



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### Simulação e Análise de Ações de Controle Volt/var no Sistema CELESC para Suporte da Programação da Operação

|                           |                            |                     |                        |
|---------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| <b>Flávio A. B. Lemos</b> | <b>Antonio V. Zampieri</b> | <b>Felipe Kober</b> | <b>Bruno Werberich</b> |
| <b>GSEE - PUCRS</b>       | <b>GSEE - PUCRS</b>        | <b>GSEE - PUCRS</b> | <b>GSEE - PUCRS</b>    |
| Flavio.lemos@pucrs.br     | zampieri@ee.pucrs.br       | kober@ee.pucrs.br   | brunorw@via-rs.net     |

|                            |                         |                            |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| <b>Leonardo Bremermann</b> | <b>Daniel P. Correa</b> | <b>Rafael Eichelberger</b> |
| <b>GSEE - PUCRS</b>        | <b>GSEE - PUCRS</b>     | <b>CELESC S.A.</b>         |
| bremer@ee.pucrs.br         |                         | rafaeichel@hotmail.com     |

#### Palavras-chave

Controle de Tensão

Controle de Reativos

Controle Volt/var

Planejamento da operação

Sistema de Apoio a Decisão

#### Resumo

Neste artigo é apresentada a solução desenvolvida para auxiliar a programação da operação da CELESC no controle do perfil horário de tensão da sua rede de média tensão. Esta solução está apoiada em um software desenvolvido através de um projeto de P&D. Este projeto permite ao operador realizar simulações e análises estáticas para auxiliar na decisão de ações de operação e controle de tensão/potência reativa, a partir da recuperação do modelo topológico da rede utilizando a base de dados da operação, de uma forma manual ou através da execução do módulo de controle Volt/var. Tal módulo fornece uma indicação das ações para a coordenação dos dispositivos de controle de tensão disponíveis, visando ajustar o nível de tensão ao longo dos alimentadores em um intervalo de operação seguro ao longo do dia. O algoritmo de coordenação de Volt/var está baseado em uma cascata de controladores fuzzy do tipo Mamdani. O sistema permite a navegação e edição gráfica da rede sobre uma base de coordenadas geo-referenciadas, permitindo monitorar indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão, exibindo os resultados das simulações de forma gráfica ou tabular. O sistema foi validado sobre um sistema piloto, e atualmente encontra-se implantado em 5 regionais da CELESC.

#### 1. Introdução

Como um produto, que deve ser fornecido a seus consumidores, a energia elétrica necessita manter padrões de qualidade e confiabilidade de fornecimento que são regulados por normas e fiscalizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Um dos aspectos

fundamentais que deve ser assegurado pela operação é o nível de tensão de fornecimento, estabelecido pela Resolução ANEEL 505/2001, o qual deve ser obedecido em todos os níveis do sistema de distribuição, devendo estar situado, para condições normais de operação, na faixa entre 0,95 e 1,05 pu. Desta forma, torna-se fundamental dispor de sistemas que possibilitem monitorar, simular e analisar ações de controle de tensão e despacho de potência reativa que sejam efetivos para manter as tensões nos alimentadores dentro de uma faixa pré-determinada em condições normais de operação para a curva de carga diária, bem como apresentar as melhores soluções factíveis de operação para condições de emergência.

Neste artigo apresenta-se um sistema de suporte à decisão, desenvolvido para auxiliar a programação da operação da CELESC no controle do perfil horário de tensão da sua rede de média tensão, que permite ao operador, ou analista, realizar simulações e análises estáticas de ações de controle de tensão/potência reativa, chamado de controle Volt/var. Este sistema foi desenvolvido através do projeto de P&D Sistema de Coordenação de Ações de Controle de Tensão – SICOTEN, em Alimentadores de Distribuição, pelo Grupo de Sistemas de Energia Elétrica – GSEE da PUC-RS. O software desenvolvido consiste de um sistema orientado a objetos, construído a partir da Plataforma PSL<sup>®</sup> DMS, que permite a edição e exibição das redes de média tensão da CELESC em uma base de coordenadas geo-referenciadas, recuperação do modelo topológico da rede utilizando a base dados da operação, monitoração de indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão (resolução ANEEL 505/2001) e indicação das ações para a coordenação dos dispositivos de controle de tensão disponíveis nos alimentadores e na subestação, que atenda, conforme o objetivo, às variações diárias de demanda.

