

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCELO DONIZETTI CUSTÓDIO

**FLUXO DE CARGA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM
MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO E BANCOS DE
CAPACITORES AUTOMÁTICOS**

Cornélio Procópio

2016

MARCELO DONIZETTI CUSTÓDIO

**FLUXO DE CARGA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM
MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO E BANCOS DE
CAPACITORES AUTOMÁTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva

Cornélio Procópio

2016



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcelo Donizetti Custodio

Fluxo de carga em redes de distribuição com modelagem de reguladores de tensão e bancos de capacitores automáticos

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30hs do dia 09/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Murilo da Silva - Presidente (Orientador)

Prof. Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - (Membro)

Prof. Dr. Leonardo Poltronieri Sampaio - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Aos meus pais, irmãs, minha noiva e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que chegasse até esta etapa de minha vida.

AGREDECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Reverencio o Professor Dr. Murilo da Silva pela sua dedicação e pela orientação deste trabalho e, por meio dele, eu me reporto a toda a comunidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio incondicional.

Agradeço a Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL e aos colegas de trabalho que contribuíram para a concretização dos resultados alcançados neste estudo.

A todos meus amigos de minha cidade e aos amigos de graduação Igor Elias, Rafael Samogim, Carlos Lourenço, Natanea Alves, Gabriela Payão, Laísa Cardoso, Vinicius Salvadori gostaria de externar minha satisfação de poder conviver com eles durante a realização desta formação.

Agradeço aos professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo. Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio. E por último, e nem por isso menos importante, agradeço a minha noiva pelo carinho, amor e compreensão.

RESUMO

CUSTÓDIO, Marcelo D. **Fluxo de carga em redes de distribuição com reguladores de tensão e banco de capacitores automáticos.** Cornélio Procópio, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Os sistemas de distribuição são basicamente constituídos de transformadores, linhas de distribuição, regulares de tensão e banco de capacitores, equipamentos estes que dimensionados com coerência representam um ganho expressivo em relação as perdas de energia e multas por fornecimento inadequado. Para o melhor aproveitamento dos reguladores de tensão e bancos de capacitores se faz necessário um estudo de caso, no qual se utiliza o fluxo de carga que representa o estado de operação da rede e o modo de como a rede ira se comportar com a aplicação destes equipamentos. O estudo em questão trata de automatizar estes equipamentos no fluxo de carga para que as análises de implementação e modificações retratem o mais fiel possível o sistema de distribuição físico.

Palavras Chaves: Redes de Distribuição. Fluxo de Carga. Banco de Capacitores Automáticos. Reguladores de Tensão.

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PROPOSTO X CONCESSIONARIA PARA PATAMAR 1 CASO 1.....	40
QUADRO 2 – PROPOSTO X CONCESSIONARIA PARA PATAMAR 3 CASO 1.....	44
QUADRO 3 – PROPOSTO X CONCESSIONARIA PARA PATAMAR 1 CASO 2.....	49
QUADRO 4 – PROPOSTO X CONCESSIONARIA PARA PATAMAR 3 CASO 2.....	53
QUADRO 5 – PROPOSTO X CONCESSIONARIA PARA PATAMAR 1 CASO 3.....	54
QUADRO 6 – PROPOSTO X CONCESSIONARIA PARA PATAMAR 3 CASO 3.....	56
QUADRO 7 – PROPOSTO X CONCESSIONARIA PARA PATAMAR 1 CASO 4.....	58
QUADRO 8 – PROPOSTO X CONCESSIONARIA PARA PATAMAR 3 CASO 4.....	60

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	14
FIGURA 2 – BOBINAS DO REGULADOR COM CHAVE INVERSORA.	15
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DO REATOR LIGADO À BOBINA DO SECUNDÁRIO.	15
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DO REATOR LIGADO À BOBINA DO SECUNDÁRIO.	16
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DO REATOR LIGADO À BOBINA DO SECUNDÁRIO.	16
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DA CONEXÃO ESTRELA.....	17
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DA CONEXÃO DELTA FECHADO	18
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DA CONEXÃO DELTA ABERTO.....	18
FIGURA 9 – LIGAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO.	19
FIGURA 10 – COMUTAÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO.....	20
FIGURA 11 – FUNCIONAMENTO DO BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICOS.	23
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS ALIMENTADOS ANALISADOS.....	33
FIGURA 13 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 1 E ALIMENTADOR 1.....	36
FIGURA 14 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 1, CASO 1 E ALIMENTADOR 1.....	37
FIGURA 15 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 1 E ALIMENTADOR 1.....	37
FIGURA 16 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 1, CASO 1 E ALIMENTADOR 1.....	38
FIGURA 17 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 1 E ALIMENTADOR 2.....	38
FIGURA 18 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 1, CASO 1 E ALIMENTADOR 2.....	39
FIGURA 19 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 1 E ALIMENTADOR 2.....	39
FIGURA 20 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 1, CASO 1 E ALIMENTADOR 2.....	40
FIGURA 21 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 1 E ALIMENTADOR 1.....	41
FIGURA 22 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 3, CASO 1 E ALIMENTADOR 1.....	41
FIGURA 23 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 1 E ALIMENTADOR 1.....	42
FIGURA 24 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 3, CASO 1 E ALIMENTADOR 1.....	42
FIGURA 25 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 1 E ALIMENTADOR 2.....	43
FIGURA 26 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 3, CASO 1 E ALIMENTADOR 2.....	43
FIGURA 27 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 1 E ALIMENTADOR 2.....	44
FIGURA 28 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 3, CASO 1 E ALIMENTADOR 2.....	44
FIGURA 29 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 2 E ALIMENTADOR 1.....	45
FIGURA 30 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 1, CASO 2 E ALIMENTADOR 1.....	45
FIGURA 31 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 2 E ALIMENTADOR 1.....	46
FIGURA 32 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 1, CASO 2 E ALIMENTADOR 1.....	46

FIGURA 33 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 2 E ALIMENTADOR 2.....	47
FIGURA 34 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 1, CASO 2 E ALIMENTADOR 2.....	47
FIGURA 35 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 2 E ALIMENTADOR 2.....	48
FIGURA 36 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 1, CASO 2 E ALIMENTADOR 2.....	48
FIGURA 37 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 2 E ALIMENTADOR 1.....	49
FIGURA 38 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 3, CASO 2 E ALIMENTADOR 1.....	50
FIGURA 39 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 2 E ALIMENTADOR 1.....	50
FIGURA 40 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 3, CASO 2 E ALIMENTADOR 1.....	50
FIGURA 41 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 2 E ALIMENTADOR 2.....	51
FIGURA 42 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 3, CASO 2 E ALIMENTADOR 2.....	51
FIGURA 43 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3 CASO 2 E ALIMENTADOR 2.....	52
FIGURA 44 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 3, CASO 2 E ALIMENTADOR 2.....	52
FIGURA 45 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 3 E ALIMENTADOR 2.....	53
FIGURA 46 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 1, CASO 3 E ALIMENTADOR 2.....	54
FIGURA 47 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 3 E ALIMENTADOR 2.....	55
FIGURA 48 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 3, CASO 3 E ALIMENTADOR 2.....	55
FIGURA 49 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 4 E ALIMENTADOR 2.....	57
FIGURA 50 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 1, CASO 4 E ALIMENTADOR 2.....	57
FIGURA 51 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 1, CASO 4 E ALIMENTADOR 2.....	58
FIGURA 52 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 1, CASO 4 E ALIMENTADOR 2.....	58
FIGURA 53 – TENSÃO A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 4 E ALIMENTADOR 2.....	59
FIGURA 54 – ERRO PERCENTUAL ENTRE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO E TENSÃO CALCULADA CONCESSIONARIA PARA O PATAMAR 3, CASO 4 E ALIMENTADOR 2.....	59
FIGURA 55 – CORRENTE A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO PARA O PATAMAR 3, CASO 4 E ALIMENTADOR 2.....	60
FIGURA 56 – POTENCIA REATIVA A MONTANTE DA MAIOR QUEDA DE TENSÃO DO ALGORITMO PROPOSTO PARA O PATAMAR 3, CASO 4 E ALIMENTADOR 2.....	60

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	10
1.2. JUSTIFICATIVA	11
1.3. OBJETIVO DO TRABALHO	12
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	13
2.2. ELEMENTOS FUNDAMENTAIS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	13
2.2.1. Reguladores de Tensão	13
2.2.2. Banco de Capacitores	21
2.3. TIPOS DE REPRESENTAÇÃO DE CARGA	23
2.3.1. Carga de potência constante com a tensão	24
2.3.2. Carga de corrente constante com a tensão	25
2.3.3. Carga de impedância constante com a tensão	25
2.4. FLUXO DE CARGA	26
2.4.1. Método de soma das correntes	26
3. METODOLOGIA	29
3.1. MODELAGEM DO BANCO DE CAPACITORES	29
3.2. MODELAGEM DO REGULADOR DE TENSÃO	31
3.3. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ANALISADO	32
3.4. MODELAGEM DO ALGORITMO PROPOSTO	34
4. RESULTADOS	35
4.1. CASO 1: CARGA LEVE	36
4.2. CASO 1: CARGA ALTA	41
4.3. CASO 2: CARGA LEVE	45
4.4. CASO 2: CARGA ALTA	49
4.5. CASO 3: CARGA LEVE	53
4.6. CASO 3: CARGA ALTA	55
4.7. CASO 4: CARGA LEVE	56
4.8. CASO 4: CARGA ALTA	59
5. CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

1.1. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O sistema elétrico de potência é formado por três grandes setores, sendo eles:

- a)** Geração: responsável por fazer tradicionalmente a conversão de energia mecânica ou química em energia elétrica.
- b)** Transmissão: responsável por transportar a energia elétrica gerada nas usinas para os centros de distribuição.
- c)** Distribuição: recebe a energia elétrica da transmissão e a entrega aos consumidores finais. É composta de subestações abaixadoras, linhas de distribuição, banco de capacitores, reguladores de tensão, dispositivos de chaveamento, proteção e monitoramento.

As empresas ligadas ao setor da distribuição têm o objetivo de atender os consumidores mantendo os padrões de qualidade do produto estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), descritos no PRODIST - Procedimentos da Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. A não conformidade no fornecimento de energia elétrica pode gerar penalidades pelo descumprimento desta norma regulatória. Para evitar multas, as empresas de distribuição fazem uso de reguladores de tensão, que auxiliam no controle da tensão fornecida aos clientes, e de bancos de capacitores para correção do fator de potência, que diminuem o carregamento da rede e conseqüentemente, acabam por contribuir também o com nível de tensão do sistema. (PEREIRA, 2014)

Alinhado a qualidade de energia elétrica, a racionalização dos recursos financeiros, faz com que as concessionárias de energia trabalhem no intuito de evitar perdas ao longo de suas linhas de distribuição, sejam elas perdas técnicas ou não técnicas. As perdas técnicas derivam de perdas por Efeito Joule devido ao aquecimento dos condutores elétricos pela passagem da corrente elétrica e perdas no consumo de reativos. Uma das medidas a serem tomadas para diminuição de perdas técnicas é o investimento em tecnologia, em obras estruturais com o dimensionamento correto dos condutores e planos de compensação reativa com banco de capacitores automáticos e fixos. As perdas não técnicas são oriundas de

furtos de energia, erros de medição, erros no processo de faturamento, entre outras perdas estas ligadas a gestão comercial. (RESENDE, 2013)

Os algoritmos de fluxo de carga permitem a simulação do estado da rede com a finalidade de calcular as tensões nas barras, calcular as intensidades das correntes elétricas e da potência dissipada que fluem nos trechos de rede existentes. (KANGAN, 2005)

Para calcular e obter o estado de operação da rede é preciso que seja considerado o modelo de linha que será utilizado, em casos de redes primárias e secundárias é usualmente simulado o modelo de linha curta. Também é necessário determinar a modelagem da carga em função da tensão de fornecimento, pois as cargas podem ser classificadas por meio de sua localização, o uso final da energia, etc. A carga pode ser representada pelos modelos: potência constante com a tensão; impedância constante com a tensão; corrente constante com a tensão e pela composição dos três modelos anteriores formando a carga híbrida. A representação da carga no sistema dependerá se a mesma é concentrada ou uniformemente distribuída, por sua demanda máxima e por curvas de cargas típicas. (KAGAN, 2005)

Os algoritmos de fluxo de carga existentes também levam em conta a representação dos equipamentos como reguladores de tensão e bancos de capacitores, no entanto esta modelagem considera tais equipamentos com sendo elementos fixos no sistema, ou seja, não variam de acordo com as mudanças dos sistemas de distribuição. Por esta razão estes algoritmos se diferenciam dos acontecimentos em campo, pois a presença de muitos reguladores de tensão e bancos de capacitores automáticos, onde os mesmos têm a possibilidade de atuar ou não atuar de acordo com o tipo de configuração do sistema.

1.2. JUSTIFICATIVA

Todos os sistemas de distribuição estão sujeitos a apresentarem problemas no fornecimento de energia elétrica como queda de tensão ao longo do alimentador devido a impedância dos cabos e cargas de consumidores e perdas por consumo de potência reativa. Estes problemas geram prejuízos às companhias de distribuição, que por sua vez, trabalham para que esses sejam os menores possíveis, investindo em

tecnologias modernas e uso de aplicativos e *softwares* que retratem o mais fiel possível o sistema de distribuição físico.

Considerando a problemática mencionada anteriormente, justifica-se o estudo de um algoritmo de fluxo de carga que contemple em seus cálculos a modelagem dos reguladores de tensão e bancos de capacitores automáticos, pois desta forma é possível considerar nas simulações do fluxo de carga os efeitos reais destes elementos do sistema, de acordo com as características do sistema de distribuição.

1.3. OBJETIVO DO TRABALHO

Elaborar um algoritmo computacional capaz de calcular o fluxo de carga, levando-se em conta a modelagem de reguladores de tensão e banco de capacitores automáticos. O fluxo de carga com a consideração dos reguladores de tensão e banco de capacitores automáticos possibilitará resultados mais próximos da condição real do sistema em determinado momento, bem como, estudos mais precisos quanto as estratégias de implementação destes equipamentos em campo.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a)** Estudo bibliográfico de fluxo de carga aplicado a sistemas de distribuição de energia;
- b)** Modelagem do sistema de distribuição, linhas, cargas, reguladores de tensão e bancos de capacitores;
- c)** Implementação de um algoritmo de fluxo de carga considerando um alimentador e múltiplos alimentadores radiais;
- d)** Modelagem dos bancos de reguladores de tensão e bancos de capacitores automáticos dentro do fluxo de carga;
- e)** Validação do algoritmo proposto aplicado a um sistema real e comparação dos resultados obtidos com o de programas similares de fluxo de carga.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção do estudo será feita a fundamentação teórica utilizada para atingir o objetivo proposto, abordando os conceitos e características do sistema de distribuição e dos equipamentos nele presentes.

2.1. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Este trabalho é voltado especificamente para sistemas de distribuição que em geral são compostos por subestações abaixadoras e linhas de distribuição.

Os sistemas de distribuição podem ser vistos como um conjunto de alimentadores e chaves seccionadoras e que podem ser compostos por um ou mais setores. (SANTOS, 2009)

O cálculo do fluxo de carga para sistemas de distribuição está ligado diretamente às características de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) e fornece informações relevantes sobre seu funcionamento, suas limitações e condições operacionais como um todo. Para tal equacionamento deve-se levar em conta a presença de equipamentos que são importantes para o funcionamento do mesmo. (PEREIRA, 2014)

2.2. ELEMENTOS FUNDAMENTAIS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Os principais equipamentos presentes em um sistema de distribuição a serem considerados são as linhas de distribuição, as cargas, reguladores de tensão e bancos de capacitores.

2.2.1. Reguladores de Tensão

O regulador de tensão começou a ser aplicado na rede de distribuição de energia elétrica na década de 40, em países desenvolvidos, em função do crescimento territorial que levou os centros de consumo para regiões distantes das subestações. Outro fator para seu surgimento, foi devido ao aumento de

equipamentos sensíveis a oscilações de tensão, onde a qualidade de energia passou a ter mais importância aos consumidores.

A regulação de tensão beneficiou as empresas distribuidoras quanto à redução de perdas na distribuição, o aumento no faturamento e a satisfação de seus clientes. (TOSHIBA, 2012)

A Figura 1 apresenta um esquema da distribuição de energia elétrica com a presença de um regulador de tensão (RT).

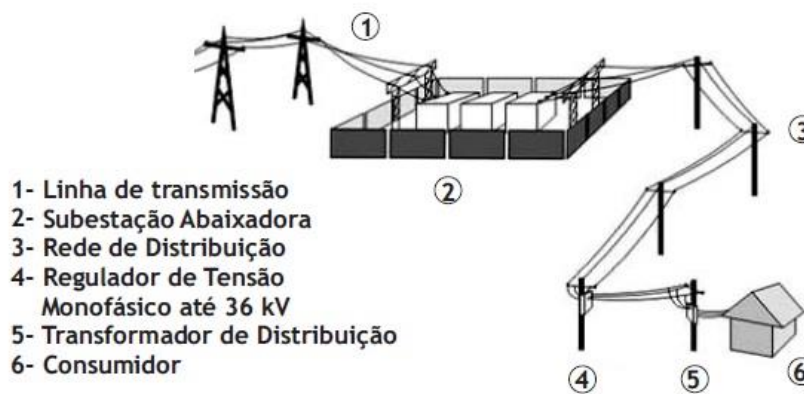


Figura 1 – Esquema de distribuição.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

2.2.1.1. Princípio de Funcionamento

O regulador de tensão tem o princípio de funcionamento parecido com um autotransformador em óleo isolante, constituído de dois enrolamentos, sendo eles o primário e o secundário. Entre os dois enrolamentos existe um acoplamento magnético e outro elétrico. Esta ligação elétrica é realizada por meio de uma chave inversora que possibilita a polarização da bobina do secundário, esta chave inversora determinará se o regulador de tensão deve elevar a tensão nos terminais de saída ou se o mesmo deve rebaixar a tensão de saída em relação a tensão de referência.

A Figura 2 a seguir exemplifica os dois enrolamentos e a ligação elétrica por meio de chave inversora.

