

Mateus de Oliveira

**UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE VOLT/VAR EM REDES  
DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
(TCC) submetido ao Curso de Gradua-  
ção em Engenharia Elétrica da Univer-  
sidade Federal de Santa Catarina como  
parte dos requisitos para obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Elé-  
trica

Orientador: Prof. Miguel Moreto, Dr.

Florianópolis  
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

de Oliveira, Mateus  
UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE VOLT/VAR EM REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO / Mateus de Oliveira ; orientador, Miguel  
Moreto , 2020.  
67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Redes de distribuição. 3.  
Lógica fuzzy. 4. Controle Volt/VAR. I. , Miguel Moreto. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Elétrica. III. Título.

Mateus de Oliveira

## UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE VOLT/VAR EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 05 de fevereiro de 2020.



---

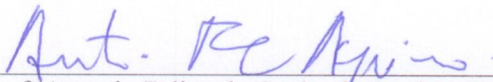
Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em exercício

**Banca Examinadora:**



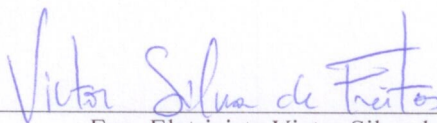
---

Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, D.Sc.  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Eng. Eletricista Victor Silva de Freitas, Me.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

Dedico esse trabalho primeiramente aos meus pais. Ao meu pai, Valdelir, que sempre me incentivou nos estudos e a entrar neste curso de graduação, gostaria que estivesse aqui hoje pra me ver finalizar essa jornada. À minha mãe, Aldanésia, pelo apoio e suporte incondicional durante essa caminhada, principalmente nos momentos mais difíceis que quase me fizeram desistir.

Aos meus avós, que ajudaram em minha criação e me fizeram ser quem sou hoje.

Ao meu namorado, Francisco, que me acompanhou em grande parte dessa trajetória, pelo companheirismo, carinho, cumplicidade e principalmente paciência e compreensão durante os momentos difíceis.

Agradeço à minha prima, Jéssica, que muito me ajudou em questões técnicas durante a elaboração deste trabalho.

Sou grato aos meus familiares, amigos e demais colegas de graduação que tornam todos os momentos sempre melhores e mais agradáveis.

Agradeço também ao meu professor e orientador Dr. Prof. Miguel Moreto pelas ideias, orientação, discussões e demais auxílios na elaboração deste trabalho.

E por fim à Universidade Federal de Santa Catarina, ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, seu corpo docente e demais colaboradores pela excelente educação pública, gratuita e de qualidade.



“If you torture the data long enough, it will confess to anything.”

Ronald Coase





## RESUMO

Ao considerar o aumento da complexidade do sistema em redes de distribuição e que muitos dos controles ainda são feitos localmente e de forma descoordenada, cria-se um sistema ineficaz. Com vistas em uma economia por meio do aumento da vida útil dos equipamentos, além de segurança e qualidade no fornecimento de energia elétrica, foi realizada uma pesquisa buscando formas de otimização destes sistemas em diversos artigos científicos. Este trabalho reúne propostas de autores e a reprodução e análise com alterações de uma estratégia de controle de tensão e potência reativa (Controle Volt/var ou VVC, do inglês *Volt/var Control*) em redes de distribuição de forma coordenada e centralizada. Esta estratégia busca adquirir dados por meio de um sistema SCADA (do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*) e realizar simulações por meio do cálculo de fluxo de potência no software OpenDSS® e utilizar programação em Python™ para aplicar uma metodologia de lógica *fuzzy* para manter todo o sistema dentro de condições ideais de operação. Este estudo atingiu o objetivo proposto após análise da aplicação em dois sistemas testes de distribuição do IEEE, 34 e 123 barras.

**Palavras-chave:** Redes de distribuição. Lógica *fuzzy*. Controle Volt/var.



## ABSTRACT

Considering the increase in complexity of the distribution systems and that many of the controls are still done locally and in an uncoordinated way, an ineffective system is created. In order to save money by increasing the equipment useful life, in addition to the safety and quality of the electricity supply, a research was carried out in many scientific articles looking for ways to optimize these systems. This work assembles proposals from authors and also reproduces with changes a strategy of voltage and reactive power control (Volt/var control or VVC) in distribution networks in a coordinated and centralized way. This strategy seeks to acquire data through a SCADA system (Supervisory Control and Data Acquisition) and performs simulations by calculating power flow in OpenDSS<sup>®</sup> software and using Python<sup>™</sup> programming to apply a fuzzy logic methodology to maintain all the system within ideal operating conditions. This work achieved the proposed objective after analyzing the application in two IEEE distribution test systems, 34 and 123 bus.

**Keywords:** Distribution networks. Fuzzy logic. Volt/var control.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de Energia Elétrica - Brasil x Mundo (TWh)	21
Figura 2 - Estados brasileiros e suas tensões	22
Figura 3 - Função de pertinência do mapeamento de um conjunto <i>fuzzy</i>	29
Figura 4 - Operações da lógica <i>fuzzy</i>	30
Figura 5 - Caracterização de uma função de pertinência do tipo trapezoidal	32
Figura 6 - Matriz Relacional	34
Figura 7 - Exemplo do Método do Centro de Gravidade	35
Figura 8 - Exemplo do Método do Máximo Valor	36
Figura 9 - Exemplo do Método da Média dos Máximos Valores	37
Figura 10 - Exemplo do Método do Centro dos Máximos Valores	38
Figura 11 - Exemplo de arquitetura do sistema de distribuição	42
Figura 12 - Integração entre Python <sup>TM</sup> e OpenDSS <sup>®</sup>	43
Figura 13 - Fluxograma geral para VVC coordenado em redes de distribuição	44
Figura 14 - Fluxograma do algoritmo para VVC coordenado	45
Figura 15 - Controlador <i>fuzzy</i>	47
Figura 16 - Fluxograma de Efetividade	47
Figura 17 - Funções de pertinência para Efetividade	48
Figura 18 - Fluxograma de Comutatividade e Controlador <i>Fuzzy</i>	49
Figura 19 - Funções de pertinência para Comutatividade	50
Figura 20 - Funções de pertinência de atuação	51
Figura 21 - Exemplo 1 da saída do controlador <i>fuzzy</i>	52
Figura 22 - Exemplo 2 da saída do controlador <i>fuzzy</i>	53
Figura 23 - Diagrama unifilar do IEEE 34 barras	55
Figura 24 - Perfil de tensão nas barras do IEEE 34 antes e após a aplicação do VVC	57
Figura 25 - Diagrama unifilar do IEEE 123 barras	58
Figura 26 - Perfil de tensão nas barras do IEEE 123 antes e após a aplicação do VVC - Parte 1	60
Figura 27 - Perfil de tensão nas barras do IEEE 123 antes e após a aplicação do VVC - Parte 2	61



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Regras para análise do controlador <i>fuzzy</i> .....	52
Quadro 2 - Situação dos equipamentos de controle do IEEE	34
barras.....	56
Quadro 3 - Situação dos equipamentos de controle do IEEE	123
barras.....	59





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CG – Centro de gravidade.

COM – *Component Object Model*

DMS – *Distribution Management System*

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

OpenDSS – *Distribution System Simulator*

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*.

SIF – Sistema de inferência *fuzzy*.

TWh – Terawatt-hora

VVC – *Volt/var control*.



## SUMÁRIO

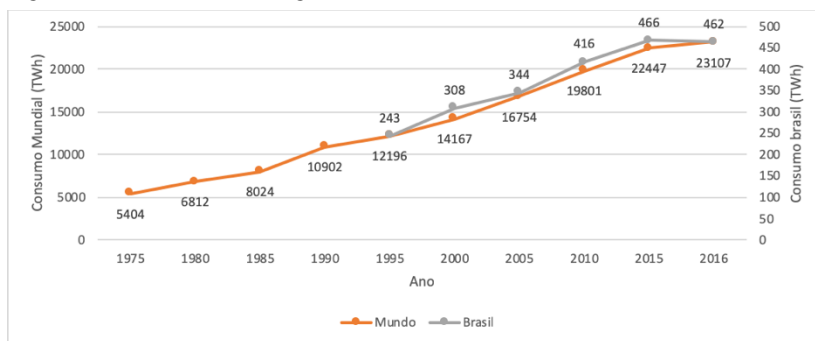
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	PROBLEMÁTICA.....	21
1.2	OBJETIVOS .....	23
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>23</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>23</b>
1.3	ORGANIZAÇÃO .....	24
<b>2</b>	<b>VVC – CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA</b>	
<b>REATIVA</b>	.....	<b>25</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES.....	26
<b>3</b>	<b>LÓGICA FUZZY</b> .....	<b>29</b>
3.1	OPERAÇÕES COM CONJUNTOS FUZZY .....	30
3.2	PROPRIEDADES DOS CONJUNTOS FUZZY .....	31
3.3	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA .....	31
3.4	FUZZIFICAÇÃO E SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY	32
3.5	SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY.....	32
<b>3.5.1</b>	<b>Tratamento de Regras</b> .....	<b>33</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Matriz de Correlação</b> .....	<b>34</b>
3.6	DEFUZZIFICAÇÃO .....	34
<b>3.6.1</b>	<b>Método do Centro de Gravidade</b> .....	<b>35</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Método do Valor Máximo</b> .....	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA DE VVC</b> .....	<b>39</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES.....	39
4.2	ARQUITETURA E ALGORITMO – DESCRIÇÃO DO VVC	42
<b>4.2.1</b>	<b>Identificação da barra e fase com maior desvio de tensão</b>	<b>45</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Identificação de violação dos níveis de tensão</b> .....	<b>46</b>

<b>4.2.3</b>	<b>Controlador <i>fuzzy</i>.....</b>	<b>46</b>
4.2.3.1	Funções de pertinência de Efetividade .....	46
4.2.3.2	Funções de pertinência de Comutatividade .....	49
4.2.3.3	Funções de pertinência da saída do Controlador <i>fuzzy</i> .....	50
<b>5</b>	<b>RESULTADOS DA APLICAÇÃO .....</b>	<b>55</b>
5.1	IEEE 34 BARRAS.....	55
5.2	IEEE 123 BARRAS.....	58
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da dependência humana por energia elétrica para os mais diversos tipos de aplicações, em âmbitos desde o trabalho, a educação e o lazer, houve, com o tempo, um aumento significativo de demanda por este tipo de energia. Conforme observado na figura a seguir, é possível visualizar o aumento no consumo de energia tanto no Brasil, quanto no mundo nas últimas décadas, acompanhando tendências de crescimento bastante semelhantes.

Figura 1 - Consumo de Energia Elétrica - Brasil x Mundo (TWh)



Fonte: The International Energy Agency (2018) e Empresa de Pesquisa Energética (2018).