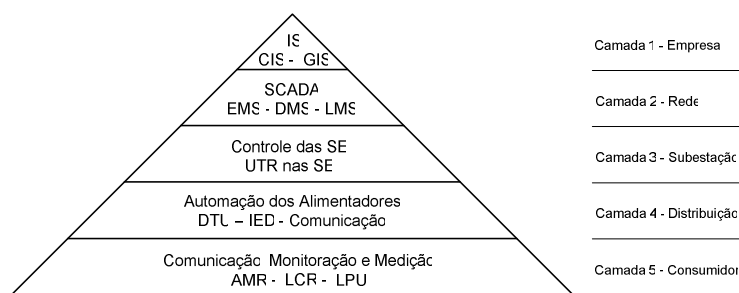
De acordo com a referência (Roytelman et. alli, 1995) o controle Volt/var é uma das funções mais importantes e vitais de um moderno DMS (Distribution Management System) (Green & Wilson, 2007). Entre as referências que abordam este tema, podem ser citadas (Roytelman & Shahidehpour, 1993) e (Roytelman et. alli, 1995), as quais apresentam aspectos teóricos e práticos de automação e discutem a implementação de algoritmos de controle Volt/var como funções de modernos DMS. Em (Roytelman et alli, 1998) são relatados e discutidos aspectos técnicos e de efetividade da implantação de um sistema de controle Volt/var a um sistema piloto. A maior parte dos trabalhos enfoca o problema de forma isolada (coordenação de religadores, coordenação de banco de capacitores) ou de blocos de dispositivos (religador - banco de capacitores ou LTC – religador ou LTC – banco de capacitores). Alguns poucos trabalhos fazem análise incluindo os dispositivos de controle Volt/var integrados, e mesmo assim apresentam o problema de forma desacoplada. Nos últimos anos começou a ser explorada a utilização de sistemas baseados em lógica fuzzy para abordar problemas em diversas áreas em sistemas de energia (El-Hawary, 1998). A metodologia de controle Volt/var desenvolvida para este projeto é baseada nas referências (Miranda & Calisto, 2002; Miranda et alli, 2007) e, utiliza o conceito de controle fuzzy, representado através de uma cascata de controladores de Mamdani. O ajuste, dos equipamentos de controle de tensão, é executado para que o sistema opere dentro da faixa de tensão, pré-determina pela legislação, ou na impossibilidade de atender esta faixa, apresentar ao analista ou operador a coordenação que submete a maioria das tensões nodais o mais próximo possível do intervalo de tensão pré-estabelecido. Os resultados são exibidos de forma gráfica ou tabular. O software foi testado sobre um sistema piloto para validação e ajustes, tendo apresentado excelentes resultados em função da facilidade de execução e da integração com as bases de dados da empresa. Estas características e as dificuldades encontradas no atual sistema utilizado para simulação do fluxo de potência da CELESC, levou à decisão de implantar o sistema em 5 regionais da CELESC, o qual, além das suas funções nativas, será utilizado para o gerenciamento de todos alimentadores da rede de distribuição primária da CELESC no que se refere a carregamento, queda de tensão, simulações de manobras, estudos de viabilidade técnica, geração de relatórios para a CELESC e para a ANEEL, dentre outros. Neste artigo, serão demonstrados resultados da aplicação do SICOTEN para um alimentador da CELESC.

## 2. Controle de Tensão em Sistemas de Distribuição

Sistemas tradicionais de controle de tensão/potência reativa são baseados em estudos off-line de previsão de carga e ajustes de parâmetros locais de controladores, os quais utilizam referências fixas e pré-estabelecidas. Através da abordagem off-line não se garante um controle efetivo em termos de operação econômica e segura nas condições normais diárias, bem como em situações de emergência onde seja necessário operar o sistema dentro de uma banda de tensão que permita o fornecimento de energia para o máximo número de consumidores, sem que isto implique em comprometer a segurança do sistema. Além disso, com o incremento de geração distribuída e microgrids, o controle de tensão efetivo sobre a rede deverá dispor de estratégias que levem em conta as contribuições destas fontes e formas de atuar, em tempo de operação, nas suas contribuições para regulação de tensão do sistema.

A existência de um controle hierárquico na distribuição será tanto mais efetivo quanto for o nível de automação presente no sistema. Portanto, é necessário levar em conta o princípio de que a empresa dispõe de um centro de operação centralizado ou de centros de operação descentralizados com delegação de executar ações de controle sobre a rede, mas que atuem de forma coordenada com um centro de controle global.

A Figura 1 apresenta uma hierarquia típica de controle de uma empresa, baseada no conceito de camadas (Green & Wilson, 2007).



**Figura 1 – Hierarquia típica de controle de uma empresa (Green e Wilson, 2007).**

**Camada 1 – Empresa:** Este é o mais alto nível das camadas e compreende todo o controle estratégico em nível de ativos, tecnologias de informações, contratos de compra e venda de energia, avaliação de reservas e previsão de demanda. Estão incluídos nesta camada os sistemas de informação corporativos (IS – Information Systems), os Sistemas de Informações dos Consumidores (CIS – Customers Information Systems) e os Sistemas de Informações Geo-referenciados (GIS – Geographical Information System).

**Camada 2 – Rede:** Este nível de controle é diretamente monitorado e executado pelos operadores de sistema (ONS – no Brasil), sendo seus ajustes dependentes das funções de despacho eletro-energético do sistema. As distribuidoras podem, de acordo com um planejamento prévio da operação, solicitar ajustes de tensão nas barras de interligação com a rede básica, a fim de ajustar o nível de tensão de seus sistemas. Entretanto, esta ação é realizada de forma manual e via contato entre o Centro de Operação da distribuidora e o Centro de Operação do Sistema. Fazem parte desta camada os sistemas de gerenciamento de energia (EMS – Energy Management System) e da distribuição (DMS – Distribution Management System), apoiados pelo sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) e pelo sistema de gerenciamento de carga (LMS – Load Management System).

**Camada 3 – Subestação:** Nessa camada de controle estão inseridos os controles dos disjuntores, chaves seccionadoras, LTC, bancos de capacitores e relés de proteção, os quais são acessados através de UTR (Unidade Terminal Remota) ou de IED (Intelligent Electronic Devices). Este nível de controle

compreende as subestações rebaixadoras da sub-transmissão e distribuição, sendo acessado pelo COD (Centro de Operação da Distribuição) das empresas de distribuição.

