

**RENATO OLIVEIRA GUIMARÃES**

**AVALIAÇÃO DOS RISCOS DE VIOLAÇÕES DE CONFORMIDADE DE  
TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO, UTILIZANDO MÉTODO  
PROBABILÍSTICO E CONJUNTOS FUZZY.**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do Título  
de Doutor em Engenharia.

São Paulo

2008

**RENATO OLIVEIRA GUIMARÃES**

**AVALIAÇÃO DOS RISCOS DE VIOLAÇÕES DE CONFORMIDADE DE  
TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO, UTILIZANDO MÉTODO  
PROBABILÍSTICO E CONJUNTOS FUZZY.**

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do Título  
de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:

Engenharia Elétrica

Orientador:

Prof. Dr. Carlos César Barioni de  
Oliveira

São Paulo

2008

*À Kelly Cristina,*

*Minha vida, minha alegria, minha  
companheira e amiga de todos os  
dias, pelo amor e incentivo em  
superar os grandes desafios da  
minha vida.*

*À Alberto, Maria José, Rosana e Roberto,*

*Meus queridos pais e irmãos, pelo  
amor e suporte em todos os  
momentos da minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos César Barioni de Oliveira, meu grande mestre, orientador e amigo, pela enorme dedicação e paciência no desenvolvimento desta tese, e pelo exemplo de vida e profissionalismo.

Ao Eng.º Sérgio Carmini Cerchiari, pelo convívio, amizade, incentivo e por ser uma referência na minha carreira profissional.

Aos amigos André Meffe e Alden Uehara Antunes pela ajuda e colaboração na preparação de diversas partes desta tese.

Aos colegas do ENERQ – Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com quem convivi e aprendi, em especial, aos amigos Prof. Dr. Nelson Kagan, Fábio Sismotto, Mauro Machado, Carlos Alexandre Penin e Mário Miguel Filho.

Aos colegas Marco Aurélio Duarte e João Carlos Guaraldo, pelo auxílio na nas implementações computacionais e realização de simulações necessárias ao desenvolvimento desta tese.

À ENERSUL, Empresa Distribuidora de Energia Elétrica do Grupo Energias do Brasil pelo suporte financeiro durante o programa de doutorado.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, as pessoas que me iluminam, protegem e dão um norte a minha vida: minha esposa Kelly Cristina, minha eterna paixão, pelo amor, carinho e pela enorme compreensão do tempo requerido para a conclusão desta tese e meu filho Renato, minha mais nova inspiração de vida e paixão; meus queridos pais, Alberto e Maria José e irmãos Rosana e Roberto, pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

À Deus por tudo, sem exceção.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2. APLICAÇÃO DE CONJUNTOS FUZZY E MÉTODOS PROBABILÍSTICOS EM ANÁLISES DO SEP .....</b>	<b>18</b>
2.1. Visão Geral .....	18
2.2. Aplicações utilizando Teoria de Conjuntos Difusos (Fuzzy) .....	19
2.3. Aplicações utilizando Métodos Probabilísticos .....	21
<b>3. LÓGICA FUZZY .....</b>	<b>24</b>
3.1. Visão Geral .....	24
3.2. Conjunto Fuzzy .....	26
3.3. Operações entre Conjuntos Fuzzy .....	27
3.4. Número Fuzzy .....	29
<b>4. AVALIAÇÃO DE RISCOS DE TRANSGRESSÃO DE VIOLAÇÃO DE TENSÃO .....</b>	<b>32</b>
4.1. Visão Geral .....	32
4.2. Conformidade de tensão: Resolução ANEEL n.º 505 de 26/11/2001 .....	33
4.2.1 Classificação da tensão de atendimento .....	33
4.2.2 Indicadores de Conformidade de tensão .....	37

<b>5. MODELO PROPOSTO PARA AVALIAÇÃO A PRIORI DOS INDICADORES DE CONFORMIDADE DE TENSÃO.....</b>	<b>41</b>
5.1. Avaliação dos Indicadores de Conformidade de Tensão.....	41
5.2. Modelagem e Caracterização da Carga .....	42
5.3. Modelagem dos Componentes da Rede Secundária.....	46
<b>6. FLUXO DE POTÊNCIA E CÁLCULO DOS INDICADORES DRP E DRC EM REDES DE BAIXA TENSÃO .....</b>	<b>49</b>
6.1. Visão Geral .....	49
6.2. Fluxo de Potência Determinístico.....	50
6.3. Fluxo de Potência Probabilístico .....	52
6.3.1 Enfoque Determinístico da Aleatoriedade da Carga.....	53
6.3.2 Modelagem Probabilística .....	57
6.3.3 Cálculo dos Indicadores a partir do Fluxo de Potência Probabilístico .....	66
6.4. Fluxo de Potência Fuzzy.....	70
6.4.1 Modelagem Fuzzy .....	71
6.4.2 Cálculo dos Indicadores a partir do Fluxo de Potência Fuzzy.....	75
6.4.2.1 Comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy.....	77
6.4.2.2 Comparação de áreas entre tensões fuzzy .....	79
6.4.2.3 Indicadores DRP/DRC fuzzy .....	81
<b>7. APLICAÇÃO DOS MODELOS EM CASOS REAIS.....</b>	<b>85</b>
7.1. Visão Geral .....	85
7.2. Resultados alcançados .....	88
7.2.1. Estação Transformadora n. 14791 .....	91
7.2.2. Estação Transformadora n. 28257 .....	95
7.2.3. Estação Transformadora n. 8336 .....	99
7.2.4. Estação Transformadora n. 7122 .....	103

7.2.5. Estação Transformadora n. 17917 .....	107
7.2.6. Estação Transformadora n. 6345 .....	110
7.2.7. Estação Transformadora n. 24702 .....	115
<b>8. CONCLUSÃO .....</b>	<b>119</b>
8.1. Aspectos Gerais e Específicos .....	119
8.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	124
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE A: PARÂMETROS DA REDE - ET 7122.....</b>	<b>I</b>
<b>APÊNDICE B: MODELAGEM FLUXO DE POTÊNCIA FUZZY .....</b>	<b>III</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação gráfica de um número fuzzy triangular .....	31
Figura 5.1. Ilustração de trecho de rede, com as grandeza associadas.....	47
Figura 6.1. Exemplo de cálculo de correntes em um trecho a partir das cargas a jusante. ....	51
Figura 6.2. Curva de Distribuição de Probabilidades Normal. ....	54
Figura 6.3. Exemplo de Resultados de Carregamento. ....	57
Figura 6.4. Curva de Distribuição de Probabilidades Acumulada, para um Consumidor Residencial de Baixa Tensão.....	58
Figura 6.5. Curva de Distribuição de Probabilidade Normal (Gaussiana), Simples e Acumulada, para Consumidores Comerciais e Industriais de Baixa e Média Tensão. ....	62
Figura 6.6. Sorteio de Demanda Segundo Curvas de Distribuição Acumuladas.....	64
Figura 6.7: Procedimento de um Ensaio para uma Rede com Três Consumidores. ..	64
Figura 6.8. Monitoração do Parâmetro Carregamento Total do Circuito (S01). ....	65
Figura 6.9. Diagrama de Blocos do Fluxo de Potência com a Modelagem Probabilística.....	66
Figura 6.10. Rede de distribuição com histograma para cada uma das barras.....	68
Figura 6.11. Histograma com os valores de DRP e DRC probabilísticos.....	68
Figura 6.12. Número fuzzy triangular.....	70
Figura 6.13. Ilustração da tensão a tensão $\tilde{V}_i$ em um determinado nó i .....	71

Figura 6.14. Ilustração da obtenção da corrente fuzzy em um trecho genérico.....	74
Figura 6.15. Ilustração número fuzzy de função trapezoidal. ....	76
Figura 6.16. Ilustração de avaliação a partir da aplicação do operador MAX-MIN..	77
Figura 6.17. Ilustração de avaliação da comparação de áreas entre tensões fuzzy ....	80
Figura 6.18. Número fuzzy triangular.....	80
Figura 6.19. Exemplo de resultado numérico de um valor de DRP fuzzy.....	83
Figura 6.20. Exemplo do processo de composição dos indicadores DRP e DRC fuzzy.....	83
Figura 6.21. Exemplo de defuzzyficação de um indicador de DRP fuzzy genérico..	84
Figura 7.1. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 14791.....	91
Figura 7.2. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 14791. ....	92
Figura 7.3. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 14791.....	92
Figura 7.4. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 14791. ....	94
Figura 7.5. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 28257.....	95
Figura 7.6. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 28257. ....	96
Figura 7.7. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 28257.....	97

Figura 7.8. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 28257. ....	98
Figura 7.9. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 8336. ....	99
Figura 7.10. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 8336. ....	100
Figura 7.11. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 8336. ....	101
Figura 7.12. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 8336. ....	102
Figura 7.13. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 7122. ....	103
Figura 7.14. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 7122. ....	104
Figura 7.15. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 7122. ....	105
Figura 7.16. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 7122. ....	106
Figura 7.17 Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 17917. ....	107
Figura 7.18 – Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 17917. ....	108
Figura 7.19. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 17917. ....	108

Figura 7.20. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 17917.....	109
Figura 7.21. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 6345.....	111
Figura 7.22 Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 6345. ....	112
Figura 7.23. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 6345.....	113
Figura 7.23. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 6345.....	114
Figura 7.24. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 24702.....	115
Figura 7.25. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 24702. ....	116
Figura 7.26. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 24702.....	116
Figura 7.27. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 24702.....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela com exemplos das propriedades Fuzzy de união, intersecção e complemento.....	28
Tabela 4.1. Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 kV.....	34
Tabela 4.2. Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV.....	35
Tabela 4.3. Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 1 kV e inferior a 69 kV.....	35
Tabela 4.4. Pontos de entrega em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (Tensões padronizadas).....	36
Tabela 6.1. Ilustração numérica para os números fuzzy que indicam as faixas de classificação prevista na resolução ANEEL n.º 505/2001.....	76
Tabela 7.1. Dados básicos do circuitos de baixa tensão analisados.....	85
Tabela 7.2. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 14791.....	93
Tabela 7.3. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 28257.....	97
Tabela 7.4. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 8336.....	101
Tabela 7.5. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 7122.....	105

Tabela 7.6. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 17917. ....	109
Tabela 7.7. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 6345. ....	113
Tabela 7.8. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 24702. ....	117
Tabela 8.1. Resultados a partir de simulações para estação transformadora n. 7122, comparação método probabilístico e método fuzzy com variação numérica de k entre 0,5 e 2. ....	123

## RESUMO

Nesta tese são apresentadas metodologias alternativas ao enfoque determinístico de avaliação de desempenho elétrico de sistemas de distribuição, especificamente na análise dos riscos de violações de conformidade de tensão em sistemas de distribuição, utilizando para isto, métodos probabilísticos e teoria de conjuntos fuzzy.

A Agência Nacional de Energia Elétrica estabeleceu a resolução nº 505/2001 que especifica indicadores de variação de tensão de longa duração, contendo os indicadores individuais e coletivos a serem mensurados, assim como, as penalidades pelo não cumprimento dos prazos limites estabelecidos para regularização.

A ENERSUL, Empresa Distribuidora do Grupo ENBR – Energias do Brasil e o ENERQ – Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia Elétrica desenvolveram um projeto de P&D para a obtenção de metodologia e software de simulação dos indicadores de variação de tensão de longa duração.

No projeto de P&D foi especificado e desenvolvido um módulo computacional para calcular o fluxo de carga com uma abordagem probabilística, partindo-se das curvas de carga típicas de consumidores, que representam a variação temporal da carga (demanda máxima e desvio padrão), obtendo-se as curvas de distribuição de probabilidades da tensão, que permitiram calcular, para cada ponto da rede, os riscos de transgressão dos indicadores de variação de tensão de longa duração.

Após o projeto de P&D, uma nova abordagem que utiliza a teoria de conjuntos difusos (fuzzy) foi desenvolvida e foi possível a comparação com o método probabilístico. Baseado em números fuzzy que representam a estimativa de níveis tensão para cada ponto na rede, e com métodos específicos de classificação fuzzy, calculam-se os indicadores de DRP e DRC.

## **ABSTRACT**

In this thesis are presented alternatives methodologies for deterministic approach for evaluation of performance of electrical distribution systems, specifically in the risk assessment of voltage levels violations in distribution systems, using for this, probabilistic methods and theory of fuzzy sets.

ANEEL's Resolution 505/2001 specifies long-term voltage variation indicators, with the following items to be measured: individual and collective indicators, and the penalties for not complying with the established limits.

ENERSUL, the distribution company of the ENBR Group – Energias do Brasil and ENERQ – Center for Regulation and Power Quality Studies – carried out an R&D project for the development of a methodology and simulation software that will enable the company to evaluate long-term voltage variation indicators.

A computational module was specified and developed to calculate the load flow with a probabilistic approach. Based on typical daily load curves, representing the time variation of the load (average and standard deviation curves), distribution curves are obtained for voltage probability, so that the risk of violating indicators can be calculated, for each point in the network.