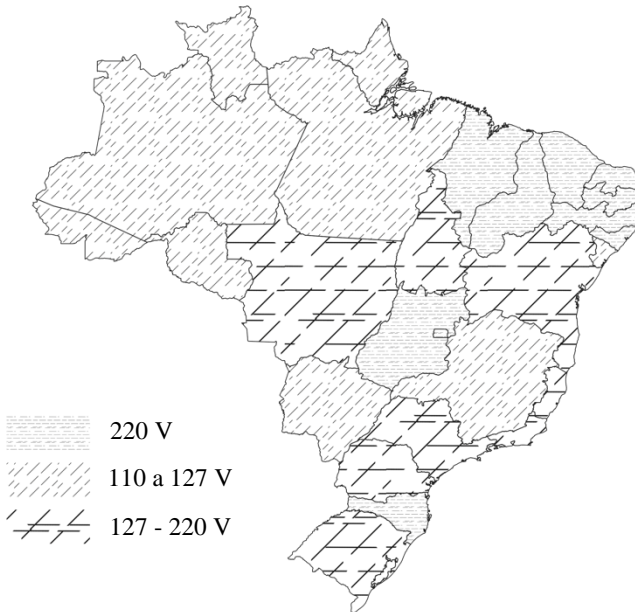
Em conjunto com essa crescente demanda por energia, os sistemas de energia elétrica também foram ficando mais complexos, com diferentes tipos de cargas conectadas a eles e padrões de usos distintos, principalmente no que se refere ao período de utilização. Com o objetivo de atender e solucionar os novos problemas decorrentes do aumento da dependência por energia elétrica e a necessidade de um controle cada vez mais preciso e eficaz, diversas soluções foram encontradas ao longo do tempo, como mostra a seção seguinte.

### 1.1 PROBLEMÁTICA

Metodologias capazes de controlar a tensão e potência reativa (*Volt/var Control – VVC*) em redes de distribuição são um dos focos dos mais variados estudos no campo de Sistemas de Potência e possuem como objetivo reduzir as violações de tensão e manter o nível da mesma em patamares adequados, além de minimizar a potência reativa.

Esse controle se torna importante quando considerado o modelo como a energia é distribuída. Os níveis de tensão são definidos e padronizados pelo poder público de certa localidade de forma a haver uma previsibilidade nos modelos de projeto, construção e comercialização de equipamentos e máquinas que visam atender àquele mercado e as violações nos níveis de tensão podem acarretar danos a estes. Atualmente no Brasil são utilizados dois padrões de nível de tensão monofásicas para baixa tensão: 220 V e 127 V, com frequência de 60 Hz, com exceção do Estado do Sergipe, que pode utilizar tensão nominal entre 110 e 127 V. Outros países podem utilizar outros valores.

Figura 2 - Estados brasileiros e suas tensões



Fonte: ANEEL (2019).

Além do importante controle dos níveis de tensão das redes de distribuição, outro fator de importante interesse, principalmente para as concessionárias, é o fluxo de potência reativa da rede. A importância da potência reativa é especialmente grande na indústria, local em que os motores mais utilizados no setor, os de indução, a utilizam em seu funcionamento. Porém esse tipo de potência gera consequências como o aumento

da corrente nas linhas, aumentando assim os custos para a distribuição, devido às maiores perdas e manutenções necessárias (ABDELHAFEZ, 2017).

Como mencionado anteriormente, metodologias de VVC podem ser aplicadas em redes de distribuição com o objetivo de controlar tanto a tensão como a potência reativa. Este controle pode ser realizado através de TAPs de transformadores e reguladores e através de inserção de bancos de capacitores em certos pontos da rede de distribuição. É importante ressaltar que estas mesmas formas de controle, se não feitas de forma adequada, podem acabar gerando mais perdas e aumentando consideravelmente o desvio da tensão, afetando negativamente todo o sistema de distribuição (DE SOUZA, 2010).

Há diversos estudos e desenvolvimento de técnicas que buscam solucionar os problemas acarretados da complexidade atual do sistema elétrico e principalmente as questões supracitadas.

Alguns exemplos de técnicas utilizadas em VVC são: técnica heurística abordada e proposta por Deng *et al.* (2002), o algoritmo evolutivo de Ulinuha *et al.* (2007) e o recozimento simulado ou a lógica *fuzzy* proposta por Liang *et al.* (2003). Particularmente a lógica *fuzzy* tem se destacado hoje dentre outras técnicas devido às suas vantagens, especialmente devido à resolução de problemas não lineares e análise de informação qualitativa vinculada à eficiência do esforço computacional (MIRANDA, 2007).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo a análise de uma metodologia de controle de tensão e potência reativa (VVC) em redes de distribuição de energia elétrica, buscando formas de reduzir as violações de tensão enquanto mantém a mesma dentro dos níveis aceitáveis por órgãos reguladores e também de minimizar o fluxo de potência reativa nas linhas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Com relação à natureza do trabalho e ao objetivo geral mencionado na seção anterior, destacam-se os seguintes objetivos específicos para o desenvolvimento deste estudo:

- Revisão de conceitos relacionados a fluxo de potência;

- Compreensão teórica e aplicações da lógica *fuzzy*;
- Desenvolvimento de algoritmo por meio de programação dinâmica e lógica *fuzzy* com a finalidade de controlar a tensão e a potência reativa;
- Realização de simulações a partir do algoritmo desenvolvido e análise de resultado.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO

O presente estudo está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: É realizada uma introdução ao tema do trabalho, além de apresentados seus objetivos gerais e específicos, além de sua organização;

Capítulo 2: A problemática é apresentada, assim como algumas considerações;

Capítulo 3: São abordados conceitos relativos à lógica *fuzzy*;

Capítulo 4: Neste capítulo é apresentada a metodologia aplicada ao VVC;

Capítulo 5: Serão apresentados os resultados e simulações do estudo;

Capítulo 6: São expostas as conclusões acerca do estudo.



## 2 VVC – CONTROLE DE TENSÃO E POTÊNCIA REATIVA

Com a finalidade de atender à demanda e oferecer um serviço de qualidade, é necessário manter o nível de tensão nas linhas de distribuição estável e adequado para a sua utilização, mesmo sob as mais distintas formas de operação do sistema. Segundo De Mello *et al.* (2017), devido à complexidade cada vez maior do sistema essa tarefa tem se tornado mais difícil. Esta complexidade se deve, por exemplo, à popularização de sistemas de geração distribuída intermitentes, como sistemas de baixa e média tensão de energia fotovoltaica e eólica, sistemas de armazenamento de energia, veículos elétricos e uso de cada vez maior de cargas não lineares na indústria.

Tipicamente, os controles que buscam diminuir as violações de tensão nas barras do sistema de distribuição e amenizar o fator de potência são feitos localmente. Esse processo descoordenado, em termos de segurança da operação, cria um controle ineficaz. Para possibilitar ajustes coordenados em tempo real é necessário um sistema de comunicação entre os equipamentos, além de um sistema de controle central responsável por tomar as decisões e ações devidas em diferentes níveis do sistema (DE MELLO *et al.*, 2017).

No controle de tensão e potência reativa de redes de distribuição são utilizados alguns dispositivos de controle diferentes. No transformador principal é instalado um comutador de TAPs para que quando houver mudanças na carga seja possível manter a tensão na barra secundária dentro dos níveis desejados. Reguladores em série também são instalados no sistema para o controle direto de tensão. Além disso, há o uso de bancos de capacitores *shunt* com controlador var para controlar a comutação na barra secundária da subestação. E por fim, pode haver capacitores conectados diretamente em cada cabo de alimentação. Esses dois últimos são utilizados para manter o fator de potência elevado no sistema e para auxiliar no controle do perfil da tensão ao longo do sistema (LIANG *et al.*, 2003).

Além do controle de tensão e potência reativa da rede, o VVC também visa otimizar as comutações nesses dispositivos do sistema, buscando soluções que acarretem o menor número de comutações possíveis, preservando, assim, a vida útil dos equipamentos (DE MELLO *et al.*, 2017).

Avanços tecnológicos recentes utilizando sistemas modernos e sofisticados de comunicação, controle e processamento estão possibilitando a utilização de várias técnicas avançadas do VVC, algumas com aplicações em tempo real.

Como mencionado na seção anterior, algumas técnicas e métodos para a solução de VVC já foram propostas na literatura. Em 2002, Deng *et al.* sugere uma abordagem heurística e algorítmica combinada, onde a primeira seria responsável por definir a sequência de comutação de transformadores e capacitores, e posteriormente, vários modelos de período único seriam criados a partir do modelo de otimização de multiperíodo, sendo então resolvidos por algoritmos de otimização convencionais. Já em 2007, Ulinuha *et al.* propõe a técnica de algoritmo evolutivo como forma de agendar o horário de alteração nos TAPs e nas conexões dos capacitores. E por fim a lógica *fuzzy*, utilizada por alguns autores, que vem se destacando principalmente devido as suas vantagens em relação a outras técnicas.

## 2.1 CONSIDERAÇÕES

Como mencionado anteriormente, a Lógica *Fuzzy*, proposta por diversos autores como uma das soluções de VVC, ainda tem se destacado hoje dentre outras técnicas devido às suas vantagens para solução de problemas não lineares e análise de informação qualitativa vinculada à eficiência do esforço computacional (MIRANDA, 2007).

Para a aplicação do VVC e da lógica *fuzzy* em tempo real, alguns autores como Berger e Krzysztof (2015), Borlase (2017) e Shahidehpour e Wang (2004) mencionam que é necessário o atendimento de alguns requisitos:

- Um programa de fluxo de potência trifásico desbalanceado onde se possa otimizar e validar a operação;
- Um sistema de controle centralizado que possa gerir o sistema de distribuição e tenha suporte para aquisição, controle e processamento de dados;
- Gravação em tempo real dos dados de equipamentos do sistema;
- Dispositivos controlados remotamente por controladores mutáveis;
- Sistema de comunicação avançado e confiável.

Por meio da implantação de um VVC por lógica *fuzzy* e do acompanhamento a cada hora da configuração atual do sistema através de um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) é possível compreender o cenário atual, encontrar e definir o melhor arranjo para o

sistema. Desta forma, a partir deste melhor arranjo, são ajustados os TAPs de transformadores e banco de capacitores na distribuição, e assim, minimizando as perdas devido à alta corrente e manter o desvio da tensão o menor possível (LIU *et al.*, 2002).