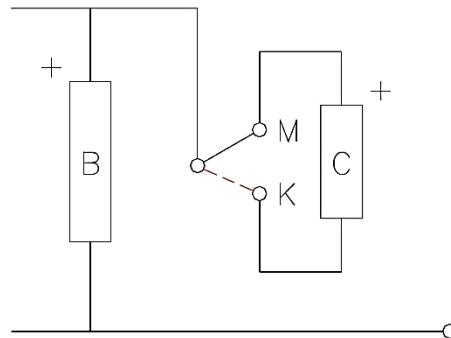


Figura 2 – Bobinas do regulador com chave inversora.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

Para que o efeito do regulador seja gradativo a bobina do secundário é dividida em 16 derivações ou tap's, formando um conjunto de 33 posições para regular a tensão, sendo 16 tap's para cima, 16 tap's para baixo e a posição neutra. Dessa forma a regulação pode corrigir desvios de até $\pm 10\%$ em passos de $0,625\%$ da tensão nominal.

O equipamento realiza a comutação entre os tap's sem o desligamento do circuito, isso é possível devido à presença de um componente chamado de reator. Este componente possui três terminais, dois deles estão ligados aos tap's do secundário e outro alimenta a carga como mostra a Figura 3.

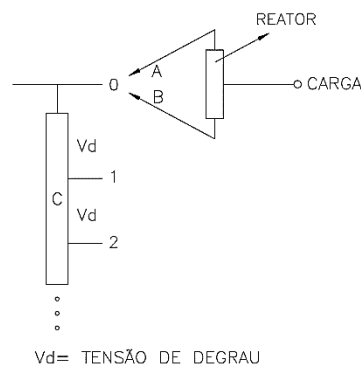


Figura 3 – Representação do reator ligado à bobina do secundário.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

No momento inicial os terminais A e B estão conectados ao mesmo tap do secundário exemplificado na Figura 3.

Assim que necessário um dos terminais A ou B se move para o próximo tap, neste momento a carga passa a ser alimentada pelos dois terminais como na Figura 4 abaixo.

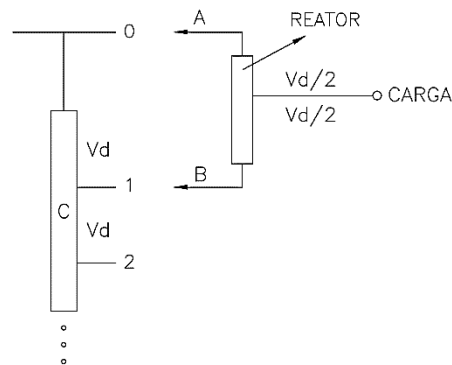


Figura 4 – Representação do reator ligado à bobina do secundário.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

Encerrando a comutação, o terminal que não se moveu se junta com outro e a carga passa a ser alimentada somente pelo novo tap, demonstrado na Figura 5 a seguir.

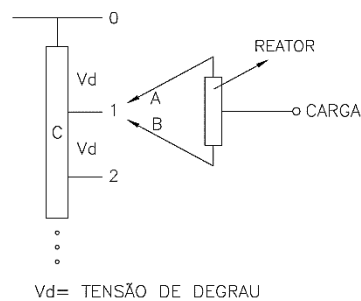


Figura 5 – Representação do reator ligado à bobina do secundário.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

2.2.1.2. Tipos de Conexão

O regulador de tensão pode ser conectado à rede elétrica formando um banco de regulação, dentre as conexões possíveis se destacam:

- Conexão em estrela;
- Conexão em delta fechado;
- Conexão em delta aberto.

Na Figura 6 é apresentado o esquema de ligação em estrela.

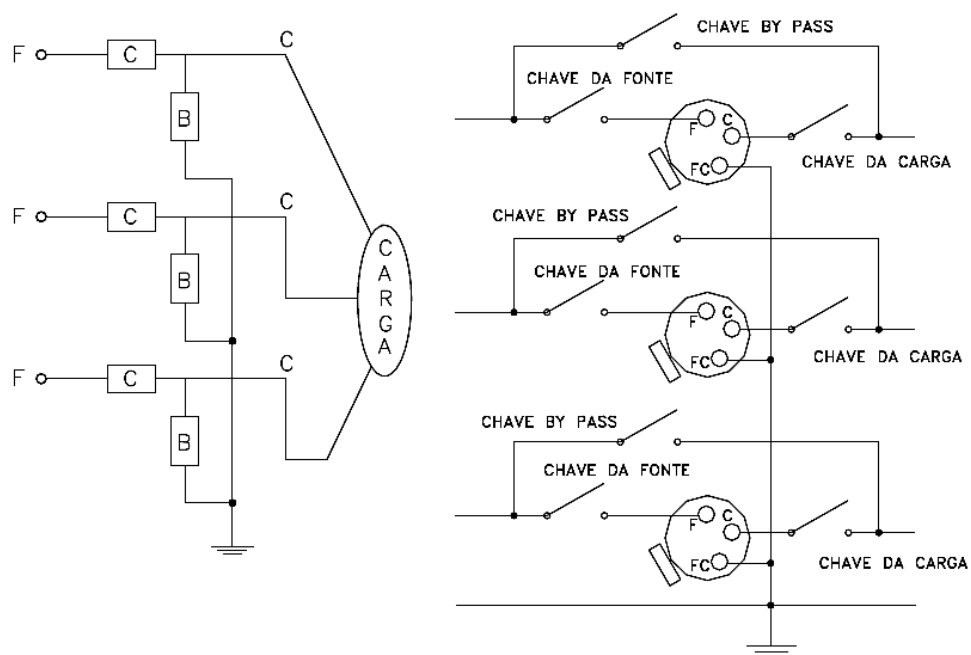


Figura 6 – Representação da conexão estrela.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

Para as conexões em estrela é recomendado que a fonte de alimentação seja em estrela, pois para o fornecimento em triangulo, o neutro virtual poderá se deslocar caso a carga seja desequilibrada, o que fará com que o banco de reguladores entre em uma avalanche de comutações.

Na Figura 7 é apresentado o esquema de ligação para conexão em delta fechado.

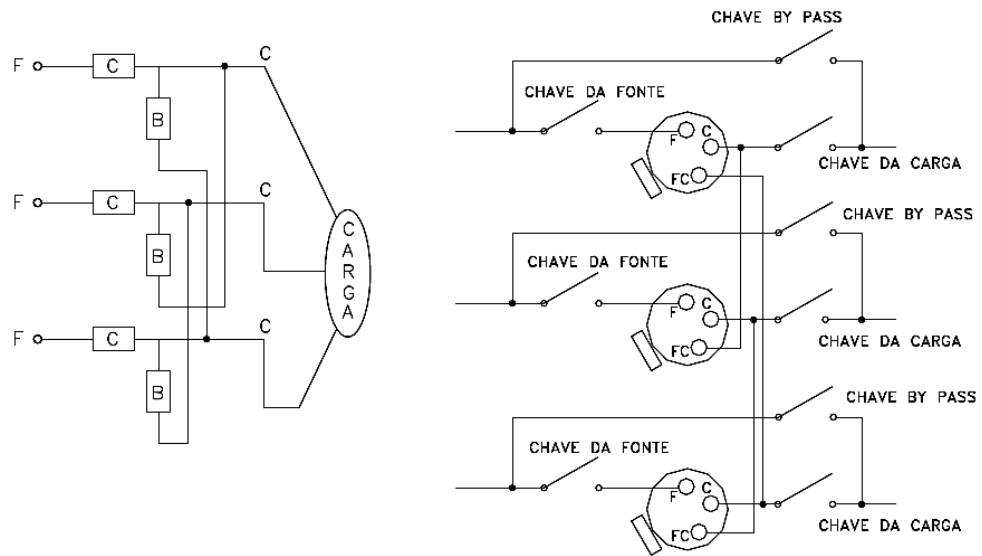


Figura 7 – Representação da conexão delta fechado

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

A regulação em conexão de delta fechado possibilita a correção de desvios de até $\pm 15\%$.

Na Figura 8 é ilustrado o tipo de conexão em delta aberto.

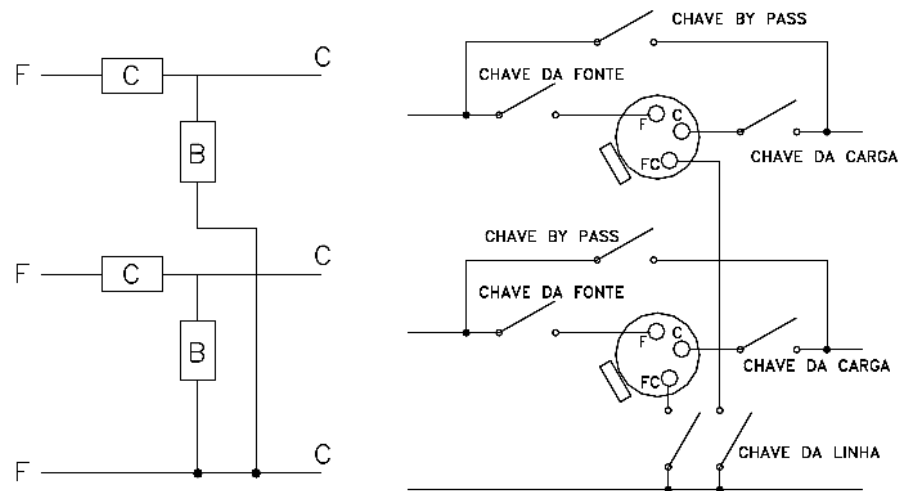


Figura 8 – Representação da conexão delta aberto.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

2.2.1.3. Funções

Os modelos disponíveis no mercado, geralmente, apresentam as seguintes funções:

- Compensar a queda na linha;
- Limitar a tensão;
- Load bônus;
- Medição de demanda com registro de eventos;
- Detector de fluxo inverso;
- Tensão de referência.

Usualmente, destaca-se a função de tensão de referência, cuja finalidade é controlar o nível de tensão na rede de distribuição, mantendo a maior estabilidade possível. Esta função trabalha em conjunto com um transformador de potencial (TP) instalado no lado da carga, usado para comparar a tensão medida em seu secundário com a tensão de referência ajustada. A diferença entre estas tensões faz com que o comutador atue ajustando a tensão dentro dos valores parametrizados.

2.2.1.4. Representação do Regulador de Tensão

A Figura 9 demonstra a ligação interna do regulador de tensão.

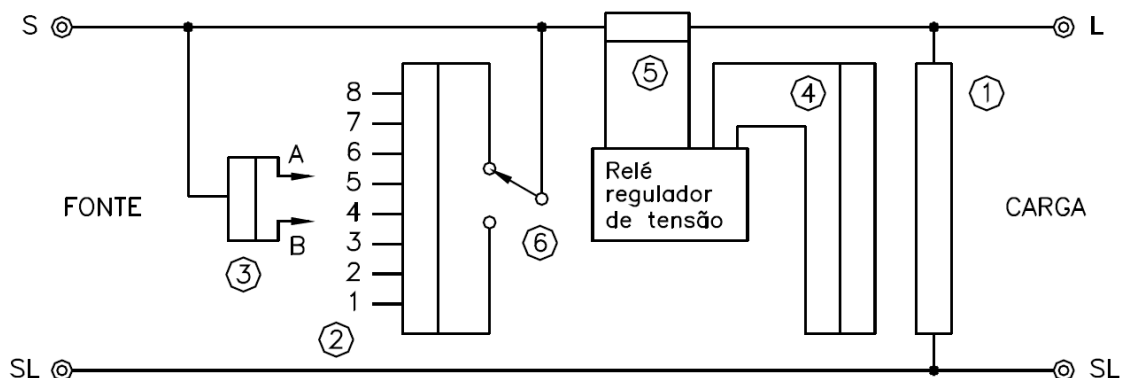


Figura 9 – Ligação do Regulador de Tensão.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

O enrolamento 1, chamado de enrolamento de excitação, induz uma tensão no enrolamento 2, também conhecido por enrolamento de TAP's ou regulação. Na Figura

9, o TP4 (transformador de potencial) instalado do lado da carga envia um sinal para o Controle regulador de tensão que posiciona os terminais A e B do reator, item 3, Figura 9, 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, sendo que seu controle é feito pelo Controle regulador. O TC5 (transformador de corrente) 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.

O RT possui um ajuste da insensibilidade que determina a faixa de precisão, a partir da Tensão de Referência (V_{ref}), dentro da qual o regulador considera que não há necessidade de comutação, estabelecendo assim a variação máxima da tensão na carga.

Exemplo:

$V_{ref} = 120V$

$NS = 3V$ ou $(2,5\%)$

Faixa = $120 \pm 3V$ ou $(2,5\%)$

Banda máxima = $123V$

Banda mínima = $117V$

A comutação será realizada quando a tensão sair fora da faixa de insensibilidade, que será da seguinte forma representada na Figura 10.

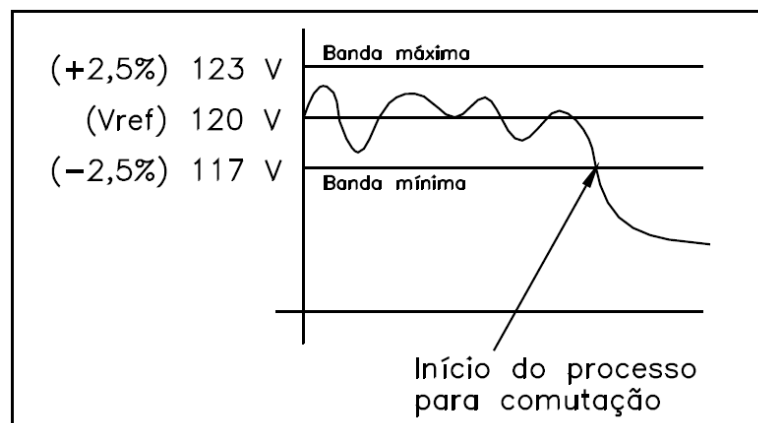


Figura 10 – Comutação do Regulador de Tensão.

Fonte: Adaptado do Manual Toshiba.

Isso quer dizer que na faixa de (117 a 123V), não há comutação. O controle não emite nenhum comando de elevar ou abaixar para o comutador.

Também é necessário que haja um controle temporizado para evitar comutações desnecessárias em função de variações rápidas de tensão. Sem ela ocorreria um número excessivo de comutações, provocando desgaste mecânico acelerado do comutador. Dessa forma, a correção de tensão se dá somente para variações de tensão cujas intensidades estejam fora dos valores ajustados pela Tensão de Referência e largura de faixa, e por período maior que o determinado na temporização.

2.2.2. Banco de Capacitores

O banco de capacitores tem a função de corrigir o fator de deslocamento. O fato de diminuir a potência reativa no sistema auxilia na redução de queda de tensão nos pontos mais distantes da subestação e reduz a potência aparente, com esse efeito a corrente que circula nos condutores também diminui.

Os bancos de capacitores, portanto apresentam os seguintes benefícios:

- Aumentar o fator de potência;
- Regular a tensão no sistema;
- Reduzir o carregamento nos transformadores das subestações;
- Reduzir o carregamento nos condutores da rede distribuição;
- Reduzir perdas inerentes por reativo e efeito joule devido a menor circulação de corrente elétrica nos condutores.

2.2.2.1. Ligação dos Bancos

Os bancos de capacitores podem ser conectados à rede de distribuição em paralelo ou em série com o circuito. Estas duas formas de ligação se distinguem nos benefícios para o sistema de distribuição.

A ligação do banco de capacitores em paralelo com a rede de distribuição é utilizada para corrigir o fator de potência nas linhas de distribuição. Enquanto a ligação do banco de capacitores em série reduz as quedas de tensão no sistema de

distribuição oriundas de impedâncias indutivas. A correção do fator de potência para ligação em série não é efetiva quando comparada com a ligação em paralelo, mesmo apresentando um ganho de tensão no alimentador. (FRAGOAS, 2008)

2.2.2.2. Tipos de Funcionamento

Os bancos de capacitores apresentam dois tipos de funcionamento, sendo eles:

- a) **Fixo:** geralmente ligados próximos às subestações por concentrar toda a carga do alimentador funcionando em tempo integral;
- b) **Automáticos:** estes são ligados próximos as fontes consideráveis de reatância indutiva, como perto de indústrias com muitos motores elétricos, são capazes de atuar conforme a necessidade do consumo de potência reativa.

2.2.2.3. Bancos de Capacitores Automáticos

Para a utilização com eficácia dos bancos de capacitores automáticos é necessário que haja um estudo elaborado por meio de análises das curvas de cargas típicas do alimentador. As curvas de cargas apresentam os valores de potência aparente, potência ativa e potência reativa por horário ou patamar de carga. O estudo também deve fornecer o melhor tipo de controle para cada caso.

O controle do banco de capacitor consiste na comparação de valores obtidos por meio de agenda (calendário), transformadores de potencial, transformadores de corrente e outros entre os valores previamente programados para entrada e saída do banco.

2.2.2.4. Operações Automáticas

O controle pode chavear o banco de capacitores automaticamente usando várias estratégias de controle: temperatura, agenda, somente tensão, tensão x tempo, temperatura x tempo, corrente e var. (INTELLICAP, 1998)

Quando a operação automática está no modo de controle Corrente, o controle chaveia o banco de capacitores com base no fluxo de corrente monofásica medido. Usa-se a seguinte logica para determinar quando chavear o banco de capacitores:

- a) O controle monitora a corrente de linha.
- b) Assim que o controle sente que a corrente ultrapassou a corrente de linha na qual o Banco é ligado (ou desligado), ele inicia a contagem de tempo que definirá se o banco deve ser comutado ou não.
- c) Se a corrente de linha permanecer continuamente acima da corrente na qual o Banco é ligado durante o tempo estabelecido para comutar o mesmo, o controle liga o banco de capacitores. Se ela permanecer continuamente abaixo da corrente na qual o Banco é desligado durante o tempo estabelecido para comutar o mesmo, o controle desliga o banco.

A Figura 11 mostra uma variação da corrente ao longo do tempo e os pontos nos quais o banco seria ligado e desligado.

