, sendo estes fiscalizados e sujeitos a multas.

Para que o sistema de distribuição de energia elétrica possa operar continuamente dentro dos limites definidos pela Resolução, são necessários estudos técnicos por parte das concessionárias de distribuição para identificar soluções economicamente viáveis para solucionar os problemas nos níveis de tensão dos alimentadores. Como a demanda não é constante, é necessário que tais estudos técnicos levem em conta a variação da carga ao longo do tempo (horas do dia e dias da semana).

De um modo geral, os problemas de tensão relacionados com o regime permanente dos alimentadores de distribuição pode ser solucionados através de diversas alternativas, dentre as quais destacam-se:

- a. A transferência da carga de um alimentador mais carregado para outros alimentadores menos carregados;
- b. O uso de Banco de Capacitores – BC para melhoria do Fator de Potência;
- c. Instalação de Regulador de Tensão – RT;
- d. Troca de bitola do alimentador;
- e. Construção de um novo alimentador;
- f. Mudança de tensão primária de alimentação e a construção de nova subestação.

Com a implantação de uma ou mais dessas alternativas é possível obter melhorias nas perdas elétricas do sistema e como consequência uma redução dos custos para a concessionária.

Diversos fatores estão relacionados com a variação de tensão e seu controle em sistemas de distribuição para isso, é necessário definir os indicadores de atendimento que quantificam a violação para o cliente.

4.1.1 RESOLUÇÃO N° 505 DA ANEEL

A Resolução da ANEEL de 26 de novembro de 2001 (ANNEE,2001), entre outras coisas, define tanto os níveis de tensão de atendimento quanto os indicadores de violação dos limites de tensão.

4.1.1.1 NÍVEIS DE TENSÃO

Os valores permitidos nos alimentadores de tensão para as variações de tensão em regime permanente são mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Tensões nominais padronizadas entre 1 e 69 kV.

Classificação da Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Contratada (TCO)
Adequada	$0,93 \cdot TCO \leq TL \leq 1,05 \cdot TCO$
Precária	$0,90 \cdot TCO \leq TL < 0,93 \cdot TCO$
Crítica	$TL < 0,90 \cdot TCO$ ou $TL \geq 1,05 \cdot TCO$

Analisando a tabela 1 os valores estipulados pela ANEEL deve se situar entre 93% e 105% da tensão nominal de operação do sistema no ponto de entrega. Deve-se observar que as pequenas variações de tensões como consequência do carregamento do sistema de distribuição ao longo das horas, do dia, dias da semana e das estações do anos não são consideradas. A figura 1 mostra a classificação da tensão de atendimento em nível de distribuição em valores normalizados,

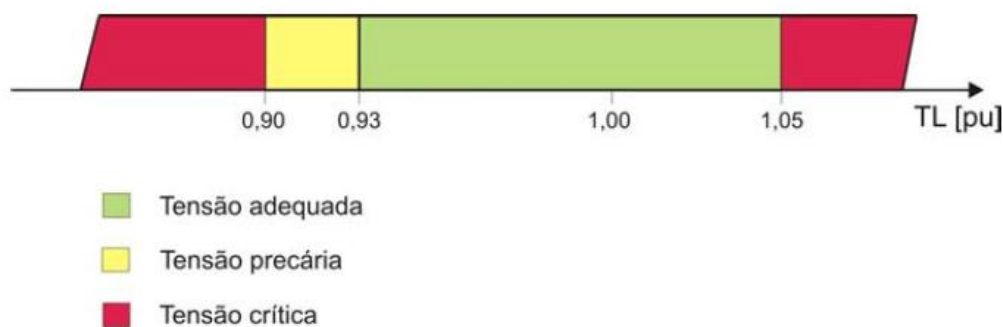


Figura 1: Classificação normalizada da tensão de atendimento.

4.1.1.2 INDICADORES QUE QUANTIFICAM A VIOLAÇÃO DOS LIMITES DE TENSÃO

A resolução N° 505 / 2001 da ANEEL define quatro indicadores que quantificam a violação dos limites de tensão adequados observados nos consumidores:

- a) Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária – DPR ; indicador individual referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas de tensão precárias, no período de observação definido, expresso em percentual;
- b) Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária – DRPM: percentual máximo de tempo admissível para as leituras de tensão, nas faixas de tensão precária, no período de observação definido;
- c) Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica - DRC: indicador individual referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas de tensão críticas, no período de observação definido em percentual;
- d) Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica – DRCM: percentual máximo de tempo admissível para as leituras de tensão, nas faixas de tensão críticas, no período de observação definido.

A resolução estabelece valores de DRPM e DRCM, sendo respectivamente 3% e 0,5 %, válidos a partir de 2007, e ainda que a concessionária deve apurar, quando medições oriundas por reclamação os indicadores individuais DRP E DRC, em % que são determinados a partir das seguintes equações:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Onde,

nlp – número de leituras situadas nas faixas precárias;

nlc – número de leituras situadas nas faixas críticas;

1008 – número de leituras válidas a cada 10 (dez) minutos no período de observação.

Do mesmo modo, a resolução apresenta a forma pela qual a ANEEL calcula o indicador coletivo do Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica – ICC, em

%, a partir dos dados das medições individuais e das medidas amostras, conforme a seguinte equação:

$$ICC = \frac{CC}{CA} \cdot 100 \quad (4.3)$$

CC - total de unidades consumidoras com leituras na faixa crítica;

CA - total mensal de unidades consumidoras objeto de medição.

Com a imposição desses limites, a ANEEL obriga as concessionárias a disponibilizem um serviço de qualidade. Para atender todas as exigências são necessários estudos detalhados das alternativas de correção de tensão .

As alternativas dos equipamentos utilizados para o controle de tensão são os reguladores de tensão, bancos de capacitores, transformadores com mudança de *taps* em subestações. Dentre as diversas possibilidades, será analisado neste trabalho o uso de reguladores de tensão.

5. REGULADOR DE TENSÃO

O Regulador de Tensão – RT é um equipamento destinado a manter um determinado nível de tensão na rede de distribuição urbana ou rural quando esta fica submetida a uma variação de tensão fora dos limites especificados.

É importante salientar que o RT é um dos equipamentos mais úteis para as concessionárias de energia elétrica que objetivam manter boa qualidade de fornecimento de energia elétrica aos seus consumidores na forma de tensão com razoável estabilidade (Resener, H.Salim, & S.Bretas, Alocação e Ajuste Ótimo de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição, 2010).

Sabe-se que o aumento de 1% na tensão de um consumidor resulta num acréscimo de faturamento de cerca de 1,5% (ALVES, 2005). Desta forma, torna-se economicamente interessante para as concessionárias resolver os problemas de subtensão do sistema de distribuição de energia de forma contínua em todas as horas do dia e isto pode ser realizado com auxílio dos RTs.

Um RT possui três terminais: fonte (F), carga (C) e fonte-carga (FC). As buchas são identificadas conforme nomenclatura descrita na tabela 2 e de acordo com o padrão ABNT.

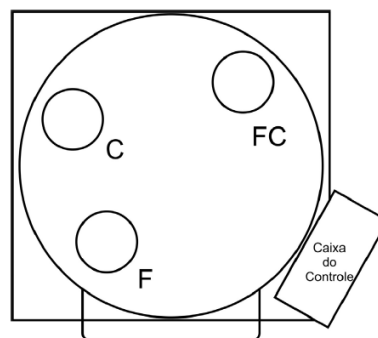


Figura 2: Disposição dos isoladores na tampa do regulador.

Isoladores	Nomenclatura	
	ABNT	ANSI
Fonte	“F”	“S”
Carga	“C”	“L”
Neutro	“FC”	“SL”

Tabela 2: Correspondência entre as nomenclaturas de buchas entre ABNT e ANSI.

5.1 TIPOS DE REGULADORES DE TENSÃO

Os reguladores de tensão são auto-transformadores com ajuste automático de *taps* sob carga. É semelhante a uma transformador convencional de dois enrolamentos conectados eletricamente em um determinado ponto. Possui um circuito de controle que analisa a tensão no lado fonte e sempre que a tensão violar os limites pré-determinados o comutação faz as alterações dos *taps*. Existem na literatura três tipos de RTs: Auto booster, Line-Drop Compensation– LDC e 32 Degraus (Alves, 2005).

5.1.1 REGULADOR DE TENSÃO AUTOBOOSTER

São Equipamentos monofásicos, porém simples, possui 4 *taps* de 1,5 % a 2,5% cada, totalizando uma capacidade de 6 % a 10%. Conforme a figura 3 o regulador de tensão está configurado como elevador de tensão, conforme a chave na posição R (Raise- Levantar), sendo que o diagrama à direita é uma simplificação do diagrama da esquerda.

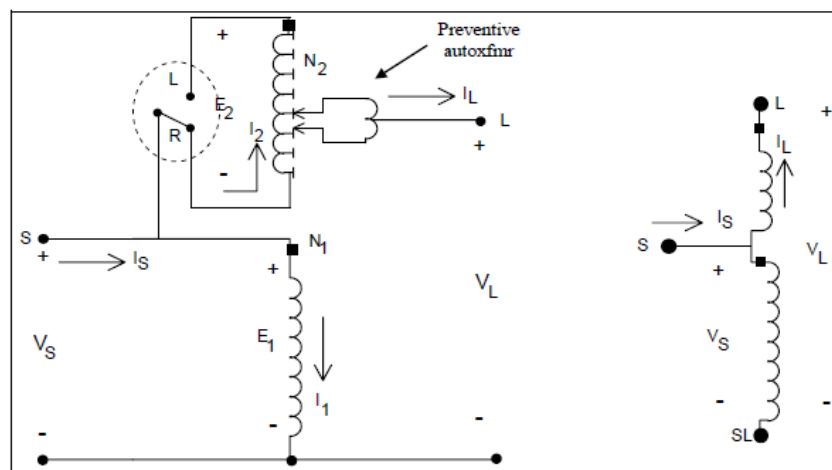


Figura 3: Esquemático do RT auto booster configurado como elevador.

Já na figura 4 o regulador de tensão está configurado como abaixador de tensão, conforme a chave na posição L (lower – abaixador).

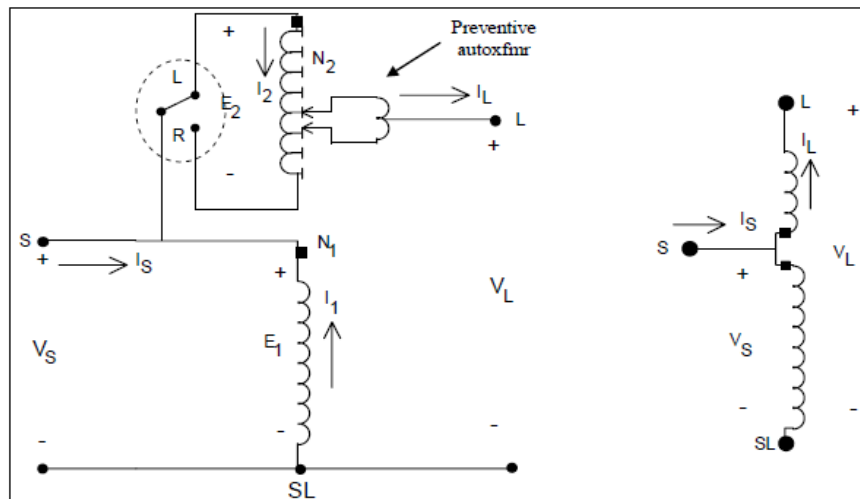


Figura 4: Esquemático do RT auto booster configurado como abaixador.

Conforme demonstrado nas figuras 3 e 4 o regulador auto booster não tem a capacidade de regulação de elevar e abaixar tensão consecutivamente, ou só eleva ou só abaixa a tensão. Apresenta baixo custo, são normalmente usados em redes de distribuição rurais com densidade de carga baixa e sendo mais usado como elevador de tensão em auxílio ao regulador de tensão de 32 degraus. Convém salientar que esses reguladores de tensão estão em desuso atualmente.

5.1.2 LINE-DROP COMPENSATION - LDC

Já o RT do tipo LDC permite controlar a tensão em pontos remotos do alimentador a jusante no ramal de ligação. Estes equipamentos possuem um circuito composto por resistências e reatâncias ajustáveis de modo que simulem os valores de resistência e reatância entre os pontos de instalação do regulador e aquele ponto onde se pretende regular a tensão.

5.1.3 32 DEGRAUS

O RT de 32 Degraus é o mais usado nas concessionárias de energia. Pode-se elevar ou reduzir o valor da tensão nos seus terminais de entrada. Essa variação é dividida em até 32 *taps* (16 *taps* para abaixar e 16 *taps* para elevar a tensão), conseguindo com isto uma variação de $\pm 0,625\%$ em cada *tap*, totalizando uma variação

na tensão em $\pm 10\%$ da tensão de alimentação. Os RTs por degraus são classificados em dois tipos, de acordo com a norma NBR 11809 /92 conforme segue:

- *Tipo A:*

Neste tipo de regulador, o circuito primário está diretamente ligado ao enrolamento paralelo que, por sua vez, está conectado, através de *taps*, ao circuito regulado, como ilustra a Figura 5. É chamado de regulador com excitação variável, uma vez que o enrolamento de excitação (ou enrolamento paralelo) sente qualquer variação de tensão da fonte. A regulação do RT Tipo A é de $+9,1\%$ até $-11,1\%$, e o mesmo possui dois transformadores de potencial (TPs), um para o relé e outro para o motor do comutador.