### 3 LÓGICA FUZZY

A partir do século XIX, com novos estudos e descobertas sendo realizados, constatou-se a necessidade de outros meios de solução para problemas encontrados na época, já que os modelos clássicos disponíveis, como a mecânica Newtoniana, em conjunto com a grande quantidade de dados, demandavam um poder computacional que ainda não estava disponível. Dessa forma, com a finalidade de buscar atender a essa demanda, essa forma de resolução mais clássica perdeu um pouco de espaço para uma teoria que tem a abordagem de incertezas como seu principal propósito, a Teoria Probabilística. Vale ressaltar que a utilização de um método ou outro não é exclusiva, mas podem também serem usados complementarmente (KLIR; YUAN, 1995).

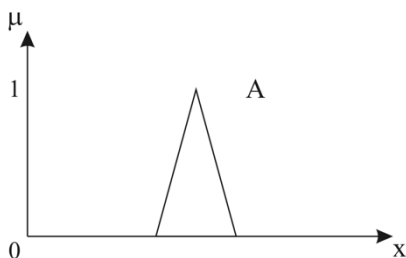
Um ponto que diferencia bem a lógica clássica da lógica *fuzzy* é que na primeira, enquanto os limites que fazem um elemento pertencer a determinado conjunto é bem definido e preciso (CHEN; PHAM, 2000), na segunda, que tem como premissa trabalhar com informações imprecisas, esse limites são imprecisos e a transição é gradual (ZAHED, 1965; ROSS, 2009).

É chamada de função de pertinência ( $\mu$ ) a função característica pela qual os elementos de um conjunto *fuzzy* são mapeados. Além disso, as funções de pertinência nesse tipo de lógica são diversas, diferentemente da lógica clássica. (ZAHED, 1965; COX, 1994).

Tanto a Equação (1) quanto a Figura 3 mostram o mapeamento do conjunto *fuzzy* A dado um elemento qualquer  $x$ .

$$\mu_A(x) \in [0, 1] \quad (1)$$

Figura 3 - Função de pertinência do mapeamento de um conjunto *fuzzy*.



Fonte: CIESLAK (2015).

### 3.1 OPERAÇÕES COM CONJUNTOS *FUZZY*

Os conceitos dos diferentes tipos de lógicas, como a lógica *Booleana*, lógica bivalente, lógica trivalente, entre outras lógicas multiníveis, foram sendo desenvolvidos no decorrer do tempo partindo da lógica clássica como base.

Para o desenvolvimento da lógica *fuzzy*, Zahed baseou-se nos trabalhos de Lukasiewicz, que foi um dos primeiros a trabalhar com uma lógica *n*-valente, onde *n* pode tender a infinito (CIESLAK, 2015). Dessa forma foram criadas três operações básicas da lógica *fuzzy*: União, Intersecção e Complemento. As equações a seguir relacionam as operações, entre dois conjuntos A e B, com operadores da lógica bivalente.

União:

$$A \cup B \rightarrow \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (2)$$

Intersecção:

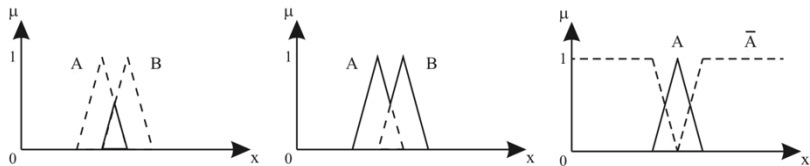
$$A \cap B \rightarrow \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (3)$$

Complemento:

$$\bar{A} \rightarrow \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4)$$

Já a Figura 4 representa graficamente o que foi exposto anteriormente por meio das equações sobre as operações básicas da lógica *fuzzy*.

Figura 4 - Operações da lógica *fuzzy*.



(a) União entre dois conjuntos *fuzzy*. (b) Intersecção entre dois conjuntos *fuzzy*. (c) Complemento de um conjunto *fuzzy*.

Fonte: CIESLAK (2015).

### 3.2 PROPRIEDADES DOS CONJUNTOS FUZZY

Um das principais diferenças entre a lógica clássica e a lógica *fuzzy* se encontra na definição dos Axiomas do Terceiro Excluído. Apesar disso, outras propriedades, como a comutatividade, associatividade, distributividade, idempotência e involução se mantêm iguais às da lógica clássica. Além disso, os conceitos de conjunto nulo e conjunto completo são análogos aos conceitos de relação nulo (**O**) e relação completa (**E**), ou seja, os Princípios de Morgan também se mantêm (ROSS, 2009; CI-ESLAK, 2015). Levando em consideração o exposto acima, considerando uma relação *fuzzy*  $A$  e as Equações 5 e 6 abaixo, é possível afirmar que, para relações *fuzzy*, os Axiomas de Terceiro Excluído, em geral, não implicam na relação nula e na relação completa.

$$A \cup \bar{A} \neq \mathbf{E} \quad (5)$$

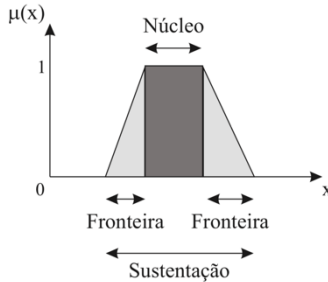
$$A \cap \bar{A} \neq \mathbf{O} \quad (6)$$

Como é possível ser observado na Figura 4c, existe uma sobreposição entre o conjunto e seu complemento. Portanto, como está descrito na Equação 5, a união entre um conjunto *fuzzy*  $A$  e seu complemento é diferente de uma relação completa (**E**). Já a interseção entre um conjunto *fuzzy*  $A$  e seu complemento difere de uma relação nula (**O**), como mostra a Equação 6.

### 3.3 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Considerando uma função de pertinência do tipo trapezoidal, é possível definir as regiões que constituem a sua caracterização, como mostra a Figura 5 a seguir. Assim como a triangular, é importante ressaltar que esse formato não é de uso obrigatório, apesar de ser bastante comum devido ao seu formato simplificado para trabalho e manuseio. O formato adequado da função de pertinência irá depender da aplicação na qual ela será utilizada e, de modo geral, sua determinação não é uma tarefa trivial (SIMÕES; SHAW, 2007).

Figura 5 - Caracterização de uma função de pertinência do tipo trapezoidal.



Fonte: CIESLAK (2015).

Em uma função de pertinência, dado um conjunto *fuzzy*, são definidas três regiões distintas: núcleo, fronteira e sustentação. O núcleo é a região onde dado um elemento  $x$  obtém-se  $\mu_A(x) = 1$ , ou seja, é onde ocorre a pertinência plena (completa). A fronteira é definida como a região onde a pertinência não é completa e não é nula, ou seja, obtém-se  $0 < \mu_A(x) < 1$  a partir de um elemento  $x$  qualquer. Por fim há a área chamada de sustentação definida como a região onde a pertinência não é nula ( $\mu_A(x) > 0$ ), ou seja, é a junção entre o núcleo e as fronteiras.

### 3.4 FUZZIFICAÇÃO E SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

O processo de fuzzificação leva em consideração que as informações possuem incertezas, ambiguidades e imprecisões, ou seja, não são puramente determinísticas. Dessa forma é necessária uma abordagem diferente, utilizando o intermédio do tratamento através de funções de pertinência (ROSS, 2009). Portanto, esse processo trata as informações sob uma perspectiva semântica em vez de analítica, pré-processando as categorias ou classes e reduzindo significativamente a quantidade de informações a serem processadas.

Segundo Simões e Shaw (2007), a forma como as informações são modeladas e as melhores abordagens a serem utilizadas na fuzzificação depende diretamente do conhecimento do processo por um especialista, pois, na maioria das vezes, são obtidas através da experiência humana.

### 3.5 SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY



É na etapa de inferência, a partir do momento em que as informações referentes ao sistema são modeladas, em que ocorre o raciocínio lógico do sistema *fuzzy*. Ou seja, o mecanismo responsável por correlacionar regras e informações é chamado de Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF). Segundo Zahed (1975) esta etapa é caracterizada como raciocínio aproximado, pois efetua o raciocínio sobre proposições imprecisas baseado na fundamentação teórica.

Segundo Ross (2009), um sistema de inferência é baseado na lógica **SE-ENTÃO**, ou seja, baseia-se em regras que correlacionam informações **antecedentes** e **consequentes**. Já segundo Simões e Shaw (2007), a inferência se baseia em operações entre universos distintos e as informações de antecedentes podem ser tratadas como entradas de um sistema, assim como consequentes seriam as saídas. A Equação 7 é uma expressão condicional de inferência equivalente a **SE**  $A(u)$  **ENTÃO**  $B(v)$ . Onde  $A$ , dito antecedente, é um conjunto de informações de entrada em um universo  $U$  ( $A(u) \in U$ ) que possui ligação com  $B$ , dito consequente, um conjunto de informações de saída em um inverso  $V$  ( $B(v) \in V$ ) (SIMÕES; SHAW, 2007).

$$A \rightarrow B \quad (7)$$

### 3.5.1 Tratamento de Regras

O método de dedução SE-ENTÃO baseia-se na própria linguagem de comunicação dos seres humanos, permitindo a expressão de conhecimento empírico e heurístico e gerando uma conclusão a partir do conhecimento de um fato (ROSS, 2009).

Como exposto por Cieslak (2015), considerando  $x$  e  $y$  elementos de conjuntos *fuzzy*  $A$  e  $B$  ( $x \in A$  e  $y \in B$ ), onde  $A$  contém informações de entrada e  $B$  de saída, é possível definir a expressão a seguir como uma expressão linguística de **Operação Conjuntiva de Múltiplos Antecedentes**:

$$\text{Se } x \text{ é } A^1 \text{ E } A^2 \text{ E } \dots \text{ E } A^n \text{ ENTÃO } y \text{ é } B^s \quad (8)$$

Baseando-se na definição da operação de interseção entre conjuntos *fuzzy* e assumindo que  $A^s = A^1 \cap A^2 \cap \dots \cap A^n$ , tem-se:

$$\text{Se } x \text{ é } A^s \text{ ENTÃO } y \text{ é } B^s \quad (9)$$

Já a Operação Disjuntiva de Múltiplos Antecedentes é construída de forma análoga à primeira, com a seguinte expressão linguística:

$$\text{Se } x \text{ é } A^1 \text{ OU } A^2 \text{ OU } \dots \text{ OU } A^n \text{ ENTÃO } y \text{ é } B^s \quad (10)$$

Baseando-se na definição da operação de união entre conjuntos *fuzzy* e assumindo que  $A^s = A^1 \cup A^2 \cup \dots \cup A^n$ , tem-se:

$$\text{Se } x \text{ é } A^s \text{ ENTÃO } y \text{ é } B^s \quad (11)$$

Segundo Ross (2009), a resolução global do sistema *fuzzy* é baseado em agregações individuais dos valores, considerando que a maior parte dos sistemas é baseado em regras que envolvem mais de uma regra.