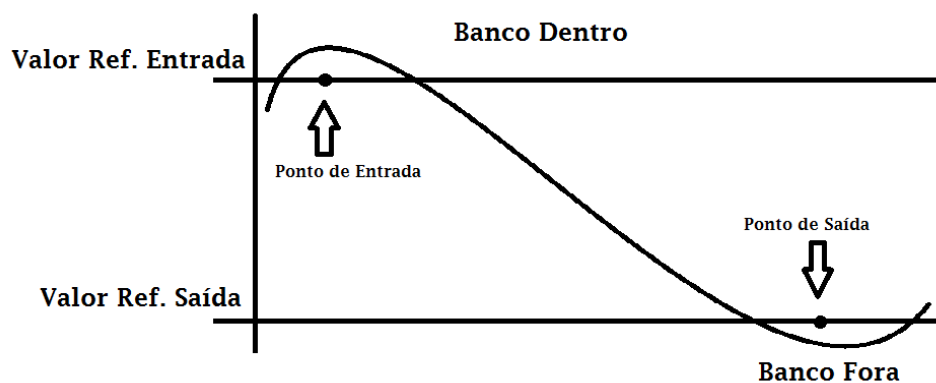


Figura 11 – Funcionamento do Banco de capacitores automáticos.

Fonte: Próprio.

2.3. TIPOS DE REPRESENTAÇÃO DE CARGA

Para o cálculo do fluxo de carga é necessário que a representação matemática da carga seja equivalente com seu comportamento físico na rede para evitar resultados que não condizem com o real funcionamento do sistema. (PEREIRA, 2014)

As cargas podem ser representadas por vários modelos de comportamento em função da tensão aplicada, dentre os quais se destacam os modelos de carga de potência constante com a tensão, de carga de corrente constante com a tensão, de cargas de impedância constante com a tensão. (KAGAN, 2005)

2.3.1. Carga de potência constante com a tensão

Segundo Kagan (2005), nas cargas de potência constante com a tensão, as potências ativas e reativas não variam com o valor da tensão que as alimenta, sendo assim, a potência absorvida por uma carga é constante para qualquer valor de tensão.

Para uma carga monofásica temos:

$$\bar{S}_{NF} = S_{NF} \angle \varphi = P_{NF} + jQ_{NF} \quad (1)$$

Sendo:

S_{NF} = potência absorvida;

P_{NF} = potência ativa;

Q_{NF} = potência reativa.

A corrente é obtida por para qualquer valor de tensão $\dot{V}_F = V_F \angle \theta_1$

$$\dot{I}_F = \frac{\bar{S}_{NF}^*}{\dot{V}_F^*} = \frac{S_{NF} \angle -\varphi}{V_F \angle -\theta_1} = \frac{S_{NF}}{V_F} \angle \theta_1 - \varphi \quad (2)$$

Sendo:

\dot{I}_F = corrente absorvida pela carga;

V_F = tensão de nominal;

φ = ângulo da potência;

θ_1 = ângulo de fase.

Sendo que a corrente é inversamente proporcional à tensão aplicada.

2.3.2. Carga de corrente constante com a tensão

Este modelo considera as cargas cuja intensidade de corrente absorvida e o ângulo de rotação de fase entre a tensão e a corrente não variam, ou seja, não sofrem variação sensível quando a tensão varia. (KAGAN, 2005)

Para este caso a corrente pode ser obtida para qualquer valor de tensão $V_{NF} = V_{NF} \angle \theta$, pela expressão:

$$\dot{I}_{NF} = \frac{\bar{S}_{NF}^*}{\dot{V}_{NF}^*} = \frac{S_{NF} \angle -\varphi}{V_{NF} \angle -\theta} = \frac{S_{NF}}{V_{NF}} \angle \theta - \varphi = I_{NF} \angle \theta - \varphi \quad (3)$$

Onde:

V_{NF} = Tensão nominal;

I_{NF} = Corrente absorvida.

2.3.3. Carga de impedância constante com a tensão

Em cargas de impedância constante com a tensão é obtida por meio da expressão:

$$\bar{Z}_{Cons} = \frac{V_{NF}^2}{\bar{S}_{NF}^*} = \frac{V_{NF}^2}{S_{NF}} \angle \varphi = R + jX \quad (4)$$

Onde:

\bar{Z}_{Cons} = impedância;

R = componente real da impedância;

X = componente imaginária da impedância.

Em que:

$$R = \frac{V_{NF}^2}{S_{NF}} \cos \varphi \quad (5)$$

$$X = \frac{V_{NF}^2}{S_{NF}} \sen \varphi \quad (6)$$

Para qualquer valor de tensão $\dot{V}_F = V_F \angle \theta_1$ alimentando a carga, a potência se dá por:

$$\bar{S}_F = \dot{V}_F \times \dot{I}^* = \dot{V}_F \times \frac{\dot{V}_F^*}{\bar{Z}_{Cons}^*} = \frac{V_F^2}{\frac{V_{NF}^2}{\bar{S}_{NF}}} = \left(\frac{V_F}{V_{NF}} \right)^2 \times \bar{S}_{NF} \quad (7)$$

\bar{S}_F = potência absorvida;

\dot{V}_F = tensão nominal;

\dot{I}^* = corrente absorvida.

Onde a potência varia quadraticamente com a tensão aplicada a ela.

2.4. FLUXO DE CARGA

Para analisar o sistema de distribuição de energia elétrica de forma computacional é utilizado o fluxo de carga. Este tem como resultado as grandezas de tensão, corrente elétrica e potência ativa e reativa em cada barra do sistema. Para determinar as grandezas citadas em sistemas de distribuição radial os métodos de fluxo de carga convencionais como Newton-Raphson, Desacoplado Rápido e outras versões oriundas dos mesmos, geralmente, não são adequadas por exigirem a fatoração de matrizes, devido as características do sistema de distribuição estas são mal condicionadas. Entre estas características temos a baixa relação R/X (resistência/reatância) das linhas e grande número de barras e linhas. (HERRANZ, 2013)

Métodos que não exigem fatoração de matrizes, como os de varredura direta/inversa, são mais empregados em sistemas de distribuição pela robustez e simplicidade. O método de soma das correntes utiliza este tipo de varredura.

2.4.1. Método de soma das correntes

O método de soma de correntes segundo Shirmohammadi (1988) é proposto para aplicações em sistemas de distribuição fracamente malhados. Segundo Sanches

(2013) o método pode ser descrito a partir da consideração de um sistema com i barras e t trechos.

Primeiramente definem-se os valores das tensões nas barras como sendo o valor nominal da subestação para primeira iteração.

Com base na definição acima é possível calcular a corrente absorvida em cada barra por meio da expressão a seguir:

$$I_i^k = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right) - Y_i^{sh} V_i^{(k-1)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Onde:

i é o número da barra.

k é o número da iteração.

I é a corrente absorvida.

S é a potência requerida na barra.

V é a tensão na barra.

Y^{sh} é a soma dos elementos shunts conectados a barra.

Assim inicia-se a etapa inversa, que consiste em realizar o somatório das correntes dos trechos que entram da barra antecessora partindo da última barra do alimentador até chegar à barra da subestação.

$$J_i^k = \sum (\text{correntes dos trechos que entram da barra antecessora}) \quad (9)$$

$$i = l, l - 1, \dots, 2, 1$$

Onde:

J é a corrente na barra.

l é o número da última barra.

Na etapa direta os valores das tensões são calculados partindo da subestação para a última barra do alimentador por meio da seguinte expressão:

$$V_i^k = V_{i-1}^k - Z_i^k J_i^k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

Onde:

Z é a impedância da linha.

Caso a convergência não seja obtida o método se repetirá. A convergência é dada pela expressão:

$$\varepsilon \geq V_i^{(k+1)} - V_i^k \quad (11)$$

Em que:

ε é o erro máximo admitido.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho iniciaram-se os estudos com a representação dos elementos presentes no sistema de distribuição de forma simplificada. Nesta etapa considerou-se apenas as modelagens referentes as impedâncias das linhas de distribuição, o posicionamento de cada barra e a potência das cargas ligadas às barras do sistema.

Tendo em vista efetuar o cálculo do fluxo de carga de forma iterativa, criou-se um algoritmo no MatLab, utilizando-se o método de soma de correntes para obter os valores de tensão e corrente em cada barra para um único alimentador e depois para mais de um alimentador. Considerou-se a representação da carga em três tipos, sendo eles, a carga de potência constante, a impedância constante e a corrente constante.

O cálculo das correntes baseia-se nos valores de tensões admitidos com sendo o valor nominal da subestação em todas as barras e na informação dos valores de potência das cargas em cada barra. A corrente calculada de cada barra soma-se na barra que a antecede, assim se obtém a corrente que circula em todo o sistema. Em seguida calcula-se o valor das quedas de tensão e conseqüentemente as tensões nas barras, com os valores obtidos do passo anterior e os valores das impedâncias de cada trecho.

Com intuito de obter os ângulos das tensões calculadas acresceu-se ao algoritmo o cálculo da tensão na forma complexa, onde foi considerado ângulo inicial igual zero.

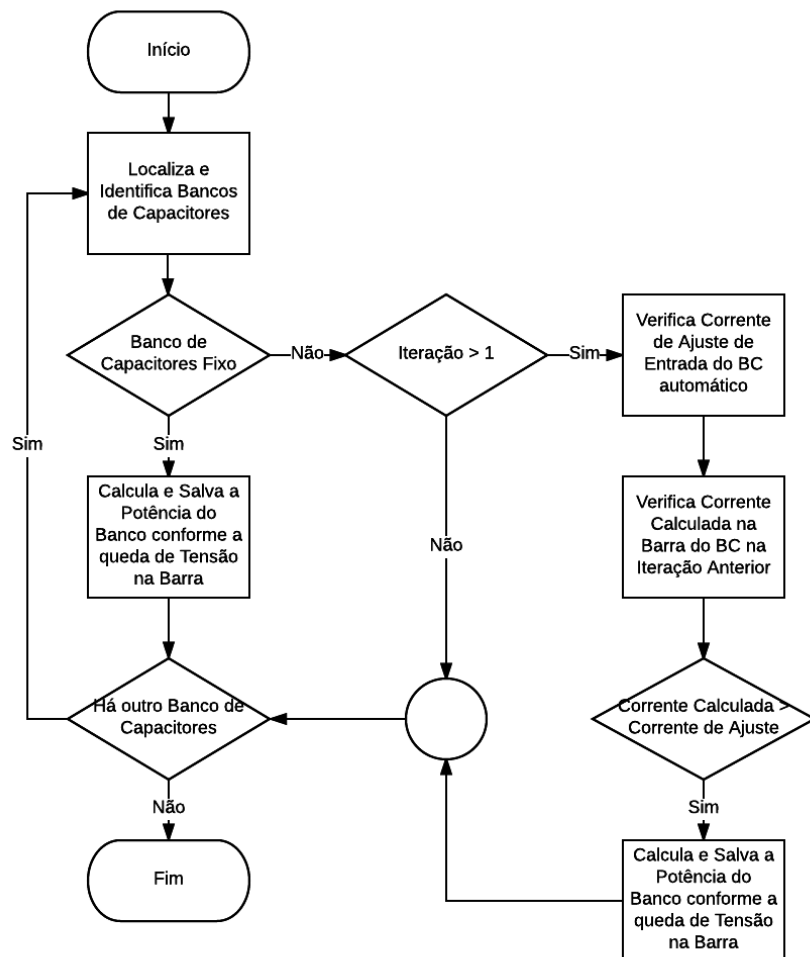
Ao algoritmo proposto foi introduzido a verificação, localização e identificação de bancos de capacitores fixos e automáticos e reguladores de tensão.

3.1. MODELAGEM DO BANCO DE CAPACITORES

O banco de capacitores fixo permanece ligado à rede de distribuição em tempo integral, ou seja, não realiza comutação de entrada e saída, este é considerado como uma carga puramente capacitiva. Após o cálculo da primeira iteração, atualiza-se o

valor da potência do banco, de acordo com a nova tensão na barra que está conectado.

O banco de capacitores automático também é considerado uma carga puramente capacitiva, no entanto, este só é conectado à rede de distribuição caso haja a necessidade de compensar a potência reativa. Para verificar a necessidade ou não da entrada do banco de capacitor automático é utilizado o controle por corrente, que compara se a corrente na barra, em que está conectado o banco, calculada após a primeira iteração é maior ou menor do que a corrente ajustada para entrada do banco na rede. Se a corrente calculada for maior que a corrente ajustada, o banco é conectado à rede e se a corrente calculada for menor que a corrente ajustada o banco permanece desligado. Após a entrada do banco o mesmo segue conectado à rede para as demais iterações. A lógica pode ser representada por meio do Fluxograma 1.

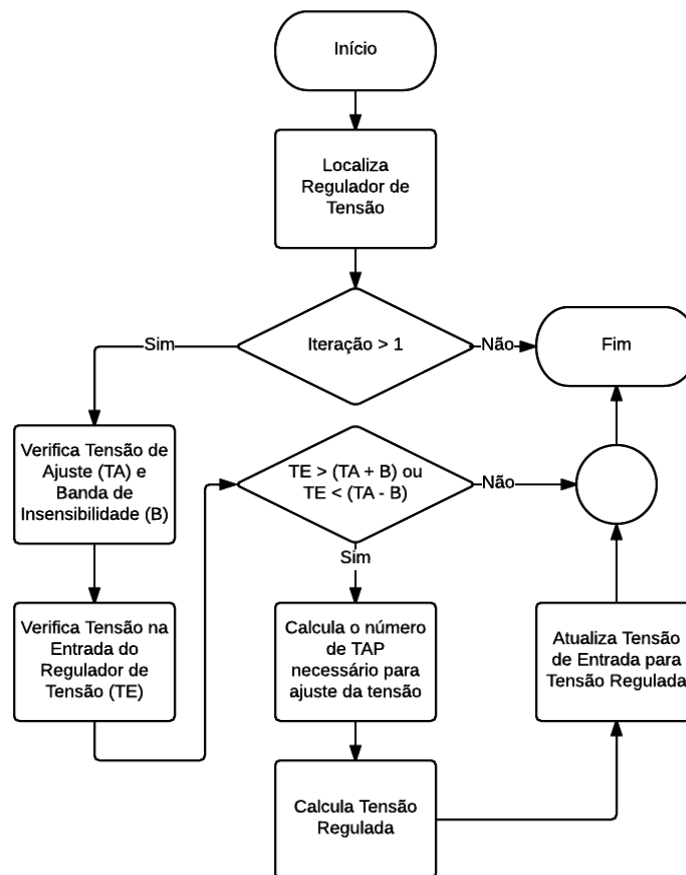


Fluxograma 1 – Modelagem do Banco de Capacitores.

A corrente de referência de entrada para o banco de capacitores automático é adotada após serem analisados requisitos de corrente e nível de consumo de kVAr no sistema em diferentes horários, por meio de análise de curvas de carga do alimentador.

3.2. MODELAGEM DO REGULADOR DE TENSÃO

Quanto ao regulador de tensão, este trabalha como um autotransformador, assim que comparada a tensão de entrada do regulador com a tensão de referência estabelecida, é calculado qual o nível de regulação deve ser aplicado com base na porcentagem máxima de regulação e do número de taps do regulador. Este processo é executado após o cálculo da primeira iteração e realizados para todas as iterações seguintes, fazendo que o ajuste se adapte a cada passo iterativo. A lógica pode ser expressa como segue no Fluxograma 2.



Fluxograma 2 – Modelagem do Regulador de Tensão.

A tensão de referência adotada para os regulares varia conforme a tensão da subestação a qual o alimentador está conectado. Para o caso de uma subestação de tensão 13800 V foi adotado o valor de regulação de 13680 V.

3.3. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ANALISADO

A base de dados reais foi extraída de uma concessionária cuja a cidade possui aproximadamente 39 mil habitantes. A cidade também possui uma subestação com 6 alimentadores, destes foram utilizados apenas 2 alimentadores, por possuírem as características necessárias para aplicação deste trabalho.

Dados do alimentador 1:

- 673 Barras;
- 114 Transformadores;
- Potência Instalada de 11743 kVA;
- 1 Banco de Capacitores Fixo de 450 kvar;
- 1 Banco de Capacitores Automático de 600 kvar;
- Maior distância da Subestação 8696 m;
- Tensão de Alimentação de 13800 V.

Dados do alimentador 2:

- 2663 Barras
- 370 Transformadores;
- Potência Instalada de 18835 kVA;
- 2 Bancos de Capacitores Fixo um de 450 kvar e outro de 300 kvar;
- 2 Bancos de Capacitores Automático de 600 kvar;
- 1 Banco de Regulador de Tensão conectado em Delta Aberto com regulação de $\pm 10\%$, 16 Taps, Capacidade de Corrente de 100 A e tensão regulada em 13,68 kV;
- Maior distância da Subestação 27112 m;
- Tensão de Alimentação de 13800 V.

A Figura 12 a seguir representa a configuração descrita dos alimentados, em destaque estão os bancos de capacitores (círculos pretos) e regulador de tensão (círculo azul).

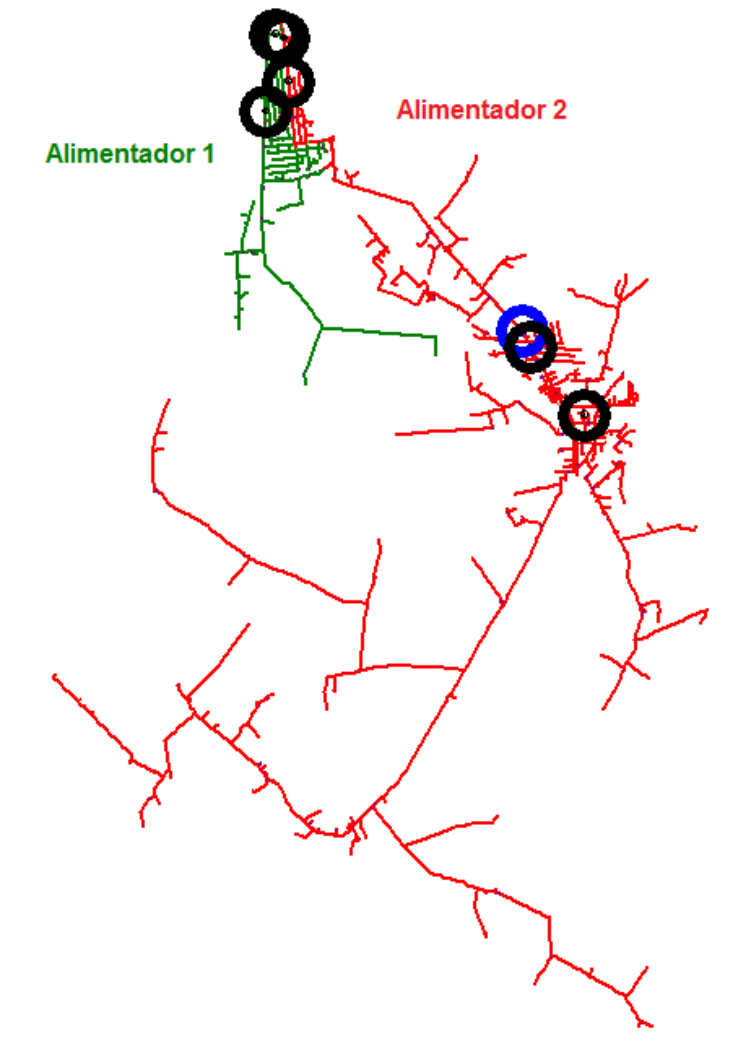


Figura 12 – Representação gráfica dos alimentados analisados.