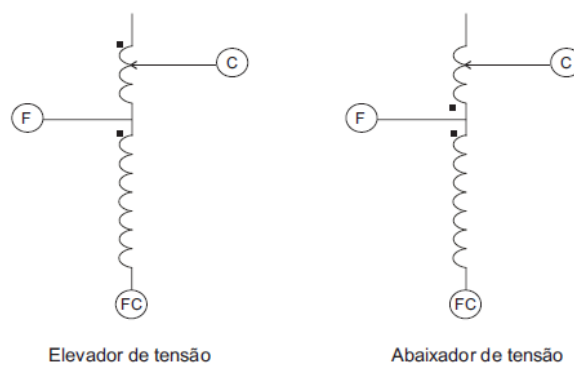


Figura 5: Regulador de tensão - 32 Degraus Tipo A.

- *Tipo B*

Neste caso, o circuito primário está conectado, através de taps, ao enrolamento série do regulador. O enrolamento série está conectado ao enrolamento paralelo que, por sua vez, está diretamente conectado ao circuito regulado, como ilustra a Figura 3. É chamado de regulador de excitação constante, uma vez que o enrolamento de excitação localiza-se no lado de carga, não sentindo variações de tensão da fonte. A regulação do Tipo B é de $\pm 10\%$ e existe apenas um TP para alimentar o relé e o motor do comutador.

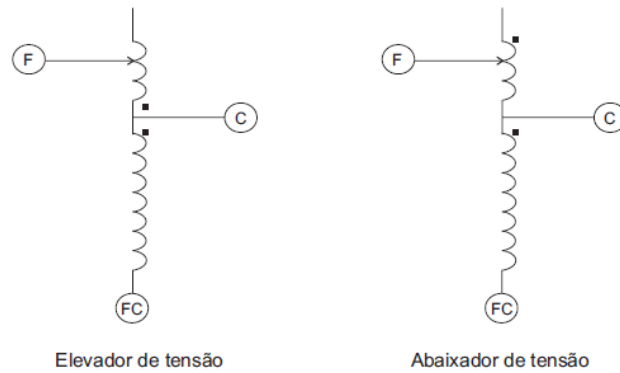


Figura 6: Regulador de tensão - 32 Degraus tipo B.

É a polaridade das bobinas que determina a ligação elétrica para o autotransformador funcionar como abaixador e elevador. Portanto, existe uma chave inversora de polaridade no circuito, para possibilitar que o autotransformador funcione como elevador e abaixador a figura 7 ilustra o diagrama esquemático do circuito.

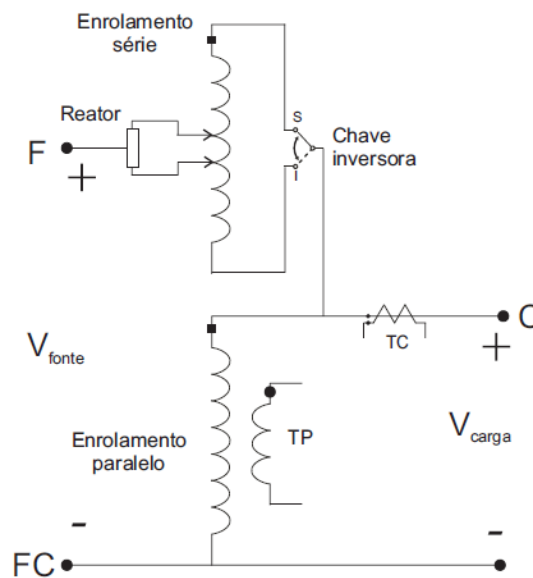


Figura 7: Diagrama do RT com a chave inversora.

Para que não seja necessário interromper o circuito durante a comutação de *tap*, adiciona-se o reator, de forma que, enquanto uma das extremidades do reator segue para outro *tap*, a alimentação da carga se faz através da outra extremidade do reator. Ao ser aplicada uma determinada tensão sobre os terminais do reator, circula uma corrente que deve ser limitada para que não ocorra o desgaste excessivo dos contatos do comutador e a vida útil dos mesmos seja preservada (Toshiba, MANUAL DE INSTRUÇÕES PARA REGULADOR DE TENSÃO MONOFÁSICO, 2008)

5.2 SISTEMA DE CONTROLE

Como visto anteriormente um regulador de 32 degraus é um autotransformador que regula automaticamente a tensão de saída, e para isto, é utilizada uma unidade de controle para realização da operação de comando para subir e baixar os *taps*.

A figura 8 mostra o diagrama de esquemático dos principais componentes do regulador de tensão exemplificando a operação do controle de tensão.

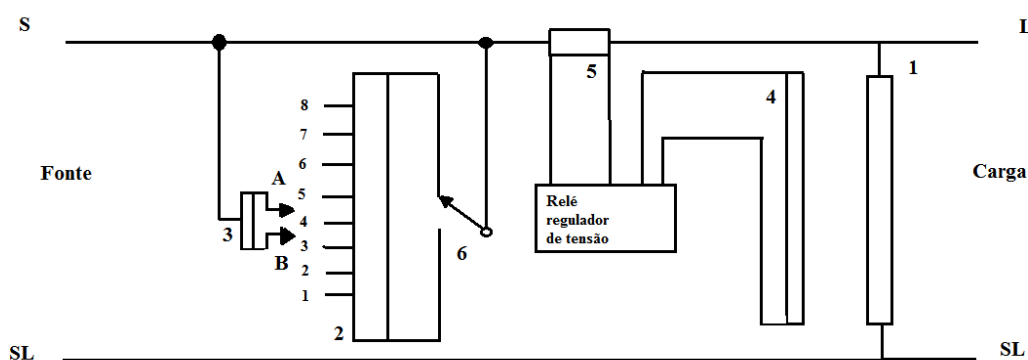


Figura 8: Diagrama esquemático do RT.

O enrolamento 1, chamado de enrolamento de excitação induz uma tensão no enrolamento 2, também conhecido por enrolamento de tapes ou regulação. O Transformador de potencial TP4 instalado do lado da carga tem duas funções: envia a tensão proporcional para o Controle do regulador de tensão e fornecer a tensão para o circuito do comutador para posiciona os terminais A e B do reator 3 na posição adequada para manter a tensão na carga constante. A chave inversora de polaridade mostrada em 6 determinará se o regulador elevará ou diminuirá a tensão na carga, sendo que seu controle e feito pelo Controle regulador. O transformador de corrente (TC5) instalado do lado da carga enviará ao Controle regulador um sinal de carregamento da linha possibilitando a compensação de quedas de tensão que ocorram no sistema.

Antes de um RT entrar em operação em uma linha de distribuição é necessário definir alguns ajustes para o perfeito funcionamento e obter o máximo de vantagens, pois ajustes incorretos do controle resultam em desempenho insatisfatório levando a níveis de tensão indesejáveis infringindo os normativos da ANEEL.

Os ajustes normalmente feitos no controle e os mais importantes são: Nível de Tensão ou Tensão de Referência, Largura de Banda, Temporização e Compensação de Queda de linha. Existem outros ajustes menos importantes que são: Limitador de Tensão Mínimo e Máximo, Tensão de Referência para Fluxo Inverso, Temporização do Fluxo inverso. Eles são tratados separadamente, mas se interligam e se afetam mutuamente

5.2.1 NÍVEL DE TENSÃO

O transformador de potencial instalado no lado carga fornece uma amostra da tensão para o controle do regulador e o ajuste do nível de tensão é feito na base da tensão que o controle eletrônico responde.

De início é necessário analisar para qual o Nível de Tensão que se pretende manter ao longo do alimentador, referenciado nos normativos da ANEEL ou baseado na necessidade de um sistema específico.

Na grande maioria dos reguladores em operação nas concessionárias de energia do nordeste a relação do TP é de 115, ou seja, quando a tensão do secundário do TP for de 120 V a tensão no primário é de 13800 V fase - fase. Assim sendo a sua tensão nominal do regulador.

A atuação do Controle do regulador de tensão se dá quando a tensão nominal do sistema de distribuição esta diferente da tensão nominal do regulador de tensão pré ajustada. Supondo um banco de reguladores cuja tensão nominal fosse entre fases de 13,8 kV e fosse preciso ligá-lo em delta fechado com tensão de linha de 14,4 kV. Como a relação do TP é:

$$N_{TP} = \frac{13800}{120} = 115$$

Pode-se modificar o valor da tensão de referência do controle para:

$$V_{rf} = \frac{14400}{115} = 125 \text{ V}$$

Modificando a tensão de referência no controle para 125 teríamos no lado carga do regulador uma tensão de 13800 V.

Outro exemplo, supomos que temos um transformador de distribuição de 12800 – 380 V, ou seja, de relação de transformação de 33,68. Tomando essa tensão na linha (12800 V) e dividindo pela relação do TP do RT, 12800/115, tem-se o nível de tensão a ser ajustado no controle, ou seja, 111,3 V. Assim para a carga leve, deve-se ajustar o nível de tensão no controle do regulador em 111 para manter em cada consumidor a tensão de 380 V.

Normalmente os reguladores de tensão possuem Nível de Tensão ajustável entre 105 a 135 V.

5.2.2 INSENSIBILIDADE (BANDWIDTH)

O ajuste da insensibilidade determina a faixa de precisão, a partir da Tensão de Referência (Nível de tensão - V_{ref}), dentro da qual o regulador considera que não há necessidade de comutação.

O ajuste da insensibilidade pequena proporcionará um melhor Nível de Tensão por outro lado, provocará mais comutações. Normalmente, os reguladores são fornecidos com largura de faixa de 1,5V a 6V, ou $\pm 0,6\%$ a 6% da Tensão de Referência. A figura 9 mostra um exemplo de insensibilidade a 2,5 % em que a tensão de referência é ajustada para 120V.

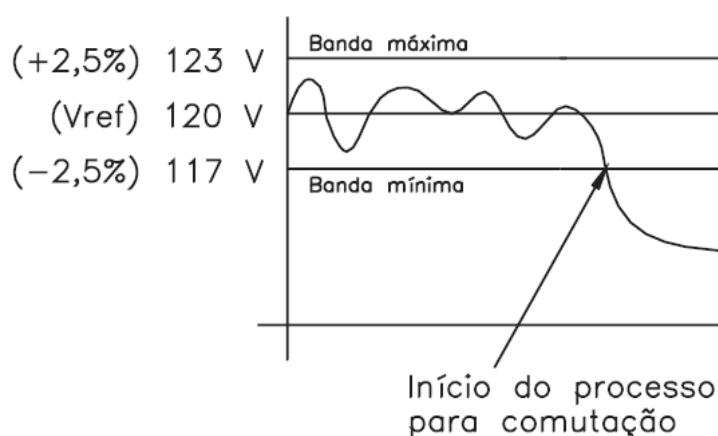


Figura 9: Ajuste da Largura de Banda.

Isso quer dizer que na faixa entre 117 a 123 V, não há comutação para alteração dos *taps*. Dentro dessa faixa o controle não permite nenhum comando. Saindo da faixa da largura de banda, o Controle inicia-se a contagem do temporizador para da início a comutação.

5.2.3 TEMPORIZAÇÃO

A finalidade da temporização é evitar comutações desnecessárias em função de variações rápidas de tensão ou transitórios, também deve ser suficiente para que baixas tensões não provoquem mal funcionamento de aparelhos e reclamações de consumidores.

Sem a temporização ocorreria um número excessivo de comutações, provocando um desgaste mecânico acelerado do comutador. Dessa forma a correção de tensão se dá somente para variações cujas intensidades caem fora da largura de banda dos valores ajustados pela tensão de referência, e por um período maior que o estipulado pela temporização. A figura 10 exemplifica o uso do temporizador.

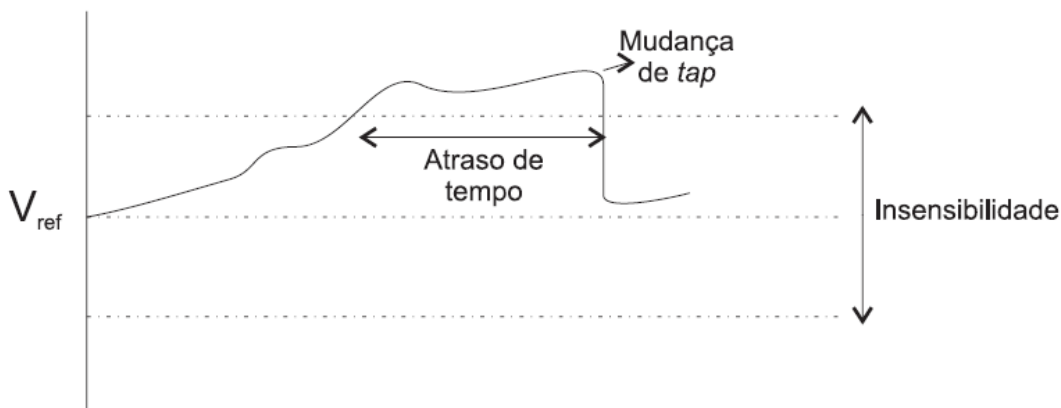


Figura 10: Ajuste de temporização.

A outra finalidade também importante é a coordenação entre dois ou mais banco de reguladores de tensão ligados em cascatas, o mais próximo à subestação deverá ter uma valor de temporização menor, ou seja, deve responder mais rápido para evitar um número de operações de comutação excessivas dos demais reguladores.