### 3.5.2 Matriz de Correlação

Um método alternativo para as operações de inferência e agrupamentos de conjuntos *fuzzy* é baseado na construção de matrizes de correlação.

Como pode ser observado na Figura 6,  $\mu_{ij}$  representa as entradas em cada elemento da matriz. Estes elementos correlacionam os conjuntos  $A$  e  $B$ , ou seja, ligam os elementos de entrada aos de saída.

Figura 6 - Matriz Relacional

	$\underline{B}_1$	$\underline{B}_2$
$\underline{A}_1$	$\mu_{11}$	$\mu_{12}$
$\underline{A}_2$	$\mu_{21}$	$\mu_{22}$
$\underline{A}_3$	$\mu_{31}$	$\mu_{32}$

Fonte: CIESLAK (2015).

### 3.6 DEFUZZIFICAÇÃO

Ao contrário do processo de fuzzificação, a defuzzificação busca traduzir o valor das variáveis linguísticas de volta em valores analíticos.

Sendo assim, a defuzzificação busca chegar a um valor único discreto a partir de uma saída do domínio *fuzzy* (SIMÕES; SHAW, 2007).

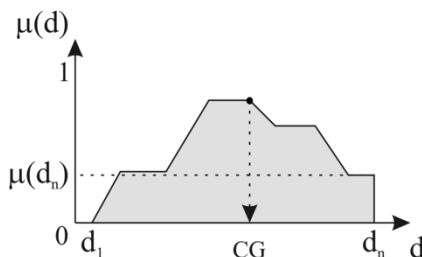
Existem diferentes métodos de fazer o processo de defuzzificação de uma certa saída. Os dois que mais se destacam são o Método do Centro de Gravidade e o Método do Máximo Valor. Vale destacar que a escolha pela técnica está diretamente ligada à técnica de como as informações foram modeladas anteriormente na fuzzificação.

### 3.6.1 Método do Centro de Gravidade

Este método utiliza o cálculo da média ponderada da região *fuzzy* a ser analisada para determinar o ponto de equilíbrio da solução. Matematicamente obtém-se o Centróide através da Equação 12 apresentada a seguir, onde  $A$  é uma determinada região *fuzzy*,  $d$  é o  $i$ -ésimo ponto no domínio,  $\mu_A(d)$  é sua correspondente pertinência e  $\mu^*_A(d)$  é o valor defuzzificado.

$$\mathfrak{R} \leftarrow \mu^*_A(d) = \frac{\sum_{i=0}^n d_i \cdot \mu_A(d_i)}{\sum_{i=0}^n \mu_A(d_i)} \quad (12)$$

Figura 7 - Exemplo do Método do Centro de Gravidade.



Fonte: CIESLAK (2015).

A solução para a Equação 12 é representada na Figura 7 como o valor do Centro de Gravidade (CG) para a figura resultante do processo de inferência.

Ademais, esse método possui algumas propriedades que fazem que ele seja amplamente utilizado nos sistemas *fuzzy* (COX, 1994), as quais se destacam:

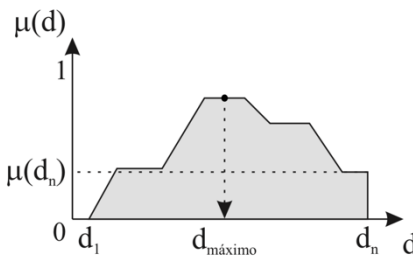
1. Alterações realizadas na topologia dos modelos, ou seja, nas funções de pertinência, resultam em mínimas mudanças no valor resultante devido ao valor defuzzificado tender a se mover levemente para próximo da região de saída *fuzzy*;
2. O cálculo do valor do Centro de Gravidade é simples, principalmente quando se leva em consideração funções de pertinência como as triangulares ou trapezoidais, ou seja, mais elementares;
3. Além de poder ser aplicado aos conjuntos *fuzzy* ele também pode ser utilizado para conjuntos do tipo *singleton*, que podem representar uma unidade discreta por meio de pulsos isolados nas funções de pertinência.

### 3.6.2 Método do Valor Máximo

Segundo Cieslak (2015), outro método utilizado para a realização da defuzzificação é o Método do Valor Máximo que utiliza a determinação de um elemento  $d$  cuja pertinência  $\mu_A(d)$  seja a máxima dentre todos os elementos do conjunto  $A$ . Ele é representado graficamente através da Figura 8 e da seguinte expressão:

$$\mu_A^*(d) \rightarrow \mu_A(d_{max}) \geq \mu_A(d_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Figura 8 - Exemplo do Método do Máximo Valor.



Fonte: CIESLAK (2015).

Existem algumas técnicas que derivam do Método do Valor Máximo visando solucionar a questão de situações onde o valor máximo se situe em regiões planas, como pode ser conferido na Figura 8. Entre as técnicas se destacam:

1. Método da Média dos Máximos Valores;
2. Método do Centro dos Máximos Valores.

O primeiro busca diminuir a ambiguidade obtendo um valor médio entre todos os valores máximos encontrados da função de pertinência resultante e pode ser obtido através da Equação 14 a seguir, onde  $D$  é a quantidade total de elementos  $d$  que são máximos:

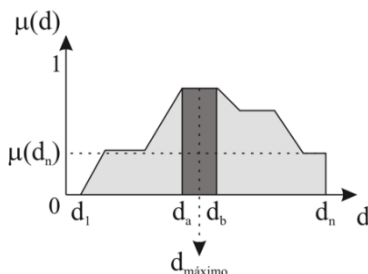
$$\mu_A^*(d) = \sum_{i=0}^n \frac{\mu_A(d_i)}{D} \quad (14)$$

Segundo Ross (2009), é possível considerar a existência de apenas dois valores máximos quaisquer em uma região de plano máximo, utilizando, portanto, a Equação 15 modificada:

$$\mu_A^*(d) = \frac{d_a + d_b}{2} \quad (15)$$

O método é representado pela Figura 9 a seguir:

Figura 9 - Exemplo do Método da Média dos Máximos Valores.



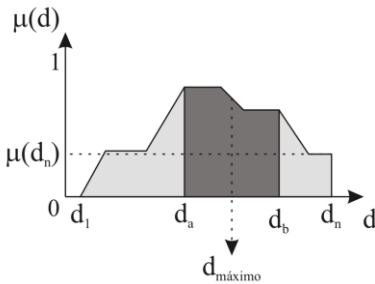
Fonte: CIESLAK (2015).

Diferentemente do primeiro, o Método do Centro dos Máximos Valores é definido determinando o centro geométrico da região que delimita os valores máximos de um certo conjunto, representado pela equação a seguir, onde  $d_{max_i}$  é o  $i$ -ésimo ponto máximo da função de pertinência:

$$\mu_A^*(d) = \frac{\sum_{i=0}^n d_{max_i} \cdot \mu_A(d_{max_i})}{\sum_{i=0}^n \mu_A(d_{max_i})} \quad (16)$$

O método é exemplificado pela Figura 10 a seguir:

Figura 10 - Exemplo do Método do Centro dos Máximos Valores.



Fonte: CIESLAK (2015).

## 4 METODOLOGIA DE VVC

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta por De Mello (2018), em sua tese de doutorado, visando a solução do problema de controle de tensão e potência reativa (VVC) em redes de distribuição.

Este trabalho baseia-se na implementação desta proposta considerando-se algumas alterações e simplificações, como a não consideração de unidades de geração distribuída. Outras serão destacadas ao longo do texto.

Para a implementação da proposta e análise dos resultados, será utilizada a ferramenta para simulação e cálculo de fluxo de potência em linhas de distribuição, OpenDSS<sup>®</sup>, em conjunto com a linguagem de programação, Python<sup>™</sup>, diferentemente da utilização do MATLAB<sup>®</sup> por De Mello (2018). Neste ambiente, serão configuradas as funções de pertinência e cálculos da lógica *fuzzy* além de ações de controle, que serão repassadas ao primeiro por meio de *Component Object Model (COM) interface*. A decisão da utilização de Python<sup>™</sup> é motivada por ser uma linguagem aberta, de livre uso e de desenvolvimento comunitário.

Vários são os aspectos que podem gerar uma perturbação nos níveis de tensão do sistema elétrico de distribuição. Em vez de ações pontuais e individuais devido a grande quantidade de equipamentos disponíveis, suas situações atuais, característica e capacidade de atuação distintas, a solução exposta a seguir segue o caminho de uma estratégia de operação coordenada, com o objetivo de otimizar o sistema de redes de distribuição via um controle centralizado, localizado em somente um ponto, que possa compreender a situação de todo o sistema ao mesmo tempo (BERGER; KRZYSZTOF, 2015; BORLASE, 2013).

### 4.1 CONSIDERAÇÕES

Buscando solucionar a problemática exposta e encontrar resultados adequados, algumas considerações devem ser feitas, principalmente no que tange à questão de restrições do sistema e a forma como ele deve funcionar. Entre as principais restrições, buscando a otimização do sistema, encontram-se os limites de tensões nas barras e a minimização do chaveamento/comutação nos equipamentos.

- Módulo de tensão nas barras

É necessário que as tensões nas redes de distribuição estejam dentro dos limites estabelecidos, garantindo assim, que a tensão entregue aos

consumidores finais esteja dentro do limite garantindo segurança, qualidade e não acarretando nenhum problema para os mesmos. Essa restrição é apresentada na Equação 17.

$$V_{min} \leq V_{i,\phi} \leq V_{max} \quad (17)$$

Onde  $V_{i,\phi}$  é a tensão em cada fase de cada barra da rede e ela deve se encontrar entre os limites de  $V_{min}$  e  $V_{max}$  que, segundo a ANEEL (2018), são 0,93 p.u e 1,05 p.u, respectivamente. Porém, para este trabalho será considerado um limite inferior de 0,94 p.u.

- Comutação nos TAPs dos transformadores

De acordo com Liang e Wang (2003) o número máximo de comutações diárias em um transformador deve ser de 30, devendo sempre ser o menor possível para evitar desgaste e custo com manutenções e possíveis substituições. Porém, para fins deste trabalho, buscou-se manter o número o menor e mais distribuído possível entre os equipamentos. A Equação 18 representa a restrição dos TAPs disponíveis.

$$a_{min} \leq a \leq a_{max} \quad (18)$$

Onde  $a_{min}$  e  $a_{max}$  são o menor e o maior TAP disponível, respectivamente, nos transformadores e reguladores de tensão.