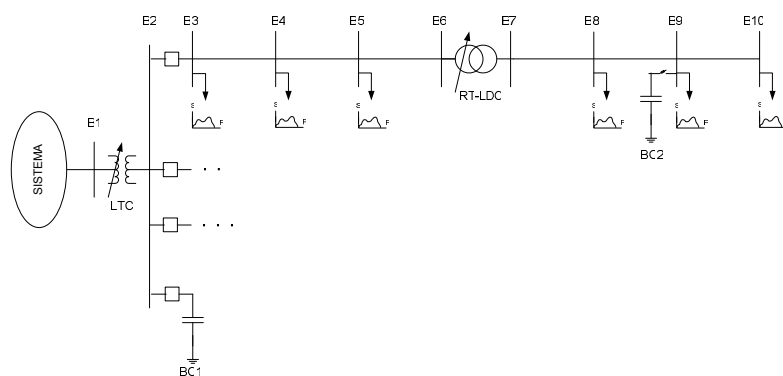
**Camada 4 – Distribuição:** Esta camada de controle abrange as redes de média tensão das distribuidoras e reflete, na sua efetividade, o nível de automação e capacidades de ações de controle em tempo real, através de ações locais e remotas sobre a rede e seus dispositivos localizados após a subestação. Também estão presentes as unidades de monitoração (DTU – Distribution Terminal Units), os dispositivos de monitoração digitais (IED – Intelligent Electronic Devices) e o sistema de comunicação para acessar estes dispositivos.

**Camada 5 – Consumidor:** É a camada de interface entre a empresa distribuidora e o consumidor, constituindo a camada de mais baixo nível na hierarquia de controle. Esta camada está se tornando cada vez mais importante a medida que o sistema de distribuição passa a ser ativo e dinâmico, com alta penetração de GD e microgrids, suportados pela disponibilidade de AMR, as quais, combinadas com processos de TI permitem a flexibilização e customização de tarifas. Além disso, através de ações de DSM (Demand Side Management) é possível determinar importâncias e restrições de operação sobre determinados tipos de cargas e consumidores, constituindo uma possibilidade de controle em condições nominais e de emergência. Nesta camada estão presentes as unidades de concentração de carga (LPU – Load Point Unit), os dispositivos de controle de carga (LCR – Load Control Devices) e os medidores automáticos de energia (AMR – Automatic Meter Reading), que apoiam as ações de medição, monitoração e controle desta camada.

Um sistema Volt/var centralizado deve proporcionar ações coordenadas dos equipamentos, de forma a atender aos seguintes requisitos (Roytelman et alli, 1995):

- Possibilidade de implementar diferentes funções objetivo, levando em conta o tipo de operação desejada;
- Remover violações de tensão do sistema;
- Diminuir o fluxo de reativos;
- Manter os níveis de potência reativa e perfil de tensão do sistema para uma operação econômica.

Para exemplificar o problema de coordenação de tensão em sistemas de distribuição, considere a Figura 2, na qual é representado um alimentador típico de média tensão.



**Figura 2 – Rede de média tensão típica**

Nesta rede encontra-se um sistema de controle de tensão/potência reativa típico de um sistema de distribuição, representado por um alimentador. Na subestação estão disponíveis para realizar o controle Volt/var o LTC e um banco de capacitores, e ao longo do alimentador um regulador de tensão, do tipo LDC e um banco de capacitores. A demanda de cada barra é representada pela

respectiva curva de carga de 24 horas, de forma a permitir capturar o comportamento horário da demanda e estabelecer a melhor estratégia de controle que satisfaça às condições de operação.

O problema consiste em determinar, de forma coordenada, os ajustes para os taps dos LTC e LDC e a potência dos bancos de capacitores, da subestação e do alimentador, que deve ser conectada, levando em conta a curva de carga diária de cada ponto de carga, a fim de eliminar possíveis sub e sobretensões.

Na próxima seção é apresentada a metodologia desenvolvida para executar o controle Volt/var.

### **3. Metodologia Desenvolvida**

A complexidade das características dos sistemas de energia elétrica vêm crescendo de forma bastante acelerada. As tomadas de decisões feitas por operadores do sistema elétrico de potência são baseadas em características e “sentimentos” que não correspondem à complexidade da rede em alguns pontos do sistema de distribuição, sendo que tais decisões podem causar desgaste dos equipamentos, violação dos níveis de segurança, não serem eficazes e nem consistentes.

A metodologia desenvolvida está baseada na teoria de controle fuzzy combinada com ferramentas de configuração e fluxo de potência para redes de distribuição e é uma extensão dos métodos desenvolvidos por (Miranda & Calisto, 2002; Miranda et alli, 2007).