After the R&D project, a new approach based on fuzzy sets theory was developed and make possible the comparison with the probabilistic approach. Based on fuzzy numbers that represents an estimative for voltage levels for each point in the network, and with specific fuzzy classification methods, the RDI and RDC indicators can be calculated.

## 1. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de energia elétrica no Brasil possuem algumas características que devem ser mencionadas a fim de facilitar a compreensão do leitor quanto ao presente trabalho.

As redes de distribuição de média tensão apresentam, em sua grande maioria, tensões nominais entre 13,8 kV e 34,5 kV e são radiais. São redes trifásicas no tronco, podendo apresentar ramais bifásicos e monofásicos (este último comumente utilizado em áreas rurais). O comprimento delas varia desde algumas dezenas de quilômetros até algumas centenas de quilômetros.

Tais redes alimentam transformadores de distribuição, cujo objetivo é abaixar a tensão para níveis, que na grande maioria, são de 220 V entre fases e 127 V entre fase e neutro. Cada transformador de distribuição alimenta uma rede de baixa tensão, composta por um cabo neutro e um ou mais cabos fase (até 3 fases) e cujo comprimento varia desde algumas dezenas de metros até algumas centenas de metros. A ENERSUL, Empresa Distribuidora do Grupo Energias do Brasil, que atua no Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil, conta com mais de 750.000 consumidores, na grande maioria consumidores residenciais.

Das redes de baixa tensão, partem ramais de serviço até o ponto de entrega dos consumidores de baixa tensão. Este ponto de entrega em cada consumidor é o ponto que deve ser medido, em caso de reclamação por parte do cliente das condições de fornecimento ou programa periódico de medições feito pela concessionária de distribuição de energia elétrica, de acordo com as diretivas dadas pelo órgão regulador para determinar os limites de tensão exigidos para garantir a qualidade do fornecimento quanto a conformidade de tensão.

De acordo com a Resolução 505/2001 [19] da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, é um direito do consumidor solicitar à concessionária a medição do nível da tensão de atendimento sempre que acreditar que este não está dentro dos limites legalmente estabelecidos, devendo esta lhe informar, no prazo de até 48

horas, o valor que será cobrado pelo serviço, na hipótese da constatação da improcedência da reclamação, bem como a data e hora em que será instalado o equipamento de medição para o acompanhamento da medição pelo solicitante.

O relatório conclusivo da medição deve ser apresentado, por escrito ao consumidor solicitante em até 30 dias a partir da formalização de sua reclamação. A ANEEL também estabelece um programa periódico de medições, na qual é estabelecida uma amostra para apuração dos indicadores de conformidade de tensão.

As medições devem ter duração de 168 horas, com intervalos de integração de 10 minutos, a partir de leituras com janelas fixas e consecutivas de 12 a 15 ciclos, totalizando 1008 registros. As medições devem ser feitas entre fases e entre fases e o neutro. Os indicadores que são apurados são o DRP - Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária e DRC - Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica.

O DRP expressa o número de leituras realizadas nas faixas precárias de tensão, valores estabelecidos na Resolução 505/2001 [19], como um percentual do total de leituras válidas realizadas no período de medição (1008 leituras).

De forma análoga, o DRC expressa o número de leituras realizadas nas faixas críticas de tensão, valores estabelecidos na Resolução 505/2001 [19], como um percentual do total de leituras válidas realizadas no período de medição (1008 leituras).

A doutrina da ANEEL estabelecida na Resolução 505/2001 sobre a conformidade de tensão baseia-se na comparação entre o prejuízo experimentado pelo cliente, devido a níveis incorretos e o custo que pesa sobre o fornecedor para reverter esses níveis com obras de melhoria. A meta da ANEEL não é conseguir a tensão ideal, mas manter o afastamento de tensão em um valor que mantenha o sistema físico em condições de adaptação do mercado. O principal desafio para implementar uma estratégia reguladora sobre conformidade de tensão é o fato de que o prejuízo do afastamento recai no cliente e, por consequência, não há estímulo para que a empresa invista na redução deste prejuízo [9].

A ANEEL tem resolvido o impasse através de valores indenizatórios na forma de ressarcimento nas faturas dos clientes, no caso de descumprimento por parte das concessionárias dos prazos limites estabelecidos na resolução nº 505/2001 da ANEEL para regularização do fornecimento quando da não-conformidade.

Existem na literatura poucos artigos que tratam de estudos envolvendo problemas em redes secundárias de distribuição por meio de programação matemática, em contraposição à grande quantidade de artigos que tratam do planejamento de redes primárias. Embora os sistemas sejam similares, existem características pertinentes à rede secundária que exigem uma modelagem de impedâncias e de demandas diferente da rede primária.

A ENERSUL e o ENERQ – Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia Elétrica desenvolveram um projeto de P&D para a obtenção de metodologia e software de simulação que permita a avaliação, pela empresa, de circuitos de distribuição ou em áreas do sistema de distribuição quanto aos indicadores de qualidade. Este projeto denominado “Desenvolvimento de modelos e ferramenta computacional para avaliação dos riscos e minimização das violações de conformidade de tensão em sistemas de distribuição” teve duração de 24 meses e integrou o ciclo 2003/2004 de Pesquisa e Desenvolvimento da ENERSUL.

Neste trabalho de pesquisa foi utilizada uma abordagem probabilística, partindo-se das curvas de carga típicas dos clientes discretizadas em 144 pontos a cada 24 horas, representando a variação temporal (ao longo do dia) da carga (demanda máxima e desvio padrão) e da modelagem da rede elétrica, obtendo as curvas de distribuição de probabilidades da tensão, que permitem calcular, para cada ponto da rede, os riscos de transgressão dos indicadores DRP e DRC. Utilizando o método de Monte Carlo [7; 8], procede-se um número determinado de simulações, com o processamento de fluxo de potência para cada um dos pontos que fazem parte da curva de carga típica do dia, para cada barra do sistema. As tensões obtidas em cada fluxo de potência deste processo são classificadas segundo as faixas de tensão estabelecidas na Resolução ANEEL nº 505/2001, com isto, obtém-se um histograma de distribuição

de frequências das tensões das barras para cada poste, resumizando os resultados das tensões.

Com o total de pontos dentro de cada faixa do histograma e o total de pontos simulados para cada barra, calculam-se o DRP e o DRC probabilísticos. Tendo em vista que as simulações de fluxo de potência foram realizadas em intervalos de 10 minutos, conforme estabelecido na Resolução nº 505, e que o histograma apresenta exatamente o número de pontos dentro de cada faixa, os próprios percentuais dados pelo histograma para as tensões precárias e críticas são, respectivamente, o DRP e o DRC probabilísticos da barra. A maior dificuldade verificada na utilização prática deste método é o tempo de processamento. A análise de centenas de alimentadores primários e milhares de redes secundárias (no caso da Enersul, aproximadamente, 285 alimentadores primários e 58.000 de redes secundárias de baixa tensão) resulta em tempos de processamento muito elevados, mesmo com a grande capacidade de processamento dos microcomputadores atuais.

O desenvolvimento de pesquisas relacionadas à área de inteligência artificial (IA) para investigação de problemas na área de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), motivaram a pesquisa e o desenvolvimento de um método alternativo baseado em conjuntos difusos (fuzzy) para a análise dos riscos de violações de conformidade de tensão em sistemas de distribuição.

Esta nova técnica que utiliza a teoria de conjuntos difusos (fuzzy) desenvolvida tornou possível a comparação com o método probabilístico, e será amplamente discutido e apresentado neste trabalho.

Baseando-se nos resultados obtidos das variáveis dependentes a partir do fluxo de potência fuzzy, com destaque para a tensão em cada nó da rede secundária em baixa tensão, sendo estas representadas por números fuzzy triangulares, que representam a estimativa de níveis de tensão para cada ponto na rede, com métodos específicos de classificação fuzzy, calculam-se os indicadores de DRP e DRC fuzzy.

Será mostrado que esta nova técnica apresenta algumas vantagens em comparação à probabilística, com destaque para significativa redução no tempo de processamento computacional.

## **2. APLICAÇÃO DE CONJUNTOS FUZZY E MÉTODOS PROBABILÍSTICOS EM ANÁLISES DO SEP**

### **2.1. Visão Geral**

Em função do crescente desenvolvimento de pesquisas relacionadas à área de inteligência artificial (IA), bem como a melhoria das técnicas já existentes, muitos dos problemas até então descritos como de grande complexidade, na engenharia elétrica e em especial na área de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), tiveram uma nova alternativa de resolução, muitas vezes mais simples de serem implementadas e mais confiáveis do que métodos convencionais.

A técnica de IA abordada neste capítulo está entre as mais comumente utilizadas na resolução de problemas ligados a Sistemas Elétricos de Potência. A Lógica Fuzzy ou Teoria de Conjuntos Difusos, que foi amplamente utilizada neste trabalho de desenvolvimento do fluxo de potência fuzzy, será amplamente discutido nos próximos capítulos. Outra abordagem a ser destacada e explorada nesta Tese é a utilização de fluxo de potência probabilístico.

Em função da massiva quantidade de variáveis e dados em geral relacionados a problemas de Sistemas Elétricos de Potência, a utilização das técnicas supramencionadas tem ganhado espaço considerável em propostas para a resolução de problemas práticos de otimização.

A inovação está presente neste trabalho com a proposição de metodologias para avaliação do risco de transgressão de violações de conformidade de tensão em sistemas de distribuição a partir de indicadores probabilísticos e fuzzy.

## 2.2. Aplicações utilizando Teoria de Conjuntos Difusos (Fuzzy)

O professor de engenharia elétrica e ciência da computação da Universidade da Califórnia em Berkeley, Lofti A. Zadeh, desenvolveu na década de 60 uma variação da tradicional teoria de conjuntos e lógica booleana, ao apresentar um artigo contendo de forma resumida os conceitos dos conjuntos difusos [1].

Em 1974 o professor Mandani, do Queen Mary College, da Universidade de Londres, implementou um controle de uma máquina a vapor, baseado em lógica fuzzy [31], fato relevante, pois até então, não se tinha conseguido automatizar essas máquinas com outras técnicas de controle, nem mesmo com o tradicional algoritmo Proporcional Integral Diferencial (P.I.D.).

Entre os anos de 1983 e 1986, uma referência para a teoria de conjuntos difusos, quando foi desenvolvido o primeiro chip nebuloso por Watanabe e Togai [32], e quando Seiji Yasunobu e Soji Miyamoto, da Hitachi, apresentaram simulações que demonstraram o sucesso do controle fuzzy para a estrada de ferro de Sendai [33].

Nos anos seguintes eventos marcantes revelaram a consolidação da teoria de conjuntos difusos no meio científico. Em 1987, Takeshi Yamakawa, em Tóquio, demonstrou o uso de Lógica Fuzzy (através de um conjunto de simples chips fuzzy dedicados) em um pêndulo invertido [34], que é um problema clássico de controle, desta forma, sobre o topo do pêndulo, foi colocado um copo contendo água e, até mesmo, um rato vivo e o sistema manteve estabilidade em ambos os casos. E em 1988, com a criação do Laboratório Internacional de Engenharia Fuzzy (LIFE), uma cooperativa que compreendia 48 companhias para pesquisas em sistemas fuzzy.

O auge da teoria se deu em 1990 quando a indústria eletro-eletrônica japonesa lançou o primeiro eletrodoméstico, uma lavadora de roupas, utilizando técnicas de controle nebuloso. Em 1995, foi desenvolvida a máquina "inteligente" de lavar pratos, dotada de um controlador fuzzy e um módulo sensor "one-stop", que combina um termistor (para medida da temperatura), um sensor condutivo (para medir a quantidade de detergente na água), um sensor de turbidez (que mede a sujeira na água de lavagem), e um sensor magnético para ler a taxa de giro do rotor, com isto, o sistema otimiza a

lavagem para qualquer carga, garantindo os melhores resultados gastando o mínimo de energia, detergente, e água.

Em estudos de sistemas de potência, dentre as várias aplicações possíveis de Lógica Fuzzy, a utilização da técnica na análise de fluxo de carga em sistemas elétricos vem se mostrando uma ótima saída para obtenção de cenários mais próximos da realidade. O Fluxo de carga determinístico trabalha com valores pré-determinados, que incluem as mais severas condições de carga. A lógica Fuzzy veio para tratar estas incertezas, que as modelagens determinísticas não tratam, oferecendo uma opção de análises ampliadas das possibilidades de estados da rede elétrica em estudo. Os Fluxos de Carga Fuzzy são geralmente fundamentados em fluxos de cargas clássicos, mas algumas operações matemáticas foram substituídas por operações fuzzy [2, 3].