- Potência reativa de banco de capacitores

O número máximo de chaveamentos diários em bancos de capacitores ligados diretamente aos barramentos deve ser de 6 e de bancos ligados diretamente em alimentadores deve ser de 4 (LIANG; WANG, 2003). A Equação 19 representa a variação de potência reativa que o banco de capacitores pode introduzir da rede, sendo  $Q_{Ci,max}$  a máxima potência reativa fornecida na barra.

$$0 \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,max} \quad (19)$$



Para fins deste trabalho, manteve-se o menor número de comutações possível sem restrição de número máximo de comutações. Além disso os bancos de capacitores foram configurados apenas para estado *on* e *off*, oferecendo, portanto, máxima ou nenhuma potência reativa, respectivamente.

- Minimização no número de comutações

Com o propósito de minimizar o número total de comutações de forma conjunta e coordenada em todos os equipamentos do sistema foram criadas duas funções com objetivo de calcular tais comutações. A primeira, Equação 20, é aplicada de forma a contar a quantidade de chaveamentos/comutações totais diárias realizadas em um equipamento, onde  $N_{cd,k}$  é o número total de comutações diárias no equipamento  $k$ ,  $t$  é o período de tempo e  $N_{C_{j,k}}$  é o número de comutações do equipamento  $k$  no intervalo  $j$ . A variável  $\Delta t$  representa o intervalo em que a solução VVC é aplicada.

$$N_{cd,k} = \sum_{j=0}^t N_{C_{j,k}}, \quad t = 0, \Delta t, \dots, 23h \quad (20)$$

A segunda função é utilizada para fins de simulação, de forma que, durante o cálculo do fluxo de potência, o algoritmo leve em consideração tanto o número de chaveamentos/comutações diárias de outras aplicações (Equação 20), quanto o número que ocorreram durante a aplicação atual, enquanto o algoritmo itera para encontrar a solução apropriada. A função é representada pela Equação 21, onde  $N_{ci,k}$  é o número de comutações internas daquela aplicação específica de VVC no equipamento  $k$ ,  $N_{cd,k}$  é o número total de comutações diárias, representadas pela Equação 20,  $N_{C_{j,k}}$  é o número de comutações do equipamento  $k$  no intervalo  $j$  e  $it$  é o número total de iterações do algoritmo realizado naquela aplicação de VVC.

$$N_{ci,k} = N_{cd,k} + \sum_{j=1}^{it} N_{C_{j,k}} \quad (21)$$

## 4.2 ARQUITETURA E ALGORITMO – DESCRIÇÃO DO VVC

Buscando uma solução para o problema de VVC coordenado, buscou-se a implementação de uma metodologia que utilizasse a lógica *fuzzy* devido à sua capacidade de utilizar raciocínios que envolvem linguagem natural para a tomada de decisões, além da capacidade de lidar com incertezas (ROLIM *et al.*, 2004).

A estratégia desenvolvida parte da premissa de que exista um sistema de controle que possa ser realizado remotamente em cada instrumento de controle do sistema, e por meio de um canal SCADA haveria a troca de informações, em ambos os sentidos, entre o sistema DMS (*Distribution Management System*) e o equipamento. A estratégia VVC desenvolvida, portanto, faz parte do DMS, como mostra a Figura 11 a seguir.

Figura 11 - Exemplo de arquitetura do sistema de distribuição



Fonte: (DE MELLO, 2018).

Como mencionado no início deste capítulo, foram utilizados para o desenvolvimento do VVC coordenado a linguagem de programação Python<sup>TM</sup>, onde foi criado o algoritmo, e o OpenDSS<sup>®</sup>, que faz os cálculos de fluxo de potência. O primeiro recebe todos os dados atuais necessários do sistema simulado no segundo, por meio da interface COM, aplica a metodologia proposta por esse trabalho e retorna os parâmetros de ajustes necessários. Essa integração está ilustrada pela Figura 12.

Figura 12 - Integração entre Python™ e OpenDSS®



- Recebimento dos dados atuais do sistema;
- Execução do algoritmo de VVC;
- Definição e envio dos novos parâmetros de ajuste.
- Cálculo de fluxo de potência trifásico;
- Fornecimento dos parâmetros requisitados pelo controle VVC;
- Recebimento e alteração dos novos ajustes.

Fonte: Adaptado de (DE MELLO, 2018).

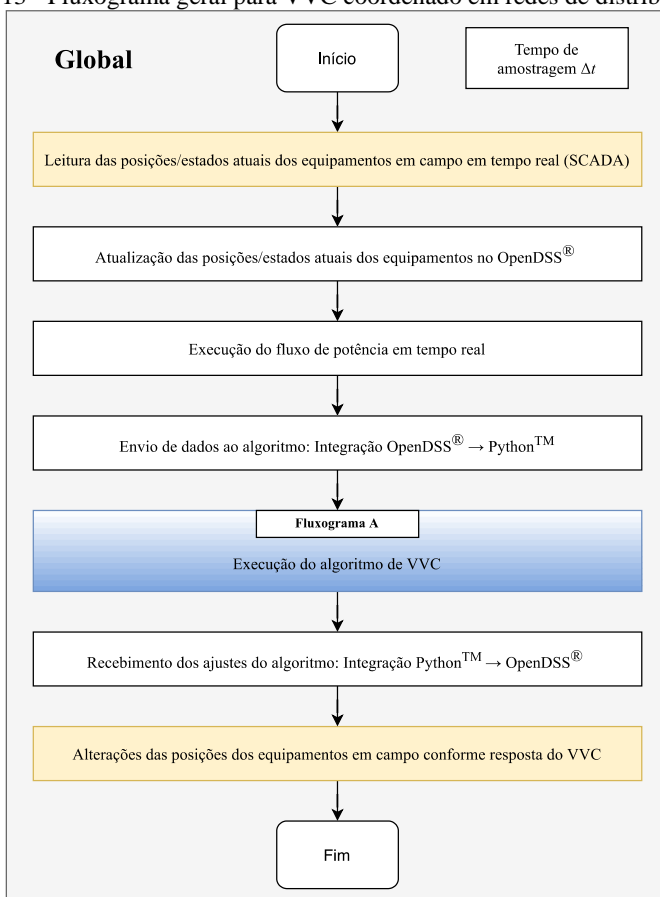
O processo geral de VVC é ilustrado pela Figura 13 a seguir. Ele pode ser configurado para funcionar automaticamente a cada intervalo de tempo  $\Delta t$ , ou pode ser ajustado para funcionar em conformidade com outras características de interesse. É importante ressaltar que o tempo mínimo entre os intervalos de tempo  $\Delta t$  deve ser de pelo menos o tempo que o algoritmo demora para encontrar a solução e efetuar os ajustes necessários.

O primeiro passo deve ser a leitura das características atuais dos equipamentos pelo sistema SCADA e o encaminhamento das mesmas ao OpenDSS®. A seguir é feito o cálculo de fluxo de potência e as informações pertinentes são enviadas para o algoritmo em Python™ para a execução do VVC. Por fim, os ajustes necessários são repassados e realizados remotamente nos equipamentos de campo.

A Figura 14 representa o fluxograma do algoritmo para VVC coordenado. Inicialmente é identificada a barra e a fase com o maior desvio de tensão dos limites estabelecidos de  $V_{min} = 0,94 p.u$  e  $V_{max} = 1,05 p.u$ . Após isto, é identificado se a tensão desta barra está ou não dentro do limite. Caso não esteja violando os limites não é necessária nenhuma alteração no sistema de distribuição. Caso haja no mínimo uma violação de tensão o controlador *fuzzy* é acionado para identificar o equi-

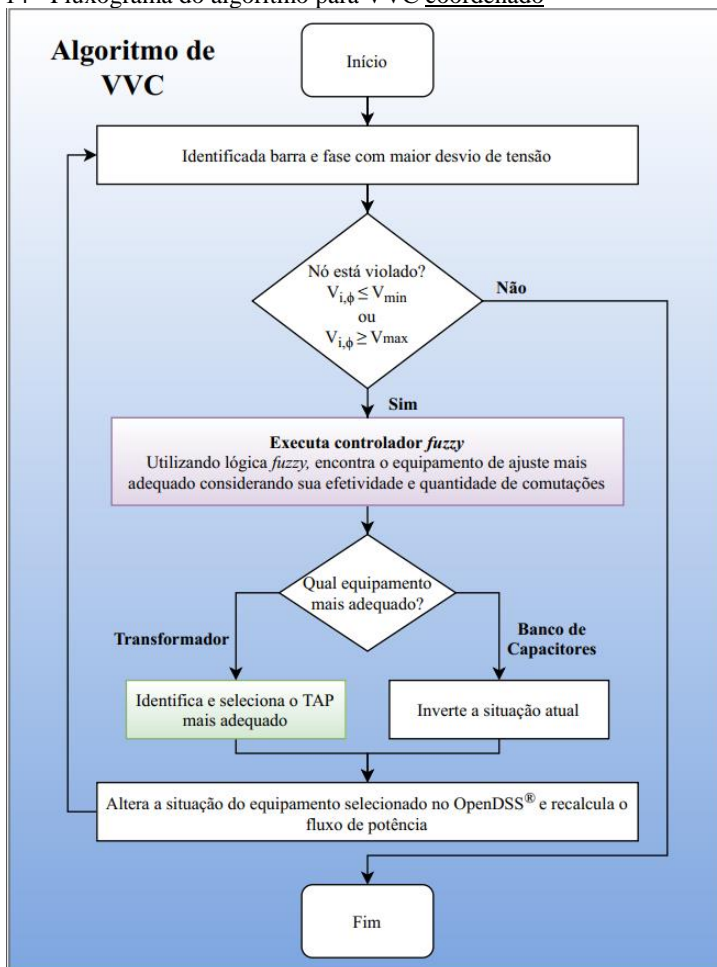
pamento de ajuste mais adequado com base na matriz *Capacidade de Atuação*, levando em conta sua efetividade e quantidade de comutações. No caso de o equipamento selecionado ser um banco de capacitores, seu estado é invertido. Caso contrário, o TAP mais adequado é selecionado, em outras palavras, é selecionado o primeiro TAP que deixe a tensão dos nós dentro dos limites, ou o mais próximo deles caso o limite de ajuste de TAP seja alcançado. Por fim o ajuste é feito no OpenDSS® e o fluxo de potência é recalculado até que todos os nós estejam dentro dos limites de tensão estipulados. A seguir cada passo é descrito em mais detalhes.

Figura 13 - Fluxograma geral para VVC coordenado em redes de distribuição



Fonte: Adaptado de (DE MELLO, 2018).

Figura 14 - Fluxograma do algoritmo para VVC coordenado



Fonte: Adaptado de (DE MELLO, 2018).