Após a identificação de violação de tensão é construída uma Matriz Efetividade. Esta, representa quanto o equipamento de controle de tensão é efetivo na variação da tensão nodal da rede de distribuição, ou seja, é calculada uma média dos desvios de tensão em função da variação da posição do dispositivo de controle. Baseada nessa matriz, a metodologia identifica qual dispositivo de controle é mais efetivo para o nó de pior violação de tensão. O programa irá corrigir a pior violação de tensão e, conseqüentemente, em outros nós que também são, de maneira menos eficaz, atingidos pelas mudanças efetuadas em determinado dispositivo de controle. Isto significa que, para uma dada ação de controle, não apenas o nó diretamente em questão será afetado, mas também outros nós que apresentam sensibilidade à ação de controle executada. É possível que uma ação efetuada em determinado nó tenha como consequência uma violação de tensão em outro nó da rede que em princípio não tinha problema de violação de tensão, mas provavelmente estava a beira da violação. Neste caso, esse nó irá entrar para o conjunto de nós com violação de tensão na próxima iteração do algoritmo, ou seja, o algoritmo só pára quando todas as tensões estiverem dentro do intervalo adequado e pré-estabelecido de operação, ou então, quando não houver mais margem de regulação para efetuar ações de controle. A Figura 3 mostra o fluxograma da metodologia desenvolvida do controle Volt/var.

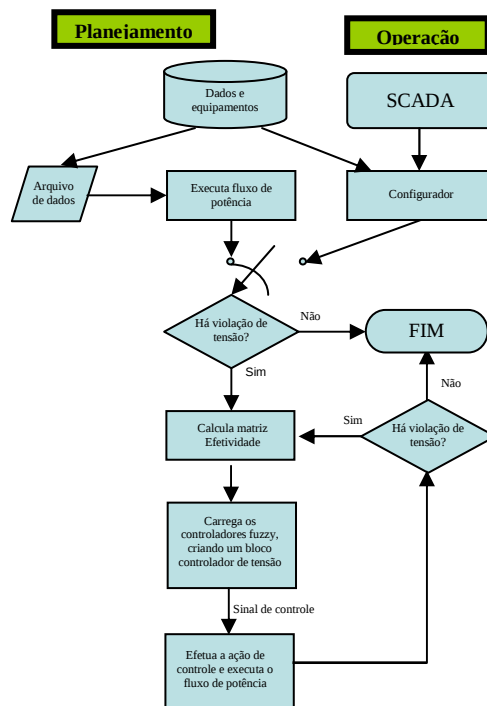


Figura 3 – Fluxograma da metodologia proposta.

#### 4. A Estrutura e as Funcionalidades do Sistema

A seguir descreve-se, resumidamente, as funcionalidades desenvolvidas para este projeto, bem como, as principais implementadas no sistema.

##### Leitura dos Dados da Rede

O software utiliza o padrão XML (eXtensible Markup Language) para intercâmbio de informações com a base de dados da empresa. A extração dos dados elétricos e topológicos da base de dados da rede de distribuição é realizada com o auxílio de uma funcionalidade especial, onde o usuário estabelece conexão à base de dados geo-referenciada e, através de uma interface específica, seleciona as subestações e alimentadores em que deseja realizar o estudo. O programa executa as consultas necessárias ao banco de dados e converte a informação resultante na estrutura XML descritiva da rede, a qual é carregada e exibida na interface do sistema. A Figura 4 mostra o fluxo de dados do processo de extração de dados e a Figura 5 exibe a interface de seleção das subestações e alimentadores.

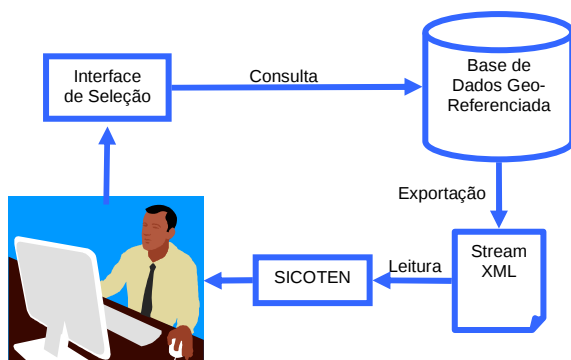


Figura 4 – Fluxo do processo de extração de dados.



Figura 5 – Interface de seleção de subestações e alimentadores.

## Cenários de Carregamento

O software permite escolher 4 cenários distintos de carregamento da rede: dia útil, sábado, domingo/feriado e capacidade instalada. Os 3 primeiros cenários utilizam a metodologia de curvas típicas, descrita em (Heizmann et alli, 2004), para juntamente com os dados de consumo, gerar uma curva de carga horária (24 horas) associada a cada Transformador de Distribuição (TD) do sistema. O quarto cenário (capacidade instalada) aplica um fator de demanda e um fator de potência sobre os valores nominais de potência de todos os TDs da rede, gerando um valor de carregamento constante para cada TD. A Figura 6 mostra uma curva de carga horária associada a um TD.

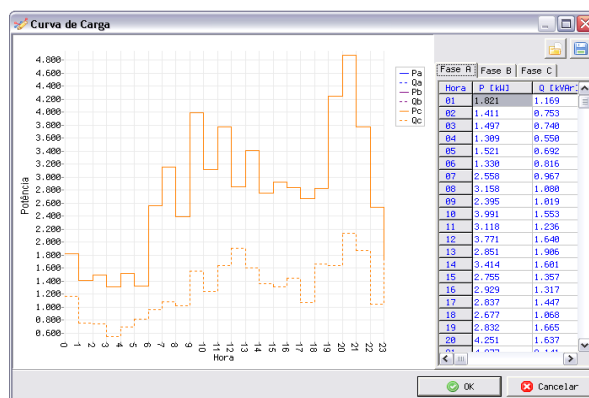


Figura 6 – Curva de carga horária em um TD.