Outro ponto importante é que o temporizador somente temporiza a primeira mudança de derivações. Se mais de uma operação for requerida para corrigir a tensão na linha, o controle funcionará até que o nível de tensão esteja dentro do ajustado. Em outras palavras, ele não temporiza cada mudança de *tap* que acontece (Toshiba, 2008).

Normalmente os RTs possuem Temporização ajustável em que varia de 30 a 90 segundos, sendo que, usa-se 60 segundos de Temporização para banco de reguladores

que não estejam em série. Para banco de reguladores em cascata usa-se a temporização de 30 segundos para o banco mais perto da fonte e 60 segundos para os demais bancos.

5.2.4 COMPENSAÇÃO DE QUEDA DE LINHA (LDC)

O compensador de queda de tensão de linha incorporado – LDC (*line-drop compensation*) é um controle que simula a impedância da linha desde o RT até o ponto onde se deseja que a tensão esteja regulada, minimizando as oscilações de tensão que a linha experimenta devido às variações na corrente de carga.

O secundário do transformador de potencial – TP, que fornece a amostra da tensão do lado de carga é colocado em série com um circuito cuja resistência e a indutância é a imagem da resistência e indutância da linha. Quando o regulador é submetido à carga, circula no transformador de corrente – TC uma corrente proporcional ao carregamento e conseqüentemente, aparece uma queda de tensão em R e X proporcional à queda de tensão da linha, conforme mostra a figura 11.

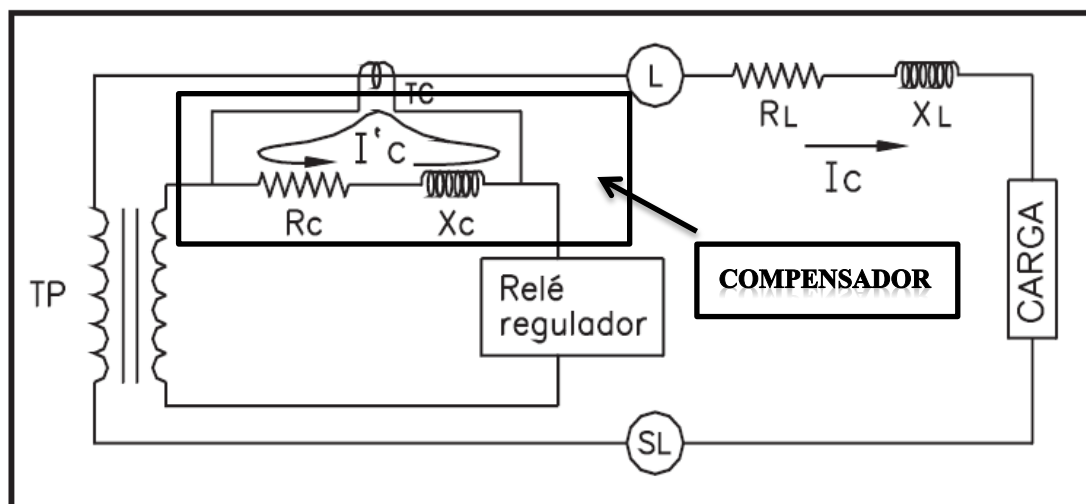


Figura 11: Compensador de Queda de Tensão.

Como as cargas em um sistema de distribuição podem ser concentradas e/ou distribuídas ao longo do alimentador, a resistência R_c e a reatância X_c são escolhidos de forma que o máximo ganho de tensão do regulador seja obtido durante o período de carga máxima e uma dada tensão seja mantida durante carregamento leve. Dois dos principais métodos para se obter os ajustes do LDC são:

- *Centro de carga:*

Nesse método os ajustes são feitos para regular a tensão em um determinado ponto a jusante do regulador. Normalmente são utilizados em sistemas onde a queda de tensão na linha é mais significativa, requerendo, portanto melhor precisão da compensação.

- *Faixa de Tensão:*

Os ajustes de R_c e X_c são escolhidos de forma que a tensão seja mantida dentro de uma faixa pré – determinada, entre carga leve e carga pesada. Os ajustes podem ou não ser proporcionais à impedância da linha de distribuição.

Independente do método utilizado, a tensão no primeiro consumidor após o RT é da máxima importância, pois ela nunca deve exceder o valor máximo selecionado, em qualquer tempo. Quando a Compensação de Queda na Linha é aplicada incorretamente, ou se a carga aumentar ultrapassando os ajustes de compensação, é possível que a tensão no primeiro consumidor seja levada a ultrapassar o valor máximo, resultando em danos aos equipamentos elétricos do consumidor. A Compensação de Queda na linha tem o efeito de aumentar a tensão no primeiro consumidor à medida que a corrente de carga aumenta através do TC do regulador. Se uma corrente superior da prevista passar pelo TC uma tensão também superior a prevista é fornecida ao primeiro consumidor.

5.2.5 OPERAÇÃO EM FLUXO INVERSO DE POTÊNCIA

Os reguladores de tensão são geralmente instalados em circuitos com fluxo de potência bidirecional, ou seja, o regulador passa a receber a tensão no lado “carga”. Quando da ocorrência deste fenômeno, o regulador terá um comportamento inadequado, podendo causar sobretensões ou subtensões no circuito ligado ao terminal fonte do regulador.

Suponha que a situação fosse conforme a figura 12, onde o RT está posicionado em uma linha de distribuição entre duas fontes independentes com cargas diferentes. Nessa situação o Fluxo de Potência pode seguir qualquer sentido para a esquerda ou direita dependendo apenas de qual fonte esteja operando na ocasião.

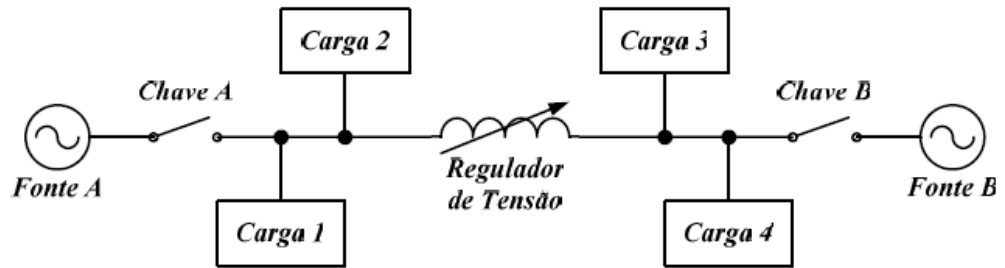


Figura 12: Diagrama com Fluxo de Potência invertível.

A figura 13 mostra um diagrama simplificado da ligação de um RT. Digamos que o Fluxo de Potência fosse da esquerda para a direita, que seria o fluxo normal para o modo como o RT é mostrado. Isso significaria, neste caso que somente a chave A da figura 12 estaria fechada e, portanto, as cargas estariam sendo alimentadas pela fonte A.

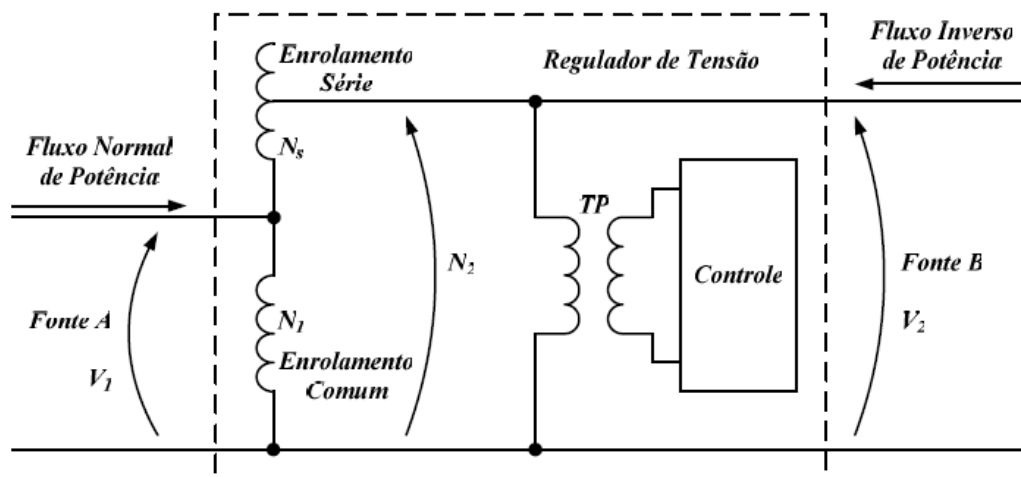


Figura 13: Diagrama Simplificado do RT ligado a uma linha.

Para esta situação, ou seja, quando o Fluxo de Potência for na direção normal, o TP é conectado através do lado da carga do RT e mede a tensão V_2 de saída do regulador. Sob condições normais de fluxo, com a tensão V_2 baixa, o TP sente esta tensão baixa e o controle opera introduzindo mais enrolamentos série N_s no circuito. Assim a tensão de saída aumenta e corrige a situação para a queda de tensão.

Suponha então que o fluxo de potência seja invertido, na figura 12 corresponde a chave B fechada e a chave A aberta. Nesse caso, o TP é conectado na entrada do RT e utilizaria, portanto, a tensão de entrada V_2 . Se a tensão V_2 for muito baixa o TP opera

adicionando mais enrolamentos série N_s no circuito, pois o regulador está para regulação normal para a fonte A.

Entretanto, observando-se a equação da relação de espiras de um transformador:

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$$

Se V_2 for baixo, o controle envia um sinal para o RT aumentar a tensão, elevando assim N_2 através do aumento de N_s . A mudança entre N_2 e V_2 faz com que V_1 e N_1 também sejam alterados para equilibrar a equação. Lembrando que N_1 permanece sempre constante, pois ele é o enrolamento de excitação, então se torna evidente que V_1 deve diminuir.

Desta forma, observando o diagrama da figura 13, podemos ver que se o RT estiver conectado para o fluxo normal e o fluxo for invertido, uma queda na tensão de entrada V_2 provoca uma queda de tensão de saída V_1 .

Dessa forma, para aplicar o RT em um circuito de fluxo variável, algumas mudanças devem ser feitas no regulador para que ele opere corretamente quando houvera inversão do fluxo. Estas mudanças são:

- Necessidade de algum circuito para detecção do fluxo inverso;
- O TP deve ser removido para o lado carga;
- Os fios do motor que faz a comutação deve ser invertido para mudar o sentido da rotação;
- Inverter a polaridade do Compensador de Queda de Linha.

Os RTs mais modernos já vêm com estas modificações incluídas, já para os RTs antigos instalados nas redes, são utilizadas outras técnicas como, por exemplo, um esquema de derivação manual ou um sistema caro e complicado de relés que requerem uma fiação entre os RTs.

5.3 CONEXÕES TÍPICAS PARA REGULADORES DE TENSÃO

Na prática, cada regulador de tensão regula sua própria fase nos sistemas monofásicos e trifásicos. Assim, teremos ligações que utilizam 2 ou 3 reguladores,

sendo que este conjunto é denominado Banco de Reguladores de Tensão. Cada regulador possui seu controle e circuito de comutação independente. As conexões típicas dos reguladores de tensão são descritas a seguir:

5.3.1 CONEXÃO EM ESTRELA ATERRADO

A estrutura da ligação para a configuração da conexão em estrela aterrado é apresentado na figura 14. Nessa configuração cada regulador regula a sua própria fase e a faixa de regulação chega a 10%. O diagrama fasorial para uma regulação de 10% é apresentado na figura 15, vejamos:

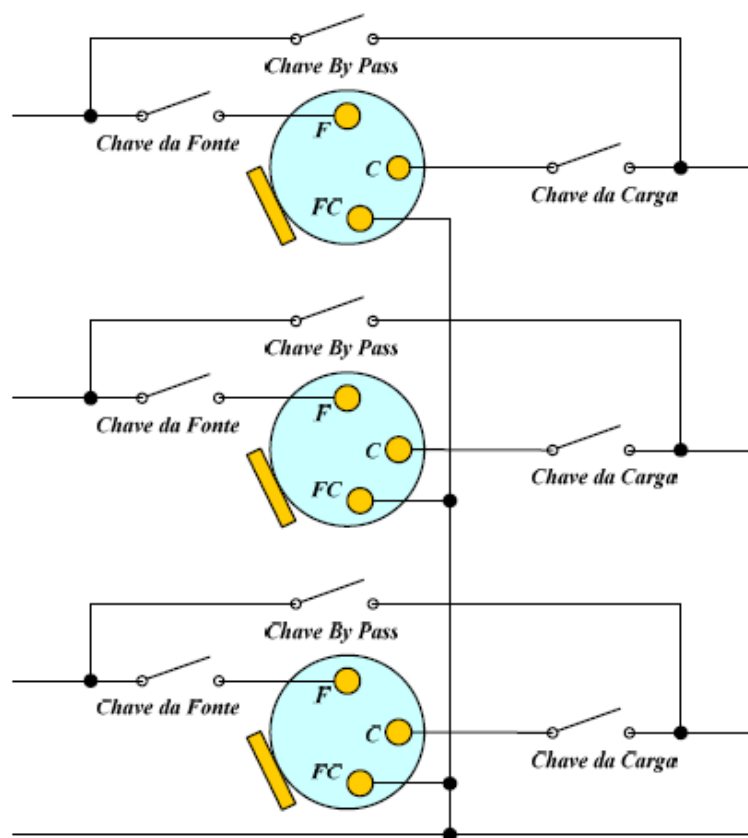


Figura 14: Regulador de tensão em estrela aterrado.