A crescente automatização dos sistemas de distribuição traz a possibilidade de se alterar mais facilmente a configuração da rede, através de manobras dos dispositivos de seccionamento, viabilizando ações que permitam operar o sistema sempre da maneira mais adequada, com redução nas perdas e melhoria nos níveis de carregamento e de tensão. Por outro lado, as interrupções no fornecimento da energia são inevitáveis, quer seja para a execução de obras de expansão do sistema, para intervenções de manutenção preventiva em componentes da rede ou, então, pela atuação de um dispositivo de proteção em decorrência de um defeito. Em todos estes casos, deve-se dispor de um plano de manobras para a reconfiguração do sistema, de forma a restringir ao mínimo a área a ser desenergizada, buscando-se restabelecer o suprimento de energia para os consumidores localizados à jusante desta área o mais rapidamente possível, através de manobras de dispositivos de seccionamento existentes na rede, mantendo ainda a condição de radialidade do sistema. Na área de Inteligência Artificial (IA), estes problemas podem ser classificados como pertencentes a classe de Problemas de Decisão com Restrições (PDRs), que são problemas de decisão de planejamento que se caracterizam por conter múltiplos objetivos; podem ser decompostos em sub-problemas mais específicos, através de uma estrutura hierárquica, devem atender a uma série de restrições (globais ou específicas), e devem possuir recursos para replanejamento diante de contingências

ou oportunidades. Os PDRs são problemas de natureza combinatória, e muitos problemas desta categoria requerem ainda que sejam contemplados aspectos de incertezas, como imprecisão de dados, análise de cenários e preferências subjetivas do tomador de decisões [4] e [5].

Outra aplicação está associada ao fato de que a operação segura e eficiente de um sistema elétrico de potência depende do emprego de controladores automáticos em diferentes níveis hierárquicos, para garantir estabilidade de operação e a qualidade do produto. A maioria dos sistemas de controle atualmente em uso ainda estão baseados em estruturas lineares com parâmetros fixos, denominados controladores convencionais. A razão para isso talvez ainda resida na maior familiaridade dos engenheiros com as técnicas de projeto e implementação de controladores convencionais. Modelos utilizando teoria de conjuntos de difusos combinada com a teoria de redes neurais já revelara bons resultados no processamento de alarmes e localização de defeitos em sistemas de potência [6].

Além destas aplicações acima citadas, outras têm sido alvos de pesquisas da comunidade científica e demonstrando o grande potencial desta técnica.

### **2.3. Aplicações utilizando Métodos Probabilísticos**

O problema clássico de análise de redes em sistemas de potência é o de encontrar uma solução técnica e economicamente viável para atendimento à carga. À medida que evoluem as questões regulatórias e são exigidos padrões de desempenho mais rigorosos pelo consumidor, os limites para variação de tensão e carregamento, fator de potência e compensação reativa nos pontos de interligação, nível de curto-circuito, limites para a frequência e duração de interrupções, passam a ser amplamente observados.

Com isto, os especialistas que estudam os sistemas de potência, sobretudo em relação às análises de regime permanente, necessitam constantemente comparar o desempenho dos resultados das alternativas avaliadas, e fazem uso da tabulação de

dados, e essa tarefa é, por vezes, inviável pelo tempo de processamento e de análise despendido.

Uma alternativa a esta demanda pode ser obtida através do fluxo de potência probabilístico, uma vez que, a cada estado da rede o mesmo é processado, associando a uma das variáveis de entrada a probabilidade de ocorrência, sendo então possível registrar o valor da grandeza de interesse. Ao final de todas as simulações realizadas, obtêm-se as funções de distribuição de probabilidade acumulada da grandeza desejada, permitindo avaliar se a mesma se encontra dentro dos padrões exigidos e se é ou não necessário definir algum investimento para corrigir possíveis violações.

O Método de Simulação Monte Carlo é definido como um mecanismo que representa a geração dos dados artificiais, a partir de um gerador de números aleatórios e das distribuições de frequências de interesse, as quais caracterizam os processos estocásticos considerados pelo modelo de simulação utilizado.

No começo deste século, o Método de Simulação Monte Carlo foi usado para estudar a equação de Boltzmann. O termo "Monte Carlo" foi introduzido por Neumann e Ulam [7], durante a Segunda Guerra Mundial, como palavra chave para um trabalho secreto em Los Alamos. Foi sugerido pela existência dos cassinos da cidade de Monte Carlo, em Mônaco. O Método de Simulação Monte Carlo foi então aplicado para problemas relacionados com a bomba atômica, o que envolveu a simulação do processo de difusão de nêutrons, em materiais físeis [8].

Uma modelagem de fluxo potência probabilístico foi proposto por RODRÍGUEZ [22], tornando-se uma metodologia alternativa à representação determinística das cargas do sistema de distribuição, e que serviu como referência no desenvolvimento desta Tese. Outras diversas propostas também buscam a aplicação de métodos probabilísticos em problemas de fluxo de potência [14] [15] [16] e [18].

Uma aplicação da abordagem probabilística que vai de encontro com o método proposto nesta Tese, utilizada para a estimação do desempenho elétrico na distribuição de energia elétrica, com implicações nos mais diversos problemas da operação e do planejamento da distribuição, com a avaliação dos parâmetros de

congestionamento de redes, as perdas e o nível de tensão, foi apresentado por KAGAN, GOUVEIA e ARANGO [11] e por VALENTE [12]. Especificamente na simulação de perdas técnicas em sistemas de distribuição de energia elétrica pode-se encontrar trabalhos utilizando abordagem probabilística [13].

Outra possibilidade de abordagem para aplicação de modelagem probabilística está na solução de problemas de planejamento de médio e longo prazos, sendo as variáveis aleatórias tratadas de forma a ter-se um método que utiliza programação linear probabilística com múltiplos objetivos [10] e [17]

A abordagem probabilística vem sendo experimentada na análise de diversos outros problemas envolvendo sistemas elétricos de potência, como estudos de confiabilidade, perdas e manutenção preventiva de redes de elétricas, entre outros.

### 3. LÓGICA FUZZY

#### 3.1. Visão Geral

A teoria sobre conjuntos lançada pelo Prof. Lofti A. Zadeh [35], publicada em 1965, presume que cada elemento de um universo possa possuir pertinência parcial a um determinado conjunto. Essa teoria generaliza os conceitos da Teoria Clássica de Conjuntos. Possui aplicações nas mais variadas áreas, como por exemplo: Avaliações por questionários, Medidas de Incerteza, Inteligência Artificial, Decisão, Processamento de Imagens, Otimização, Análise de Regressão, Reconhecimento de Padrões, etc.

A Lógica Fuzzy pode ser definida como uma lógica que suporta os modos de raciocínio aproximados ao invés de exatos, como as pessoas estão naturalmente acostumadas a trabalhar. Ela está baseada na teoria dos conjuntos nebulosos. O princípio fundamental da Lógica *Fuzzy* é o princípio da dualidade, que estabelece que dois eventos opostos podem coexistir. Isto é, um elemento pode pertencer, em um certo grau, a um conjunto e, em um outro grau, a um outro conjunto. Em Lógica Fuzzy os paradoxos podem ser reduzidos a “*meias verdades*” ou “*meias mentiras*”, como se queira, através de uma lógica multi-valorada. O verdadeiro (1) e o falso (0) são substituídos por *graus de pertinência* que podem assumir qualquer valor entre 0 e 1. O valor 0,5 descreve um paradoxo.

Para que isso seja feito é necessário estabelecer parâmetros de pertinência e não pertinência pelos quais os diferentes graus de verdade podem ser atribuídos. Por exemplo, ao estabelecer o seguinte padrão:

- Um homem que tiver 1,70 metros ou menos, não é considerado alto.
- Um homem que tiver 1,80 metros ou mais é considerado alto.

E, em seguida, foi feita a seguinte pergunta: Fulano é alto?

Se Fulano tiver 1,70 metros ou menos, ele não é alto, já que o valor do grau de pertinência(certeza) da resposta será 0. Mas se Fulano tiver 1,80 ou mais, o mesmo é alto, já que o grau de pertinência será 1. Porém se Fulano tiver uma altura entre 1,71 e 1,79 metros ele não pode ser considerado nem alto nem baixo, no entanto, pode ser estabelecido um grau de pertinência quanto a ser alto. Como os valores 0 e 1 representam as percentagens 0% e 100% é possível estabelecer o grau de pertinência em termos percentuais. Por exemplo: Se Fulano tem 1,75 metros, por uma regra de três simples, pode-se dizer que Fulano é alto com um grau de pertinência de 50% (ou 0,50).

A palavra “fuzzy”, de origem inglesa, significa incerto, impreciso, subjetivo, nebuloso etc. Porém, nenhuma dessas traduções é tão fiel ao sentido amplo dado pela palavra fuzzy em inglês. Além disso, tem-se observado que a maioria dos autores de diversos países têm usado a palavra fuzzy, sem traduzir este termo para sua língua pátria, com exceção da França, que traduziu-a por *nebule*. Essas têm sido as justificativas para não se traduzir esta palavra para o português.

A teoria de conjuntos fuzzy foi introduzida, em 1965, pelo matemático de origem iraniana Lotfi Asker Zadeh, professor da Universidade de Berkley - Estados Unidos, com a principal intenção de dar um tratamento matemático a certos termos lingüísticos subjetivos, como “aproximadamente”, “em torno de”, dentre outros. Esse seria um primeiro passo no sentido de se programar e armazenar conceitos vagos em computadores, tornando possível a produção de cálculos com informações imprecisas ou subjetivas, a exemplo do que faz o ser humano.

Para obter a formalização matemática de um conjunto fuzzy, Zadeh baseou-se no fato de que qualquer conjunto clássico pode ser caracterizado por uma função: sua função característica, cuja definição é dada a seguir.

Seja  $U$  um conjunto e  $A$  um subconjunto de  $U$ . A função característica de  $A$  é dada por:

$$C_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A. \end{cases} \quad (3.1)$$

Desta forma,  $C_A$  é uma função cujo domínio é  $U$  e a imagem está contida no conjunto  $\{0, 1\}$ , com  $C_A(x) = 1$  indicando que o elemento  $x$  está em  $A$ , enquanto  $C_A(x) = 0$  indica que  $x$  não é elemento de  $A$ . Assim, a função característica descreve completamente o conjunto  $A$ , já que indica quais elementos do conjunto universo  $U$  são elementos também de  $A$ .

Permitindo uma espécie de “relaxamento” no conjunto imagem da função característica de um conjunto foi que Zadeh formalizou matematicamente um subconjunto fuzzy.

### 3.2. Conjunto Fuzzy

Seja  $U$  um conjunto (clássico) e  $F$  um subconjunto fuzzy de  $U$ . Sendo  $F$  caracterizado por uma função  $\mu : U \rightarrow [0, 1]$ , chamada função de pertinência do conjunto fuzzy  $F$ .

O valor  $\mu(x) \in [0, 1]$  indica o grau com que o elemento  $x$  de  $U$  está no conjunto fuzzy  $F$ , com  $\mu(x) = 0$  e  $\mu(x) = 1$  indicando, respectivamente, a não pertinência e a pertinência completa de  $x$  ao conjunto fuzzy  $F$ . Do ponto de vista formal, a definição de um subconjunto fuzzy foi obtida simplesmente ampliando-se o contra-domínio da função característica, que é o conjunto  $\{0, 1\}$ , para o intervalo  $[0, 1]$ .

Neste sentido, pode-se dizer que um conjunto clássico é um caso particular de conjunto fuzzy. Por exemplo, o conjunto  $P$ , dos números pares, tem função característica  $C_P(n) = 1$  se  $n$  é par e  $C_P(n) = 0$  se  $n$  é ímpar. Portanto o conjunto dos pares é um particular conjunto fuzzy já que  $C_P(n) \in [0, 1]$ . Neste caso foi possível descrever todos os elementos de  $P$  a partir da função característica porque todo número natural ou é par ou é ímpar.

### 3.3. Operações entre Conjuntos Fuzzy

Sejam  $A$  e  $B$  dois subconjuntos fuzzy de  $U$ , com funções de pertinências indicadas também por  $A$  e  $B$ . Dizemos que  $A$  é subconjunto fuzzy de  $B$ , e escrevemos  $A \subset B$ , se  $A(x) \leq B(x)$  para todo  $x \in U$ . Note que o conjunto vazio( $\emptyset$ ) tem função de pertinência  $\emptyset(x) = 0$  enquanto o conjunto universo( $U$ ) tem função de pertinência  $U(x) = 1$  para todo  $x \in U$ . Assim, podemos dizer que  $\emptyset \subset A$  e que  $A \subset U$  para todo  $A$ .