Além de utilizar um cenário geral para todo o sistema, o software permite atribuir uma curva de carga específica a cada TD. Esta funcionalidade se mostra especialmente útil nos casos em que há dados históricos de medição de demanda de consumidores. A atribuição de curvas de cargas específicas se dá através da importação de arquivos específicos de dados.

## Fluxo de Potência

Uma ferramenta fundamental para a aplicação proposta neste estudo é o fluxo de potência. Através do fluxo de potência são obtidas as informações necessárias para os controladores executarem suas funções. Métodos como Newton-Raphson e Desacoplado Rápido (Monticelli, 1983), comumente utilizados em sistemas de transmissão, não apresentam bom desempenho no caso de sistemas de distribuição, tendo em vista as características deste tipo de sistema, tais como a baixa relação X/R dos parâmetros dos alimentadores, trechos com representação de chaves, reguladores de tensão e trechos com cargas muito próximas (baixa impedância) ligados a outros com impedância relativamente alta.

De acordo com (Srinivas, 2000), os métodos eficientes para a solução do fluxo de potência em sistemas de distribuição radiais são divididos em duas categorias:

- Métodos de varredura direta e inversa;
- Métodos baseados na matriz impedância nodal implícita.

Os métodos de varredura direta e inversa são recomendados, principalmente, para sistemas radiais, mas podem ser adaptados para sistemas fracamente malhados. O software utiliza um algoritmo baseado no método de Soma de Potências, o qual apresenta bons resultados no sentido da precisão das soluções, tempo de cálculo, fechamento de malhas e inclusão de geração distribuída.

## Interface Gráfica de Visualização

O sistema possui visualização e navegação gráfica geo-referenciada, o que facilita a interpretação dos resultados gerados, em especial, o estado elétrico da rede. Dispõe ainda de recursos comuns a ambientes CAD (Computer Aided Design) para auxílio ao desenho e à edição das redes elétricas, o que possibilita criação de casos hipotéticos para simulações e estudos, bem como, auxílio à atividade de planejamento de expansão das redes elétricas. A Figura 7 mostra o diagrama geo-referenciado de uma rede real.

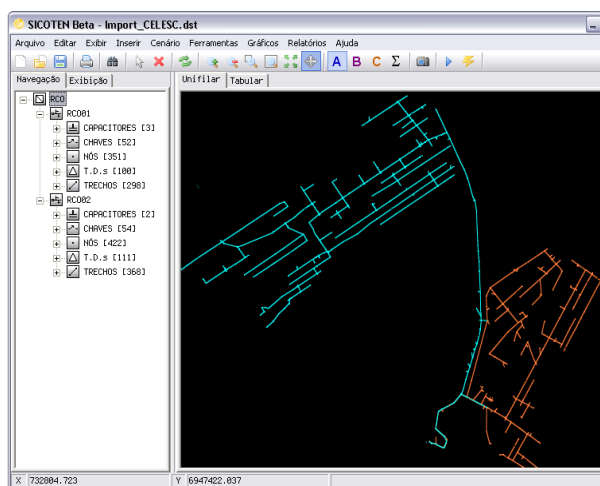


Figura 7 – Rede geo-referenciada.

## Monitoramento do Estado da Rede

Além de exibir o estado da rede com informações textuais sobre o diagrama geo-referenciado, o software permite ao usuário definir um código de cores em função do estado elétrico dos elementos da rede. Tal código permite a rápida identificação de elementos que estejam com valores críticos ou violados de tensão e/ou carregamento em relação aos seus limites. A Figura 8 exibe a janela de definição do código de cores e a Figura 9 mostra um trecho de rede onde o código de cores foi aplicado.

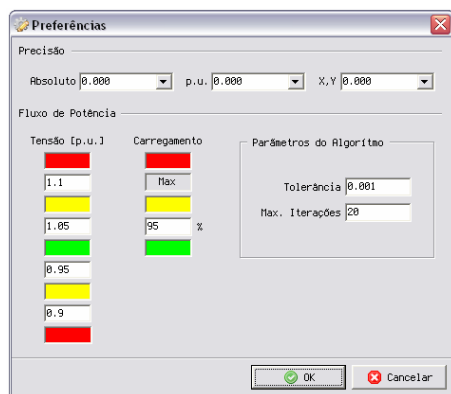


Figura 8 – Janela de definição do código de cores.