#### 4.2.1 Identificação da barra e fase com maior desvio de tensão

A primeira parte do algoritmo tem a função de identificar a barra e fase com o maior desvio de tensão em relação aos limites pré-estabelecidos, independente se está fora ou dentro deles. A partir do cálculo de fluxo de potência realizado pelo OpenDSS® os valores de tensão de cada barra e fase do sistema  $V_{i,\phi}$  são armazenados e comparados com os limites, conforme a Equação 22 a seguir:

$$\Delta V_{i,\phi} = \begin{cases} V_{i,\phi} - V_{max}, & V_{i,\phi} \geq 1 p.u \\ V_{min} - V_{i,\phi}, & V_{i,\phi} < 1 p.u \end{cases} \quad (22)$$

A identificação da barra e fase com maior desvio  $\Delta V_{i,\phi}$  é armazenada para utilização na próxima parte do algoritmo.

Como utilizado por Bremermann (2008) e Miranda e Calisto (2002), a correção da violação de tensão é feita sempre em cima do nó com maior desvio, corrigindo assim outros nós com violações menores ao mesmo tempo. Caso a correção anterior acarrete violar um novo nó que antes não estava violado, este será analisado no próximo ciclo, até todos os nós estarem ajustados dentro dos níveis de tensão adequados.

#### 4.2.2 Identificação de violação dos níveis de tensão

Após a identificação da barra e fase com maior desvio de tensão é verificado se a tensão deste nó está dentro ou fora dos limites de tensão estabelecidos. Em decorrência de como o desvio foi calculado anteriormente, basta apenas verificar se o desvio é maior que zero ou não, conforme a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Se } \Delta V_{i,\phi} > 0 & \rightarrow \text{Nó violou tensão} \\ \text{Se } \Delta V_{i,\phi} \leq 0 & \rightarrow \text{Nó não violou tensão} \end{aligned}$$

#### 4.2.3 Controlador *fuzzy*

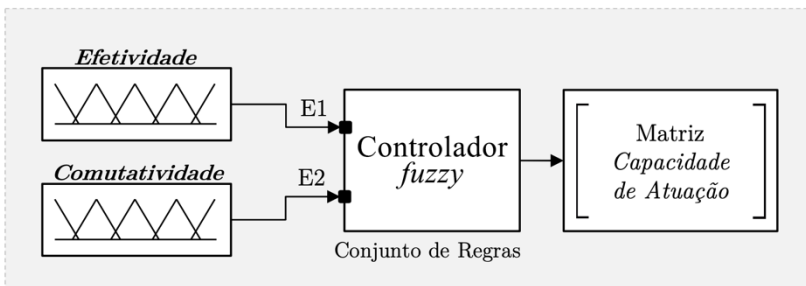
Caso se identifique, pelo procedimento anterior, que há uma violação de tensão, o algoritmo irá utilizar o controlador *fuzzy* desenvolvido para encontrar o equipamento mais apropriado para a correção da violação na barra e fase identificadas no primeiro passo.

Para o funcionamento do controlador, duas funções de pertinência foram criadas, a função de pertinência de Efetividade e a de Comutatividade. As variáveis de saída de ambas essas funções de pertinência se tornarão as variáveis de entrada do controlador *fuzzy*, conforme ilustrado na Figura 15.

##### 4.2.3.1 Funções de pertinência de Efetividade

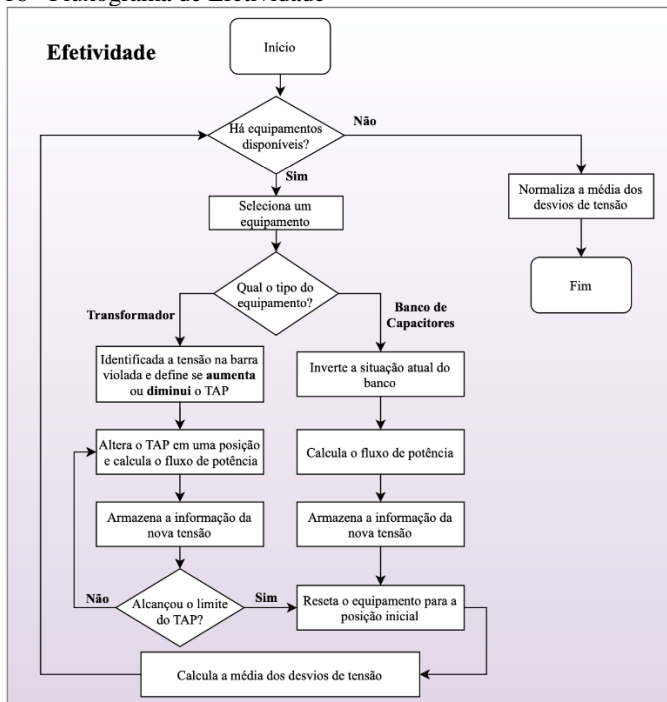
Em cada iteração do algoritmo, para cada barra e fase com maior violação de tensão, é necessário identificar o quão efetivo é cada equipamento de controle para a correção desta violação. Para isso, o algoritmo segue o processo ilustrado na Figura 16.

Figura 15 - Controlador *fuzzy*



Fonte: Adaptado de (DE MELLO, 2018).

Figura 16 - Fluxograma de Efetividade

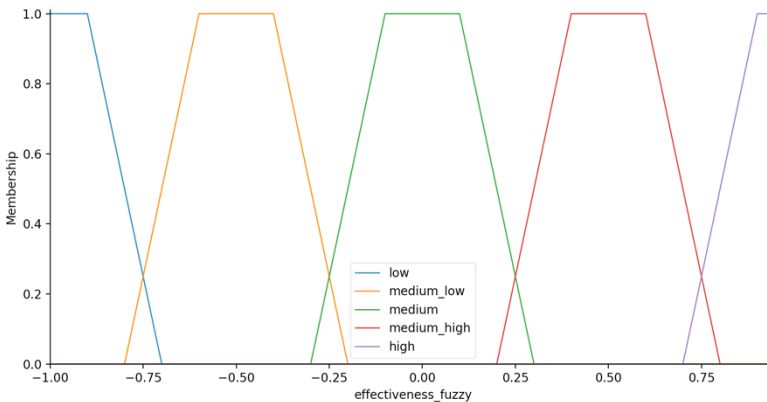


Fonte: Adaptado de (DE MELLO, 2018).

Inicialmente seleciona-se o primeiro equipamento na lista de equipamentos disponíveis. Caso seja um banco de capacitores simplesmente se inverte o estado atual deles, ou seja, se estiverem conectados na rede são, então, desconectados e vice-versa. Então se recalcula o fluxo de potência e se armazena a informação da nova tensão na barra violada. Caso o equipamento selecionado seja um transformador, é identificado se para corrigir a tensão é necessário aumentar ou diminuir o TAP. Posteriormente este é alterado em uma posição, calculado o fluxo de potência, armazenada a nova tensão e repetido o processo até o TAP chegar ao seu limite máximo ou mínimo. Após as alterações em cada equipamento para a definição de sua efetividade ele é resetado para sua posição inicial e a média dos desvios de tensão é calculada para cada um. Por fim, após serem analisados todos os equipamentos individualmente, a média dos desvios de tensão são normalizadas entre os valores  $[-1; 1]$ .

A normalização se faz necessária para enquadrar os equipamentos conforme as funções de pertinência, ilustradas na Figura 17, representadas pelos seguintes conjuntos linguísticos: *Low* (Baixo), *Medium Low* (Médio Baixo), *Medium* (Médio), *Medium High* (Médio Alto) e *High* (Alto).

Figura 17 - Funções de pertinência para Efetividade



Fonte: Próprio autor.

Abaixo está descrita a parametrização das funções de pertinência acima em valores numéricos:

- *Low* (Baixo) –  $[-1; -1; -0,9; -0,7]$ ;
- *Medium Low* (Médio Baixo) –  $[-0,8; -0,6; -0,4; -0,2]$ ;
- *Medium* (Médio) –  $[-0,3; -0,1; 0,1; 0,3]$ ;

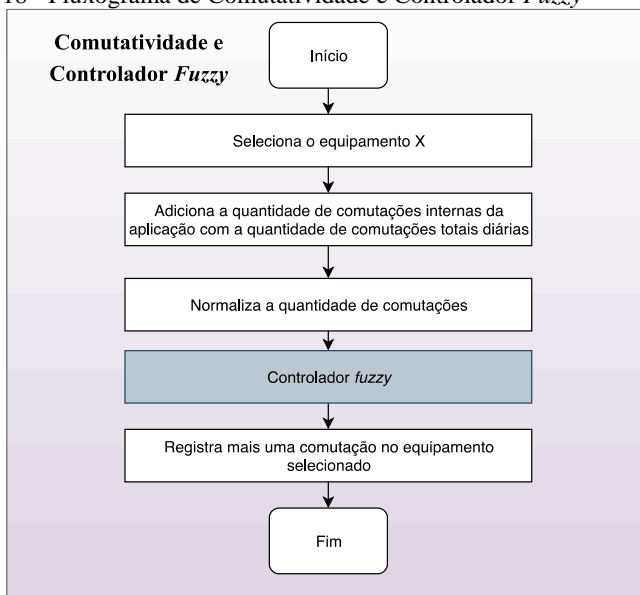


- *Medium High* (Médio Alto) – [0,2; 0,4; 0,6; 0,8];
- *High* (Alto) – [0,7; 0,9; 1; 1].

#### 4.2.3.2 Funções de pertinência de Comutatividade

Assim como para a Efetividade, é necessário definir as funções de pertinência para a Comutatividade, de forma que se possa minimizar o número total de comutações nos equipamentos da rede e evitar o desgaste deles. O processo é ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Fluxograma de Comutatividade e Controlador *Fuzzy*

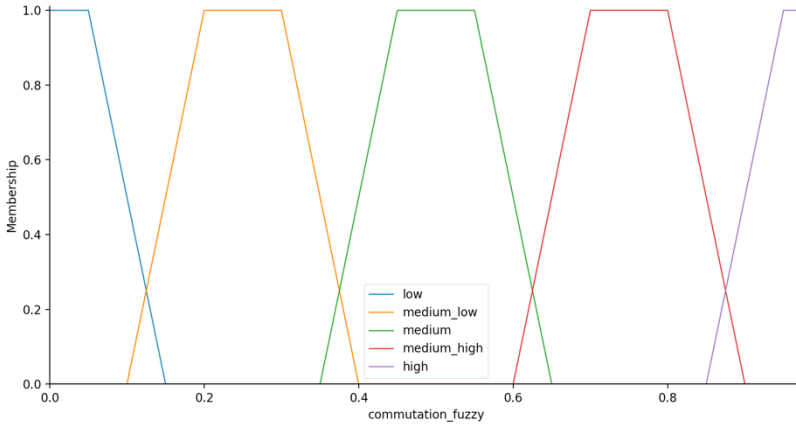


Fonte: Adaptado de (DE MELLO, 2018).