A união entre  $A$  e  $B$  é o conjunto fuzzy cuja função de pertinência é dada por:

$$(A \cup B)(x) = \text{máximo}_{x \in U} \{A(x), B(x)\} \quad (3.2)$$

A intersecção entre  $A$  e  $B$  é o conjunto fuzzy cuja função de pertinência é dada por:

$$(A \cap B)(x) = \text{mínimo}_{x \in U} \{A(x), B(x)\} \quad (3.3)$$

O complemento de  $A$  é o conjunto fuzzy  $A'$  cuja função de pertinência é dada por:

$$A'(x) = 1 - A(x), x \in U \quad (3.4)$$

Particularmente, se  $A$  e  $B$  forem conjuntos clássicos, então as funções características das respectivas operações, acima definidas, satisfazem estas igualdades, mostrando a coerência destas definições. Por exemplo, se  $A$  é um subconjunto (clássico) de  $U$ , então a função característica,  $A$ , do seu complementar é tal que  $A'(x) = 0$  se  $A(x) = 1$  (i.é.  $x \in A$ ) e  $A'(x) = 1$  se  $A(x) = 0$  (i.é.  $x \notin A$ ). Neste caso, ou  $x \in A$  ou  $x \notin A$ . Na teoria fuzzy não tem-se necessariamente essa dicotomia, nem sempre é verdade que  $A \cap A' = \emptyset$ , assim como não é verdade que  $A \cup A' = U$ . O exemplo a seguir ilustra tais fatos.

Suponha que o conjunto universo  $U$  seja composto pelos circuitos de baixa tensão de uma região, identificados pelos números 1, 2, 3, 4 e 5. Sejam  $A$  e  $B$  os conjuntos fuzzy que representam o índice de sobrecarga e o índice de transgressão de tensão dos circuitos, respectivamente. A tabela 3.1 ilustra a união, intersecção e o complemento.

**Tabela 3.1 – Tabela com exemplos das propriedades Fuzzy de união, intersecção e complemento.**

Circuito BT	índice de sobrecarga (A)	índice de transgressão de tensão (B)	$A \cup B$	$A \cap B$	$A'$	$A \cap A'$
1	0,7	0,6	0,7	0,6	0,3	0,3
2	0,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,0
3	0,4	0,2	0,4	0,2	0,6	0,4
4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5	1,0	0,2	1,0	0,2	0,0	0,0

Os valores das colunas, exceto os da primeira, indicam os graus com que cada circuito pertence aos conjuntos fuzzy  $A, B, A \cup B, A \cap B, A', A \cap A'$ , respectivamente, onde  $A$  e  $B$  são supostamente dados. Na coluna  $A \cap A'$ , o valor 0,3 indica que o circuito 1 está tanto no grupo dos sobrecarregados como no dos não sobrecarregados. Como dito antes, este é um fato inadmissível na teoria clássica de conjuntos na qual tem-se a lei do terceiro excluído ( $A \cap A' = \emptyset$ ).

### 3.4. Número Fuzzy

De um modo geral pode-se dizer que, em um problema concreto, muitos números que lá aparecem são idealizações de informações imprecisas envolvendo valores numéricos, como são os casos de frases como “em torno de”. Por exemplo, quando se mede a altura de um indivíduo, o que se obtém é um valor numérico carregado de imprecisões. Tais imprecisões podem ter sido causadas pelos instrumentos de medidas, pelos indivíduos que estão medindo, pelo indivíduo que está sendo medido etc. Finalmente opta-se por um valor preciso (um número real) “a” para indicar a altura.

No entanto, seria mais prudente dizer que a altura é em torno de “a”. Neste caso, matematicamente, indica-se a expressão *em torno de* “a” por um conjunto fuzzy A, cujo domínio é o conjunto dos números reais. Também é razoável esperar que  $A(a) = 1$ . A escolha dos números reais como domínio é porque, teoricamente, os possíveis valores para a *altura* são números reais.

Para definir número fuzzy, é preciso introduzir o conceito de  $\alpha$ -níveis (também conhecido como  $\alpha$ -cuts) de um conjunto fuzzy A, que são os subconjuntos clássicos dos números reais definidos por:

$$[A]^\alpha = \{x \in \mathfrak{R} : A(x) \geq \alpha\}, \text{ para } \alpha \in [0, 1] \quad (3.5)$$

Sendo assim, um conjunto fuzzy A é chamado de número fuzzy quando o conjunto universo, onde A está definido, é o conjunto dos números reais ( $\mathfrak{R}$ ) e satisfaz às condições:

1. Todos os  $\alpha$ -níveis de A são não vazios.
2. Todos os  $\alpha$ -níveis de A são intervalos fechados de  $\mathfrak{R}$ .
3. O suporte de A,  $\{x \in \mathfrak{R} : A(x) > 0\} = \text{sup } pA$ , é limitado.

Observa-se que, com a definição acima, todo número real  $r$  é um particular número fuzzy cuja função de pertinência é a sua função característica:

$$C_r(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x = r \\ 0 & \text{se } x \neq r \end{cases} \quad (3.6)$$

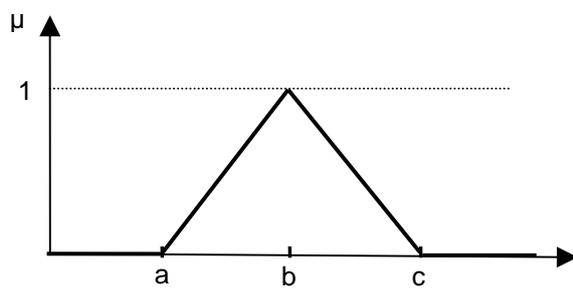
Os números fuzzy mais comuns são os triangulares, trapezoidais e os em forma de sino. A seguir são dadas as definições para números fuzzy triangulares.

Um número fuzzy  $A$  é dito triangular se sua função de pertinência é da forma:

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c} & \text{se } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases} \quad (3.7)$$

para  $a < b < c$ .

Graficamente um número fuzzy triangular é definido tendo como base o intervalo  $[a, c]$  e, como único vértice fora desta base, o ponto  $(b, 1)$ , conforme ilustra a figura 3.1. Deste modo, os números reais  $a$ ,  $b$  e  $c$  definem o número fuzzy triangular  $A$  que será denotado pela terna ordenada  $(a; b; c)$ . Note que o conjunto fuzzy acima não é necessariamente simétrico já que  $c-b$  pode ser diferente de  $b-a$ . Como,  $A(b) = 1$ , pode-se dizer que o conjunto fuzzy  $A$  é um modelo matemático razoável para a expressão lingüística “perto de  $b$ ”. O mesmo não pode-se dizer da expressão “em torno de  $b$ ”, onde espera-se uma simetria.



**Figura 3.1 – Representação gráfica de um número fuzzy triangular**

## **4. AVALIAÇÃO DE RISCOS DE TRANSGRESSÃO DE VIOLAÇÃO DE TENSÃO**

### **4.1. Visão Geral**

As regras no setor elétrico para conformidade de tensão são antigas e foram recentemente revisadas e aprimoradas. Em 17 de abril de 1978, o DNAEE<sup>1</sup> publicou a Portaria nº 47 [36], que estabeleceu os níveis de tensão de fornecimento de energia elétrica, bem como a definiu os limites de variação das tensões, em geral, a serem observados pelos concessionários de serviços públicos de eletricidade.

O aprimoramento regulatório se fez em 26 de novembro de 2001, quando a ANEEL publicou a Resolução nº 505 [19] com o objetivo de estabelecer de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente.

A proposta da ANEEL quando estabeleceu a Resolução n.º 505/2001 foi baseada na comparação entre o prejuízo experimentado pelo cliente, devido a níveis incorretos e o custo que pesa sobre o fornecedor para reverter esses níveis com obras de melhoria.

A meta da ANEEL não é conseguir a tensão ideal, mas manter o afastamento de tensão em um valor que mantenha o sistema físico em condições de adaptação do mercado [9].

O principal desafio para implementar uma estratégia reguladora sobre conformidade de tensão é o fato de que o prejuízo do afastamento recai no cliente e, por consequência, não há estímulo para que a empresa invista na redução deste prejuízo.

A ANEEL tem resolvido o impasse através de valores indenizatórios na forma de ressarcimento nas faturas dos clientes.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, criado em 1968, órgão normativo e fiscalizador, posteriormente extinto dando lugar à ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

A Resolução n.º 505/2001, revisada em 2003 (Resolução n.º 676, de 19 de dezembro de 2003), estabelece as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, a serem observadas pelo ONS<sup>2</sup>, concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica.

Para verificação da conformidade, a Resolução estabelece a realização de medições de tensões trimestrais numa determinada amostra de clientes, cujo tamanho é definido pelo número de consumidores da empresa. Também são estabelecidos os procedimentos a serem seguidos para atendimento a reclamações de clientes que solicitam a verificação da qualidade de tensão de fornecimento.

#### **4.2. Conformidade de tensão: Resolução ANEEL n.º 505 de 26/11/2001**

A Resolução ANEEL n.º 505 de 26 de novembro de 2001, estabelece índices de qualidade para os níveis de tensão em regime permanente, e torna-se de fundamental importância que as concessionárias conheçam e apurem estes indicadores para tomar ações preventivas, evitando a reclamação de tensão por parte dos consumidores.

##### **4.2.1 Classificação da tensão de atendimento**

A tensão de atendimento é classificada de acordo com as faixas de variação da tensão de leitura, que é definida como o valor eficaz de tensão, integralizado a cada 10 minutos, obtido de medição por meio de equipamentos apropriados, expresso em volts ou quilovolts.

Há 3 artigos específicos na Resolução que abordam a classificação da tensão de atendimento no âmbito das concessionárias de distribuição e das unidades consumidoras (no artigo 2º da resolução, define-se entre outros termos, o significado

---

<sup>2</sup> ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico é uma entidade de direito privado, sem fins lucrativos, criada em 26 de agosto de 1998, responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

para unidade consumidora, como sendo um conjunto de instalações e equipamentos elétricos caracterizado pelo recebimento de energia elétrica em um só ponto de entrega, com medição individualizada e correspondente a um único consumidor).

Destes 3 artigos específicos, o artigo 4º contempla as concessionárias de distribuição; o artigo 5º contempla as unidades consumidoras atendidas em alta tensão ( $\geq 69$  kV) e em média tensão ( $< 69$  kV e  $> 1$  kV); o artigo 6º contempla as unidades consumidoras atendidas em baixa tensão ( $\leq 1$  kV).

Para as concessionárias de distribuição, o artigo 4º estabelece que a tensão a ser contratada junto ao ONS ou entre concessionárias deve ser a tensão nominal no ponto de conexão (definido como o conjunto de equipamentos e materiais que se destinam a estabelecer a conexão elétrica entre dois sistemas).

O artigo 5º estabelece, para unidades consumidoras atendidas em tensão superior a 1 kV, que a tensão contratada com a concessionária ou ONS, no ponto de entrega ou de conexão, deve-se situar entre 95% (noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal do sistema elétrico. A correspondente tensão de atendimento é classificada conforme os quadros 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, de acordo com a tensão nominal no ponto de entrega.

**Tabela 4.1. Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 230 kV**

<p>CLASSIFICAÇÃO DA TENSÃO DE ATENDIMENTO</p> <p>FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO DE LEITURA</p> <p>ADEQUADA</p> <p><math>0,95 TC^{(3)} \leq TL^{(4)} \leq 1,05 TC</math></p> <p>PRECÁRIA</p> <p><math>0,93 TC \leq TL &lt; 0,95 TC</math> ou <math>1,05 TC &lt; TL \leq 1,07TC</math></p> <p>CRÍTICA</p> <p><math>TL &lt; 0,93 TC</math> ou <math>TL &gt; 1,05 TC</math></p>
--

<sup>3</sup> Tensão Contratada

<sup>4</sup> Tensão de Leitura

**Tabela 4.2. Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV**

CLASSIFICAÇÃO DA TENSÃO DE ATENDIMENTO
FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO DE LEITURA
ADEQUADA
$0,95 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
PRECÁRIA
$0,90 TC \leq TL < 0,95 TC$ ou $1,05 TC < TL \leq 1,07 TC$
CRÍTICA
$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,07 TC$

**Tabela 4.3. Pontos de entrega ou conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 1 kV e inferior a 69 kV**

CLASSIFICAÇÃO DA TENSÃO DE ATENDIMENTO
FAIXA DE VARIAÇÃO DA TENSÃO DE LEITURA
ADEQUADA
$0,93 TC \leq TL \leq 1,05 TC$
PRECÁRIA
$0,90 TC \leq TL < 0,93$
CRÍTICA
$TL < 0,90 TC$ ou $TL > 1,05 TC$

**Tabela 4.4. Pontos de entrega em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (Tensões padronizadas)**

Tensão Nominal (TN)		Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (Volts)
Ligação	Volts			
Trifásica	(220) / (127)	$(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$	$(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (109 \leq TL < 116 \text{ ou } 133 < TL \leq 140)$	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$
	(380) / (220)	$(348 \leq TL \leq 396) / (201 \leq TL \leq 229)$	$(327 \leq TL < 348 \text{ ou } 396 < TL \leq 403) / (189 \leq TL < 201 \text{ ou } 229 < TL \leq 233)$	$(TL < 327 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$
Monofásica	(254) / (127)	$(232 \leq TL \leq 264) / (116 \leq TL \leq 132)$	$(220 \leq TL < 232 \text{ ou } 264 < TL \leq 269) / (109 \leq TL < 116 \text{ ou } 132 < TL \leq 140)$	$(TL < 220 \text{ ou } TL > 269) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$
	(440) / (220)	$(402 \leq TL \leq 458) / (201 \leq TL \leq 229)$	$(380 \leq TL < 402 \text{ ou } 458 < TL \leq 466) / (189 \leq TL < 201 \text{ ou } 229 < TL \leq 233)$	$(TL < 380 \text{ ou } TL > 466) / (TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$

É um direito do consumidor solicitar à concessionária a medição do nível da tensão de atendimento sempre que acreditar que este não está dentro dos limites legalmente estabelecidos, devendo esta informar-lhe, no prazo de até 48 (quarenta e oito) horas, o valor que será cobrado pelo serviço na hipótese da constatação da improcedência da reclamação, bem como a data e hora em que será instalado o equipamento de medição para o acompanhamento da medição pelo solicitante.