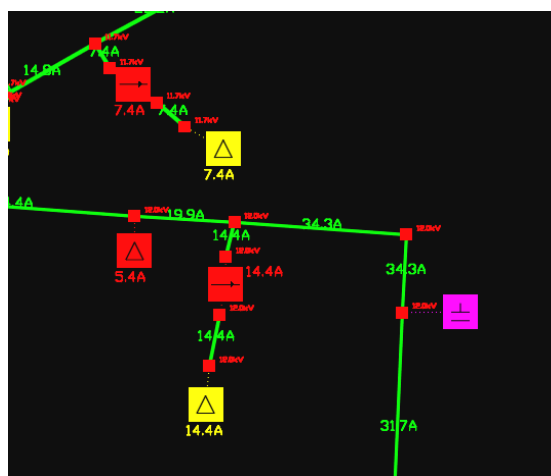
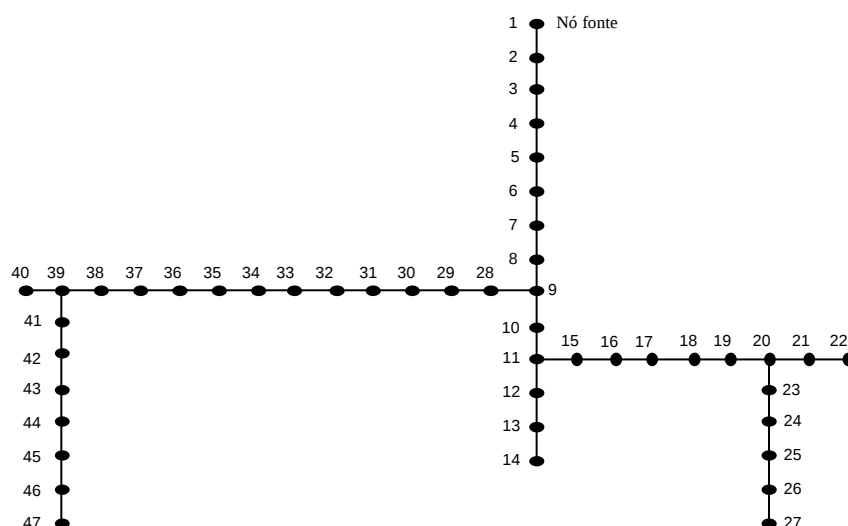


Figura 9 – Código de cores aplicado à rede.

## 5. Resultados

Nesta seção é apresentado o resultado da aplicação da metodologia de controle Volt/var sobre um alimentador da CELESC. Foi utilizado um alimentador piloto equivalentado em 47 nós, o qual é representado pela Figura 10.



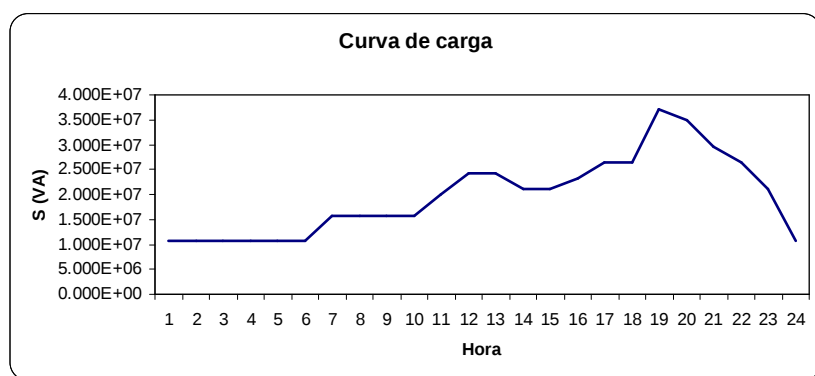
**Figura 10 – Sistema equivalentado do alimentador RCO-06.**

Este alimentador possui como equipamentos de controle três reguladores de tensão e dois bancos de capacitores. A Tabela 1 mostra a alocação, capacidade (banco de capacitores) e margem de regulação dos dispositivos de controle (tap e potência dos bancos de capacitores).

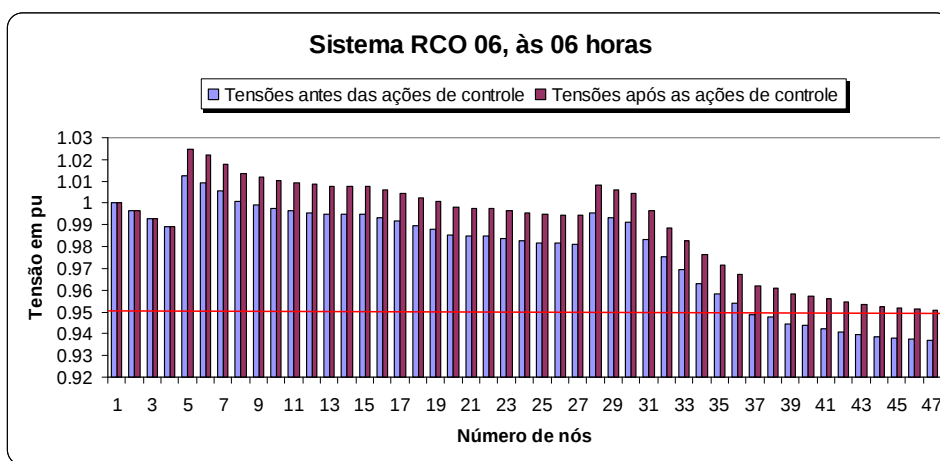
**Tabela 1 – Tabela dos equipamentos de controle do alimentador RCO-06.**

| Dispositivos de controle | Localização dos equipamentos | Nó de controle | Faixa de posições / Unidades |
|--------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|
| Regulador de tensão      | Entre os nós 04 e 05         | 05             | 16 posições                  |
| Banco de capacitores     | No nó 11                     | 11             | 3 unidades de 300kvar cada   |
| Regulador de tensão      | Entre os nós 15 e 16         | 16             | 16 posições                  |
| Banco de capacitores     | No nó 31                     | 31             | 3 unidades de 600kvar        |
| Regulador de tensão      | Entre os nós 36 e 37         | 37             | 16 posições                  |

A curva de carga da simulação, é mostrada na Figura 11 e foi utilizada para efetuar a simulação de 24 horas, com o objetivo de analisar o comportamento do algoritmo de controle Volt/var.