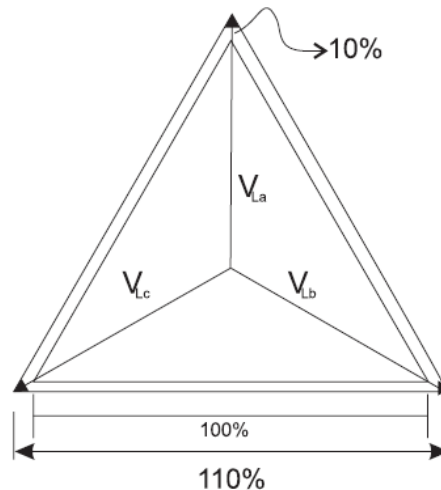


Figura 15: Diagrama fasorial para regulação a 10%.

Os reguladores monofásicos não podem ser operados em uma ligação com o neutro isolado, neutro do banco deve ser impreterivelmente conectado ao neutro do sistema, para que a corrente de neutro num possível desequilíbrio de carga do banco tenha caminho fechado para a terra e, portanto para fonte.

Caso a fonte seja em delta e o banco de reguladores em estrela, o neutro virtual da ligação estrela se deslocará, e o banco entrará numa série de avalanche de comutações levando para a posição máxima ou mínima os *taps* dos reguladores.

5.3.2 CONEXÃO EM DELTA FECHADO

A ligação de reguladores em delta fechado é apresentada na figura 16. Nesta ligação o terminal fonte-carga (FC) de um regulador está ligado ao terminal carga (C) da unidade adjacente. Na figura 17 é apresentado o diagrama fasorial para regulação máxima.

A ligação de três RTs em delta fechado proporciona $\pm 10\%$ de regulação na fase em que está conectado e mais $\pm 5\%$ na fase adjacente. Como são três reguladores conectados, o resultado será uma regulação de $\pm 15\%$ na tensão do banco.

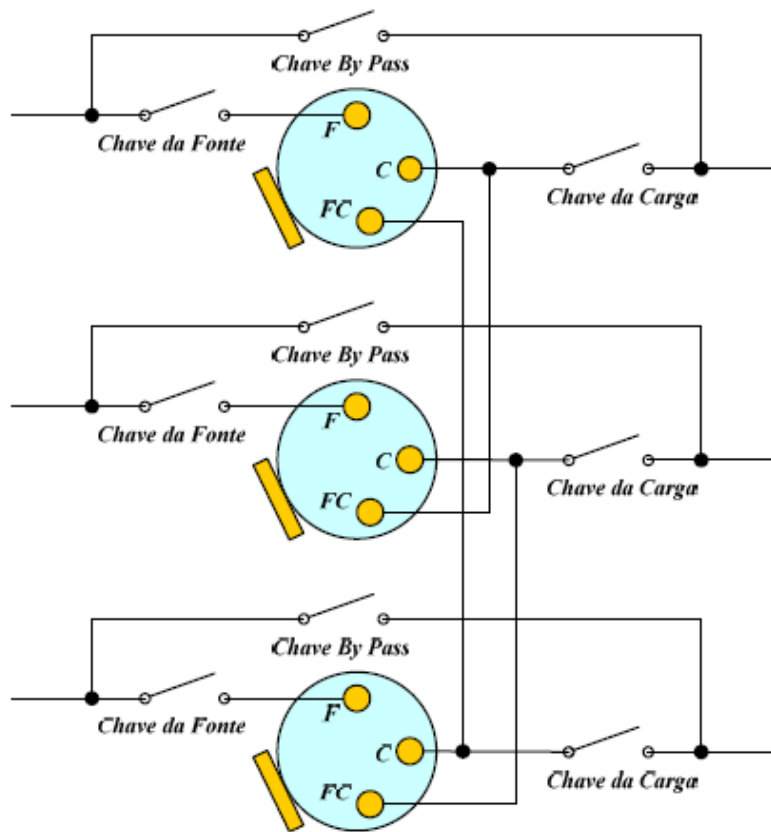


Figura 16: Ligação em delta fechado a 15 %.

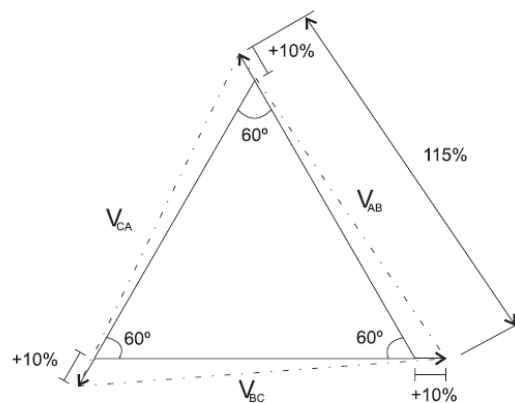


Figura 17: Diagrama fasorial para regulação máxima.

No caso da ligação delta, deve-se atentar para os ajustes do compensador de que da na linha, pois os TPs monitoram as tensões de linha. No caso de um fator de potência unitário da carga a corrente lida pelo TC está 30° defasada em relação à tensão de linha. A direção da defasagem depende das conexões dos reguladores, ou seja, das polaridades das bobinas. (COOPER, 1978)

5.3.3 CONEXÃO EM DELTA ABERTO

Essa configuração utiliza bancos de dois reguladores. A figura 18 mostra os reguladores conectados entre as fases AB e CB. Essa ligação é vantajosa quando se trata de ligação em cascata, porque economiza 1 regulador, recomenda-se utilizar 3 e no máximo 4 bancos de reguladores em cascata, devido à problemas de sobretensões no sistema.

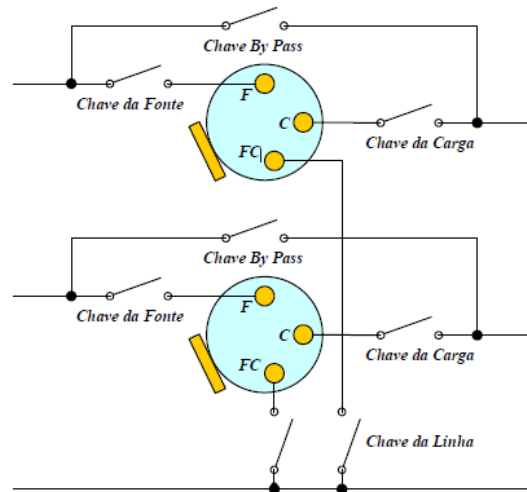


Figura 18: Conexão em Delta Aberto.

Na conexão em Delta Aberto cada RT proporciona uma regulação de $\pm 10\%$ na fase em que está conectado e provoca um aumento de $\pm 5\%$ na terceira fase. Com isto a terceira fase, também, regula $\pm 10\%$. Diagrama fasorial da ligação Delta Aberto é apresentado na figura a seguir:

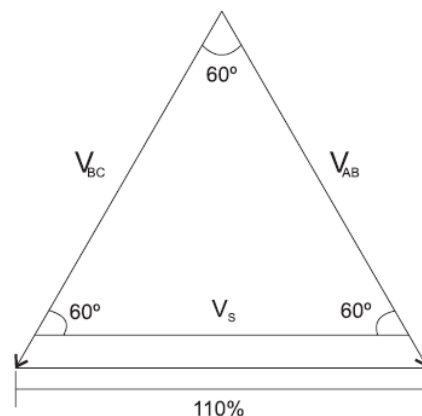


Figura 19: Diagrama fasorial da ligação em Delta Aberto.

Na ligação em Delta aberto, um dos reguladores está conecta em atraso e o outro em avanço. É necessário que seja considerada essa defasagem nos ajustes dos compensadores, da mesma maneira como é feito no banco em delta fechado.

6. FLUXO DE CARGA TRIFÁSICO

A análise do fluxo de potência trifásico no sistema de distribuição é de fundamental importância para estudo e correção do perfil de tensão com a instalação de banco de reguladores de tensão.

A análise do fluxo de carga de um alimentador de distribuição permite que sejam determinadas as seguintes grandezas do sistema:

- Amplitude de tensão e ângulo em todas as barras;
- Fluxo de potência ativa e reativa em cada seção;
- Perdas em cada seção de linha;
- Potência ativa e reativa total do alimentador;
- Perdas totais.

O algoritmo fundamenta-se nas Leis de Kirchoff para calcular as tensões e correntes em todas as barras e seções de linha. Considerando o sistema apresentado na figura a seguir as equações que definem as correntes e tensões na barra de entrada (barra n) e barra de saída (barram m) são:

$$[V_{abc}]_n = [a] \cdot [V_{abc}]_m + [b] \cdot [I_{abc}]_m \quad (6.1)$$

$$[I_{abc}]_n = [c] \cdot [V_{abc}]_m + [d] \cdot [I_{abc}]_m \quad (6.2)$$

$$[V_{abc}]_m = [a] \cdot [V_{abc}]_n + [b] \cdot [I_{abc}]_n \quad (6.3)$$

$$[I_{abc}]_n = -[c] \cdot [V_{abc}]_n + [d] \cdot [I_{abc}]_n \quad (6.4)$$

Onde $[a]$, $[b]$, $[c]$ e $[d]$ são as matrizes genéricas.

$[V_{abc}]_n$ Vetor tensão trifásico da barra n

$[I_{abc}]_n$ Vetor corrente que sai da barra n

$[V_{abc}]_m$ Vetor tensão trifásico da m

$[I_{abc}]_m$ Vetor de corrente que entra na barra m

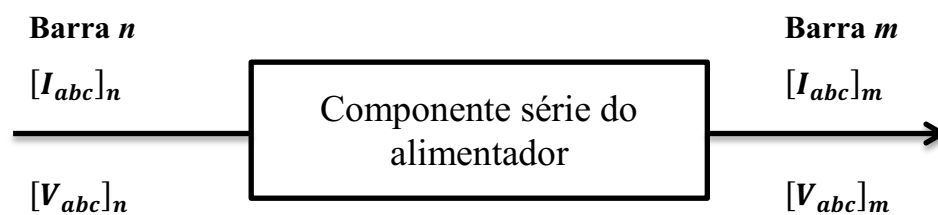


Figura 20: Componente série de um alimentador

As matrizes a , b , c e d são definidas pela modelagem de cada componente série (segmentos de linha, transformadores e reguladores de tensão) de um sistema de distribuição. As modelagens da linha, das cargas e do regulador de tensão são descritas a seguir.

6.1 MODELAGEM DA LINHA

A modelagem das linhas de distribuição consiste na utilização dos parâmetros série e paralelo que compõem os condutores. Para análise em regime permanente, as linhas trifásicas são representadas por um circuito π a parâmetros concentrados, conforme mostrado na a figura 21 (Neto, 2007).

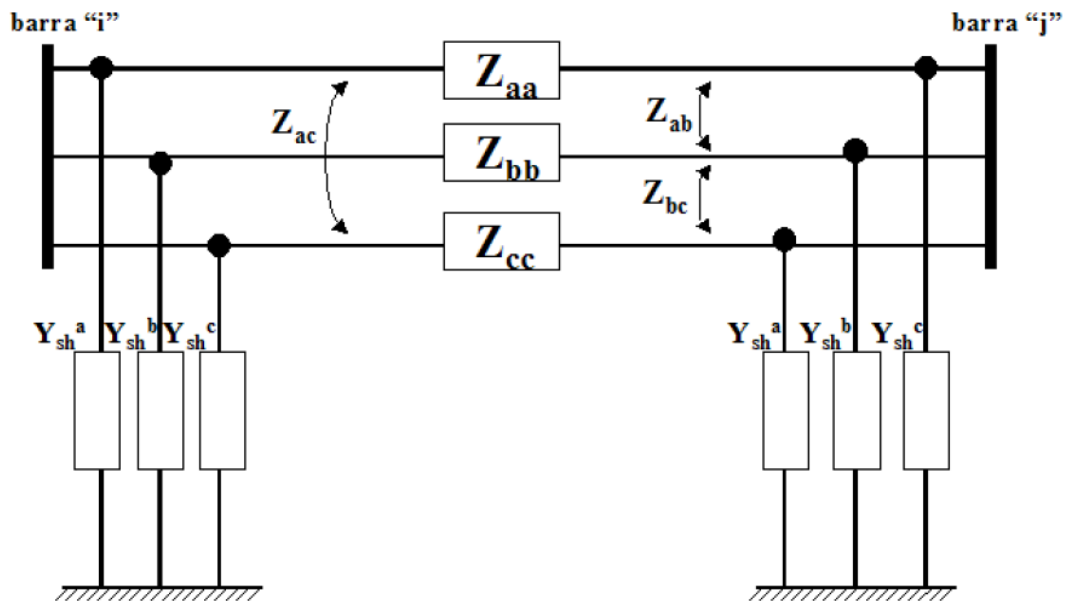


Figura 21: Esquema da linha de transmissão ou distribuição.

Em linhas de distribuição aéreas com distância de até 80 km os efeitos da reatância capacitiva podem ser desprezados. O circuito então, pode ser simplificado e a resistência e reatância são tratadas como elementos concentrado, conforme figura 22.

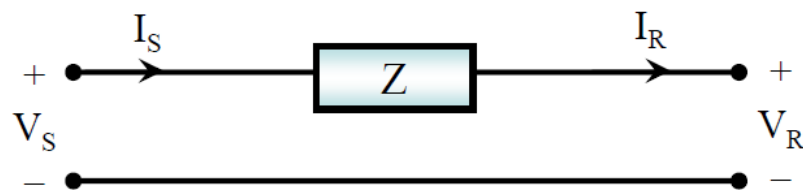


Figura 22: Modelo Simplificado da linha de distribuição.