O relatório conclusivo da medição deverá ser apresentado, por escrito, ao consumidor solicitante em até 30 (trinta) dias a partir da formalização da reclamação.

#### 4.2.2 Indicadores de Conformidade de tensão

Os indicadores são apurados quando da realização das medições solicitadas pelo consumidor ou quando da realização das medições previstas no programa periódico de medição amostral da concessionária são:

##### a) **DRP - Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária**

Trata-se de indicador individual, referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas de tensão precárias, no período de observação definido, expresso em percentual e calculado conforme expressão abaixo:

$$DRP = \frac{nlp}{1.008} \times 100[\%] \quad (4.1)$$

na qual:

*nlp*: número de leituras situadas nas faixas precárias;

1.008: número de leituras válidas a cada 10 (dez) minutos, no período de observação.

O limite máximo a ser observado para este indicador, chamado de Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária ( $DRP_M$ ), ou seja, o percentual máximo de tempo admissível para as leituras de tensão, nas faixas de tensão precárias, no período de observação definido, foi estabelecido em 6% (seis por cento) para o ano de 2004, sendo este reduzido de um valor absoluto de 1% (um por cento) a cada ano, no período de 2005 a 2007, quando passa a ter o valor fixo de 3% (três por cento).

##### b) **DRC - Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica**

Trata-se de indicador individual, referente à duração relativa das leituras de tensão, nas faixas de tensão críticas, no período de observação definido, expresso em percentual e calculado conforme expressão abaixo:

$$\text{DRC} = \frac{n_{lc}}{1.008} \times 100[\%] \quad (4.2)$$

na qual:

*n<sub>lc</sub>*: número de leituras situadas nas faixas críticas;

1.008: número de leituras válidas a cada 10 (dez) minutos, no período de observação.

O limite máximo a ser observado para este indicador, chamado de Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica (DRC<sub>M</sub>), ou seja, o percentual máximo de tempo admissível para as leituras de tensão, nas faixas de tensão críticas, no período de observação definido, foi estabelecido em 1,1% (um inteiro e um décimo por cento) para o ano de 2004, sendo este reduzido de um valor absoluto de 0,2% (dois décimos por cento) a cada ano, no período de 2005 a 2007, quando passa a ter o valor fixo de 0,5% (cinco décimos por cento).

Quando dos registros obtidos de medições solicitadas e/ou amostrais for constatado que o valor do indicador DRP superar a meta estabelecida, a concessionária deverá adotar providências para o retorno da tensão à condição adequada, a partir da data de término das leituras, obedecendo os seguintes prazos:

- 90 (noventa) dias a partir de janeiro de 2004;
- 60 (sessenta) dias a partir de janeiro de 2005.

No caso do DRC, quando dos registros obtidos de medições de tensão solicitadas e/ou amostrais superar a meta estabelecida, a concessionária deverá adotar as providências para o retorno da tensão à condição adequada, a partir da data de término das leituras, obedecendo os seguintes prazos:

- 30 (trinta) dias a partir de janeiro de 2004;
- 15 (quinze) dias a partir de janeiro de 2005.

A regularização do nível de tensão deverá ser comprovada por nova medição, obedecendo o mesmo período de observação, e o resultado final comunicado, por escrito, ao consumidor que solicitou a medição.

A partir de 1º de janeiro de 2005, expirados os prazos supra discriminados, e permanecendo desatendida a regularização dos níveis de tensão, as unidades consumidoras que tiverem sido submetidas a condições de serviço inadequadas, farão jus à restituição de importância calculada de acordo com a fórmula a seguir:

$$\text{Valor} = \left[ \frac{\text{DRP} - \text{DRP}_M}{100} \cdot k_1 + \frac{\text{DRC} - \text{DRC}_M}{100} \cdot k_2 \right] \cdot k_3 \quad (4.3)$$

na qual:

$k_1 = 1$ ;

$k_2 = 4$ , para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão;

$k_2 = 2$ , para unidades consumidoras atendidas em Média Tensão;

$k_2 = 1$ , para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão;

$k_3 =$  coeficiente de majoração;

$\text{DRP} =$  valor do  $\text{DRP}$  apurado, expresso em %;

$\text{DRP}_M =$  valor do  $\text{DRP}_M$  expresso em %;

$\text{DRC} =$  valor do  $\text{DRC}$  apurado, expresso em %;

$\text{DRP}_M =$  valor do  $\text{DRP}_M$  expresso em %;

$\text{DRC}_M =$  valor do  $\text{DRC}_M$  expresso em %.

O coeficiente de majoração a ser utilizado, no caso de unidade consumidora cativa, corresponderá à média aritmética do valor líquido das faturas mensais de energia, referentes aos 03 (três) meses anteriores à apuração, sendo entendido como valor

líquido da fatura o valor em moeda corrente resultante da aplicação das respectivas tarifas de fornecimento, sem a incidência de impostos, sobre as componentes de consumo de energia elétrica ativa, de demanda de potência ativa, de uso do sistema, de consumo de energia elétrica e demanda de potências reativas excedentes.

No caso do cliente livre, o coeficiente de majoração corresponderá à média aritmética dos 03 (três) últimos meses do montante de energia disponibilizado no ponto de conexão, multiplicado pelo valor normativo relativo à fonte competitiva, vinculado aos contratos de energia adquirida livremente.

A restituição devida ao consumidor, conforme critério acima, não impedirá o consumidor de exercer seu direito de pleitear à concessionária o ressarcimento por outras perdas e danos causados pelo serviço inadequado de energia elétrica e será mantida enquanto restar desatendida a condição que lhe originou.

## **5. MODELO PROPOSTO PARA AVALIAÇÃO A PRIORI DOS INDICADORES DE CONFORMIDADE DE TENSÃO**

### **5.1. Avaliação dos Indicadores de Conformidade de Tensão**

O processo de avaliação dos indicadores de conformidade de tensão é composto por diversas etapas, que inicia-se com a simulação de fluxos de potência determinísticos e encerra-se na análise dos resultados dos processamentos de fluxos de carga com as abordagens probabilística e fuzzy.

A simulação de fluxos de potência determinísticos para as redes de média tensão propicia a identificação dos transformadores de distribuição (ET's) com tensões fora da faixa adequada, para esta etapa, utiliza-se 4 pontos da curva de carga diária para fazer o fluxo determinístico em 4 patamares de carga, já as curvas completas de carga são utilizadas nos fluxos de potência probabilístico e fluxo de potência fuzzy que precisarão de mais tempo para processamento.

Para os transformadores de distribuição (ET's) identificados na etapa anterior é efetuado o cálculo elétrico da rede de baixa tensão, utilizando-se de fluxos de potência probabilístico e fuzzy.

Com as tensões resultantes nas barras, obtidas na etapa anterior, efetuam-se os cálculos dos indicadores de DRP e DRC.

A partir dos resultados anteriores, classificam-se as redes de baixa tensão que deverão ser objeto de ações preventivas, por apresentarem potenciais problemas de tensão.

Nos próximos sub-itens são apresentadas as representações que serão utilizadas referentes à carga das redes de baixa tensão e dos componentes de redes secundárias, que serão utilizadas nos modelos de cálculo elétrico – fluxo de potência – determinístico, probabilístico e fuzzy, que serão discutidos nos próximos capítulos.

## 5.2. Modelagem e Caracterização da Carga

A modelagem da carga envolve dois aspectos importantes: o primeiro, refere-se ao tratamento da curva de carga de cada consumidor e o segundo, referente à variação da potência ou corrente absorvida por ela com a variação da tensão.

Quanto ao primeiro aspecto, as curvas de carga típicas são obtidas a partir de estudos dos hábitos de consumo [20, 21] ou campanha de medição amostral identificados pelo tipo de consumidor (residencial, comercial, industrial, rural e outros) e faixas de consumo e/ou demanda.

Quanto ao segundo aspecto, são vários os tipos de modelos adotados normalmente na área de distribuição [22], destacando-se os seguintes: potência constante, corrente constante e impedância constante. Na implementação computacional desenvolvida neste trabalho, a modelagem pode ser definida pelo usuário e pode contemplar uma combinação percentual de cada modelo, que será detalhada ainda neste tópico.

As metodologias utilizadas na elaboração de estudos para o projeto e planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica obedecem a critérios e especificações, dentre os quais se destaca a previsão de carga atual e futura, visando o dimensionamento de circuitos primários, secundários, transformadores, etc.

Para consumidores não residenciais ligados em baixa tensão, a determinação da potência absorvida da rede secundária pode ser feita através de levantamento da carga total instalada ou prevista para esses consumidores, aplicando-se fatores de demanda típicos por atividade e classe de consumo do estabelecimento e fator de coincidência para cada grupo de consumidores similares.

Uma das primeiras metodologias, amplamente empregada, baseia-se na obtenção da função kVAs, que tem por objetivo efetuar a conversão estatística do consumo total mensal de energia elétrica (kWh) de um grupo de consumidores secundários ligados a uma mesma estação transformadora, em demanda máxima desta última (kVA) [23], [24].

Uma outra metodologia, mais avançada, é a que discretiza o mercado consumidor e leva em consideração a curva de carga típica de cada segmento do mercado. Esta curva consta de “n” pontos no dia todo (por exemplo, 96 pontos, em intervalos de 15 minutos), que é uma vantagem considerável em relação ao método anterior (kVAs), que só representa um ponto no dia todo (somente a demanda máxima) [21], [22], [25].

Neste trabalho utilizou-se curva de carga típica com 144 pontos em intervalos de 10 minutos. As curvas de carga típicas são compostas de uma curva média e uma de desvio padrão para contemplar a variabilidade do uso da energia, devido aos diferentes comportamentos dos consumidores em cada instante de tempo nos dias úteis e também nas variações de fim de semana. A variabilidade da carga será contemplada pela curva de desvio padrão.

Na definição das faixas de consumo de cada classe de consumo, um fato importante a ser observado é que tais faixas foram arbitradas [26], aproveitando-se as faixas de consumo estabelecidas nos estudos de revisão tarifárias da Enersul – Empresa Energética de Mato Grosso do Sul, no ano de 2003, na qual houve um procedimento específico para a obtenção de tais faixas.

As curvas de carga média e de desvio-padrão dos conjuntos de consumidores, por exemplo supridos por um transformador de distribuição, podem ser obtidas mediante a metodologia nomeada de agregação de curvas de carga, que se vale das curvas dos consumidores ligados à rede de distribuição secundária, pertencente a essa estação transformadora. O método de agregação consiste em calcular, intervalo por intervalo, os 144 valores das curvas médias e das curvas de desvio-padrão de um conjunto de cargas (ou consumidores), a partir dos valores respectivos de cada um deles.

A metodologia de fluxo de potência utilizada nesta tese adota a representação por curvas de carga diária típicas para a modelagem da carga, visto a sua característica de apresentar a variação do consumo do mercado durante o dia todo (em intervalos de 10 minutos).

Com relação a detalhes dos modelos de carga que tratam da variação de potência absorvida com a tensão aplicada, conforme citados anteriormente: potência constante, corrente constante e impedância constante, apresenta-se a seguir o equacionamento básico para o cálculo das correntes.

No primeiro modelo, tem-se que a potência absorvida pela carga é independente da tensão aplicada, ou seja, que a carga absorve sempre a mesma potência, produzindo uma elevação no valor da corrente quando a tensão diminui, e vice-versa.

Este modelo denomina-se modelo de potência constante, que permite a representação de cargas como, por exemplo, motores elétricos.

A corrente absorvida pela carga é dada pela expressão:

$$\mathbf{i}(\mathbf{v}) = \frac{\mathbf{p} - j\mathbf{q}}{\mathbf{v}^*} \quad (5.1)$$

Sendo,

$\mathbf{i}(\mathbf{v})$  a corrente absorvida pela carga em p.u.

$\mathbf{p}$  e  $\mathbf{q}$  as parcelas constantes de potência ativa e reativa respectivamente em p.u.

$\mathbf{v}^*$  é o conjugado da tensão em p.u.