**Figura 11 – Curva de carga da simulação de 24 horas.**



**Figura 12 – Tensões do RCO-06 às 06 horas.**

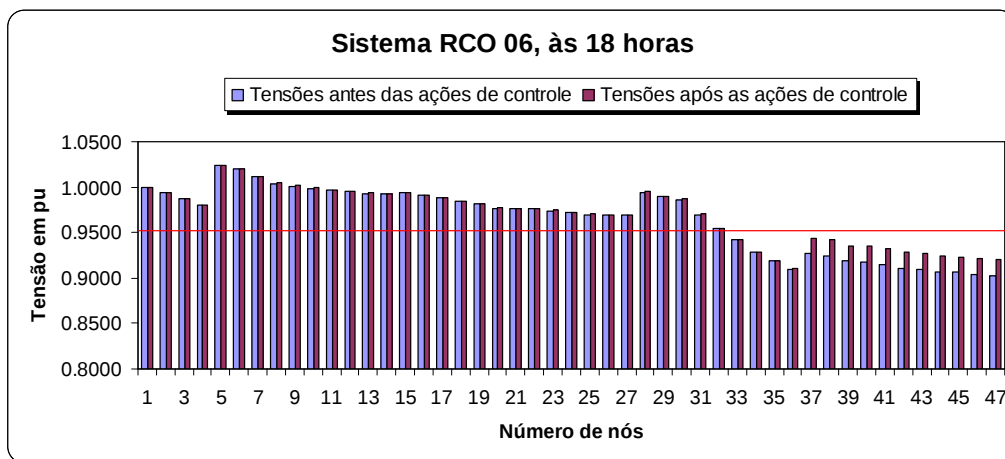
Observa-se na Figura 12 que os nós 37 a 47 apresentavam um perfil de subtensão que foi corrigido pelo algoritmo através da mudança de posição do tap do regulador do nó 05, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2 – Tabela das ações nos dispositivos de controle.**

| <b>Comportamento dos dispositivos de controle</b> |                       |               |                                  |               |                        |               |                                  |               |                        |               |
|---------------------------------------------------|-----------------------|---------------|----------------------------------|---------------|------------------------|---------------|----------------------------------|---------------|------------------------|---------------|
| <b>Horas</b>                                      | <b>TAP nó 5 em pu</b> |               | <b>Banco de cap. nó 11 em pu</b> |               | <b>TAP nó 16 em pu</b> |               | <b>Banco de cap. nó 31 em pu</b> |               | <b>TAP nó 37 em pu</b> |               |
|                                                   | <b>Antes</b>          | <b>Depois</b> | <b>Antes</b>                     | <b>Depois</b> | <b>Antes</b>           | <b>Depois</b> | <b>Antes</b>                     | <b>Depois</b> | <b>Antes</b>           | <b>Depois</b> |
| 0                                                 | 1.0000                | 1.0260        | 0.0300                           | 0.0300        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.0600                           | 0.0600        | 1.0000                 | 1.0000        |
| 1                                                 | 1.0260                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.0600                           |               | 1.0000                 |               |
| 2                                                 | 1.0260                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.0600                           |               | 1.0000                 |               |
| 3                                                 | 1.0260                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.0600                           |               | 1.0000                 |               |
| 4                                                 | 1.0260                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.0600                           |               | 1.0000                 |               |
| 5                                                 | 1.0260                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.0600                           |               | 1.0000                 |               |
| 6                                                 | 1.0260                | 1.0386        | 0.0300                           | 0.0300        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.0600                           | 0.0600        | 1.0000                 | 1.0000        |
| 7                                                 | 1.0386                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.0600                           |               | 1.0000                 |               |
| 8                                                 | 1.0386                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.0600                           |               | 1.0000                 |               |
| 9                                                 | 1.0386                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.0600                           |               | 1.0000                 |               |
| 10                                                | 1.0386                | 1.0500        | 0.0300                           | 0.0300        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.0600                           | 0.0600        | 1.0000                 | 1.0107        |
| 11                                                | 1.0500                | 1.0500        | 0.0300                           | 0.0300        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.0600                           | 0.1334        | 1.0107                 | 1.0313        |
| 12                                                | 1.0500                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.1334                           |               | 1.0313                 |               |
| 13                                                | 1.0500                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.1334                           |               | 1.0313                 |               |
| 14                                                | 1.0500                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.1334                           |               | 1.0313                 |               |
| 15                                                | 1.0500                |               | 0.0300                           |               | 1.0000                 |               | 0.1334                           |               | 1.0313                 |               |
| 16                                                | 1.0500                | 1.0500        | 0.0300                           | 0.1680        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.1334                           | 0.1800        | 1.0313                 | 1.0313        |
| 17                                                | 1.0500                |               | 0.1680                           |               | 1.0000                 |               | 0.1800                           |               | 1.0313                 |               |
| 18                                                | 1.0500                | 1.0500        | 0.1680                           | 0.1800        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.1800                           | 0.1800        | 1.0313                 | 1.0500        |
| 19                                                | 1.0500                | 1.0500        | 0.1800                           | 0.1800        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.1800                           | 0.1800        | 1.0500                 | 1.0500        |
| 20                                                | 1.0500                | 1.0500        | 0.1800                           | 0.1800        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.1800                           | 0.1800        | 1.0500                 | 1.0500        |
| 21                                                | 1.0500                |               | 0.1800                           |               | 1.0000                 |               | 0.1800                           |               | 1.0500                 |               |
| 22                                                | 1.0500                |               | 0.1800                           |               | 1.0000                 |               | 0.1800                           |               | 1.0500                 |               |
| 23                                                | 1.0500                | 1.0188        | 0.1800                           | 0.1800        | 1.0000                 | 1.0000        | 0.1800                           | 0.1800        | 1.0500                 | 1.0500        |