Inicialmente, seleciona-se o equipamento e então as comutações internas daquela aplicação do algoritmo são adicionadas às comutações diárias que o equipamento já possui, utilizando as Equações 15 e 16. A quantidade de comutações é então normalizada entre [0; 1]. O controlador *fuzzy* utiliza essas informações, em conjunto com a efetividade, para selecionar o equipamento mais eficaz e, por fim, é registrada mais uma comutação.

Diferentemente da Efetividade, a normalização da Comutatividade fez-se somente entre [0; 1] por razão de simplificação de algoritmo, porém se manteve os cinco conjuntos linguísticos como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Funções de pertinência para Comutatividade



Fonte: Próprio autor.

Abaixo está descrita a parametrização das funções de pertinência acima em valores numéricos:

- *Low* (Baixo) – [0; 0; 0,05; 0,15];
- *Medium Low* (Médio Baixo) – [0,1; 0,2; 0,3; 0,4];
- *Medium* (Médio) – [0,35; 0,45; 0,55; 0,65];
- *Medium High* (Médio Alto) – [0,6; 0,7; 0,8; 0,9];
- *High* (Alto) – [0,85; 0,95; 1; 1].

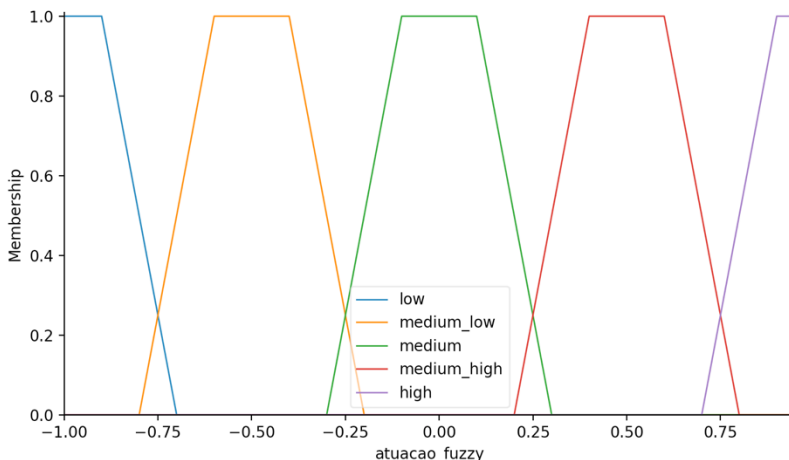
#### 4.2.3.3 Funções de pertinência da saída do Controlador *fuzzy*

Por fim é possível adquirir as funções de pertinência da saída do Controlador *fuzzy*, ou seja, as funções de pertinência de atuação. Ela pode ser conferida na Figura 20 e possui a mesma parametrização das funções de pertinência da Efetividade.

- *Low* (Baixo) – [-1; -1; -0,9; -0,7];
- *Medium Low* (Médio Baixo) – [-0,8; -0,6; -0,4; -0,2];
- *Medium* (Médio) – [-0,3; -0,1; 0,1; 0,3];

- *Medium High* (Médio Alto) – [0,2; 0,4; 0,6; 0,8];
- *High* (Alto) – [0,7; 0,9; 1; 1].

Figura 20 - Funções de pertinência de atuação



Fonte: Próprio autor.

É necessário, também, a definição do conjunto de regras do controlador. O conjunto é formado por várias proposições que relacionam as pertinências entre as variáveis, do tipo “Se (ação) Então (consequência)” e pode ser visto no Quadro 1 abaixo, seguindo as seguintes abreviações:

- *Low* (Baixo) – L;
- *Medium Low* (Médio Baixo) – ML;
- *Medium* (Médio) – M;
- *Medium High* (Médio Alto) – MH;
- *High* (Alto) – H.

As regras foram definidas de forma que quanto mais alta seja a comutatividade ou mais baixa seja a efetividade do equipamento menor será a Capacidade de Atuação do mesmo, e vice-versa. A partir da saída do controlador é definido o equipamento a ser utilizado. Dois exemplos são ilustrados a seguir:

- 1) Se equipamento selecionado possui Efetividade *Low* e Comutatividade *Medium*, com valores de -0,9 e 0,41, res-

pectivamente. **Então**, o equipamento possui uma capacidade de atuação *Low*, com um valor defuzzificado de -0,8775, como pode ser conferido na Figura 21.

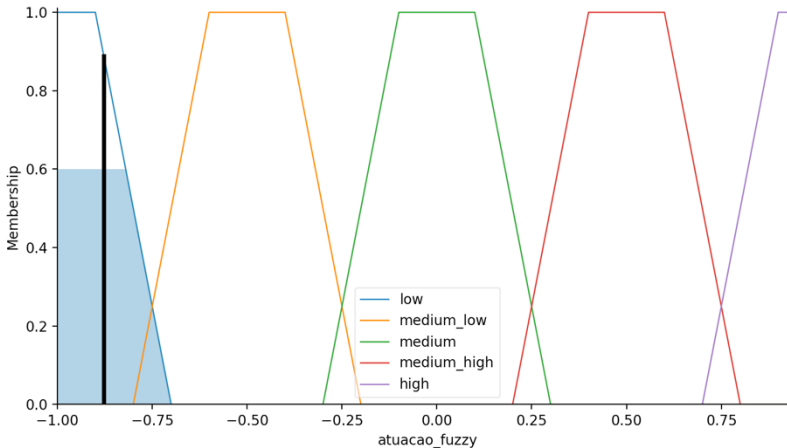
- 2) Se equipamento selecionado possui Efetividade tanto *Medium High* e *High*, porém com maior grau de pertinência para *Medium High* e Comutatividade *Medium Low*, com valores de 0,72 e 0,33, respectivamente. **Então**, o equipamento possui uma capacidade de atuação *Medium High*, com um valor defuzzificado de 0,528, como pode ser conferido na Figura 22.

Quadro 1 - Regras para análise do controlador *fuzzy*

		E2		Efetividade				
		E1		L	ML	M	MH	H
Comutatividade	L	M	M	MH	H	H		
	ML	L	ML	M	MH	H		
	M	L	ML	ML	M	H		
	MH	L	L	ML	ML	M		
	H	L	L	L	L	ML		

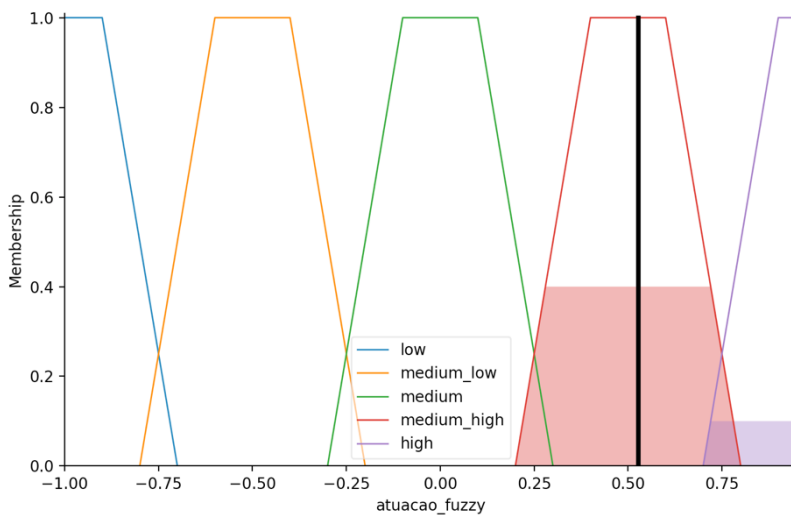
Fonte: Próprio autor.

Figura 21 - Exemplo 1 da saída do controlador *fuzzy*



Fonte: Próprio autor.

Figura 22 - Exemplo 2 da saída do controlador *fuzzy*



Fonte: Próprio autor.

A partir dos valores defuzzificados de todos os equipamentos de controles disponíveis para serem utilizados no sistema de distribuição é escolhido o instrumento mais eficaz para corrigir a tensão no nó violado. A partir do momento em que não há mais violações de tensão, as informações de ajustes são então enviadas para os equipamentos em campo através do sistema SCADA.



## 5 RESULTADOS DA APLICAÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados da implementação da solução de controle de tensão e potência reativa (VVC) utilizando lógica *fuzzy* por meio de simulações empregando o algoritmo desenvolvido em Python™ em conjunto com a ferramenta para simulação OpenDSS®.

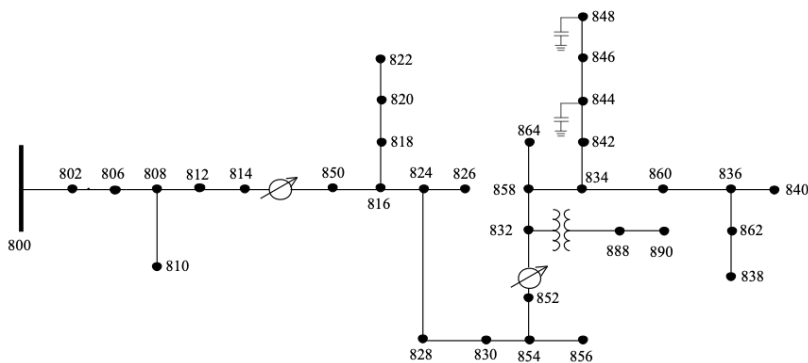
Serão utilizados alguns sistemas de testes disponibilizados pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), como o IEEE 34 barras e IEEE 123 barras.

É importante frisar que o controle automático dos equipamentos foi desativado nos sistemas de teste mencionados acima, durante as simulações, com intuito de analisar o funcionamento puro do sistema de controle desenvolvido.

### 5.1 IEEE 34 BARRAS

Este sistema é constituído de 34 barras e apresenta uma complexidade considerada média em relação a outros disponibilizados também pela IEEE. Ele possui linhas bifásicas e trifásicas, cargas concentradas e distribuídas, dois bancos de capacitores, dois reguladores de tensão, além de dois transformadores. O diagrama unifilar do sistema pode ser conferido na Figura 23 abaixo.

Figura 23 - Diagrama unifilar do IEEE 34 barras



Fonte: Adaptado do IEEE.

As tensões iniciais do sistema de testes podem ser conferidas na Figura 24 abaixo. É perceptível que os níveis de tensão se encontram

abaixo dos limites estabelecidos antes do ajuste de tensão através do VVC em conjunto com lógica *fuzzy* em mais da metade das barras do sistema.

Ao aplicar o algoritmo com a solução, o programa realiza 279 iterações até encontrar a solução apropriada para manter todo o sistema dentro dos limites impostos. Para isso várias alterações nos equipamentos devem ser realizadas, como pode ser conferido no Quadro 2 a seguir.