A modelagem das linhas de distribuição consiste portanto, na utilização dos parâmetros série que compõem os condutores. A impedância série é constituída pela resistência dos condutores e das reatâncias indutivas próprias e mútuas, resultados dos campos que cercam o respectivo condutor.

O modelo adotado neste trabalho é o modelo RL, apresentado na figura 23.

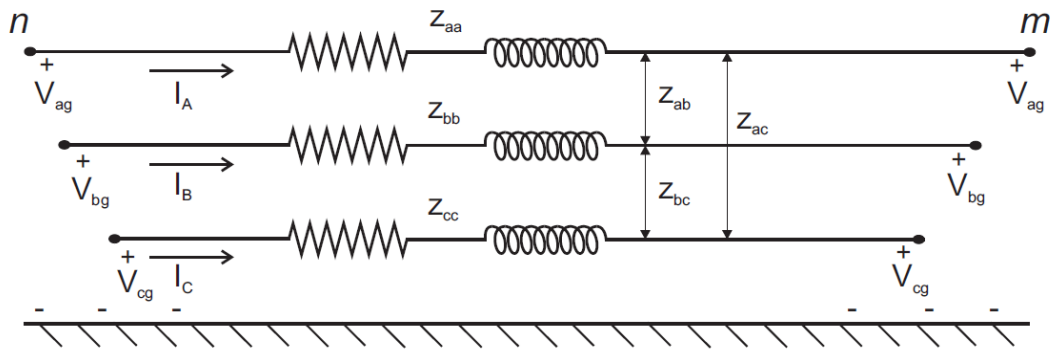


Figura 23: Modelo adotado nesse trabalho.

Para este modelo de linha, as matrizes genéricas utilizadas no fluxo de potência trifásico são dadas por:

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$[b] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$[c] = 0 \quad (6.7)$$

$$[d] = [a] \quad (6.8)$$

Como as linhas são normalmente, desbalanceadas e sem transposição, a modelagem mais adequada não deve usar aproximações referentes aos espaçamentos dos condutores, suas dimensões e transposição.

6.2 MODELAGEM DAS CARGAS

As cargas num sistema de distribuição podem ser trifásica, bifásica ou monofásica, sendo que as cargas trifásicas podem ser conectadas em delta ou estrela com neutro aterrado ou não. Modelos diferentes podem ser utilizados. Para representá-las em redes de distribuição e no cálculo de fluxo de potência, podem ser modeladas como:

- Potência ativa e reativa constante;

- Corrente constante;
- Impedância constante;
- Modelo ZIP.

Em todas as representações parte-se de um valor de potência aparente (especificado) e de um valor de tensão que, dependendo do modelo empregado, pode ou não sofrer alterações durante o processo iterativo (Uchoa, 2003).

6.2.1 MODELO DE CARGA PARA POTÊNCIA ATIVA E REATIVA CONSTANTE

As correntes nas linhas para cargas modeladas como potência constante são dadas por:

$$I_{la}^P = \left(\frac{S_a}{V_{an}}\right)^* = \frac{|S_a|}{|V_{an}|} \angle \delta_a - \theta_a = |I_a| \angle \alpha_a \quad (6.9)$$

$$I_{lb}^P = \left(\frac{S_b}{V_{bn}}\right)^* = \frac{|S_b|}{|V_{bn}|} \angle \delta_b - \theta_b = |I_b| \angle \alpha_b \quad (6.10)$$

$$I_{lc}^P = \left(\frac{S_c}{V_{cn}}\right)^* = \frac{|S_c|}{|V_{cn}|} \angle \delta_c - \theta_c = |I_c| \angle \alpha_c \quad (6.11)$$

Para este modelo a potência aparente permanece constante variando apenas as tensões de fase em cada interação.

6.2.2 MODELO PARA IMPEDÂNCIA CONSTANTE

A impedância permanece constante enquanto a tensão varia em cada interação. As correntes das cargas são obtidas em função das impedâncias constantes dadas por:

$$I_a^Z = \frac{V_{an}}{Z_a} = \frac{|V_{an}|}{|Z_a|} \angle \delta_a - \theta_a = |I_a| \angle \alpha_a \quad (6.12)$$

$$I_b^Z = \frac{V_{bn}}{Z_b} = \frac{|V_{bn}|}{|Z_b|} \angle \delta_b - \theta_b = |I_b| \angle \alpha_b \quad (6.13)$$

$$I_c^Z = \frac{V_{cn}}{Z_c} = \frac{|V_{cn}|}{|Z_c|} \angle \delta_c - \theta_c = |I_c| \angle \alpha_c \quad (6.13)$$

6.2.3 MODELO DE CORRENTE CONSTANTE

A corrente permanece constante enquanto a tensão varia e a potência cai com a tensão. Então as magnitudes são mantidas constantes e os ângulos mudam com a alteração do ângulo da tensão.

$$I_{la}^i = |I_{la}| \angle \delta_a - \theta_a \quad (6.15)$$

$$I_{lb}^i = |I_{lb}| \angle \delta_b - \theta_b \quad (6.16)$$

$$I_{lc}^i = |I_{lc}| \angle \delta_c - \theta_c \quad (6.17)$$

Sendo

δ_{abc} Ângulos de tensão da fase;

θ_{abc} Ângulos do fator de potência.

6.2.4 MODELO ZIP

É uma combinação das três cargas que pode ser realizada atribuindo uma porcentagem de cada um dos três modelos descritos. Logo a corrente que entra na carga é a soma dos três componentes.

$$I_{la}^i = \alpha I_a^p + \beta I_a^z + \gamma I_a^i \quad (6.18)$$

$$I_{lb}^i = \alpha I_b^p + \beta I_b^z + \gamma I_b^i \quad (6.19)$$

$$I_{lc}^i = \alpha I_c^p + \beta I_c^z + \gamma I_c^i \quad (6.20)$$

Sendo $0 \leq \alpha, \beta, \gamma$ e $\alpha + \beta + \gamma = 1$.

6.2.5 MODELAGEM DO REGULADOR DE TENSÃO

A modelagem do regulador de tensão consiste em determinar a relação entre as tensões e correntes de entrada e saída. Essa relação pode ser obtida através da análise do circuito de um autotransformador. Foi escolhida a modelagem do regulador de tensão de 32 degraus tipo B por ser o mais utilizado pelas concessionárias de energia. (Resener, 2008)

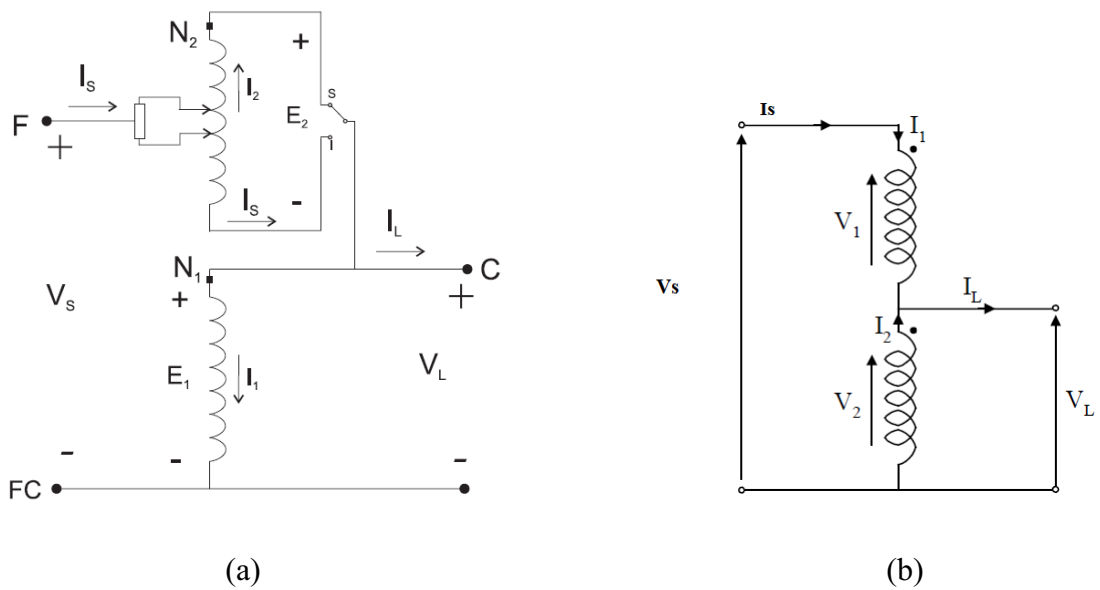


Figura 24: (a) Circuito equivalente do regulador de tensão tipo B com a chave na posição de elevar taps. (b) e o circuito equivalente do autotransformador.

A relação entre as tensões E_1 e E_2 é dada por:

$$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2} \quad (6.21)$$

Onde:

E_1 Tensão do enrolamento paralelo [V];

E_2 Tensão do enrolamento série [V];

V_1 Número de espiras do enrolamento paralelo;

V_2 Número de espiras do enrolamento série.

As tensões no lado fonte (V_s) e no lado carga (V_L) são definidas como:

$$V_s = E_1 - E_2 \quad (6.22)$$

$$V_L = E_1 \quad (6.23)$$

Substituindo a equação temos:

$$E_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_L \quad (6.24)$$

Logo, substituindo a expressão (6.24) na (6.22), a tensão no lado fonte V_s e a tensão no lado carga V_L pode ser definida como:

$$V_s = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot V_L \quad (6.25)$$

Como a relação entre correntes é dada por:

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2 \quad (6.26)$$

Onde:

I_1 Corrente no enrolamento paralelo;

I_2 Corrente no enrolamento série.

A corrente de carga

$$I_L = I_s - I_1 \quad (6.27)$$

E,

$$I_2 = I_s \quad (6.28)$$

Substituindo a equação (6.28) na (6.26) resulta em:

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_s \quad (6.29)$$

Substituindo a expressão (6.25) na equação (6.23) obtemos:

$$I_L = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot I_s \quad (6.30)$$

A partir das equações (6.25 e 6.30) pode-se definir a relação de transformação para o RT funcionando na posição superior:

$$a_R = 1 - \frac{N_2}{N_1} \quad (6.31)$$

Como a relação N_2/N_1 é desconhecida, a equação acima pode ser modificada para ser função da posição do *tap*. Para o regulador em uso temos que cada *tap* modifica a tensão em 0.625 % por degrau. Portanto, a relação de transformação do RT pode ser dada por:

$$a_R = 1 - 0.00625 \cdot tap \quad (6.32)$$

No caso da chave inversora estar na posição inferior, a direção das correntes que circulam nos enrolamentos série e paralelo se modifica, mas a polaridade das tensões nos dois enrolamentos permanece a mesma.

As equações para o RT com a chave na posição inferior são obtidas com o mesmo procedimento na chave na posição superior, resultando na seguinte relação de transformação:

$$a_R = 1 + \frac{N_2}{N_1} \quad (6.33)$$

$$a_R = 1 + 0.00625 \cdot tap \quad (6.34)$$

Portanto, as relações entre tensões e correntes de entrada e saída para o RT monofásico Tipo B são dadas por:

$$V_s = a_R \cdot V_L \quad (6.35)$$

$$I_s = \frac{1}{a_r} \cdot I_L \quad (6.36)$$

Tem-se, portanto, as matrizes genéricas utilizadas no fluxo de carga trifásico de potência dada por:

$$[a] = a_R \quad [b] = 0 \quad [c] = 0 \quad [d] = \frac{1}{a_R}$$

7. ESTUDO DE CASO

7.1 APLICAÇÕES A SISTEMAS REAIS

Neste trabalho é utilizado-se a rede de distribuição rural e urbana da subestação de Jericó da concessionária Energisa Paraíba. Esse alimentador foi escolhido por já possuir estudos para alocação de reguladores. O diagrama unifilar do alimentador é mostrado na figura 25:

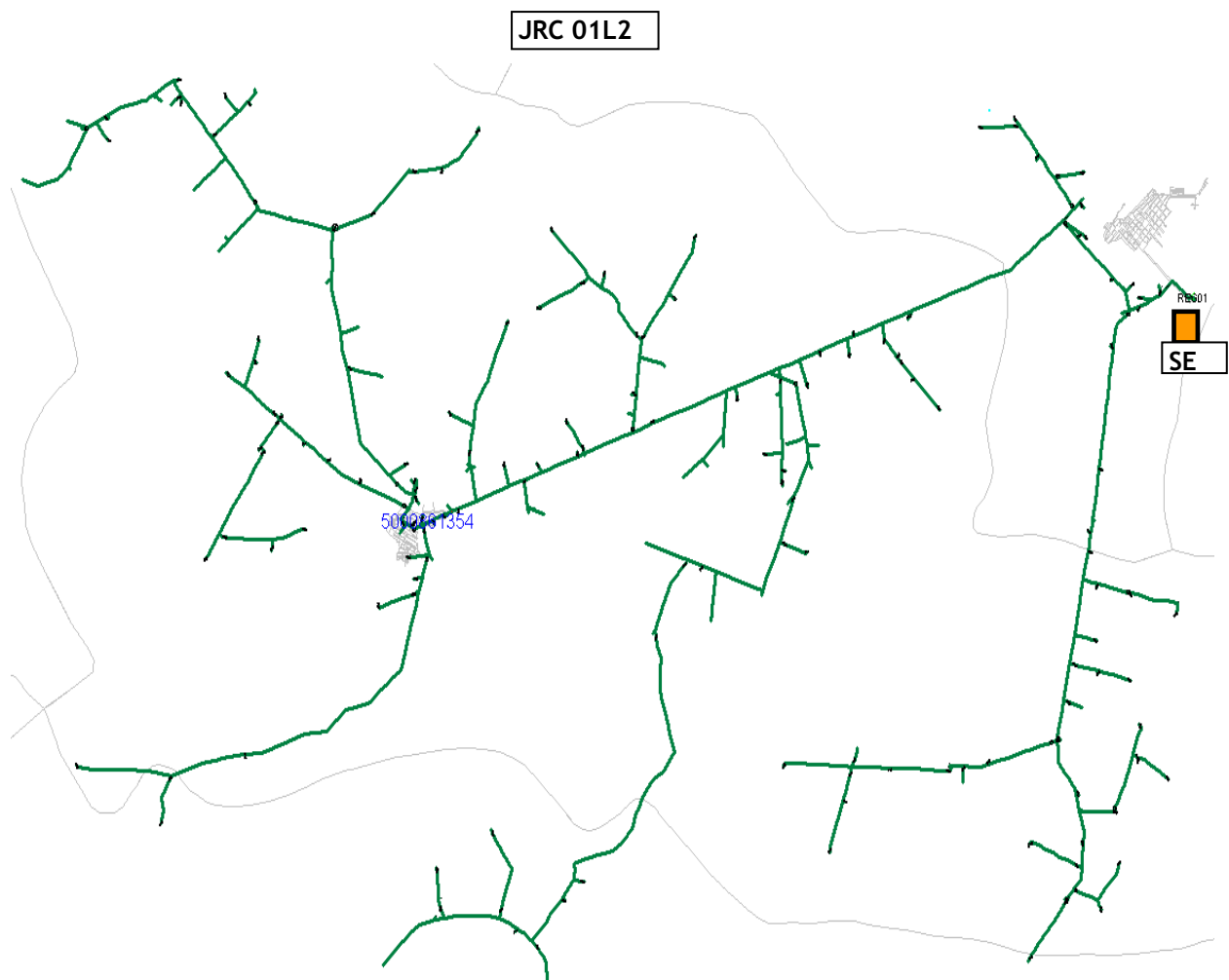


Figura 25: Alimentador da subestação de Jericó - Pb.

Neste trabalho, o método do fluxo de potência utiliza uma abordagem orientada aos ramos. Para isto é necessário numerar todos os ramos. O alimentador com a identificação das barras é mostrado na figura 26.

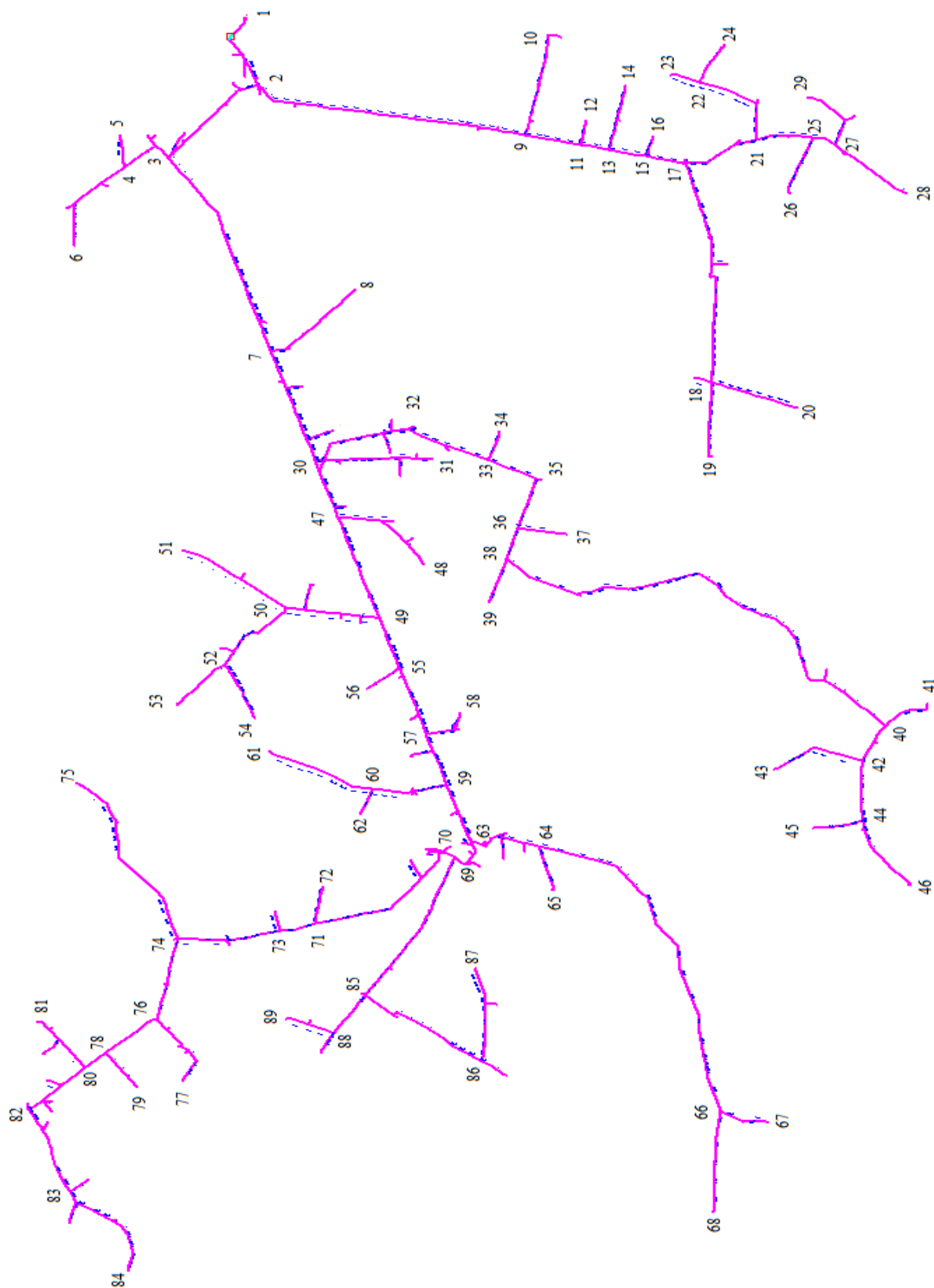


Figura 26: Alimentador com identificação nas barras.

A rede de distribuição radial de média tensão possui 89 barras, e tem uma tensão base de $V_b = 13.8 \text{ kV}$. E tensão média de referência no nó principal (1) de $V_{ref} = 14,077 \text{ kV}$ (verificados de: 1 de janeiro a 30 de agosto de 2011, com medições aproximadamente a cada 20 minutos). Ela possui potência nominal aparente total de 3197,5 kVA. A rede apresenta bitolas 1/0 de cabos CAA para as três fases. O nível de carregamento é baixo. A relação X/R nas impedâncias das fases é em torno de 0,36. Possui o comprimento do ramo principal de 14,56 km. Detalhes do alimentado retirados do Sistema Gerenciamento da distribuição (SGD) são apresentados nas figuras 27 e 28.

Detalhes da Rede Primária

Rede Primária
 Alimentador: **JRC - L2** Bloco: **AUX0074828**
 No: **620093,751 - 9271372,049** Nível: **132**
 Fonte: **620135,373 - 9271390,528** Jumper: **Ausente**
 Fases: **ABC** Classe de Tensão (kV): **15**
 Natureza: **Tronco** Comprimento (m): **52**
 Proprietário: **COMPANHIA** Desenergizado: **Não**
 Instalação: **Caminho Crítico**
 Tipo de Rede: **Aérea**
 Código ANEEL

Projeto: **CADASTRO**

Dados Elétricos | Curto Circuito

Curto Circuito	Fases	Simétrico (A)		Assimétrico (A)			Relação X/R	Fator	Impedâncias Equivalentes	
		Módulo	Ângulo	Máxima	Eficaz	Contínua				
Trifásico	A	1537	-19,7	2242	1538	69	0,36	1		
	B	1538	-139,5	2240	1539	65	0,36	1		
	C	1536	100,9	2241	1538	69	0,36	1		
Bifásico	AB	1332	-19,5	1943	1333	60				
	BC	1330	-139,4	1937	1331	56				
	CA	1331	100,7	1941	1332	60				
M o n o f á s i c o	Franco	AN	897	-42,3	1309	898	40	0,91		1
		BN	899	-161,8	1309	900	38	0,91		1
		CN	897	77,7	1309	898	40	0,91	1	
	40 Ω	AN	170	-7,3	248	170	8	0,13	1	
		BN	170	-127,2	247	170	7	0,13	1	
		CN	170	112,7	248	170	8	0,13	1	
	80 Ω	AN	92	-4	134	92	4	0,07	1	
		BN	92	-123,9	134	92	4	0,07	1	
		CN	92	116,1	134	92	4	0,07	1	
	100 Ω	AN	75	-3,2	109	75	3	0,06	1	
		BN	75	-123,2	109	75	3	0,06	1	
		CN	75	116,8	109	75	3	0,06	1	

Sequencial (Ω)
 $R1 = 4,88225$
 $X1 = 1,74633$
 $R0 = 9,9399$
 $X0 = 14,42671$

Trifásica (Ω)
 $Ra = 6,56638$
 $Xa = 5,97296$
 $Rb = 6,60384$
 $Xb = 5,90606$
 $Rc = 6,56638$
 $Xc = 5,97296$

Comprimento Acumulado
km = 14,5663

Subestação | Barramento | Alimentador | Análise | Sair

Figura 27: Dados específicos do alimentador.

Detalhes da Rede Primária

Rede Primária
 Alimentador : JRC - L2 Bloco : JRC31L2-6
 Nó : 632941,917 - 9274487,623 Nível : 6
 Fonte : 632949,227 - 9274481,235 Jumper : Ausente
 Fases : ABC Classe de Tensão (kV) : 15
 Natureza : Tronco Comprimento (m) : 9,7
 Proprietário : COMPANHIA Desenergizado: Não
 Instalação : **Caminho Crítico**
 Tipo de Rede : Aérea

Estrutura: HORIZONTAL

	Fase	Neutro	Guarda
Formação	SINGELO		
Bitola	1,0		
Material	S		
Isolação	N		
Cor. Admissível	230		

Dados do Último Projeto
 Data: Projeto: CADASTRO

Dados Elétricos | Circuito

Instante do Cálculo:
Máxima do Alimentador
 Dia: Domingos / Feriados
 Horário: 19

	Tensões (V)			Correntes (A)			Carregamentos (%)		
	Fases	Módulo	Ângulo	Fases	Módulo	Ângulo	Admissível	Verão	Inverno
	A	8001	0	A	36,9	-25,8	18	22,5	16,4
	B	8001	240	B	41,5	-147,1	15	15	12,9
	C	8002	120	C	24,3	93,8			

Desequilíbrio (%): 29,1

Demandas (Fluxo)	Fase A	Fase B	Fase C	Dados Passantes	Urbano	Rural
Aparente (kVA)	295,4	331,9	194,2	Cientes	836	1124
Ativa (kW)	265,9	295,4	174,2	Potência Nominal (kVA)	342,5	2655
Reativa (kVAr)	128,7	151,3	85,9	Banco Capacitor (kVAr)	0	0
Fator de Potência (%)	90,0	89,0	89,7	VIP Comercial	106	39
Queda de Tensão (%)	-0,4	-0,4	-0,4	VIP Técnico	122	69
				Especiais	0	0
				Pontuação	0	0
				Consumo (kWh)	72716,1	57603

Perdas de Demanda		Perdas de Energia	
Ativa (kW)	32,1	Ativa (kWh)	14632
Reativa (kVAr)	28	Reativa (kVArh)	12789

Subestação Barramento Alimentador Análise Sair

Figura 28: Dados específicos do alimentador.

O levantamento de injeções de potência aparente (VA) em cada barra do alimentador é apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Injeção de Potência Aparente nas barras.

Nó	Potência Aparente (kVA) Dados Passantes	Nó	Potência Aparente (kVA) Dados Passantes
1	3197.50	46	10
2	3092.0	47	1832.5
3	30	48	50
4	20	49	1777.5
5	5	50	50
6	5	51	15

7	2247.0	52	15
8	70	53	5
9	405	54	5
10	65	55	1702.5
11	340	56	15
12	10	57	1417.50
13	330	58	10
14	10	59	1407.5
15	320	60	105
16	5	61	75
17	315	62	30
18	20	63	50
19	10	64	35
20	10	65	15
21	280	66	25
22	50	67	10
23	20	68	15
24	30	69	220
25	200	70	460
26	60	71	405
27	130	72	15
28	80	73	5
29	50	74	390
30	140	75	35
31	75	76	315
32	120	77	55
33	95	78	245
34	10	79	5
35	85	80	235
36	80	81	25
37	5	82	200
38	70	83	165

39	10	84	145
40	60	85	85
41	5	86	35
42	25	87	10
43	5	88	25
44	20	89	10
45	10		

Pela análise da distribuição de carga do alimentador, observa-se que aproximadamente 57% da carga de todo alimentador é injetada na barra 59.

Com a ajuda do software para cálculo de fluxo de potência, InterPlan®, utilizado pela Energisa, determinou-se a queda de tensão em todo alimentador. A figura 29 e o gráfico 1, ilustram o nível de tensão no ramo principal (1,2,3,7,30,47,49,55,57,59,63,69,71,74,76,78,80,82,84). Observa-se que na parte em que o alimentador está em amarelo, a queda de tensão é superior a 7% da tensão na barra 1, entrando na faixa de tensão precária.