Fonte: Adaptado do Programa Utilizado pela Concessionaria.

Com esta base se estabeleceu algumas simulações para verificação do algoritmo proposto por etapas, primeiramente sendo retirado do sistema os equipamentos de regulagem de tensão e compensação reativa.

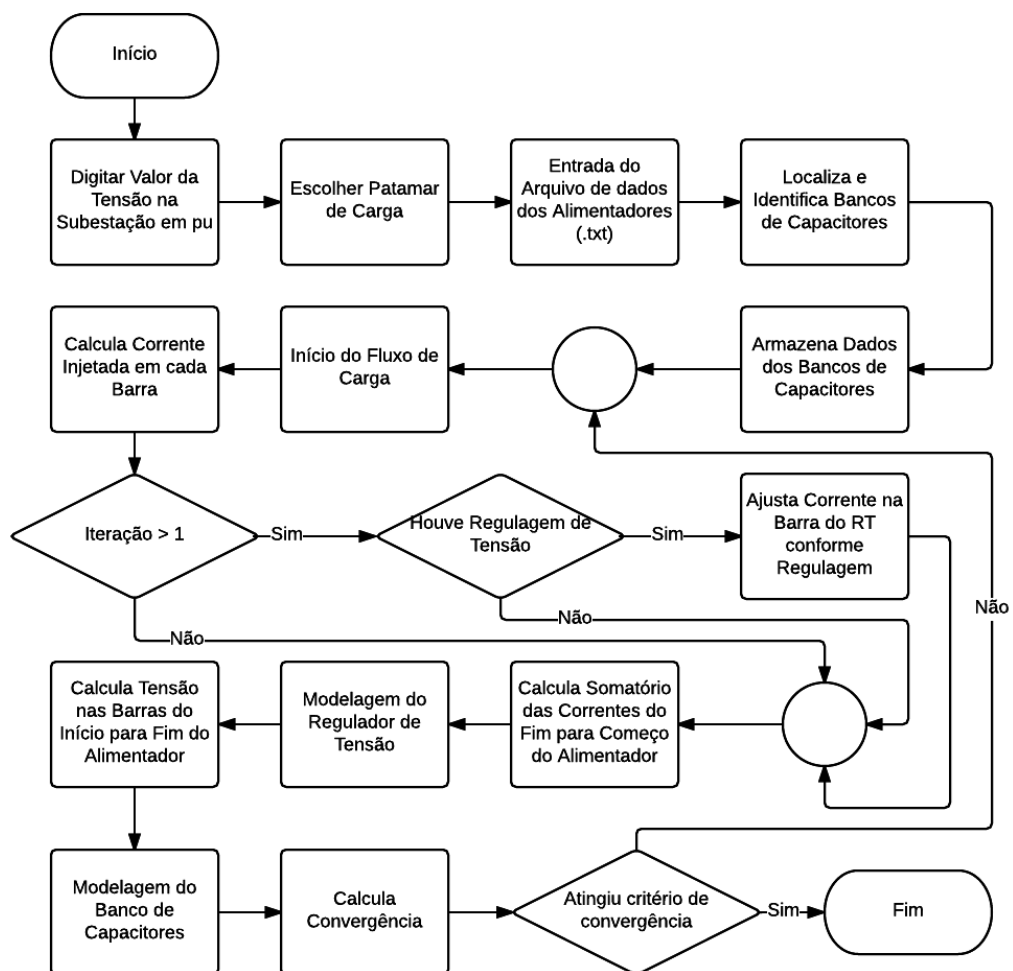
Outras duas simulações também auxiliaram na verificação do algoritmo proposto, uma somente com o uso de bancos de capacitores e outra somente com o uso de reguladores de tensão.

Com a validação dos passos anteriores foi possível realizar o cálculo do fluxo de carga com a modelagem dos bancos de capacitores e reguladores de tensão existentes no sistema.

Para a demonstração dos resultados obtidos foi adotado a amostragem do sistema de distribuição onde se encontrava a maior queda de tensão ao longo do alimentador e que nesta barra também se encontrassem os equipamentos objetivos deste trabalho a montante.

3.4. MODELAGEM DO ALGORITMO PROPOSTO

O Fluxograma 3 representa as etapas de funcionamento do algoritmo proposto.



Fluxograma 3 – Modelagem do Algoritmo Proposto.

4. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes as aplicações dos dados obtidos em conjunto com a concessionária de energia, os quais, estes foram aplicados ao algoritmo proposto na plataforma do Matlab, para o fluxo de carga em redes de distribuição com modelagem de reguladores de tensão e bancos de capacitores automáticos e fixos.

Os resultados obtidos por meio do algoritmo proposto serão comparados com os resultados do programa utilizado pela companhia para o cálculo do fluxo de carga. É importante salientar que o programa desenvolvido pela companhia leva em conta a modelagem de bancos de capacitores e reguladores de tensão.

Os dados coletados se referem a dois alimentadores extraídos da base de dados da concessionária, nos quais foram subdivididos em quatro casos no âmbito de validar o algoritmo proposto, sendo eles:

Caso 1: Alimentadores sem a aplicação de reguladores de tensão e bancos de capacitores fixos e automáticos.

Caso 2: Alimentadores com somente a aplicação de bancos de capacitores fixos e automáticos.

Caso 3: Alimentadores com somente a representação de reguladores de tensão.

Caso 4: Alimentadores levando em conta a representação dos reguladores de tensão e bancos de capacitores.

Para os casos 1, 2 e 3 têm-se os valores simulados no programa utilizado pela concessionária para análise por partes para validação das componentes presentes no sistema elétrico. No caso 4 têm-se os valores calculados pelo programa da concessionária sem alterações na base de dados, pois esse se trata da presença de todos os componentes do sistema elétrico a serem analisados neste estudo.

As cargas presentes no sistema elétrico variam conforme o consumo de seus clientes durante o dia. Esta carga pode ser dividida em cinco patamares de consumo, sendo estes: Madrugada, Manhã, Tarde, Ponta e Noite. Estes Patamares auxiliaram para avaliar a necessidade de utilização de bancos de capacitores automáticos e

reguladores de tensão, para isso serão utilizados dois tipos de carga, sendo uma coletada do patamar 1 referente ao período da madrugada, e outra do patamar 3 referente ao período da tarde.

A escolha dos patamares foi feita analisando o consumo destes, pois no período da madrugada têm-se uma queda elevada de consumo, sendo assim é provável que não seja necessário a utilização de bancos de capacitores. O período da tarde foi escolhido pois têm-se uma grande presença de indústrias e comércios, nos quais há um grande consumo de potência reativa, justificando a necessidade de entrada dos bancos de capacitores automáticos.

4.1. CASO 1: CARGA LEVE

As Figuras 13, 14, 15 e 16 demonstram os resultados obtidos do fluxo de carga para tensão ao longo do alimentador, erro da tensão percentual, corrente elétrica e potência reativa no sistema elétrico, respectivamente, sem a aplicação de reguladores de tensão e sem os bancos de capacitores fixos e automáticos para o patamar 1 no alimentador 1.

Na Figura 13 observa-se que a tensão ficou próxima da calculada pelo programa utilizado pela companhia.

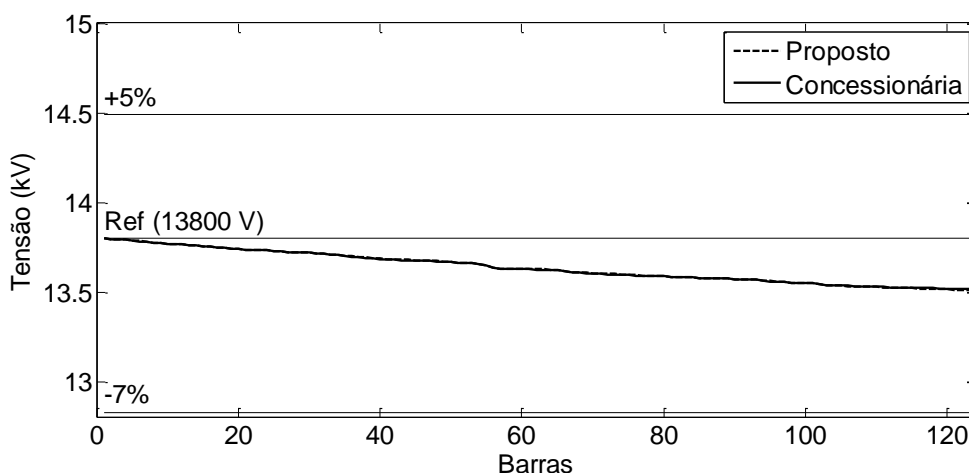


Figura 13 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 1 e alimentador 1.

Na Figura 14 observa-se que o erro máximo percentual ficou próximo a 0,025% entre os valores calculados por ambos algoritmos.

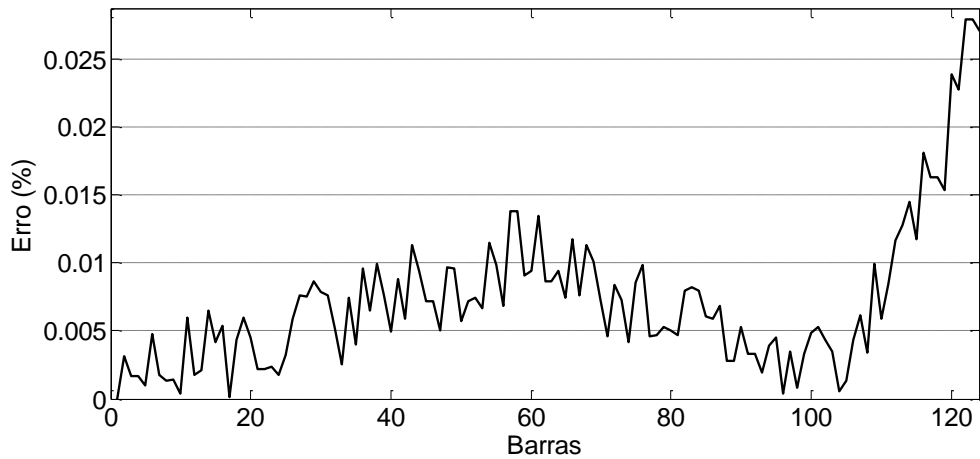


Figura 14 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 1, caso 1 e alimentador 1.

Na Figura 15 temos valores de corrente calculadas por ambos programas praticamente sobrepostas.

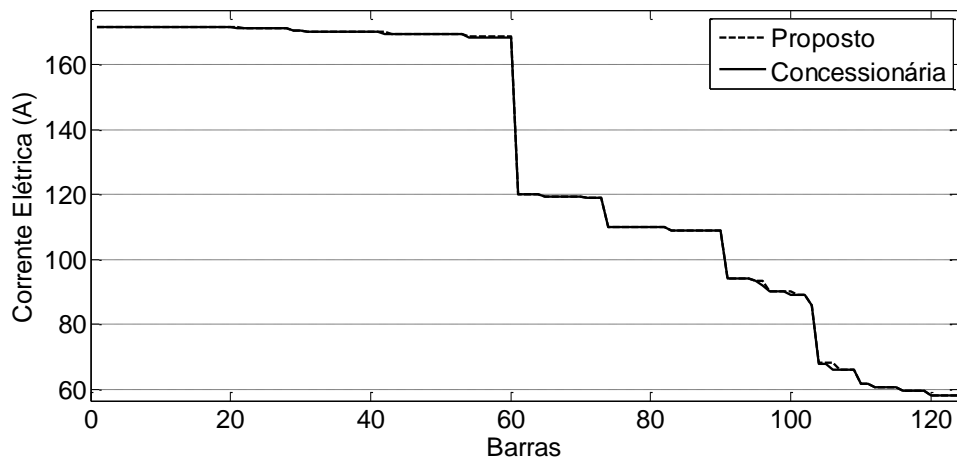


Figura 15 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 1 e alimentador 1.

Na Figura 16 é possível analisar a evolução da potência reativa ao longo alimentador para o algoritmo proposto.

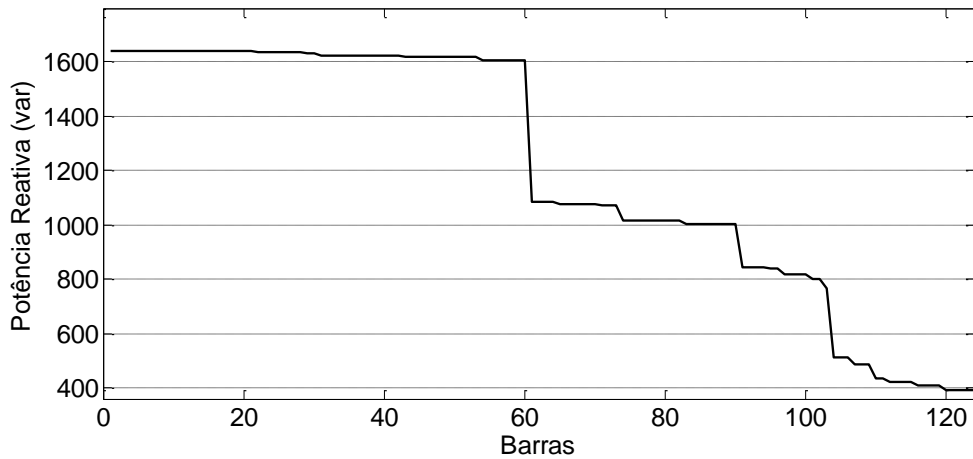


Figura 16 – Potencia Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 1, caso 1 e alimentador 1.

As Figuras 17, 18, 19 e 20 abaixo representam os resultados obtidos nas mesmas condições da simulação anterior, no caso aplicado ao alimentador 2.

Por se tratar de simulações sem a modelagem de banco de capacitores e reguladores de tensão na Figura 17 temos tensões abaixo de 7% da tensão de referência regulamentado pelo Prodist.

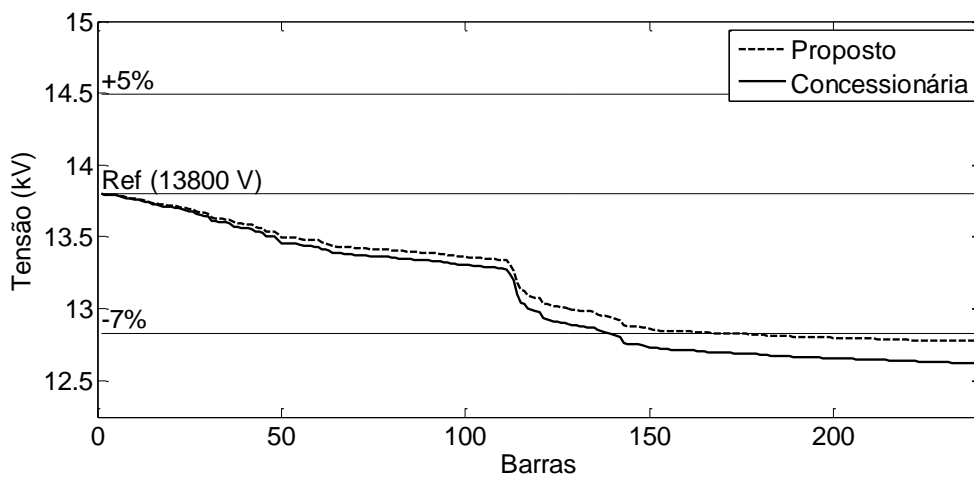


Figura 17 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 1 e alimentador 2.

O erro percentual na tensão visto na Figura 18 apresenta seu máximo valor próximo a 1%.

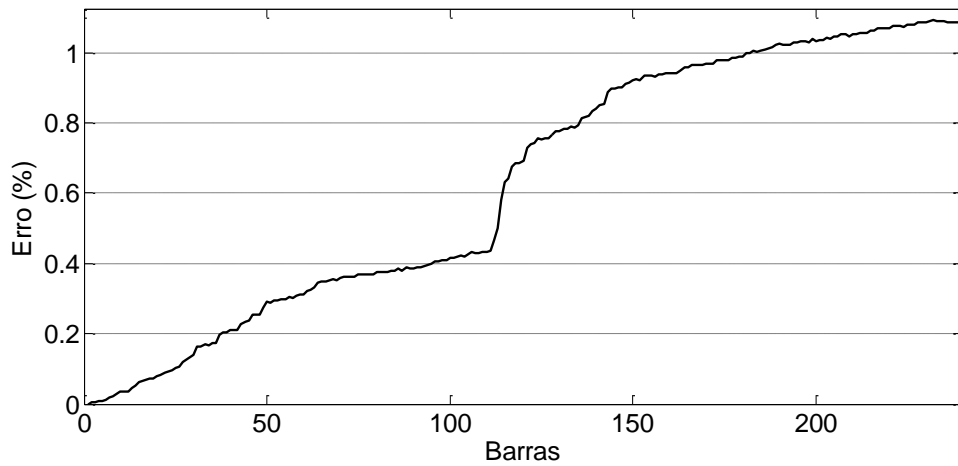


Figura 18 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 1, caso 1 e alimentador 2.

Nas figuras 19 e 20 observa-se a mudança de carga entre os alimentadores 1 e 2, quando comparadas com as Figuras 15 e 16 em vista que a corrente elétrica e a potência reativa evoluem ao longo do alimentador.