Da Tabela 2, observa-se que o regulador de tensão do nó 37 não atua às 06 horas. Porém os nós 37 a 47, conforme Figura 12, têm violação de tensão. Isto ocorre porque a mudança no dispositivo de controle do regulador de tensão do nó 05 é suficiente para corrigir todas as violações de tensão.

Outro resultado importante é que às 18 horas, devido ao alto carregamento do sistema, as violações de tensão não são totalmente corrigidas, como mostra a Figura 13. O regulador de tensão do nó 37 tinha, neste horário, margem de controle que foi utilizada na tentativa de correção das violações de tensão dos nós 37 a 47. O tap deste equipamento foi limitado e mesmo assim o algoritmo não obteve sucesso na correção do problema. Após a ação de controle o algoritmo alertou que não haviam mais equipamentos de controle disponíveis para corrigir as violações de tensão, pois todos equipamentos estavam sem margem de regulação.



**Figura 13 – Tensões do sistema RCO-06 às 18 horas.**

O algoritmo mostrou-se coerente com a metodologia desenvolvida corrigindo as violações de tensão quando havia margem de controle e alertou que não poderia corrigir as violações de tensão quando não haviam equipamentos de controle disponíveis para efetuar qualquer ação de controle.

## 6. Conclusões

O artigo apresentado mostra o desenvolvimento de uma metodologia de controle Volt/var para sistemas de distribuição baseado em controladores que utilizam lógica fuzzy. Foi implementado um controlador central, do tipo Cascata de Mamdani, que recebe informações de um espaço de entrada e através da lógica fuzzy fornece um espaço de saída que é interpretado e resulta em uma dada ação de controle. O objetivo é comprovar que essa metodologia pode ser usada na operação de sistemas de distribuição, e que auxilia efetivamente na tomada de decisão por parte dos operadores e despachantes dos Centros de Operação.

As análises efetuadas nesta pesquisa comprovam a eficiência da metodologia proposta e a facilidade linguística que é inerente a metodologia da lógica fuzzy. Esta é uma questão fundamental para uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão, onde o operador deve se sentir a vontade com a ação de controle proposta pelo programa.

Em todas as simulações foi imposta uma curva de carga de 24 horas, onde procurou-se representar as variações da demanda durante um dia típico de operação.

Os resultados apresentaram consistência nas respostas dos controladores de Mamdani, tanto para a correção de sub-tensão quanto para a correção de sobretensão, mesmo com variações da topologia do sistema e dos cenários de carregamento. A metodologia proposta também mostrou-se adequada para melhorar a distribuição do fluxo de reativos no sistema, colaborando para um melhor aproveitamento dos dispositivos de controle em função da coordenação Volt/var.

Os controladores também obtiveram comportamento coerente quando analisado o efeito de entrada de geração distribuída no sistema e modelagem de diferentes tipos de carga.

A pesquisa mostrou-se relevante, pois aborda o assunto de controle Volt/var de forma acoplada envolvendo os equipamentos de controle disponíveis atualmente na rede de distribuição.

## 7. Bibliografia

- EL-HAWARY, M. E. Electric Power Applications of Fuzzy Systems. IEEE Press, 1998.
- GREEN, J. N. & WILSON, R. Control and Automation on Electrical Power Distribution Systems. CRC, 2007.
- HEIZMANN, G. et alli. Sistema Computacional para Modelagem e Avaliação de Curvas de Carga em Sistemas de Distribuição. In: XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado. Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004. v. 1. p. 1-6.
- MIRANDA, V. & CALISTO, P. A Fuzzy Inference System to Voltage/var Control in DMS – Distribution Management System. 14th PSCC – Power System Computation Conference. Sevilla, Jun. 2002.
- MIRANDA, V. et alli. An Improved Fuzzy Inference System for Voltage/var Control. Power Systems, IEEE Transactions On. Vol. 22. pp. 2013-2020. Nov. 2007.
- MONTICELLI, A. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Primeira Edição. Editora Edgard Blücher. 1983.
- ROYTELMAN, I et alli. Volt/var control algorithm for modern distribution management systems. Power Systems, IEEE Transactions On. Vol. 10. pp. 1454-1460. Ago.1995.
- ROYTELMAN, I. & SHAHIDEHPOUR, S. M. Practical aspects of distribution automation in normal and emergency conditions. IEEE Transactions On. Vol. 8. Issue 4. pp. 2002 – 2008. Out. 1993.
- ROYTELMAN, I. et alli. Pilot project to estimate the centralized Volt/var control effectiveness. IEEE Transaction on Power Systems. Vol. 13, Issue 3. pp. 864 – 869. Ago. 1998.
- SRIVINAS, M. S. Distribution Load Flows: A Brief Review. Proceedings of the 2000 IEEE PES Summer Meeting. Jan, 2000.