No quadro, os transformadores são os subxf e xfm1, sendo o primeiro entre a subestação e o início do sistema, não representado na figura do diagrama unifilar. Já reg1 e reg2 são os reguladores sendo “a”, “b” e “c” as fases às quais eles estão conectados. E por fim c844 e c848 são os bancos de capacitores.

Quadro 2 - Situação dos equipamentos de controle do IEEE 34 barras

		Situação			
		TAP Inicial	TAP Final	Banco Inicial	Banco Final
Equipamento	subxf	1	1	-	-
	xfm1	1	1.1	-	-
	reg1a	1	1.1	-	-
	reg1b	1	1.05	-	-
	reg1c	1	1.0125	-	-
	reg2a	1	1.00625	-	-
	reg2b	1	0.99375	-	-
	reg2c	1	1.05	-	-
	c844	-	-	Conectado	Conectado
	c848	-	-	Conectado	Conectado

Fonte: Próprio autor.

As possibilidades de comutação entre os equipamentos são:

- **Transformadores e reguladores:** passos de 0,0625 em  $\pm 16$  posições de ajustes;
- **Banco de capacitores:** totalmente conectados ou não no sistema.



Figura 24 - Perfil de tensão nas barras do IEEE 34 antes e após a aplicação do VVC



Fonte: Próprio autor.

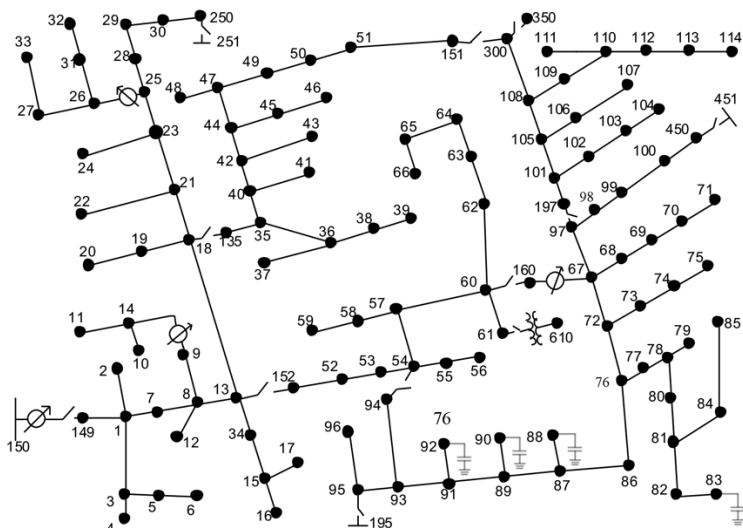
É importante notar que por esta ser a primeira correção de tensões houve um grande número de iterações do algoritmo para deixar as tensões nas barras dentro dos limites. No caso de correções subsequentes, com intervalo máximo sugerido de uma hora, a quantidade de iterações para

corrigir o sistema será substancialmente menor levando em consideração que a variação de tensão nas barras será gradual e poucas violarão os limites por análise.

## 5.2 IEEE 123 BARRAS

Este sistema de teste da IEEE é maior e mais complexo que o anterior, apresentando 123 barras. Além disso possui linhas monofásicas, bifásicas e trifásicas, quatro banco de capacitores, quatro reguladores de tensão e um transformador. Na Figura 25 é possível verificar o diagrama unifilar do sistema.

Figura 25 - Diagrama unifilar do IEEE 123 barras



Fonte: Adaptado do IEEE.

Na Figura 26 e na Figura 27 é possível visualizar as barras que se encontram dentro ou fora dos limites de tensão, um total de 45 barras. Ao realizar a correção e ajustes dos equipamentos por meio do algoritmo são necessárias 61 iterações na correção inicial.

As configurações iniciais e os ajustes realizados nos equipamentos podem ser conferidos no Quadro 3.

As possibilidades de configurações dos equipamentos (reguladores, transformadores e banco de capacitores) são as mesmas do exemplo anterior, IEEE 34 barras.

Quadro 3 - Situação dos equipamentos de controle do IEEE 123 barras

		Situação			
		TAP Inicial	TAP Final	Banco Inicial	Banco Final
Equipamento	reg1a	1	1.04375	-	-
	xfm1	1	0.96875	-	-
	reg2a	1	1.05625	-	-
	reg3a	1.0875	1.0375	-	-
	reg4a	1.1	1.09375	-	-
	reg3c	1.01875	0.975	-	-
	reg4b	1.1	1.075	-	-
	reg4c	1.03125	0.99375	-	-
	c83	-	-	Conectado	Conectado
	c88a	-	-	Conectado	Desconectado
	c90b	-	-	Conectado	Desconectado
	c92c	-	-	Conectado	Desconectado

Fonte: Próprio autor.

Figura 26 - Perfil de tensão nas barras do IEEE 123 antes e após a aplicação do VVC - Parte 1



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 - Perfil de tensão nas barras do IEEE 123 antes e após a aplicação do VVC - Parte 2



Fonte: Próprio autor.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste trabalho de conclusão de curso foi possível realizar estudos referentes ao controle de tensão e potência reativa em redes de distribuição, procurando-se automatizar e aprimorar este processo com o intuito de diminuir o tempo de respostas e otimizar o sistema como um todo. O objetivo é o de aumentar a vida útil dos equipamentos e diminuir o custo de manutenção e substituição dos mesmos, possibilitando uma economia direta para as concessionárias de distribuição e indiretamente para o consumidor final.

Com o objetivo de solucionar essa problemática desenvolveu-se um sistema que poderia ser aplicado *online* em salas de controle, com interface direta ao sistema SCADA, por meio das tecnologias OpenDSS® e Python™. Por meio de testes realizados em sistemas de distribuição elétrica fornecidos pelo IEEE, foi possível verificar a eficiência do sistema, tanto na parte de correção dos níveis de tensão quanto na parte de prolongamento da vida útil dos aparelhos. Para tal, utilizou-se fundamentos da lógica *fuzzy* como forma de verificar tanto a eficiência dos equipamentos como seu histórico de comutatividade na rede.

Levando em conta os resultados apresentados no Capítulo 5 e os estudos feitos previamente em artigos e literaturas para chegar a tais fins considera-se que tanto os objetivos gerais como os objetivos específicos, apresentados na primeira sessão, foram devidamente atingidos. Além disso foram adquiridos novos conhecimentos além dos que foram ensinados durante o curso de graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, como lógica *fuzzy* e a linguagem de programação Python™.

Para trabalhos futuros, buscando o estudo desta temática aqui apresentada, indica-se o aprofundamento em questões mais específicas relacionada a redes de distribuição, como alterações de topologia dos alimentadores e a inserção de geração distribuída, a descoberta da melhor sequência de chaveamentos/comutações a ser aplicada no equipamentos após a sugestão do sistema de controle e o aperfeiçoamento e otimização do algoritmo.





## REFERÊNCIAS

ABDELHAFEZ, Ahmed A. et al. Reactive Power Problem and Solutions: An Overview. **Journal of Power and Energy Engineering**, v. 5, n. 05, p. 40, 2017.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. **PRO-DIST Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica**, v. Revisão 10, 2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tensões Nominais**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/tensoes-nominais>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

BERGER, L. T.; KRZYSZTOF, I. **Redes Elétricas Inteligentes - Aplicações, comunicação e segurança**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BORLASE, S. **Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions**. London: CRC Press, 2013.

BREMERMANN, L. E. Controle fuzzy volt var em sistemas de distribuição. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS, Porto Alegre**, 2008.

CHEN, Guanrong; PHAM, Trung Tat. **Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems**. CRC press, 2000.

CIESLAK, Dionatan Augusto Guimarães. **Diagnóstico Automático de Eventos e Distúrbios em Unidades Geradoras e Usinas Utilizando uma Abordagem Nebulosa**. 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2015.

COX, Earl. **The Fuzzy Systems Handbook**. [S.l.]: Academic Press, Inc., 1994.

DE MELLO, Ana Paula Carboni. **Estratégia de Controle Volt/var Coordenado para Sistemas de Distribuição Inteligentes**. 2018. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação

em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

DE MELLO, Ana Paula Carboni; PFITSCHER, Luciano Lopes; BERNARDON, Daniel Pinheiro. Coordinated Volt/var control for real-time operation of smart distribution grids. **Electric Power Systems Research**, v. 151, p. 233-242, 2017.

DE SOUZA, Benemar Alencar; DE ALMEIDA, Angelo Márcio Formiga. Multiobjective optimization and fuzzy logic applied to planning of the volt/var problem in distributions systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 3, p. 1274-1281, 2010.

DENG, Youman et al. A heuristic and algorithmic combined approach for reactive power optimization with time-varying load demand in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 4, p. 1068-1072, 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Balances 2018**. OECD, 2018.

KLIR, George J.; YUAN, Bo. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic - Theory and Applications**. [S.l.]: Prentice Hall, 1995.

LIANG, Ruey-Hsun; WANG, Yung-Shuen. Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 2, p. 610-618, 2003.

LIU, Yutian; ZHANG, Peng; QIU, Xizhao. Optimal volt/var control in distribution systems. **International journal of electrical power & energy systems**, v. 24, n. 4, p. 271-276, 2002.

MIRANDA, Vladimiro; MOREIRA, André; PEREIRA, Jorge. An improved fuzzy inference system for voltage/VAR control. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 22, n. 4, p. 2013-2020, 2007.

MIRANDA, V.; CALISTO, P. **A fuzzy inference system to voltage/var control in dms - distribution management system**. 14th Power Systems Computation Conference. **Anais...**2002

ROLIM, Jacqueline G.; ZÜR N, Hans Helmut; JR, Ghendy Cardoso. Diagnóstico de faltas em sistemas de potência: Definição do problema e abordagens via inteligência artificial. **Sba: Controle & Automação**, v. 15, n. 2, 2004.

ROSS, T.J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. [S.l.]: Wiley, 2009. ISBN 9780470748510.

SHAHIDEHPOUR, Mohammad; WANG, Yaoyu. **Communication and control in electric power systems: applications of parallel and distributed processing**. John Wiley & Sons, 2004.

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. [S.l.]: Editora Blucher, 2007.

ULINUHA, Agus; MASOUM, Mohammad AS; ISLAM, Syed M. Optimal scheduling of LTC and shunt capacitors in large distorted distribution systems using evolutionary-based algorithms. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 1, p. 434-441, 2007.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338 – 353, 1965. ISSN 0019-9958.

ZADEH, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. **Information Sciences**, v. 8, n. 3, p. 199 – 249, 1975. ISSN 0020-0255.