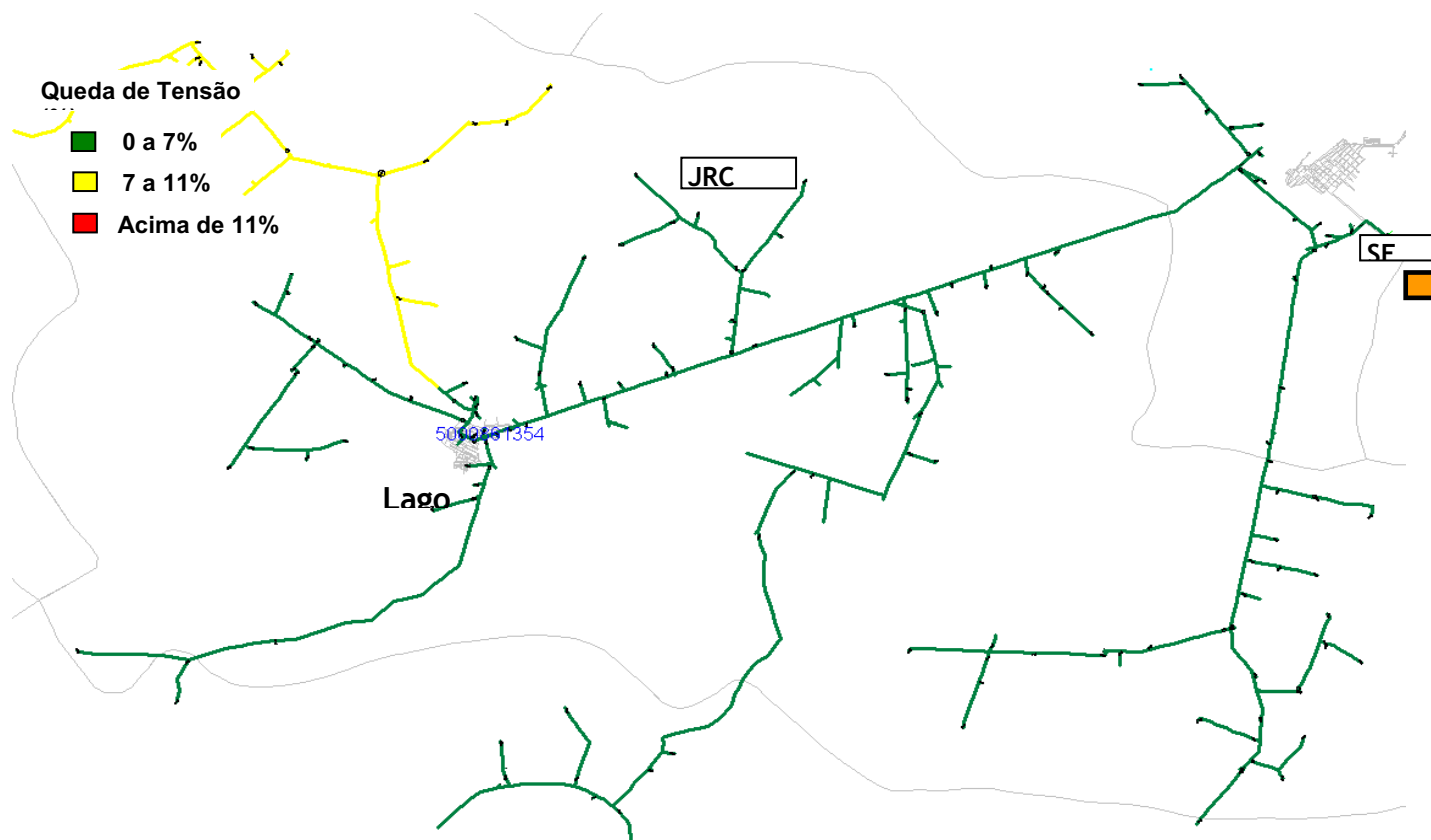


Figura 29: Distribuição da tensão no alimentador.

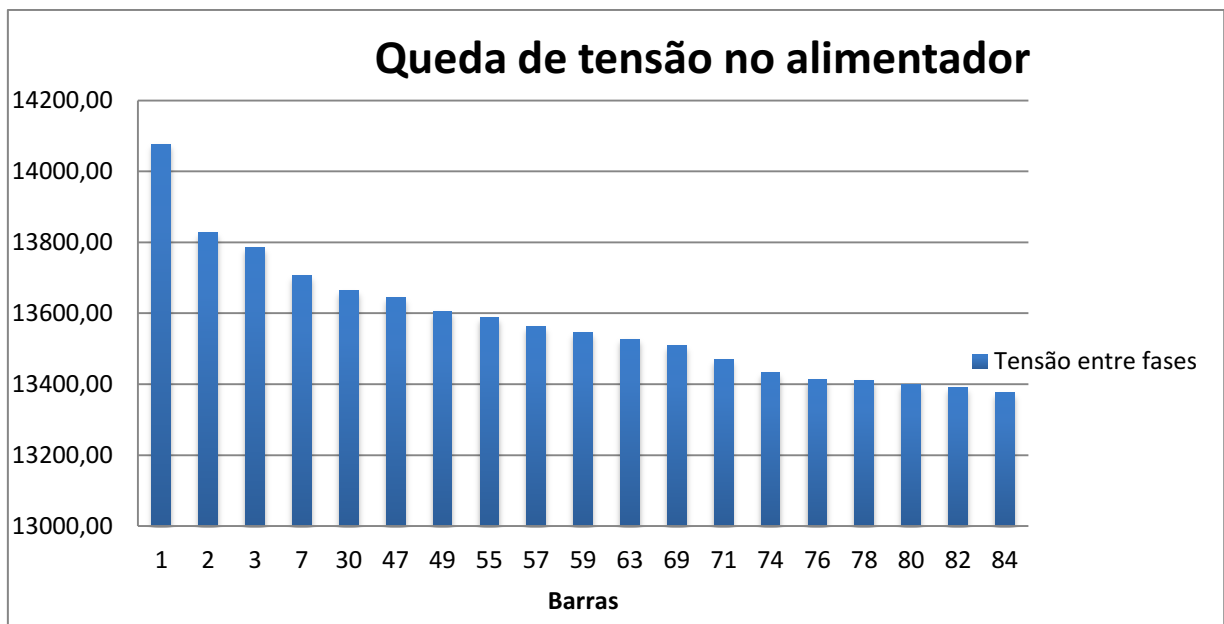


Gráfico 1: Queda de tensão no alimentador.

O estudo de alternativas para melhoria do perfil de tensão pode ser dividido em duas partes: planejamento e operação, ou seja, que é preciso dimensionar e alocar da melhor forma possível o regulador de tensão e então ajustar o nível de tensão de referência adequadamente. No subproblema de planejamento o objetivo é melhor local de instalação do RT para o seu aproveitamento máximo, corrigindo a tensão do maior número de barras possível, de modo que fiquem dentro dos limites estabelecidos pela resolução 505/2001 ANEEL. O subproblema de operação visa achar o melhor ajuste para o equipamento.

7.2 ALOCAÇÃO EM SISTEMAS REAIS

O problema de alocação ótima de reguladores de tensão em um sistema de distribuição caracteriza-se como sendo de otimização combinatória, já que há várias possibilidades de barra no sistema real para alocação.

Para definição do número de RTs necessários e alocação dos mesmos, foram utilizados os seguintes passos:

1. Executar o fluxo de potência trifásico, sem RTs instalados para o carregamento máximo do alimentador;

2. Um regulador é instalado na barra mais próxima da subestação onde a tensão está fora do intervalo permitido com seus ajustes de tensão referência;
3. Executar novamente o fluxo de potência;
 - a. Se ainda existirem barras cujas tensões violam os limites, voltar para o passo 2, instalando outro regulador;
 - b. Caso contrário, parar.

Esse processo foi realizado e determinou –se que apenas um RT, com ajuste de 120 V na tensão de referência no controle, seria necessário para corrigir o perfil de tensão (figura 30).

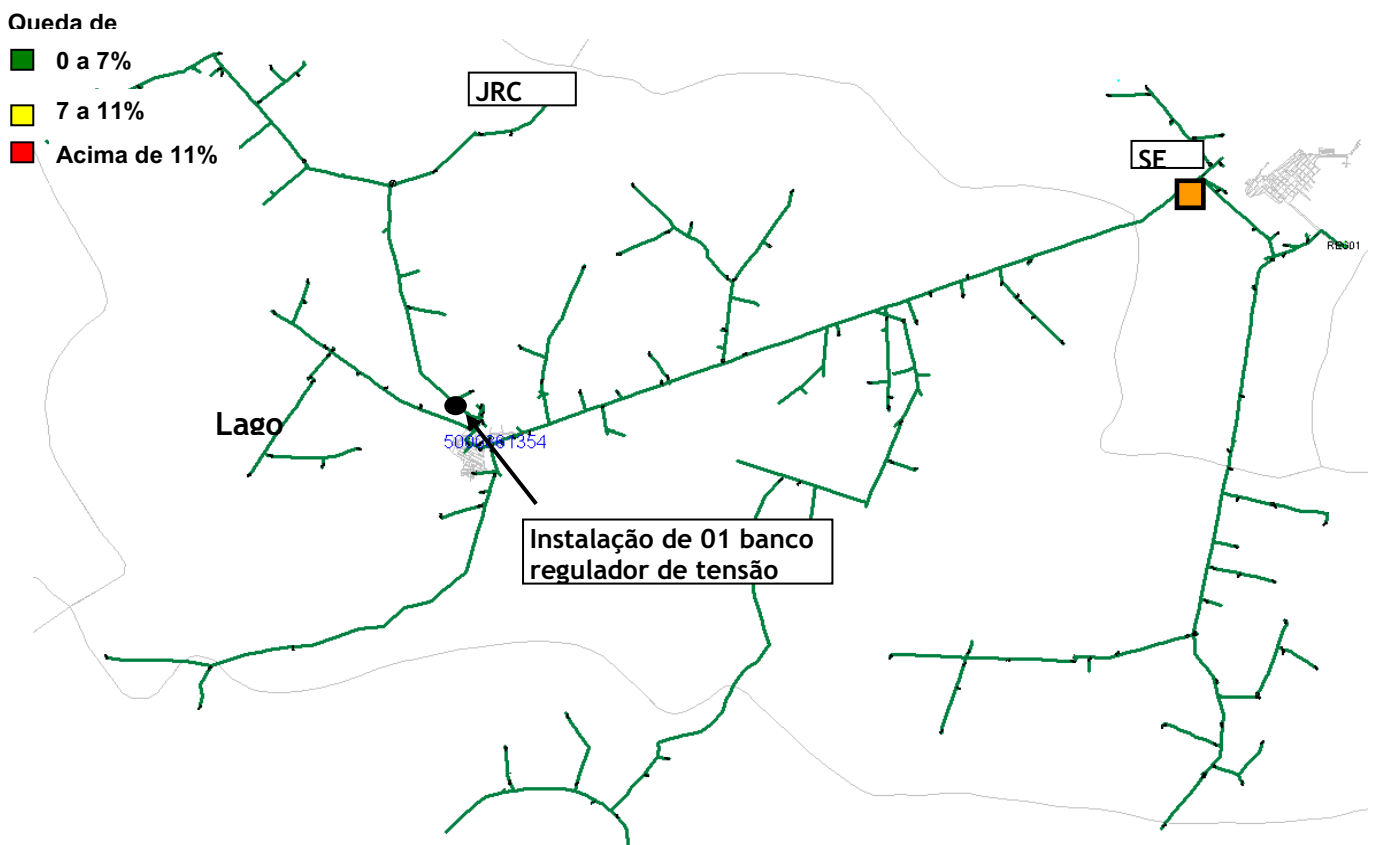


Figura 30: Perfil de tensão do alimentador com apenas um regulador instalado.

Incluindo a previsão de aumento de carga no alimentador, se faz necessário instalar o dispositivo em barras mais a jusante da barra onde o nível de tensão infringe a resolução normativa da ANEEL. Um possível local de instalação do banco de reguladores é mostrado na figura 31.