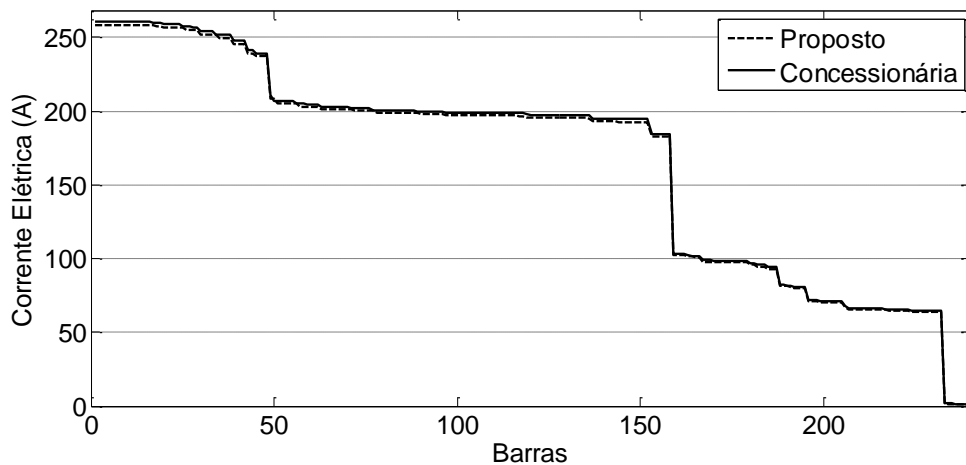


Figura 19 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 1 e alimentador 2.

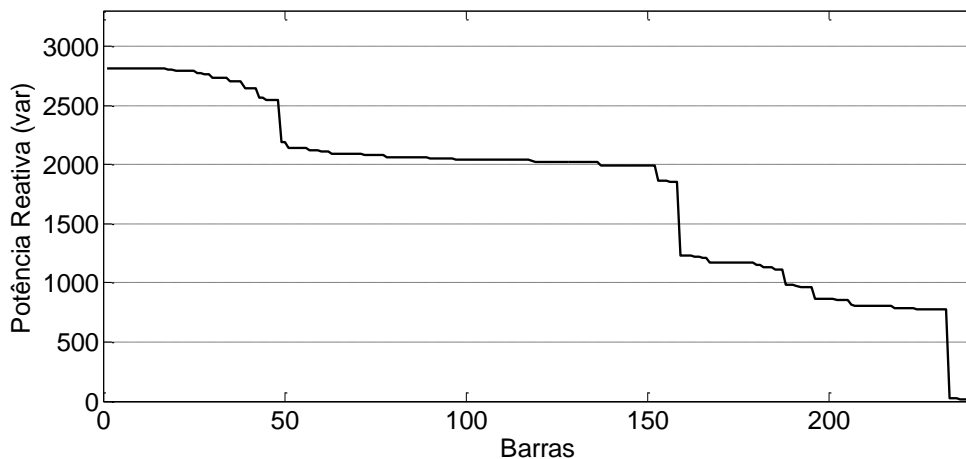


Figura 20 – Potencia Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 1, caso 1 e alimentador 2.

O Quadro 1 a seguir apresenta um resumo dos dois alimentadores analisados, quanto a corrente, potência ativa e reativa na subestação e maior queda de tensão tanto para o algoritmo proposto quanto ao utilizado pela concessionária.

Quadro 1 – Proposto x Concessionária para patamar 1 caso 1.

Alimentador	Corrente (A)		Potência Ativa (W)		Potência Reativa (var)	
	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária
Alimentador 02	258,3	260,6	5496,6	5391,9	2813,7	3119,6
Alimentador 01	171,6	171,6	3760,1	3734,7	1639,9	1694,8
Total SE	430,0	432,2	9256,7	9126,7	4453,6	4814,4
Alimentador	Maior Queda de Tensão (V)					
	Proposto	Concessionária				
Alimentador 02	12386,9	12368,0				
Alimentador 01	13479,7	13511,0				

Os valores encontrados pelo algoritmo proposto apresentam pequenas diferenças em relação aos valores calculados pela concessionária. Deve-se levar em consideração que o programa utilizado pela companhia tem critério de convergência calculado sobre a corrente com erro de 0,1 A e que o algoritmo proposto tem critério de convergência calculado sobre o valor de tensão com erro de 0,001 pu. As diferenças ainda podem ser devido a variação na consideração de algum tipo de carga pelo programa da concessionária ou que este considere algum tipo de perda na linha de distribuição.

4.2. CASO 1: CARGA ALTA

Como nas duas simulações acima, com a mudança de patamar de 1 para 3, tem-se as respostas tanto do programa utilizado pela companhia e do algoritmo proposto para a representação desta carga em um nível mais alto que o anterior.

As Figuras 21, 22, 23 e 24 representam uma carga maior devido ao período do dia, onde se constata uma maior presença de clientes consumindo uma demanda superior ao período da madrugada. Estas fazem referência ao alimentador 1.

Na Figura 21 nota-se que a queda de tensão no algoritmo proposto ficou mais acentuada em relação ao programa da companhia. Com isso o erro entre os programas aumentou quando vista a comparação entre a Figura 14 e a Figura 22.

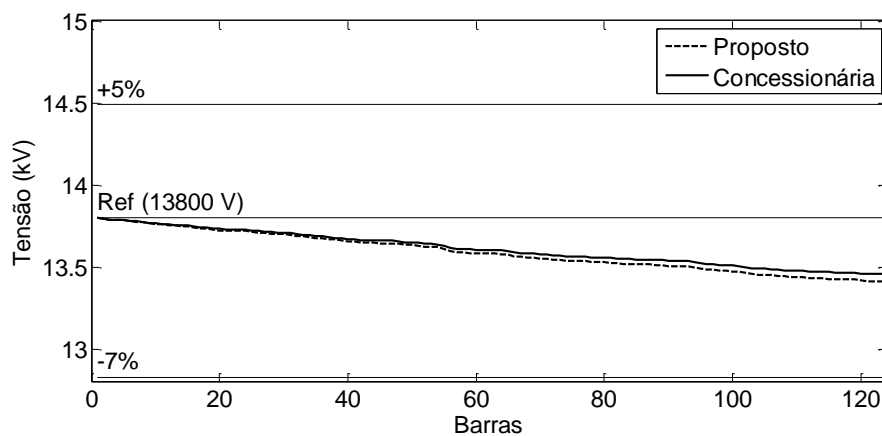


Figura 21 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 1 e alimentador 1.

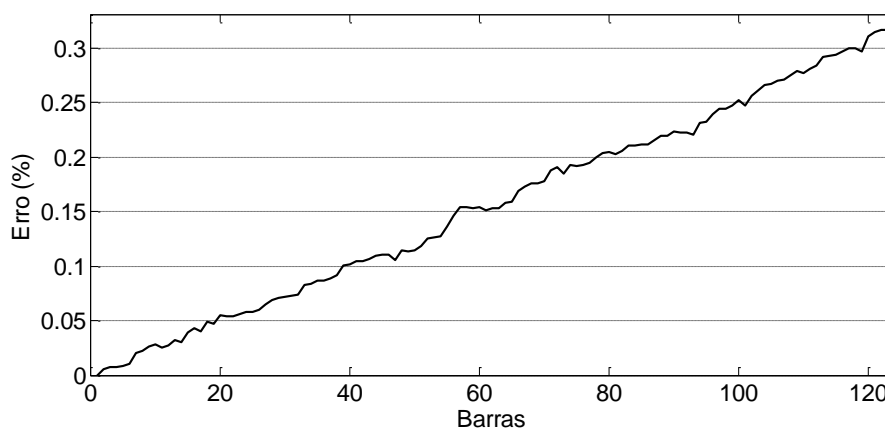


Figura 22 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 3, caso 1 e alimentador 1.

Para as respostas de corrente elétrica e potência reativa, Figuras 23 e 24, apenas é possível estabelecer que entre os dois patamares já analisado houve um aumento somente na corrente elétrica.

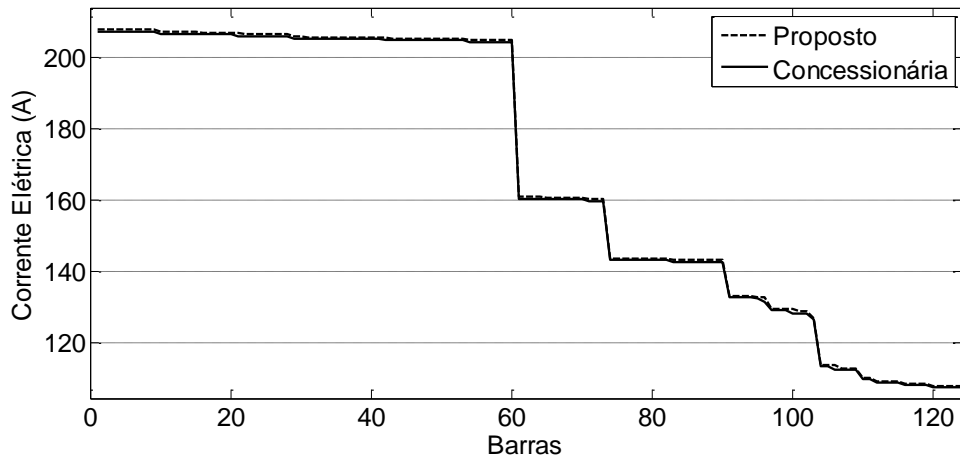


Figura 23 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 1 e alimentador 1.

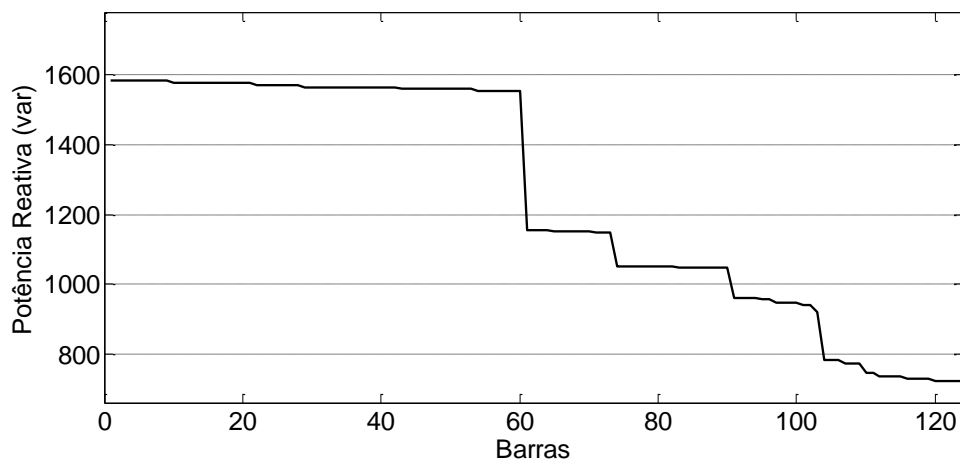


Figura 24 – Potencia Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 3, caso 1 e alimentador 1.

As figuras 25, 26, 27 e 28 a seguir demonstram o comportamento das grandezas analisadas aplicadas ao alimentador 2.

Para as Figuras 25 e 26 percebe-se que os valores entre os programas se mantiveram com o mesmo comportamento aos analisados para o patamar 1. Para o valor do erro percentual nota-se que houve uma queda no seu valor máximo.

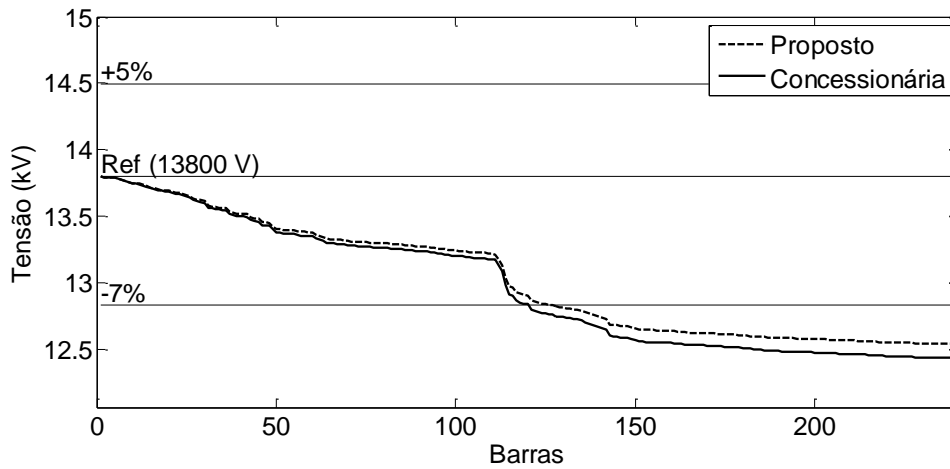


Figura 25 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 1 e alimentador 2.

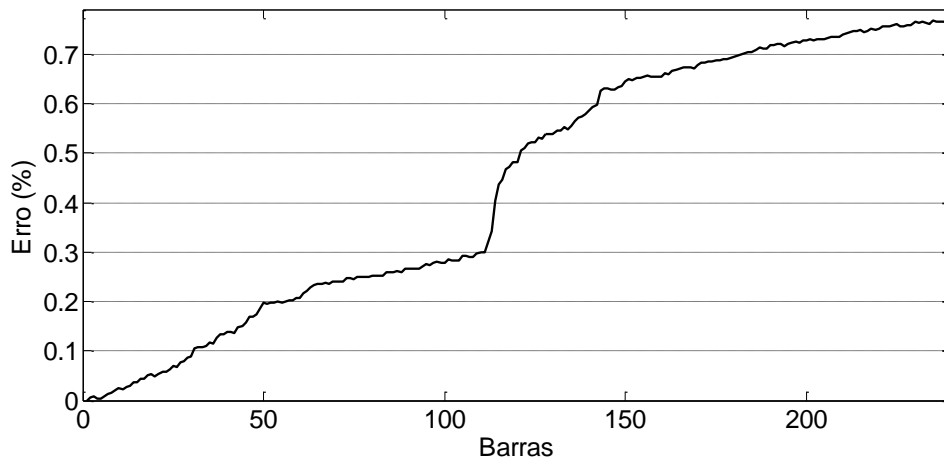


Figura 26 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 3, caso 1 e alimentador 2.

Para as Figuras 27 e 28 é possível afirmar que houve um aumento em relação a mudança de carga, comprovando assim o aumento de consumo entre os dois períodos.

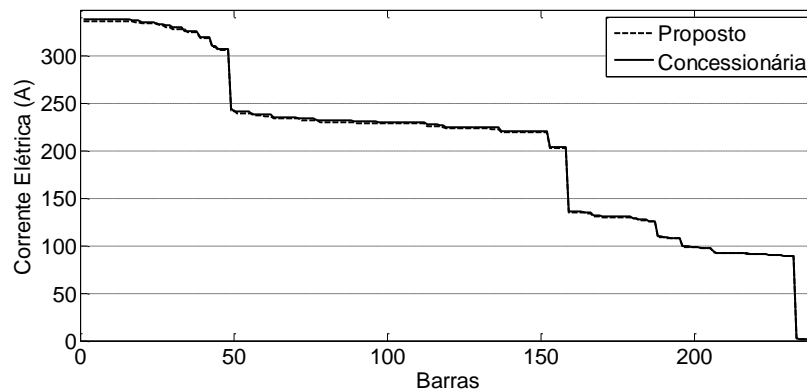


Figura 27 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 1 e alimentador 2.

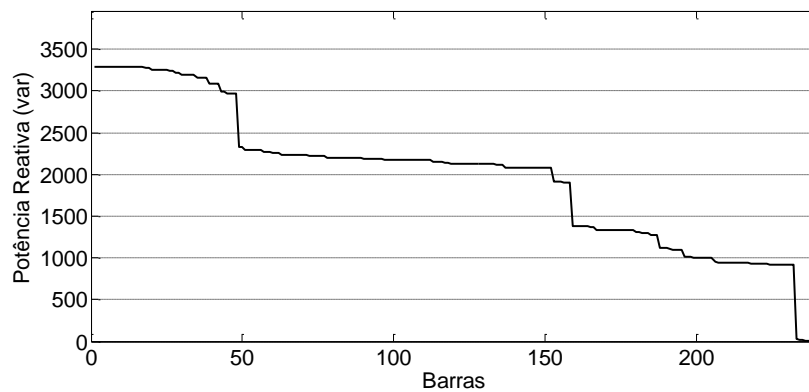


Figura 28 – Potência Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 3, caso 1 e alimentador 2.

O Quadro 2 a seguir apresenta um resumo dos dois alimentadores analisados, quanto a corrente, potência ativa e reativa na subestação e maior queda de tensão tanto para o algoritmo proposto quanto ao utilizado pela concessionária utilizando o patamar de carga 3.

Quadro 2 – Proposto x Concessionária para patamar 3 caso 1.

Alimentador	Corrente (A)		Potência Ativa (W)		Potência Reativa (var)	
	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária
Alimentador 02	336,6	338,0	7343,6	7165,3	3284,4	3734,6
Alimentador 01	207,8	207,3	4708,5	4660,7	1583,1	1679,4
Total SE	544,4	545,3	12052,0	11826,0	4867,5	5414,0
Alimentador	Maior Queda de Tensão (V)					
	Proposto	Concessionária				
Alimentador 02	11830,5	11977,0				
Alimentador 01	13411,0	13456,0				

4.3. CASO 2: CARGA LEVE

Neste processo foi analisado o acréscimo da modelagem dos bancos de capacitores fixos e automáticos para alimentadores 1 e 2 considerando a carga mais leve.

As Figuras 29, 30, 31 e 32 representam os resultados obtidos para alimentador 1. Mesmo com a atuação do banco de capacitor fixo na barra 20 observa-se nas Figuras 29 e 30 um pequeno aumento na diferença entre os resultados do algoritmo proposto e os calculados pelo programa da concessionária.