No segundo modelo, considera-se que o módulo da corrente absorvida e o fator de potência da carga são invariantes com a tensão. Neste caso, a corrente é constante juntamente com o fator de potência, e que são independentes do valor da tensão, ou seja, com a variação da tensão tem-se variação no valor da potência absorvida, para maior ou para menor, em forma diretamente proporcional à variação da tensão.

Este modelo denomina-se modelo de corrente constante e é bastante apropriado para a representação de cargas como, por exemplo, lâmpadas fluorescentes.

A corrente absorvida pela carga é dada pela expressão:

$$i(\mathbf{v}) = \frac{\mathbf{p} - j\mathbf{q}}{V_{\text{nom}}} \cdot \frac{\dot{\mathbf{v}}}{|\dot{\mathbf{v}}|} \quad (5.2)$$

Sendo,

$i(\mathbf{v})$  a corrente absorvida pela carga em p.u.

$\mathbf{p}$  e  $\mathbf{q}$  as parcelas de potência ativa e reativa respectivamente, medidas a tensão nominal,  $v_{\text{nom}}$ , em p.u.

$\mathbf{v}$  é a tensão em p.u.

O terceiro modelo considera que a impedância da carga é independente do valor da tensão aplicada. Neste caso, as cargas comportam-se de maneira que a variação do valor da tensão não varia o valor da impedância, mas sim os valores de corrente e da potência absorvida.

Este modelo é denominado de impedância constante e é aderente para a representação de cargas, como por exemplo, lâmpadas incandescentes, reatores e capacitores “shunt” e chuveiros elétricos.

A corrente absorvida pela carga é dada pela expressão:

$$i(\mathbf{v}) = \frac{\mathbf{p} - j\mathbf{q}}{(v_{\text{nom}})^2} \cdot \dot{\mathbf{v}} \quad (5.3)$$

Sendo,

$i(\mathbf{v})$  a corrente absorvida pela carga em p.u.

$\mathbf{p}$  e  $\mathbf{q}$  as parcelas de potência ativa e reativa respectivamente, medidas a tensão nominal,  $v_{\text{nom}}$ , em p.u.

$\mathbf{v}$  é a tensão em p.u.

Quando não se dispõe de informações mais precisas, em geral, assume-se que as cargas são do tipo corrente constante, isto é, o módulo da corrente e o fator de potência desta são invariantes com o correspondente módulo de tensão. Este tipo de modelagem é largamente utilizado e bastante aceitável em redes de distribuição, que contam com composição de diferentes equipamentos, por representar de forma adequada o que acontece com um conjunto de cargas ligadas a um mesmo ponto [22].

Outro aspecto relevante a ser considerado na modelagem das cargas para a realização de cálculos elétricos em redes de distribuição refere-se ao desequilíbrio das correntes das fases em função das possibilidades de conexões existentes, tais como: monofásicas, bifásicas e trifásicas.

Por outro lado, mesmo na existência de apenas ligações trifásicas não pode-se garantir o equilíbrio na demanda ligada por estas conexões, pois em geral, a utilização da energia elétrica se dá via ligação de pequenas cargas monofásicas, o que implica no desequilíbrio de corrente.

Esta condição leva a considerar que cada um dos condutores de fase e o neutro tenha comportamento diferente um do outro, ou seja, correntes de fases não necessariamente iguais em módulo e defasadas de  $120^\circ$ .

Esta situação levou a adoção de uma modelagem de rede que possa levar em consideração este aspecto, tornando os resultados mais precisos, com valores simulados mais próximos dos valores reais.

### **5.3. Modelagem dos Componentes da Rede Secundária**

Um trecho de rede de baixa tensão está definido por dois nós, sendo que eles devem ser consecutivos (não pode existir um terceiro nó entre os dois primeiros, pois caracterizaria a existência de dois trechos e não apenas um). Os nós da rede de baixa tensão são aqueles pontos onde são realizadas as conexões com o transformador de

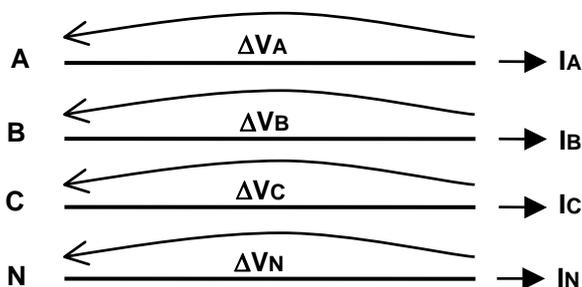
distribuição ou ligados os consumidores, ou ainda, onde há alguma derivação em dois ou mais trechos de rede.

Por conveniência técnica, neste trabalho, as redes secundárias de distribuição em baixa tensão são consideradas na configuração radial, logo, não são contempladas as situações para ligação em malha.

Na situação de haver mudança de bitola dos condutores ou na configuração dos mesmos, também é definido um nó entre os trechos correspondentes.

Cada trecho de rede de baixa tensão é modelado a partir da correspondente matriz de impedâncias, cujos elementos são calculados conforme metodologia detalhada em [27], que depende diretamente do tipo de rede, tipo de condutores, disposição geométrica deles e da resistividade do solo.

A figura 5.1 apresenta um trecho de rede com a indicação das quedas de tensão, correntes e identificação das fases envolvididas.



**Figura 5.1. Ilustração de trecho de rede, com as grandezas associadas.**

A equação matricial 5.4 relaciona a queda de tensão em cada condutor (fase A, B, C e neutro N) com as correspondentes correntes. Ou seja, sendo  $V_i$  e  $I_i$ , respectivamente a queda de tensão e a corrente no condutor  $i$  de um trecho genérico da rede,  $Z_{ii}$  a impedância própria do condutor  $i$  e  $Z_{ij}$  a impedância mútua entre os condutores  $i$  e  $j$ , a relação entre as quedas de tensão e as correntes num trecho deve ser avaliada por esta equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \\ \Delta V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AN} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BN} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CN} \\ Z_{NA} & Z_{NB} & Z_{NC} & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_N \end{bmatrix}$$

**Equação 5.4. Relação entre as quedas de tensão e as correntes num trecho genérico.**

## **6. FLUXO DE POTÊNCIA E CÁLCULO DOS INDICADORES DRP E DRC EM REDES DE BAIXA TENSÃO**

### **6.1. Visão Geral**

O cálculo de fluxo de potência em redes de energia elétrica tem como principal objetivo a determinação do estado da rede e da distribuição dos fluxos. Através disto, pode-se verificar problemas de tensão, sobrecargas, cálculo das perdas visando o planejamento da operação e expansão do sistema; análise de contingências para verificar o efeito de saídas de linhas, transformadores e geradores; estudo da tensão e dos reativos a fim de testar a eficiência dos equipamentos; verificação da capacidade de transmissão com o objetivo de conhecer os limites de transferência; controle “on-line” e avaliação de segurança para verificar as medidas em situações de emergência, entre algumas outras grandezas de interesse. O problema do fluxo de potência pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas não-lineares correspondentes às leis de Kirchhoff e um conjunto de restrições operacionais da rede e de seus componentes [28].

O modelo de fluxo de potência escolhido para este trabalho não é o ponto de maior interesse, mas sim, o modo de representação das cargas e grandezas elétricas associadas. Desta forma, são inseridos no processo argumentos probabilísticos e possibilísticos que levam a uma nova abordagem que permite avaliar as condições elétricas em que operam cada uma das fases de uma rede de distribuição. Além disto, avaliar indicadores envolvendo a qualidade da energia elétrica que não se faz possível em fluxos de potência determinísticos tradicionais, que não consideram as inúmeras combinações de fatores que alteram o desempenho elétrico da rede ao longo de um ciclo de operação, por exemplo, entre o momento de maior e menor carga da rede em estudo.

## 6.2. Fluxo de Potência Determinístico

Nesta seção, é apresentada resumidamente a metodologia do fluxo de potência determinístico, que serve como base para a metodologia do fluxo de potência probabilístico, exposta na seção seguinte. Nesta tese, o fluxo de potência determinístico é simulado para quatro patamares de carga diferentes (caracterizando as condições de carga da manhã, tarde, noite e madrugada).

Primeiramente, apresenta-se o procedimento básico para o cálculo elétrico da rede de distribuição de baixa tensão. Para fazer este cálculo, devem ser conhecidos os seguintes dados:

- Dados do transformador de distribuição (tensão do primário, impedância de curto-circuito, etc.);
- Dados da topologia e informações dos trechos da rede secundária (comprimentos, tipo e bitola dos condutores, configuração, número de condutores, posição do TAP do transformador, cuja tensão nominal da rede a ele está associado, etc.);
- Dados das cargas (tipo de ligação – monofásicas, bifásicas, trifásicas –, fases de ligação, informações de consumo mensal, ponto de ligação e, principalmente as curvas de carga diárias típicas das diferentes categorias das cargas presentes na rede).

Partindo destes dados, pode-se determinar os parâmetros elétricos necessários, quais sejam:

- carregamento em todos os trechos da rede e, posteriormente, dependendo do caso na estação transformadora;
- queda de tensão em todos os trechos da rede e também a queda de tensão máxima (ou seja, o valor da tensão no nó mais crítico, nomeado como valor da mínima tensão da rede em questão), que normalmente é fornecido em % da tensão nominal do sistema. Conhecendo-se o valor da tensão no primário do

transformador de distribuição, resultado de um fluxo de potência na rede de média tensão, pode-se obter o valor real da tensão em todos os nós da rede.

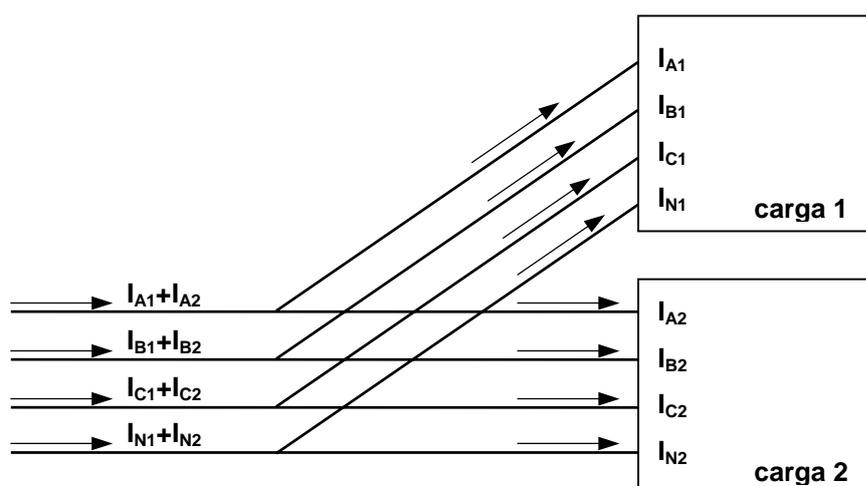
Podem ser determinadas também as perdas técnicas da rede, assim como o fator de desequilíbrio de tensão, para qualquer barra ou desequilíbrio de corrente, para qualquer trecho da rede.

As potências ativa e reativa das cargas são obtidas a partir de curvas de cargas estratificadas por tipos de consumidores e por níveis de consumo. Para cada transformador de distribuição, têm-se as energias mensais consumidas, bem como o número de consumidores ligados a ele.

As correntes em cada condutor são avaliadas a partir das demandas instantâneas dos consumidores (valores em intervalos de 10 minutos, por exemplo).

Para a determinação da corrente de uma carga ligada é necessário definir-se qual dos modelos de carga a ser utilizado, escolhido dentro dos modelos anteriormente apresentados (potência constante, corrente constante e impedância constante).

Sabendo-se que o circuito é constituído de trechos de rede, conforme ilustrado pela figura 6.1, para determinar a corrente num dado trecho, basta acumular a corrente, por fase e neutro das cargas a jusante do trecho.



**Figura 6.1. Exemplo de cálculo de correntes em um trecho a partir das cargas a jusante.**

O procedimento para cálculo de corrente em todos os trechos da rede em estudo parte desde os trechos finais até o ponto de suprimento (transformador de distribuição), determinando-se as correntes por fases e neutro da rede, com o correspondente cálculo das quedas de tensão nos trechos, conforme a equação matricial 5.4.

Uma vez determinadas as correntes e as quedas de tensão em cada trecho, pode-se iniciar os cálculos deste o terminal de baixa tensão do transformador (secundário) e determinar as quedas de tensão acumuladas por fase em todos os trechos da rede, e por conseqüência, os valores da tensão em qualquer ponto da rede em questão.

O critério de “convergência” ou de “parada” em simulações de fluxos de carga está em geral relacionado à comparação entre a diferença em p.u. do valor de uma grandeza elétrica calculada entre dois cálculos consecutivos e um valor pré-definido de referência, muitas vezes denominado de “valor de tolerância”.