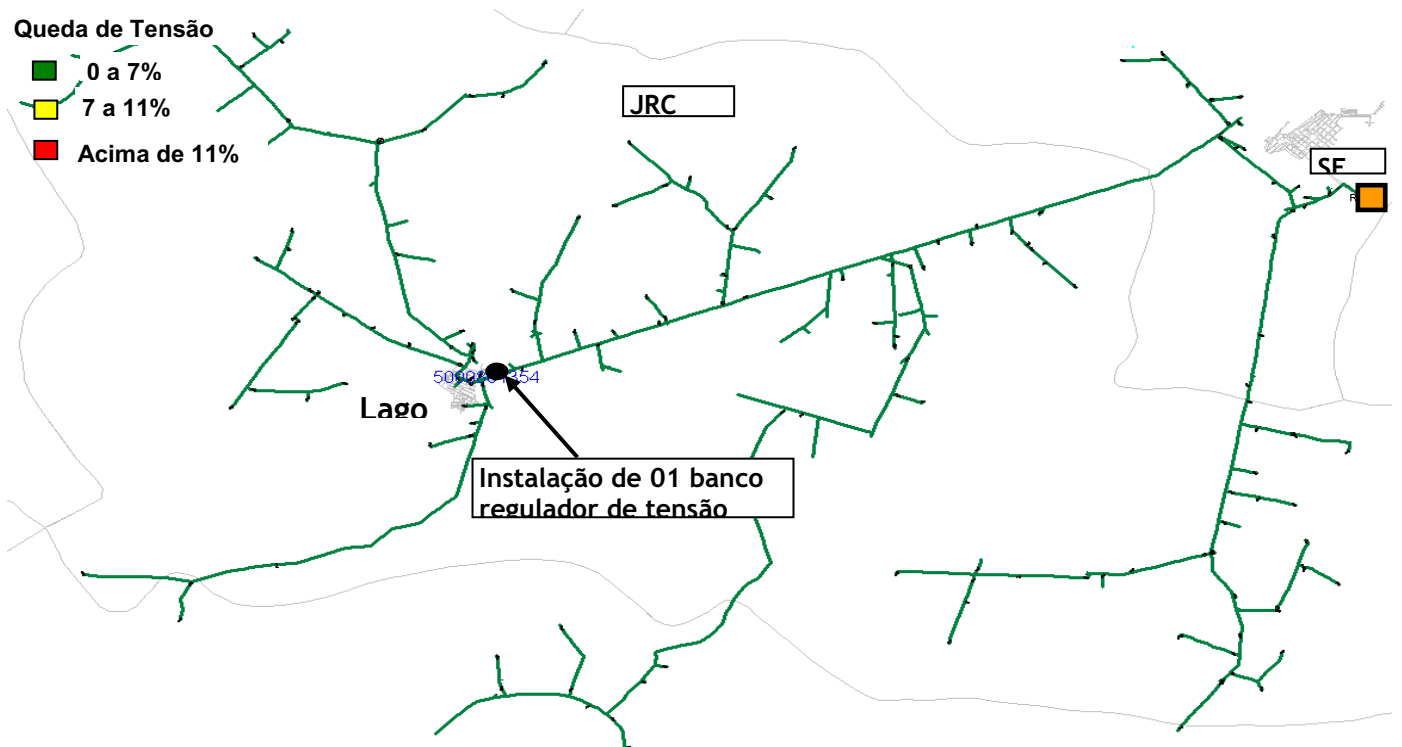


Figura 31: Possível local de instalação do RT levando em consideração o aumento da carga.

Alocando o RT, entre as barras 59 e 63, foi calculado novo fluxo de potência com a tensão de referência de 121 V, observou que o perfil de tensão foi mantido dentro dos padrões aceitáveis.

A potência nominal de um regulador de tensão é apenas a potência transformada por ele e não a potência “passante” no ponto em que será instalado (barra). Portanto, o cálculo é feito considerando o máximo percentual de regulação do regulador, desta forma tem-se : (Formiga de Almeida, Pamplona, Macedo, & de Souza)

$$S_R = \frac{\%R}{100 \sqrt{3}} S \quad (7.1)$$

Em que:

S_R Potência calculada de cada unidade monofásica, em cada kVA;

$\%R$ Percentual de regulação do banco;

S Potência total trifásica na barra em kVA.

Desta forma, determinou-se que um banco de reguladores de tensão com potência aparente superior a 121.90 kVA será necessário para suprir a demanda de regulação. Não existe diferença na potência de cada unidade monofásica quando se muda de banco ligado em delta aberto para delta fechado, mas muda a faixa de regulação (de 10% para 15%).

A instalação de apenas um banco de reguladores nem sempre é a solução mais econômica, pois, em certos casos a instalação de dois ou mais bancos de RT traria soluções mais viáveis, considerando os custos com as perdas ativas do sistema, custo de investimento e manutenção dos reguladores e penalizações por violação dos limites de tensão.

Se for viável, a instalação de dois ou mais RTs, um processo recursivo de busca pelas melhores alocações é iniciado, visando minimizar os custos desejados.

Embora nem sempre seja realizável, em função do grande número de soluções possíveis, a enumeração pode obter a solução ótima de alguns problemas combinatoriais, (Alves, 2005). Para o problema da alocação dos RTs, o número de combinações de nb elementos tomados n a n é definido como:

$$C_{nb}^n = \frac{nb!}{n!(nb-n)!}$$

Sendo nb o número de barras da rede e n o número de RTs que serão instalados.

Para o alimentador em estudo, o número total de combinações possíveis é igual a 3828 uma vez que o sistema possui 87 barras (excluindo a barra da SE) e dois reguladores a serem instalados. Como a solução supõe a instalação dos reguladores nas barras mais próximas da SE, onde a tensão viola o limite permitido (normalmente o limite inferior), é possível afirmar que, movendo o RT para barras a frente da barra inicial, existirão barras que violam o limite permitido novamente. Dessa forma é possível eliminar das combinações as barras à jusante do RT, reduzindo o espaço de busca pela melhor alocação dos n equipamentos.

Neste trabalho considera-se como barra candidata a receber o regulador a barra à montante da barra onde foi inicialmente alocado o RT, em direção a SE. As barras candidatas para receber os reguladores RT_1 e RT_2 serão:

$$\text{Barras } RT_1 = [2 \quad 3 \quad 7]$$

$$\text{Barras } RT_2 = [70 \quad 69 \quad 63 \quad 59 \quad 57 \quad 55 \quad 49 \quad 47 \quad 30]$$

E as combinações possíveis para a instalação dos reguladores RT_1 e RT_2 serão:

$$\text{combinação} = [\text{Barras } RT_1, \text{Barras } RT_2]$$

Sendo $\text{Barras } RT_1 = 2, 3 \text{ e } 7$ e $\text{Barras } RT_2 = 70 \dots 30$.

Ao final, reduziram-se as 3828 combinações possíveis para apenas 27. Para cada combinação é executado o fluxo de potência, determinando as perdas e os desvios de tensão. As alternativas são comparadas entre si, com intuito de encontrar a solução que minimiza as perdas e o melhor perfil de tensão, ou seja, aquele perfil que apresentar a menor variação de tensão.

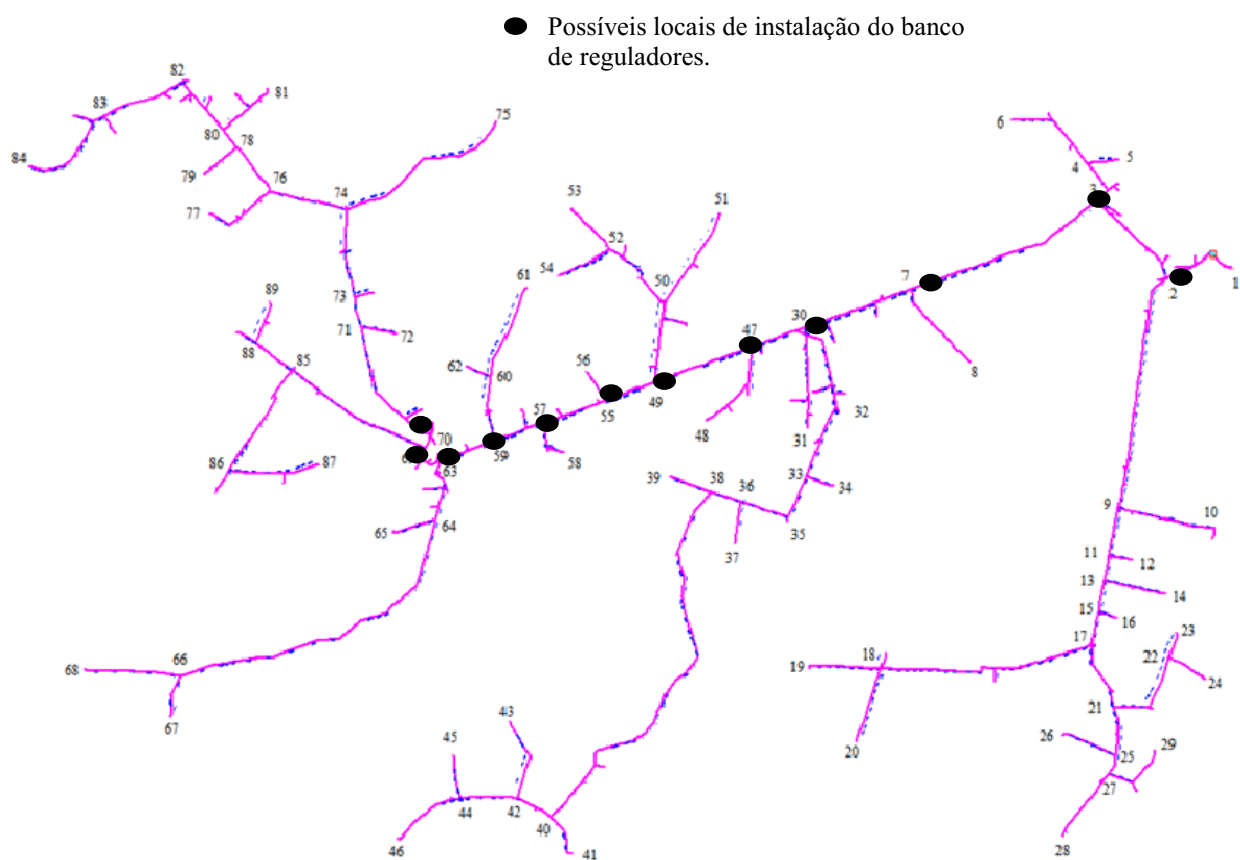


Figura 32: Possíveis locais de instalação dos bancos de reguladores de tensão.

8. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram vistas diversas alternativas para alocação de reguladores de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica através de um método de enumeração. Para reduzir o número de soluções possíveis, os reguladores de tensão são inicialmente, alocados nas barras mais próximas da SE, onde a tensão viola o limite pré – definido, eliminando-se as barras à jusante da barra inicial na análise.

O objetivo clássico analisado consistiu na redução dos desvios de tensão, procurando aproximar o perfil de tensão do alimentador ao perfil regular nominal. Manter os níveis de tensão o mais próximo da tensão nominal traz benefícios para os consumidores, uma vez que seus aparelhos são projetados para operar em uma determinada tensão.

8.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se como trabalhos futuros:

- Considerar além dos reguladores de tensão, bancos de capacitores para correção do perfil de tensão;
- Novos estudos de caso com alimentadores reais;
- Implementação com novas técnicas de análise de fluxo de potência;
- Considerar o crescimento da carga ao longo dos anos

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- RNP. (2004). Acesso em 10 de 07 de 2011, disponível em RNP – Rede Nacional de Ensino e Pesquisa: <http://www.rnp.br/newsgen/9811/vpn.html>
- Toshiba. (2009). Acesso em 08 de julho de 2011, disponível em Reguladores de tensão Toshiba: <http://www.toshiba.com.br/t/Brasil/conteudo.php?content.11>
- (2011). Acesso em 04 de Abril de 2011, disponível em Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>
- Alves, M. L. (2005). *Módulo de Alocação Otimizada de Reguladores de Tensão e Bancos*. Porto Alegre: Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- COOPER, P. S. (1978). *Determination of Regulator Compensator Settings*.
- Eletric, S. (2003). *Manual técnico do religador Nulec*. Queensland.
- Energisa. (2009). *Portal Grupo Energisa*. Acesso em 21 de Março de 2011, disponível em Energisa: <http://www.energisa.com.br/grupoenergisa>
- Filho, J. M. (2002). *Instalações Elétricas Industriais*. Rio de Janeiro: L.T.C.
- Formiga de Almeida, A. M., Pamplona, F. M., Macedo, H. D., & de Souza, B. A. (s.d.). Planejamento de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição via Algoritmos Genéticos e Lógica Fuzzy. p. 6.
- História da Energisa*. (s.d.). Acesso em 19 de julho de 2011, disponível em História da energisa Paraíba e Borborema: <http://portal.energisa.com.br/Borborema/Energisa%20Borborema/A%20Empresa/Historia.aspx>
- História da Energisa*. (s.d.). Acesso em 19 de julho de 2011, disponível em História da Energisa Paraíba e Borborema: <http://portal.energisa.com.br/Borborema/Energisa%20Borborema/A%20Empresa/Historia.aspx>
- Isoni. (2003). *Jarranjos de Sistemas de Distribuição Elétrica para Instalações de Médio e Grande Porte*. ENGEPARC ENGENHARIA Ltda.

- Neto, M. A. (Dezembro de 2007). *Implementação do fluxo de carga utilizando o método da injeção das correntes trifásicos*. Rio de Janeiro - RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PRODIST, P. d. (01 de 01 de 2011). Qualidade da Energia Elétrica. pp. 32-39.
- R.S.Mantovani, J., Casari, F., & A.Romero, R. (03 de Dezembro de 2000).
Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. p. 10.
- Resener, M. (2008). *Alocação e Ajuste Ótimo do Regulador de Tensão em Sistemas de Distribuição*. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado.
- Salengue, W. (1974). *Barramentos condutores em instalações elétricas industriais*. Rio de Janeiro.
- SZUVOVIVSKI, I. (2008). ALOCAÇÃO SIMULTÂNEA DE BANCOS DE CAPACITORES E REGULADORES DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO . CURITIBA, PARANÁ, BRASIL .
- Toshiba. (2008). *MANUAL DE INSTRUÇÕES PARA REGULADOR DE TENSÃO MONOFÁSICO*. Contagem - MG.
- Toshiba. (2008). *TB-R1000 Controle para Regulador de Tensão*. Toshiba T&D do Brasil LTDA.
- Uchoa, L. (2003). *Cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição com modelagem a quatro fios*. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha solteira - São Paulo.

-