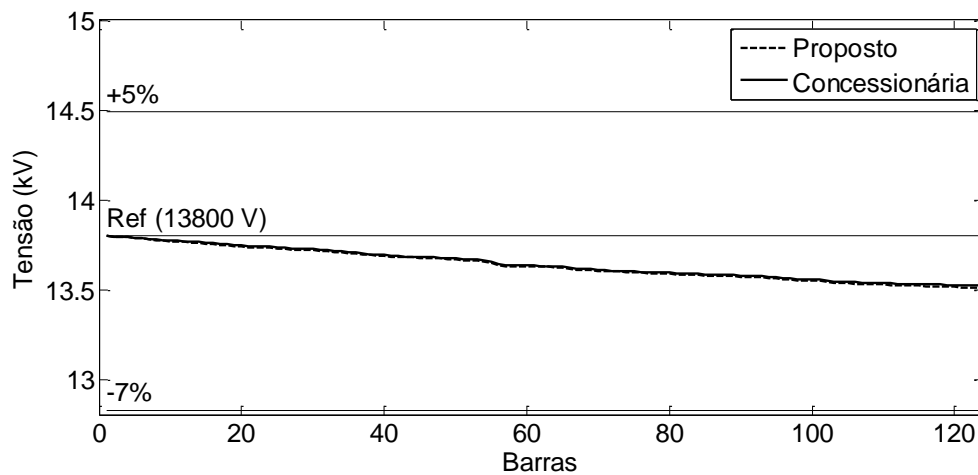


Figura 29 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 2 e alimentador 1.

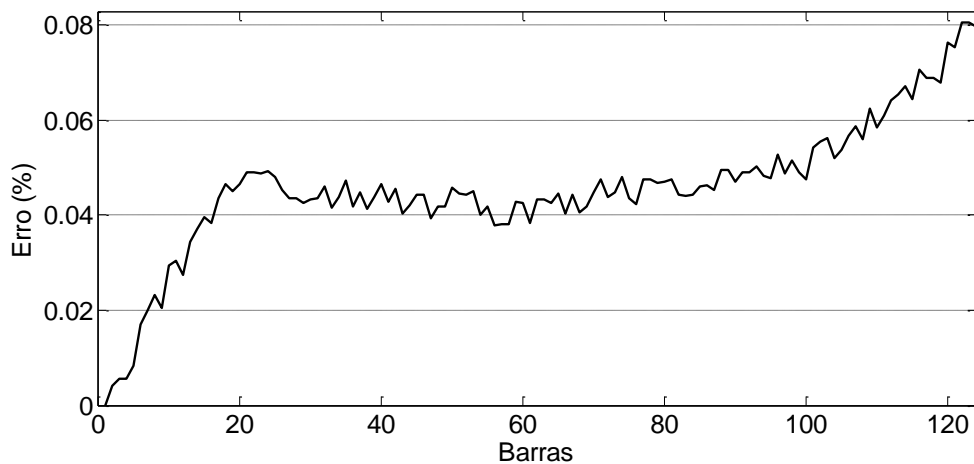


Figura 30 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 1, caso 2 e alimentador 1.

Nesta situação é possível observar nas Figuras 31 e 32 a presença de um banco de capacitores fixo BC1 devido há a redução de corrente elétrica e potência reativa na barra 20. Nesta modelagem também há um banco de capacitores na barra 68, sendo que este é automático e programado para entrar em funcionamento caso a corrente na sua barra seja superior a corrente de referência, valor adotado igual a 150 A, como a corrente não ultrapassou este valor o banco de capacitores manteve-se desligado do sistema.

Cabe ressaltar que nas Figura 31 e 32 na barra 60 a aumento expressivo na corrente e potência reativa devido a entrada e um ramal que possui uma carga de aproximadamente 1/3 da carga do alimentador.

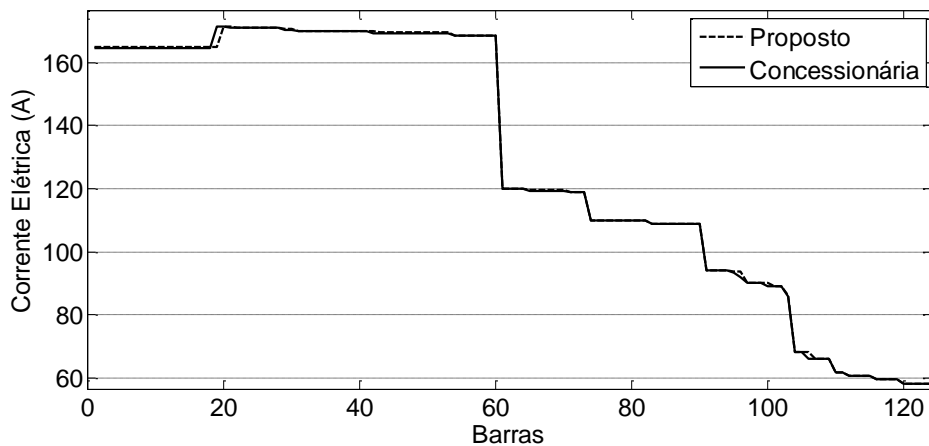


Figura 31 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 2 e alimentador 1.

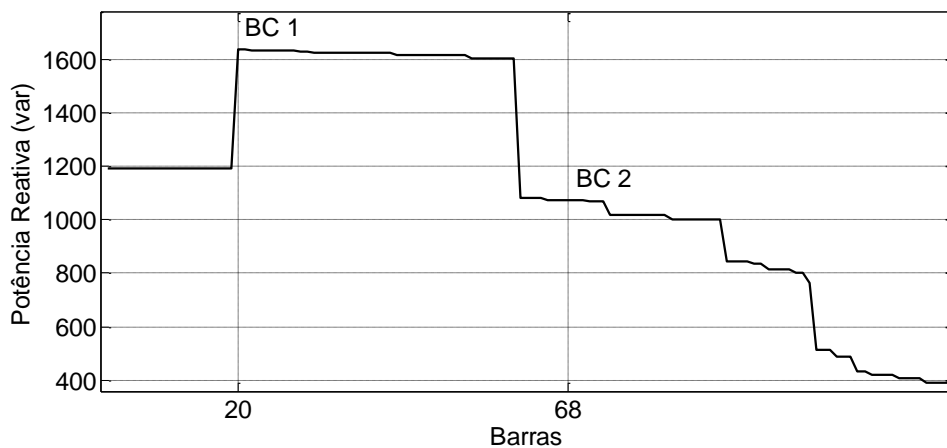


Figura 32 – Potencia Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 1, caso 2 e alimentador 1.

As figuras 33, 34, 35 e 36 representam os resultados obtidos para alimentador 2. As Figuras 33 e 34 mantiveram o padrão de resposta de tensão e erro percentual.

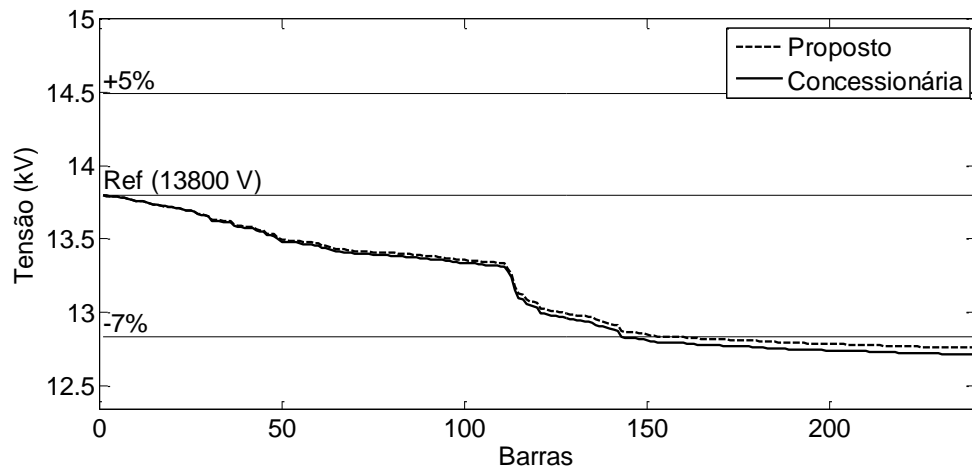


Figura 33 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 2 e alimentador 2.

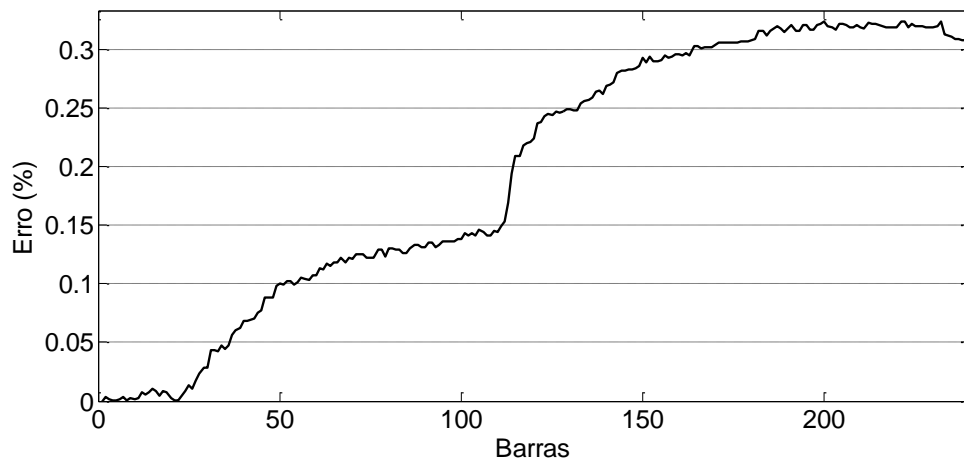


Figura 34 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionaria para o patamar 1, caso 2 e alimentador 2.

A Figura 35 apresenta uma resposta similar ao calculado pela concessionaria onde observa-se que as curvas estão sobrepostas.

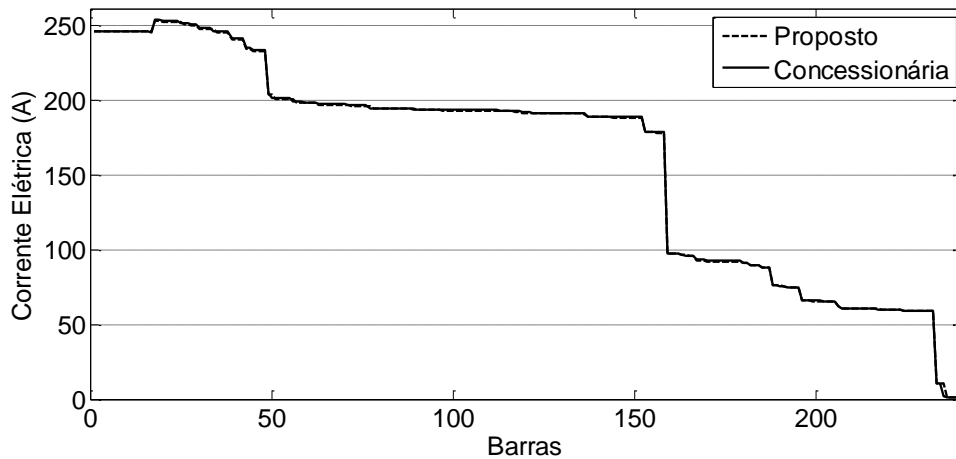


Figura 35 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 2 e alimentador 2.

Analisando-se a Figura 36 cabe ressaltar que os bancos de capacitores BC1 e BC4 são bancos fixos e que estes estão atuando indiferente da carga ou patamar. Observa-se que nas barras 38 e 159 os bancos de capacitores BC2 e BC3 respectivamente não estão realizando a compensação reativa, isto devido a estes dois bancos serem automáticos e não terem ultrapassado a corrente ajustada para a entrada dos mesmos.

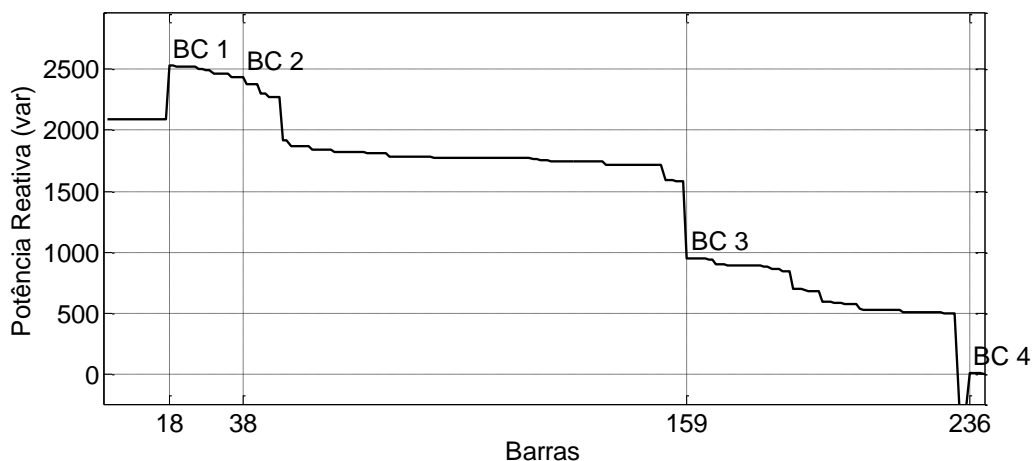


Figura 36 – Potencia Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 1, caso 2 e alimentador 2.

O Quadro 3 a seguir apresenta um resumo dos dois alimentadores analisados, quanto a corrente, potência ativa e reativa na subestação e maior queda de tensão tanto para o algoritmo proposto quanto ao utilizado pela concessionária.

Quadro 3 – Proposto x Concessionária para patamar 1 caso 2.

Alimentador	Corrente (A)		Potência Ativa (W)		Potência Reativa (var)	
	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária
Alimentador 02	246,2	246,2	5500,9	5377,5	2090,9	2389,8
Alimentador 01	165,0	164,7	3760,1	3734,0	1192,0	1246,3
Total SE	411,2	410,9	9261,0	9111,5	3283,0	3636,1
Alimentador	Maior Queda de Tensão (V)					
	Proposto	Concessionária				
Alimentador 02	12370,7	12462,0				
Alimentador 01	13479,5	13518,0				

4.4. CASO 2: CARGA ALTA

Neste processo foi analisado o acréscimo da modelagem dos bancos de capacitores fixos e automáticos para alimentadores 1 e 2 considerando a carga mais alta.

As figuras 37, 38, 39 e 40 representam os resultados obtidos para alimentador 1. O comportamento da queda de tensão e erro é similar aos demais casos já citados. A diferença a ser notada nesta etapa é a entrada do banco de capacitores automáticos, indicados na Figura 40 como BC2 na barra 68. Nota-se que nesta barra há uma queda na potência reativa, caracterizando a entrada do banco de capacitores automático. Esta diminuição na potência reativa causa uma queda no consumo de corrente elétrica, fato este verificado na Figura 39 na mesma barra que está conectado o banco.

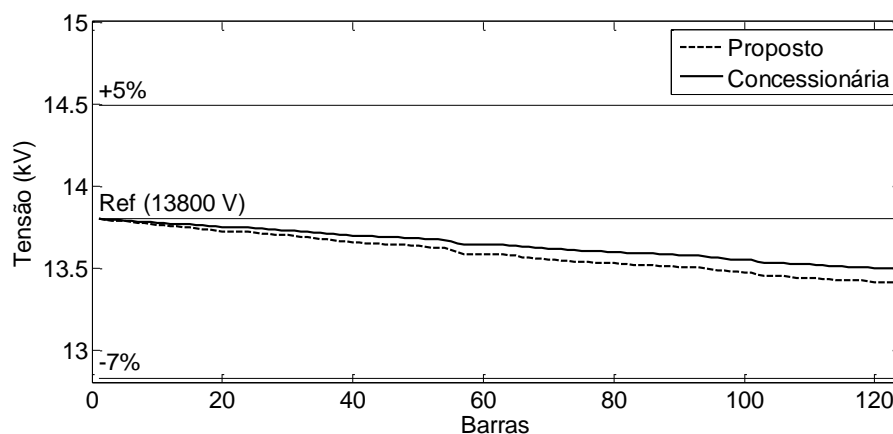


Figura 37 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 2 e alimentador 1.

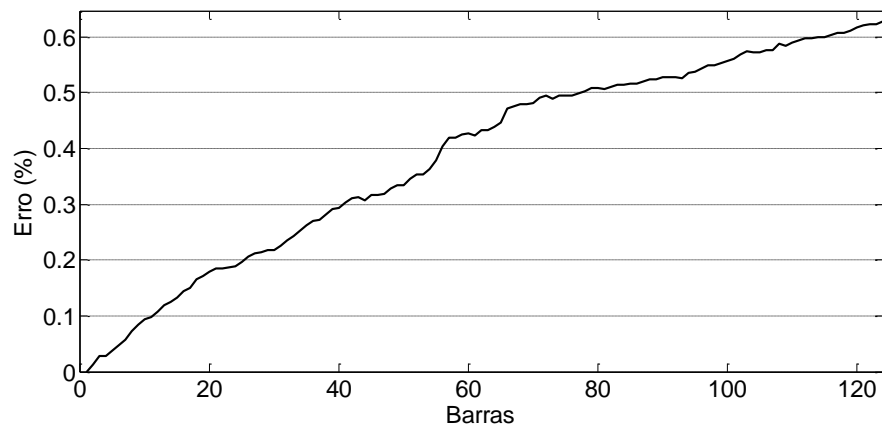


Figura 38 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 3, caso 2 e alimentador 1.

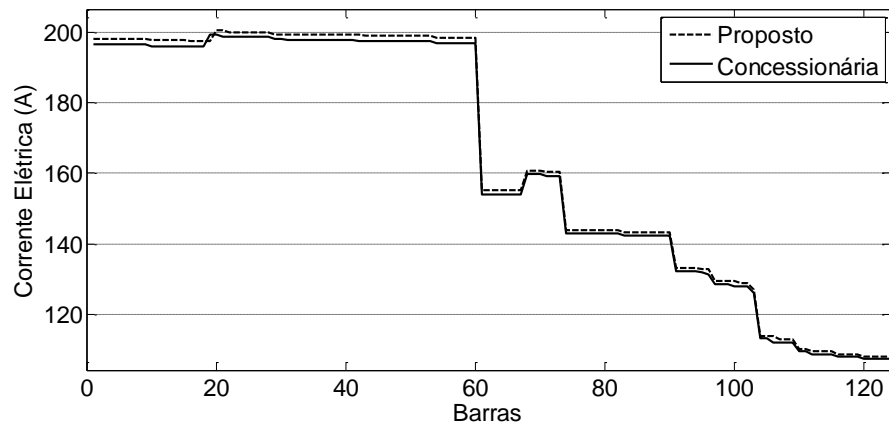


Figura 39 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 2 e alimentador 1.