Para concluir, por meio do modelo determinístico de cálculo de fluxo de potência avaliam-se os seguintes parâmetros elétricos:

- tensões em todos os nós da rede, entre fases, e entre fase e neutro;
- correntes em todos os trechos da rede, nos condutores das fases e no neutro;
- carregamento total da rede;
- queda de tensão máxima na rede, que é o valor da mínima tensão na rede em questão.

### **6.3. Fluxo de Potência Probabilístico**

O modelo probabilístico baseia-se em processamentos do fluxo de potência determinístico, descrito anteriormente, valendo-se de simulações baseadas no método de Monte Carlo, que é adotado para o tratamento das cargas nos diferentes cenários, a partir das curvas de probabilidades de demandas [26].

Os resultados obtidos com esta modelagem são mais realistas no que se refere aos comportamentos aleatórios das cargas existentes nas redes de distribuição.

Os cálculos determinísticos produzem apenas o resultado de um cenário de distribuição de cargas ao longo da rede, ao passo que os probabilísticos são mais realistas, já que produzem resultados que vêm associados a uma distribuição de probabilidades, representando a carga em vários cenários, denominados ensaios.

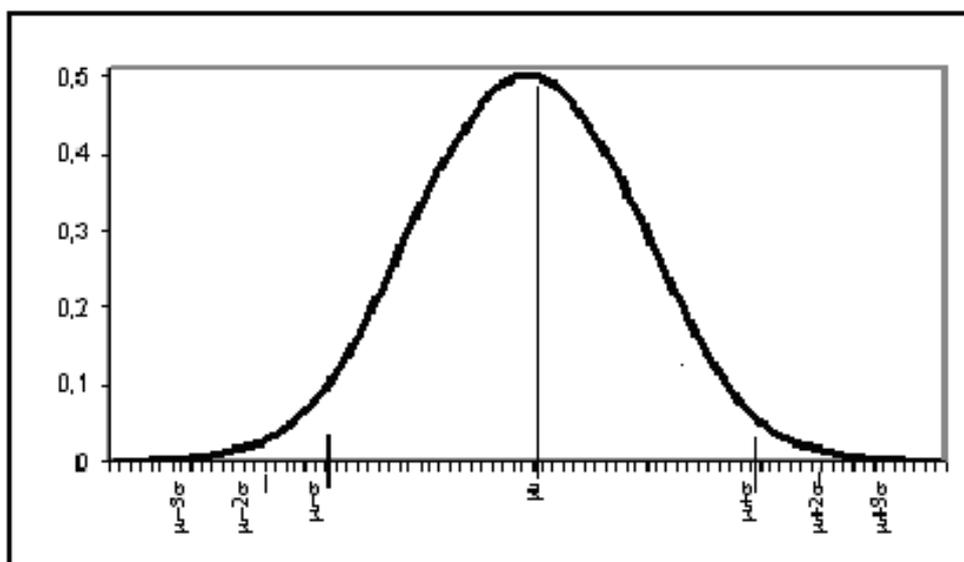
O tratamento probabilístico pode exigir elevados esforços computacionais, pois simula o sistema diversas vezes até alcançar a convergência do processo, que será detalhado mais adiante.

A adoção de variáveis probabilísticas é, no entanto, uma tendência das diversas áreas da engenharia, principalmente dos engenheiros de distribuição.

### **6.3.1 Enfoque Determinístico da Aleatoriedade da Carga**

Uma forma de tentar diminuir os riscos relativos à utilização de valores de demandas fixas na representação da carga consiste em considerar o valor no qual existe probabilidade baixa de que a demanda seja excedida.

No caso da figura 6.2, assumindo-se distribuição normal e adotando-se a demanda igual à média ( $\mu$ ) acrescida de um desvio-padrão ( $\sigma$ ), tem-se uma probabilidade de aproximadamente 16% de que a demanda seja excedida. No caso de  $\mu+2\sigma$ , tem-se a probabilidade de 2,3% e, para  $\mu+3\sigma$ , probabilidade de 0,03%.



**Figura 6.2. Curva de Distribuição de Probabilidades Normal.**

Verifica-se, portanto, que se o desvio-padrão é elevado, a utilização somente da demanda média ( $\mu$ ) pode levar a altos riscos de transgressões nos parâmetros técnicos da rede em questão.

Assim, pode-se lançar mão de se adotar um valor de demanda acrescido de um fator  $k$ . Quanto maior for o valor de  $k$ , tanto será menor o risco de transgressão dos parâmetros técnicos, porém mais sobredimensionados seriam os equipamentos do sistema elétrico projetado.

A dificuldade maior na utilização deste método consiste em que, para cada trecho da rede elétrica, tem-se desvio-padrão ( $\sigma$ ) diferenciado. Em função da agregação da carga, quanto mais afastado dos consumidores, e mais próximo da fonte de suprimento, menores são os valores do desvio-padrão.

Quanto à manipulação do desvio-padrão das demandas de 10 minutos, tenta-se avaliar quais são os valores a serem adicionados à demanda para o cálculo dos diferentes parâmetros elétricos, de modo que o risco de cada parâmetro violar o respectivo critério técnico seja mínimo. Desta forma, dependendo do parâmetro

(queda de tensão –  $\Delta V$  – ou carregamento – carreg –) em análise, propõe-se a utilização do seguinte valor de demanda em cada ponto:

$$\mu_{t,\Delta V} = k_{\Delta V} * \sigma_t + \mu_t \quad (6.1)$$

$$\mu_{t,carreg} = k_{carreg} * \sigma_t + \mu_t \quad (6.2)$$

Sendo:

$\mu$  : Demanda média no instante t;

$\sigma$  : Desvio padrão;

$\Delta v$  : queda de tensão.

Os coeficientes de proporcionalidade ( $k_{\Delta V}$  e  $k_{carreg}$ ) deverão ser escolhidos de modo a minimizar os riscos associados à violação do critério técnico.

Portanto, pretende-se avaliar um valor, acima da demanda média, que é proporcional ao desvio-padrão de cada carga e global do circuito, que permita o cálculo mais preciso possível, sem incorrer em riscos de erros altos na estimação dos valores de carregamento e queda de tensão.

Esta modelagem é aqui chamada de enfoque determinístico para representação da aleatoriedade da carga, que precede à modelagem probabilística.

No caso de uma rede secundária, suprida por uma estação transformadora (ET), pode-se utilizar a seguinte expressão para avaliação da demanda  $\mu_{i,t}$ , em cada consumidor:

$$\mu_{i,t} = \mu_{med_{i,t}} * \left( 1 + \frac{k * \sigma_{ET,t}}{\mu_{med_{ET,t}}} \right) \quad (6.3)$$

sendo:

- $\sigma_{ET,t}$  é o desvio-padrão da demanda agregada na ET, correspondente à demanda acumulada nos diferentes pontos da rede devido a todas as cargas, avaliado a partir do desvio-padrão de cada consumidor (raiz quadrada da somatória dos desvios-padrão ao quadrado).
- $\mu_{medET,t}$  é a demanda média agregada na ET, determinada pela soma das demandas de cada consumidor, no instante t.
- k é o fator de proporcionalidade a ser aplicado a cada desvio-padrão normalizado.

A adoção do método de cálculo das demandas de consumidores descrito acima garante que o carregamento na rede seja  $k \cdot \sigma_{ET,t}$  acima do valor médio, o que incorre em risco conhecido a priori (que depende do valor deste parâmetro k) da demanda exceder este valor.

Em geral, o desvio-padrão no trecho inicial do circuito é muito pequeno, por causa da agregação de um grande número de consumidores, o que levaria à utilização da demanda média em todas as cargas, ou seja, minimizando o risco de transgressão no carregamento e na queda de tensão.

No entanto, em trechos mais próximos das cargas, nos quais os valores das curvas de desvio-padrão delas são maiores, os riscos de utilização da média também são maiores.

Neste trabalho, propõe-se um outro método de adquirir esses valores, através do fluxo de potência probabilístico para redes de distribuição secundária (baixa tensão).

Essa modelagem é nomeada “Modelo Probabilístico para o Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição” que é detalhada no item que se segue.

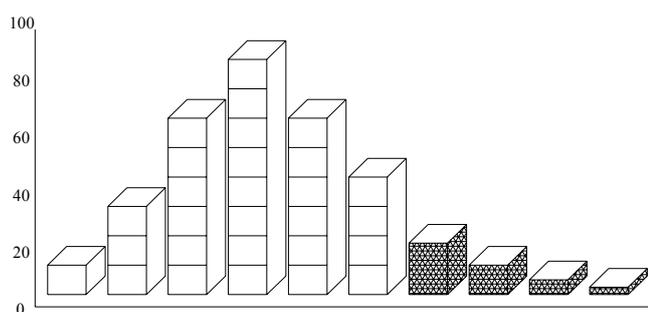
### 6.3.2 Modelagem Probabilística

Neste item, apresenta-se a metodologia probabilística para o cálculo de fluxo de potência para redes de distribuição secundárias (redes de baixa tensão).

Nesta modelagem, as demandas, para a aplicação da metodologia do fluxo de potência probabilístico passam a ser variáveis aleatórias (por terem uma distribuição de probabilidades associada).

Resulta que as variáveis dependentes (por exemplo, tensão em cada nó, queda de tensão, carregamento e perdas – total e trecho por trecho – da rede) são também aleatórias, portanto, com uma curva de distribuição de probabilidades associadas, com valores médios e de desvio-padrão.

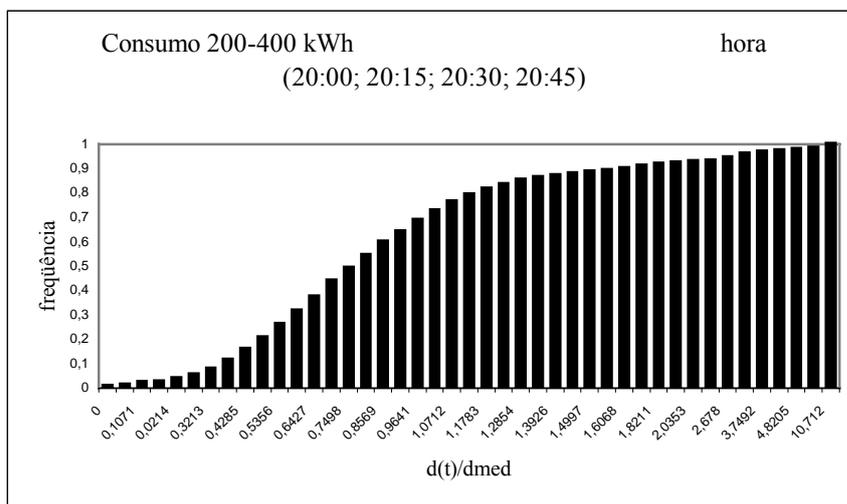
Com este enfoque, a queda de tensão em um nó qualquer, por exemplo, deve ser entendida como faixas de valores com probabilidades de ocorrência: “a queda de tensão no ponto ‘i’ varia entre 3 e 6%, com probabilidade 90%”; ou, “a probabilidade (ou risco) da queda de tensão nesta barra ser superior a 7,5% é de 1%”. Na figura 6.3, apresenta-se como exemplo, uma curva de resultados de carregamento, onde os valores que superam a tolerância são mostrados hachurados.



**Figura 6.3. Exemplo de Resultados de Carregamento.**

Para a determinação das curvas de distribuição de probabilidades das variáveis dependentes, as demandas instantâneas dos consumidores serão assumidas com as suas respectivas curvas de distribuição de probabilidades, avaliadas a partir das medições de curvas de carga diária típicas.

A figura 6.4 mostra um exemplo de curva de distribuição acumulada da relação entre a demanda e a sua média para o horário (intervalo) de ponta de carga de um consumidor residencial.



**Figura 6.4. Curva de Distribuição de Probabilidades Acumulada, para um Consumidor Residencial de Baixa Tensão.**

O procedimento de aquisição, tratamento e depuração de dados, para consumidores residenciais, descreve-se a seguir:

- Parte-se do princípio que os consumidores de um estrato devem ter um comportamento distinto dos consumidores dos demais estratos, o que faz com que deva existir uma curva de distribuição de probabilidade própria relacionada a cada um dos estratos.
- No presente trabalho, adota-se um conjunto de 2 a 5 curvas típicas de carga para cada categoria de consumo, caracterizadas por um fator de carga e pela participação no mercado de suas respectivas categorias, que será detalhado após a descrição deste procedimento.
- Tomando-se as curvas de uma mesma categoria, a soma de suas participações de mercado deve ser igual a 100%.