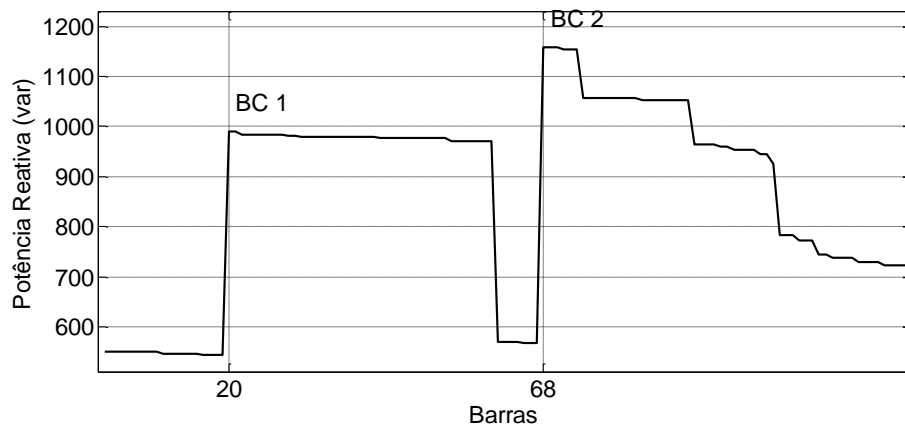


Figura 40 – Potência Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 3, caso 2 e alimentador 1.

As figuras 41, 42, 43 e 44 representam os resultados obtidos para alimentador 2. Para esta rede de distribuição que conta com a presença de dois bancos de capacitores fixos e dois bancos de capacitores automáticos, também se nota a entrada dos bancos automáticos devido ao aumento de corrente no fornecimento devido ao período do dia. O funcionamento dos bancos automáticos fica evidenciado na Figura 44 onde há um decréscimo de corrente e potência reativa nas barras 38 e 159.

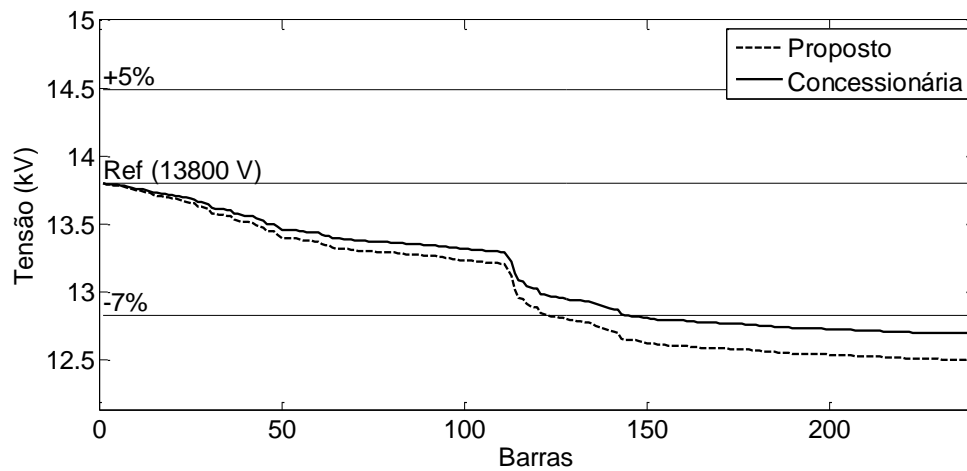


Figura 41 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 2 e alimentador 2.

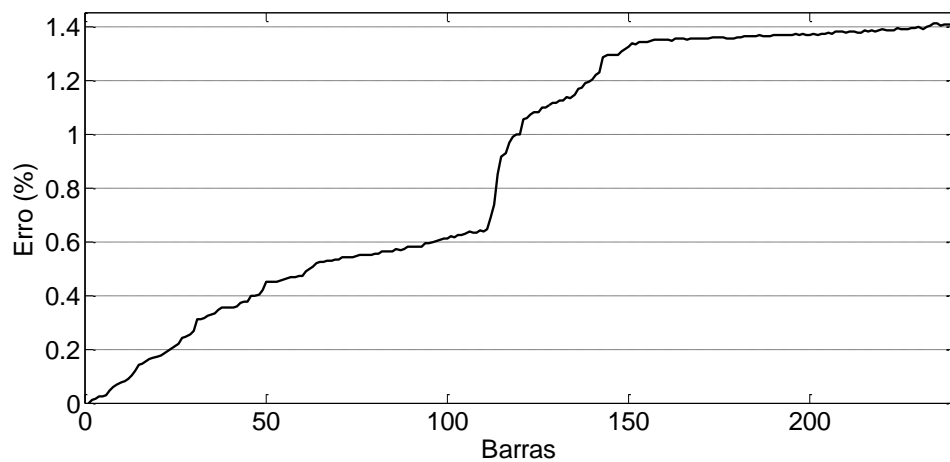


Figura 42 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 3, caso 2 e alimentador 2.

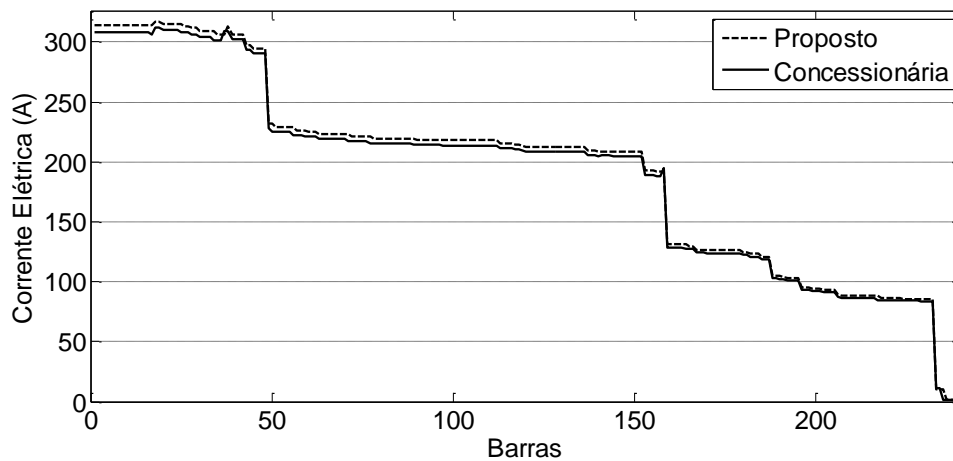


Figura 43 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 3 caso 2 e alimentador 2.

Na figura 44 o banco denominado BC3 não apresentou uma queda na potência reativa mais evidente devido a uma carga de quase mesmo valor que o banco de capacitores conectado na mesma barra.

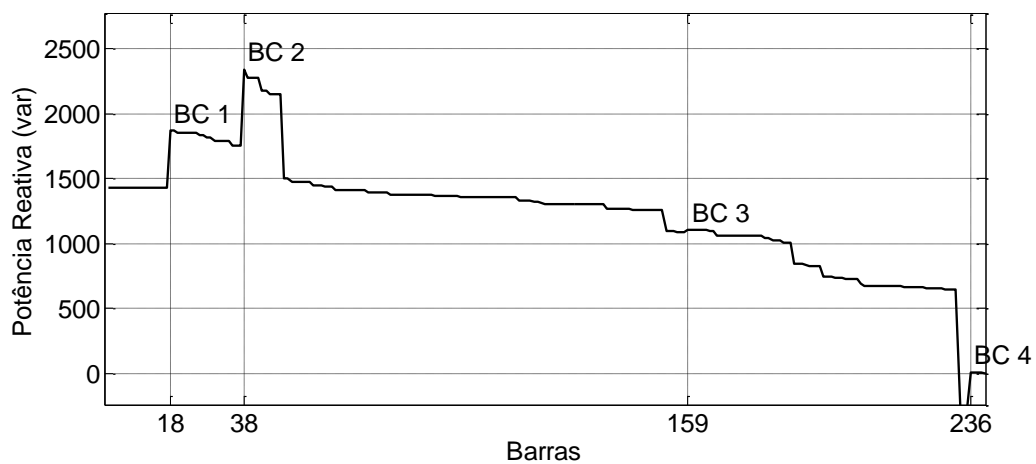


Figura 44 – Potência Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 3, caso 2 e alimentador 2.

O Quadro 4 a seguir apresenta um resumo dos dois alimentadores analisados, quanto a corrente, potência ativa e reativa na subestação e maior queda de tensão tanto para o algoritmo proposto quanto ao utilizado pela concessionária.

Quadro 4 – Proposto x Concessionária para patamar 3 caso 2.

Alimentador	Corrente (A)		Potência Ativa (W)		Potência Reativa (var)	
	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária
Alimentador 02	313,7	307,7	7358,8	7120,6	1436,9	1845,5
Alimentador 01	198,3	196,7	4708,8	4657,0	546,5	639,6
Total SE	512,0	504,4	12067,6	11777,6	1983,4	2485,0
Alimentador	Maior Queda de Tensão (V)					
	Proposto	Concessionária				
Alimentador 02	11780,8	12247,0				
Alimentador 01	13409,6	13497,0				

4.5. CASO 3: CARGA LEVE

Neste processo foi analisado o acréscimo da modelagem regulador de tensão para alimentador 2. Não cabe análise para o alimentador 1 devido ao mesmo não possuir regulador de tensão.

As figuras 45 e 46 representam os resultados obtidos para alimentador 2. Na Figura 45, próximo a barra 150, nota-se que o regulador de tensão está atuando corrigindo a tensão para a tensão de referência adotada em 13680 V.

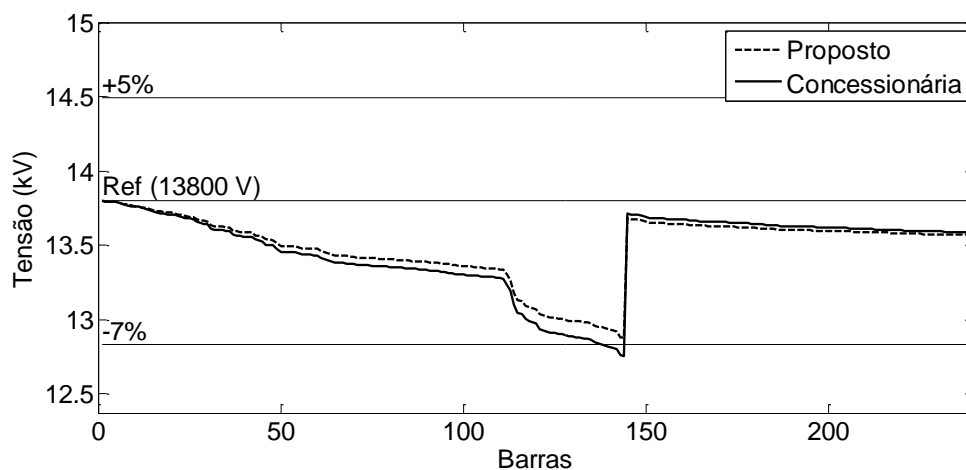


Figura 45 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 3 e alimentador 2.

Na Figura 46 o erro percentual apresentado atingiu o maior pico na maior queda de tensão ao longo do alimentador 2.

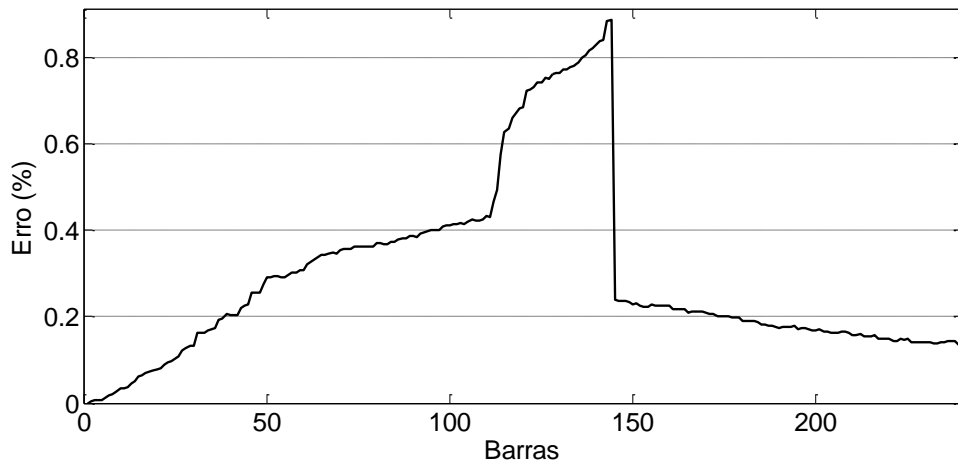


Figura 46 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 1, caso 3 e alimentador 2.

Por se tratar de uma análise sobre o regulador de tensão os resultados obtidos de corrente e potência reativa não apresentam diferenças quando comparados com os valores obtidos para a simulação do caso 1 na seção 4.1 representados pelas Figuras 19 e 20.

O Quadro 5 a seguir apresenta um resumo dos dois alimentadores analisados, quanto a corrente, potência ativa e reativa na subestação e maior queda de tensão tanto para o algoritmo proposto quanto ao utilizado pela concessionária.

Quadro 5 – Proposto x Concessionária para patamar 1 caso 3.

Alimentador	Corrente (A)		Potência Ativa (W)		Potência Reativa (var)	
	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária
Alimentador 02	258,3	260,4	5494,8	5388,3	2812,9	3113,4
Alimentador 01	171,6	171,6	3760,1	3734,7	1639,9	1694,8
Total SE	429,9	431,9	9254,8	9123,0	4452,8	4808,2
Alimentador	Maior Queda de Tensão (V)					
	Proposto	Concessionária				
Alimentador 02	12878,5	12756,0				
Alimentador 01	13479,7	13511,0				

4.6. CASO 3: CARGA ALTA

Neste processo foi analisado o acréscimo da modelagem regulador de tensão para alimentadores 2. Nas Figuras 47 e 48 representam os resultados obtidos para alimentador 2. Como na seção 4.5 observa-se na Figura 47 a correção na tensão devido ao uso do regulador de tensão.

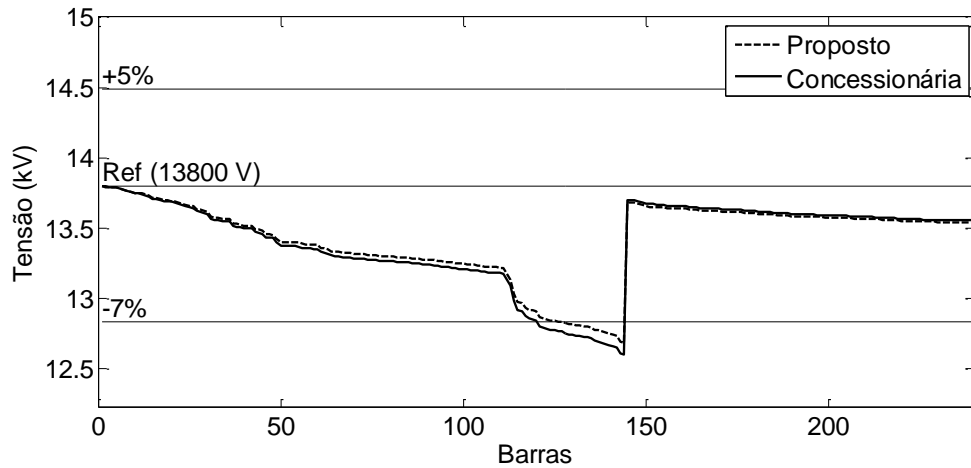


Figura 47 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 3 e alimentador 2.

O erro percentual na Figura 48 apresenta o mesmo comportamento da Figura 46 apresentada na seção anterior.

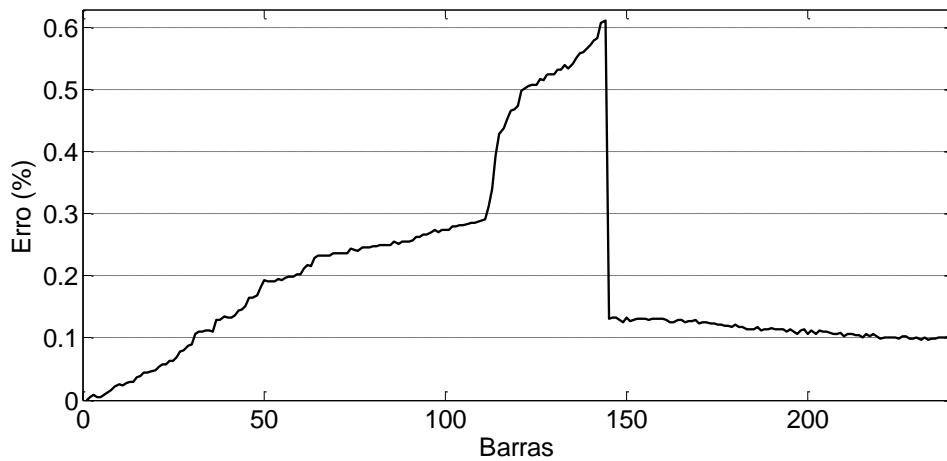


Figura 48 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 3, caso 3 e alimentador 2.

Por se tratar de uma análise sobre o regulador de tensão os resultados obtidos de corrente e potência reativa não apresentam diferenças quando comparados com os valores obtidos para a simulação do caso 1 na seção 4.1 representados pelas Figuras 28 e 27.

O Quadro 6 a seguir apresenta um resumo dos dois alimentadores analisados, quanto a corrente, potência ativa e reativa na subestação e maior queda de tensão tanto para o algoritmo proposto quanto ao utilizado pela concessionária.

Quadro 6 – Proposto x Concessionária para patamar 3 caso 3.

Alimentador	Corrente (A)		Potência Ativa (W)		Potência Reativa (var)	
	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária
Alimentador 02	336,3	337,6	7337,7	7158,1	3281,8	3723,4
Alimentador 01	207,8	207,3	4708,5	4660,7	1583,1	1679,4
Total SE	544,1	544,8	12046,1	11818,8	4864,9	5402,8
Alimentador	Maior Queda de Tensão (V)					
	Proposto	Concessionária				
Alimentador 02	12680,2	12596,0				
Alimentador 01	13411,0	13456,0				

4.7. CASO 4: CARGA LEVE

Neste processo foi analisado o acréscimo da modelagem regulador de tensão e bancos de capacitores para os alimentadores 1 e 2.

Como o alimentador 1 não possui regulador de tensão a resposta para tal é a mesma do que quando é aplicado somente o banco de capacitores, esta resposta pode ser verificada na seção 4.3 nas Figuras 29, 30, 31 e 32.

As figuras 49, 50, 51 e 52 representam os resultados obtidos para alimentador 2. Observando a Figura 49 em relação a Figura 45 temos o enquadramento da maior queda de tensão para as normas do Prodist, visto aplicação de RT e BC.

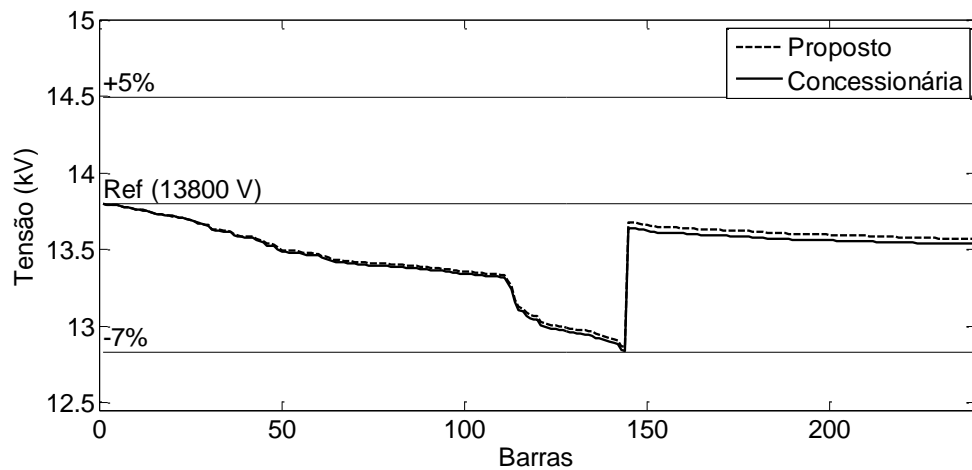


Figura 49 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 4 e alimentador 2.

A Figura 50 apresenta o erro percentual dentro do esperado.

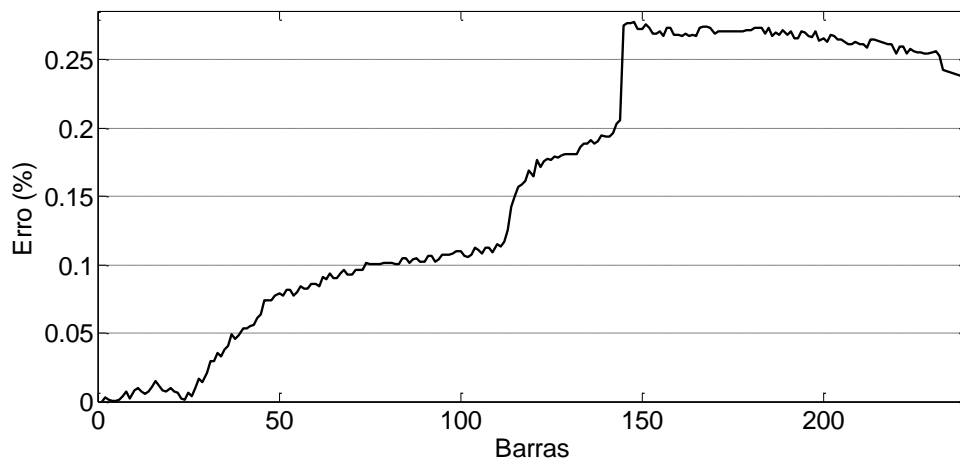


Figura 50 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 1, caso 4 e alimentador 2.

Nas Figuras 51 e 52 e possível notar a atuação dos bancos fixos BC1 e BC4 onde há uma diminuição acentuada da potência reativa nas barras 18 e 236 nas quais estão conectados respectivamente os bancos fixos, e que os bancos automáticos BC2 e BC3 estão desconectados da rede de distribuição, pois após as barras 38 e 159 a potência reativa continua a aumentar gradativamente. Na barra 159, BC3, nota-se a presença de uma carga bem acentuada ligada a mesma.

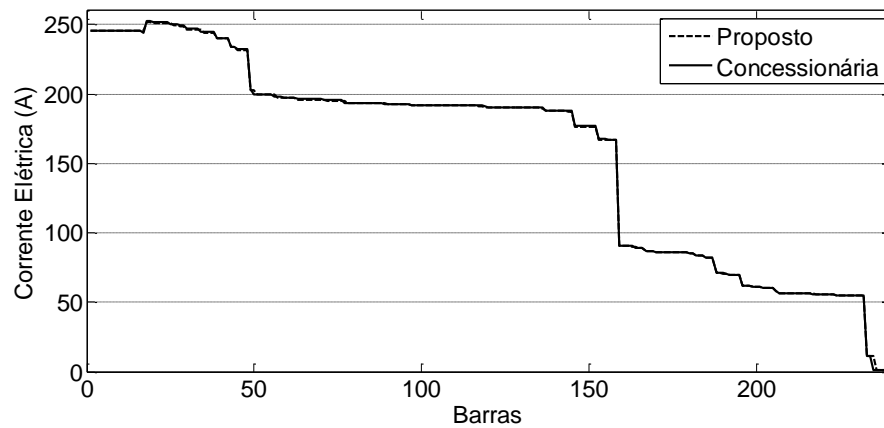


Figura 51 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 1, caso 4 e alimentador 2.

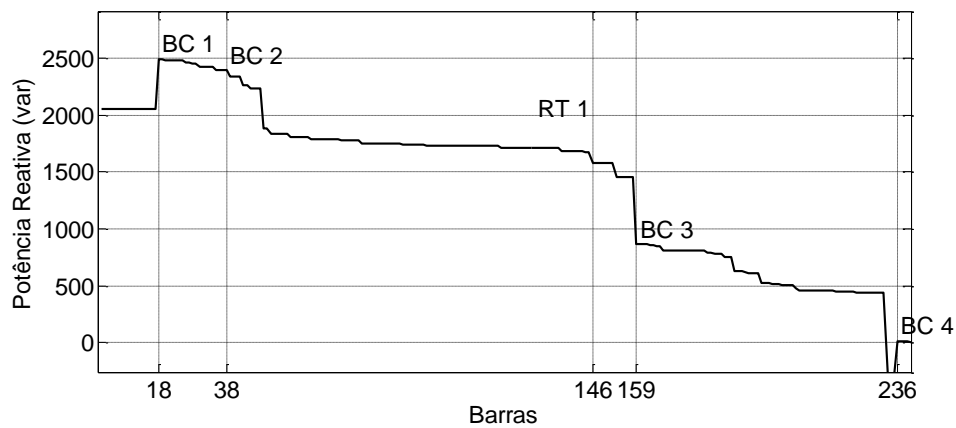


Figura 52 – Potência Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 1, caso 4 e alimentador 2.

O Quadro 7 a seguir apresenta um resumo dos dois alimentadores analisados, quanto a corrente, potência ativa e reativa na subestação e maior queda de tensão tanto para o algoritmo proposto quanto ao utilizado pela concessionária.

Quadro 7 – Proposto x Concessionária para patamar 1 caso 4.

Alimentador	Corrente (A)		Potência Ativa (W)		Potência Reativa (var)	
	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária
Alimentador 02	245,6	245,3	5498,2	5373,1	2053,8	2347,8
Alimentador 01	165,0	164,7	3760,1	3734,0	1192,0	1246,3
Total SE	410,6	410,0	9258,4	9107,1	3245,9	3594,1
Alimentador	Maior Queda de Tensão (V)					
	Proposto	Concessionária				
Alimentador 02	12867,4	12839,0				
Alimentador 01	13479,5	13518,0				

4.8. CASO 4: CARGA ALTA

Neste processo foi analisado o acréscimo da modelagem regulador de tensão e bancos de capacitores para alimentadores 1 e 2. Devido ao alimentador não possuir o elemento de regulação de tensão o mesmo não será analisado nesta etapa, haja visto que este já foi analisado na seção 4.4 nas Figuras 37, 38, 39 e 40.

As figuras 54, 55, 56 e 57 representam os resultados obtidos para alimentador 2. Na Figura 54, mesmo com a carga mais elevada a maior queda de tensão ficou dentro do estabelecido no Prodist, isto devido a atuação dos bancos automáticos conectados ao sistema de distribuição. Esta afirmação pode ser verificada na Figura 57 onde nota-se a redução na potência reativa devido a compensação realizada pelos bancos de capacitores nas barras 38 e 159.

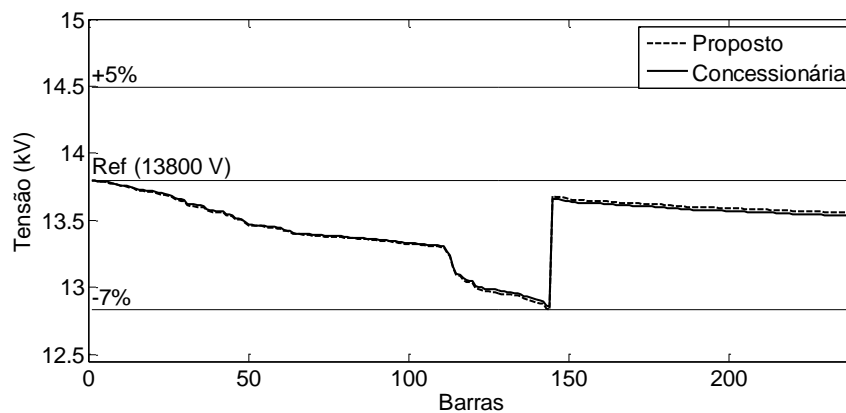


Figura 53 – Tensão a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 4 e alimentador 2.

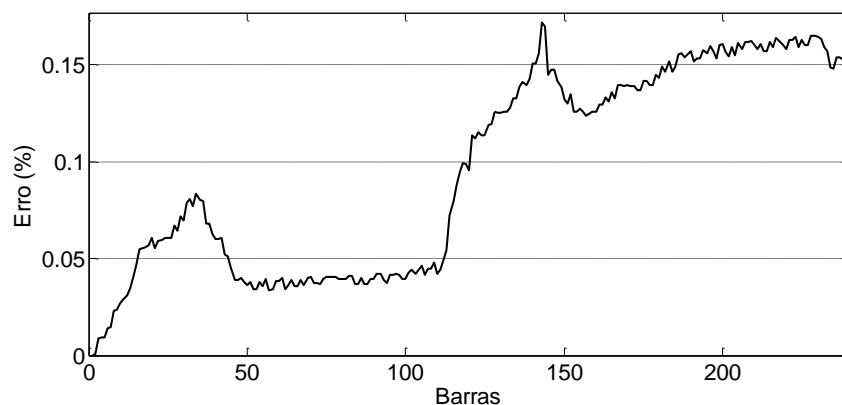


Figura 54 – Erro percentual entre Tensão do algoritmo proposto e Tensão calculada concessionária para o patamar 3, caso 4 e alimentador 2.

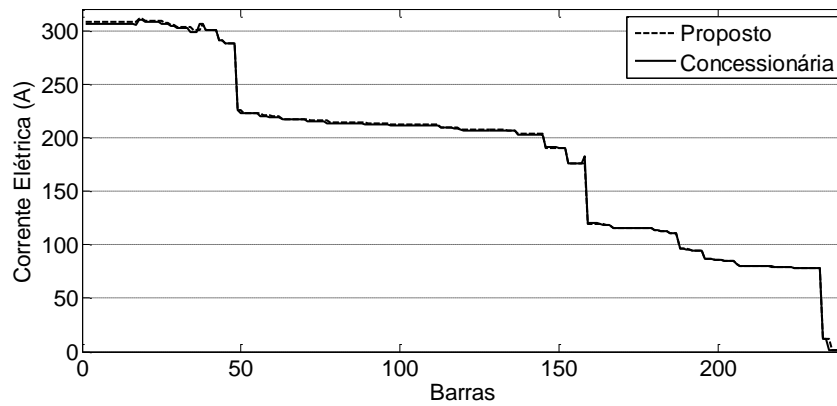


Figura 55 – Corrente a montante da maior queda de tensão para o patamar 3, caso 4 e alimentador 2.

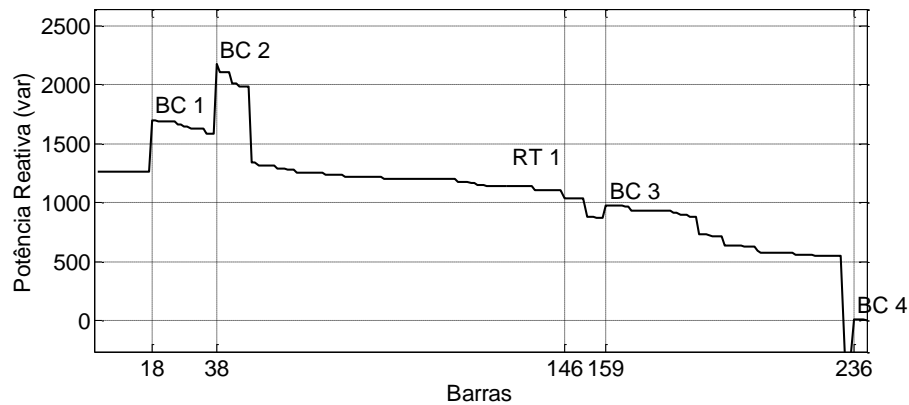


Figura 56 – Potência Reativa a montante da maior queda de tensão do algoritmo proposto para o patamar 3, caso 4 e alimentador 2.

O Quadro 8 a seguir apresenta um resumo dos dois alimentadores analisados, quanto a corrente, potência ativa e reativa na subestação e maior queda de tensão tanto para o algoritmo proposto quanto ao utilizado pela concessionária.

Quadro 8 – Proposto x Concessionária para patamar 3 caso 4.

Alimentador	Corrente (A)		Potência Ativa (W)		Potência Reativa (var)	
	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária	Proposto	Concessionária
Alimentador 02	308,3	306,2	7260,8	7112,2	1264,6	1725,9
Alimentador 01	197,5	196,7	4691,0	4657,0	538,5	639,6
Total SE	505,9	502,9	11951,7	11769,2	1803,1	2365,4
Alimentador	Maior Queda de Tensão (V)					
	Proposto	Concessionária				
Alimentador 02	12832,6	12856,0				
Alimentador 01	13469,4	13497,0				

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo no programa MatLab com a finalidade de calcular o fluxo de carga em redes de distribuição com a automatização dos bancos de capacitores e reguladores de tensão por ser este cálculo essencial para análise do funcionamento destes elementos no sistema de distribuição. Por meio deste fluxo de carga também pode ser analisada a necessidade de implementação ou realocação destes elementos nas redes de energia elétrica.

Os resultados do algoritmo proposto foram validados com os resultados do programa utilizado pela concessionária onde as respostas de tensão tiveram erro máximo próximo a 0,25% da tensão calculada para o sistema real com a utilização dos bancos de capacitores e reguladores de tensão. Os valores calculados de corrente elétrica e potência reativa apresentam uma pequena diferença em relação aos calculados pelo programa utilizado pela concessionária. Esta por sua vez pode ser ocasionada devido aos critérios de convergência não serem calculados com a mesma metodologia, à alguma consideração diferente na carga ou ainda a consideração de algum tipo de perda na linha.

O algoritmo proposto é capaz de distinguir se os bancos de capacitores são fixos ou automáticos e com o auxílio das curvas geradas de corrente e potência reativa é possível analisar se os mesmos estão conectados à rede de distribuição de energia elétrica e se estão fornecendo potência reativa ao sistema. O algoritmo além de simular os bancos de capacitores já existentes na linha de distribuição possibilita o incremento de novos bancos ou a realocação dos mesmos.

A utilização do regulador de tensão pode ser analisada nos gráficos de tensão gerados pelo algoritmo proposto quanto ao enquadramento do nível de tensão estabelecido pelo PRODIST Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica. A partir desta análise é possível estabelecer a necessidade da implementação de novos bancos de reguladores de tensão ou se os mesmos devem ser realocados ao longo da linha de distribuição. Pode se verificar a melhor solução para problemas de níveis de tensão por meio de simulações no algoritmo proposto. Outras soluções como mudança das especificações do regulador de tensão podem ser analisadas também por meio da utilização deste algoritmo.

REFERÊNCIAS

FRAGOAS, Alexandre Gracioli. **Estudo de caso do uso de bancos de capacitores em uma rede de distribuição primária – Indicativos da sua viabilidade econômica.** São Carlos, 2008, 72p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

HERRANZ, Andre Pasini. **Estudo de desempenho do fluxo de carga em sistemas de distribuição radial a partir de técnicas distintas de ordenação de barras.** Cornélio Procópio, 2013, 82p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Campus Cornélio Procópio.

INTELLICAP, EnergyLine Systems. Controladores automáticos de capacitores IntelliCap. **Manual de Instruções.** 1998.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos C. B. de; ROBBA, Ernesto J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

PEREIRA, Douglas Henrique. **Fluxo de potência de varredura direta/inversa para o problema de reconfiguração de redes em sistemas de distribuição.** São Carlos, 2014, 95p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PRODIST, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Revisão 7 - Resolução Normativa nº 664/2015. 2016

RESENDE, Tatiana. **Perdas na distribuição: baixa tensão, altos prejuízos.** Reportagem Especial da Agência Canal Energia, Brasília, 2013. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/imprensa/artigos-e-releases/1018-perdas-na-distribuicao-baixa-tensao-altos-prejuizos-reportagem-especial-canal-energia>>. Acessado em: 05 mai. 2015.

SANCHES, Danilo S. **Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivo para Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** São Carlos, 2013. 125p. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SANTOS, Augusto Cesar dos. **Algoritmo evolutivo computacional eficiente para reconfiguração de sistemas de distribuição.** São Carlos, 2009, 186p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H. W., SEMLYEN, A., LUO, G. X. **A compensation-Based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks.** 1988. v. 3, n. 2, p. 753-762. IEEE Transactions on Power Systems.

TOSHIBA, Infraestrutura América do Sul Ltda. **Manual de Instruções para Reguladores de Tensão Monofásicos.** Contagem: 2012.