- d. Partindo desta base, selecionam-se todos os valores de um mesmo intervalo de tempo das curvas de carga medidas em pu da demanda média observada no período de medição de cada consumidor.
- e. De posse de todos esses dados, calcula-se a média das demandas de cada intervalo. Por exemplo, supondo que se tem a medição de 25 consumidores do mesmo estrato com 20 dias úteis, a média das demandas de cada intervalo é calculada a partir desses 500 (25x20) valores pertencentes aos consumidores em questão de um mesmo instante do dia. Isso requer que as medições sejam do mesmo intervalo de 15 minutos.
- f. Após a obtenção da média das demandas para cada intervalo, divide-se cada um dos valores da demanda de um intervalo pela média calculada, obtendo-se assim a relação da demanda de um intervalo em pu e a demanda média desse mesmo intervalo em pu. A partir dos valores mínimo e máximo da relação demanda/demanda média, calculam-se as faixas do histograma de frequência das relações calculadas.
- g. Uma vez obtido este histograma, que representa a curva de densidade de probabilidades dos valores da relação demanda/demanda média, determina-se a curva de distribuição acumulada até chegar à probabilidade 1, ou seja, 100% dos valores. Na figura 6.4 mostra-se a forma das curvas de distribuição de probabilidades para um consumidor residencial do estrato de 200 a 400 kWh mensais para o intervalo das 20:00 às 20:45.
- h. Deve-se esclarecer que, como se quer fazer uma análise com intervalos de cada hora, então se agrupam os intervalos pertencentes a uma hora, tendo assim a demanda assumida para as 20:00, sendo representada pela média dos dados de cada intervalo de 15 minutos registrados nos horários: 20:00, 20:15, 20:30 e 20:45hs. Assim sendo, a demanda para cada um dos 24 intervalos de uma hora do dia todo estariam compostas pelos respectivos valores de xx:00, xx:15, xx:30 e xx:45 hs.

Para obtenção dos conjuntos de curvas típicas de carga para cada categoria de consumo, descrito no item “b” do procedimento descrito anteriormente, utiliza-se o chamado Método das Nuvens Dinâmicas [30] e é utilizado com o objetivo de identificar grupos de indivíduos (curvas de carga) com comportamentos semelhantes dentro de uma categoria de consumo.

Assim, ao representar cada categoria por mais de uma curva típica, consegue-se curvas com desvios menores e que mapeiam os diferentes comportamentos e/ou características de carga dentro da categoria.

O Método das Nuvens Dinâmicas é um método que utiliza e encapsula um método de análise de clusters muito conhecido e utilizado, o k-Médias [30].

Basicamente, o Método das Nuvens Dinâmicas consiste em rodar o k-Médias um certo número de vezes. O objetivo do método é reduzir a dependência que o k-Médias tem com relação ao sorteio inicial.

Assim, o método inicia definindo-se k núcleos com q indivíduos cada, cujo “centro de gravidade” será tomado como referência para o cálculo das distâncias dos indivíduos aos núcleos, obtendo-se uma partição e agrupando-se os indivíduos em torno desses núcleos.

Após a classificação dos indivíduos, os núcleos são recalculados e o processo se repete até que os novos núcleos sofram uma variação em relação aos núcleos da iteração anterior menor que uma tolerância especificada. No início da experiência, o sistema de núcleos é constituído por indivíduos sorteados aleatoriamente e, após a convergência do processo, pode-se obter até k agrupamentos.

A medida de distância, que pode ser euclidiana simples, ponderada ou  $x$  ao quadrado, permite agrupar os indivíduos em torno dos núcleos mais próximos e definir as classes ou agrupamentos. No caso deste trabalho, foi utilizada a distância euclidiana.

No Método das Nuvens Dinâmicas, algumas experiências, por exemplo 5, são realizadas (utilizando o k-Médias). Ao término da realização das experiências, verifica-se se os indivíduos de cada grupo obtido na primeira experiência aparecem

no mesmo grupo nas demais experiências. Se isso ocorrer, o grupo em questão é denominado forma forte. Caso isso não ocorra, os grupos em que os indivíduos aparecem juntos são divididos de forma que os grupos resultantes tenham os mesmos indivíduos em todas as experiências. Os grupos resultantes também são denominados formas fortes.

Os agrupamentos resultantes denominados formas fortes da população são os indivíduos que ficam sempre juntos, no mesmo grupo, durante todo o processo.

Esse método identifica, dentro da população, os “grupos de indivíduos” mais semelhantes entre si.

O Método k-Médias utilizado é um método de classificação não hierárquica, pois parte de uma população inicial, procurando agrupar os indivíduos semelhantes em famílias.

Após a utilização do k-Médias e a posterior obtenção das formas fortes, o Método das Nuvens Dinâmicas utiliza um método de classificação ascendente hierárquica, no qual os agrupamentos são fundidos sucessivamente.

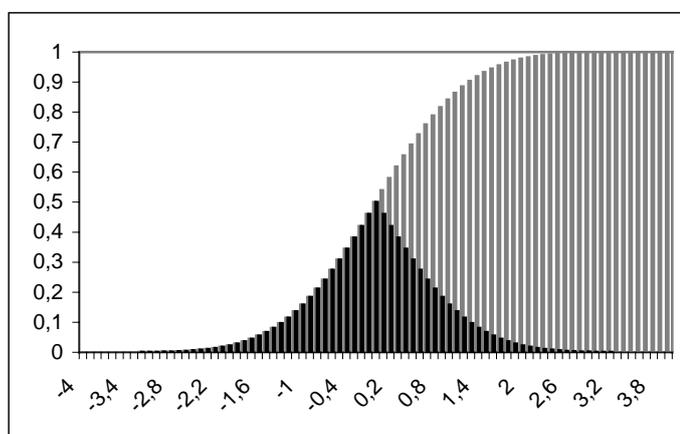
O método utilizado, denominado Método de Ward calcula as distâncias entre todos os grupos e funde os dois grupos cuja distância for menor. O processo é repetido até se obter o número de grupos especificado.

A necessidade de aplicação do Método de Ward é explicada pela grande quantidade de formas fortes obtidas após a realização dos vários experimentos com o k-Médias. O objetivo do Método de Ward é reduzir a quantidade de formas fortes obtidas. Para decidir quando parar a redução, deve-se controlar a variância inter-grupos que mede a homogeneidade (qualidade) do novo grupo obtido a partir da fusão de outros dois.

O Método das Nuvens Dinâmicas é muito utilizado nos estudos de revisão tarifária no processo de caracterização da carga. É comum obter mais de uma curva para cada categoria de consumo.

Assim, cada curva possui uma representatividade ou participação de mercado, que é obtida pelo percentual de energia total da categoria que a respectiva curva representa. Tomando-se as curvas de uma mesma categoria, a soma de suas participações de mercado deve ser igual a 100%.

Para os consumidores comerciais e industriais ligados à rede de baixa tensão foi adotada a curva de distribuição normal ou Gaussiana, devido a que este tipo de distribuição mostra-se aceitável para eles, já que os valores do desvio-padrão deles não são muito grandes.



**Figura 6.5. Curva de Distribuição de Probabilidade Normal (Gaussiana), Simples e Acumulada, para Consumidores Comerciais e Industriais de Baixa e Média Tensão.**

Antes da aplicação do Método de Monte Carlos para construção dos diversos cenários de carga é preciso realizar a seleção de uma curva típica dentre um conjunto de curvas típicas de carga para cada categoria de consumo.

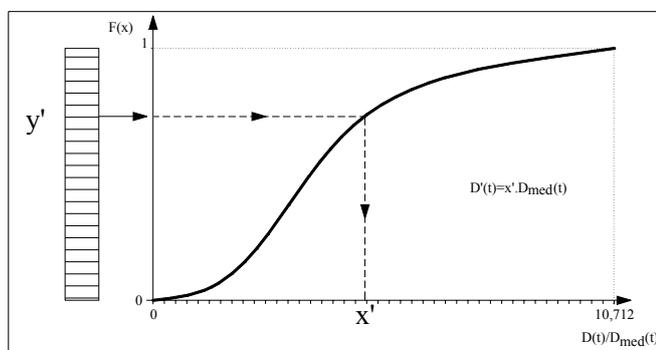
Com isto, para a seleção de uma curva típica dentre um conjunto de curvas, caracterizadas por um fator de carga e pela participação no mercado de suas respectivas categorias, realiza-se um sorteio aleatório de um número entre 0 e 1, que possibilita a seleção de uma das curvas do grupo, considerando a maior ou menor participação de cada curva no mercado da categoria, a soma de suas participações de mercado é sempre igual a 100%. Este método empregado recebe o nome de método da “roleta”.

Para cada uma das curvas típicas geradas em pu da demanda média, foi arbitrado o valor de 0,92 indutivo para o fator de potência, assumido constante para todos os 144 pontos das curvas.

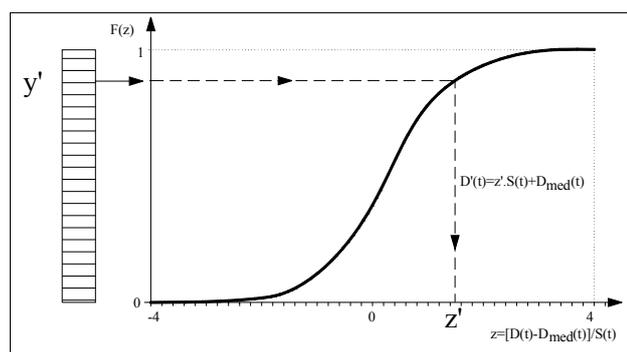
O método empregado (Monte Carlo) parte da execução de um número suficiente de ensaios, que identificam possíveis cenários de demandas diversificadas de todos os consumidores da rede (para um mesmo instante), a partir da geração de números aleatórios com distribuição de probabilidade adotada segundo a descrição feita acima.

Para simular a função distribuição de probabilidade acumulada, basta gerar um número aleatório 'y' com distribuição uniforme, no intervalo [0;1] e obter o valor sorteado da demanda.

A figura 6.6 mostra este processo para ambos os casos, ou seja, distribuição específica ou própria dos consumidores residenciais e distribuição normal para os demais consumidores.



### 6.6.a. Consumidores Residenciais



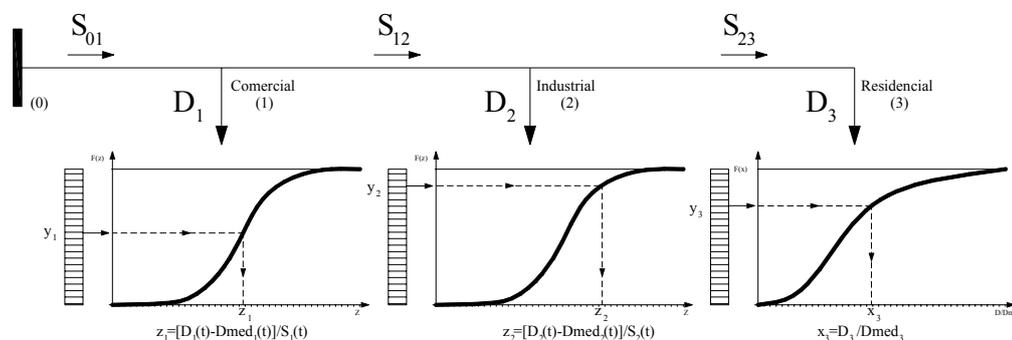
### 6.6.b. Consumidores com Distribuição Normal

#### Figura 6.6. Sorteio de Demanda Segundo Curvas de Distribuição Acumuladas.

Para melhor monitoração do método de Monte Carlo, em termos da convergência do processo, é comum dividir o número total de ensaios em grupos. Por exemplo, são realizados 10 grupos de 100 ensaios e, para cada grupo, monitoram-se os parâmetros elétricos de interesse, por meio da monitoração de suas médias e desvios-padrão acumulados.

Quando os valores médios e de desvio-padrão das variáveis param de variar (ou a variação é menor que uma tolerância pré-determinada), entre dois grupos consecutivos, existe indicação de convergência do processo.

A figura 6.7 ilustra o procedimento de um ensaio com cenário gerado aleatoriamente para o caso de uma rede com apenas três consumidores, sendo 1 comercial, 1 industrial e 1 residencial.

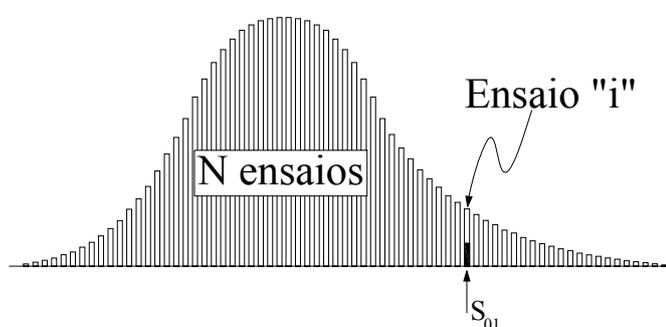


**Figura 6.7: Procedimento de um Ensaio para uma Rede com Três Consumidores.**

Conhecendo-se, a partir das curvas de carga dos consumidores, os valores médios  $\mu_{\text{méd } 1}$ ,  $\mu_{\text{méd } 2}$ ,  $\mu_{\text{méd } 3}$  e de desvio-padrão  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  a partir do sorteio de três números aleatórios  $y_1$ ,  $y_2$  e  $y_3$ , são determinadas as demandas para o ensaio  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  e  $\mu_3$ .

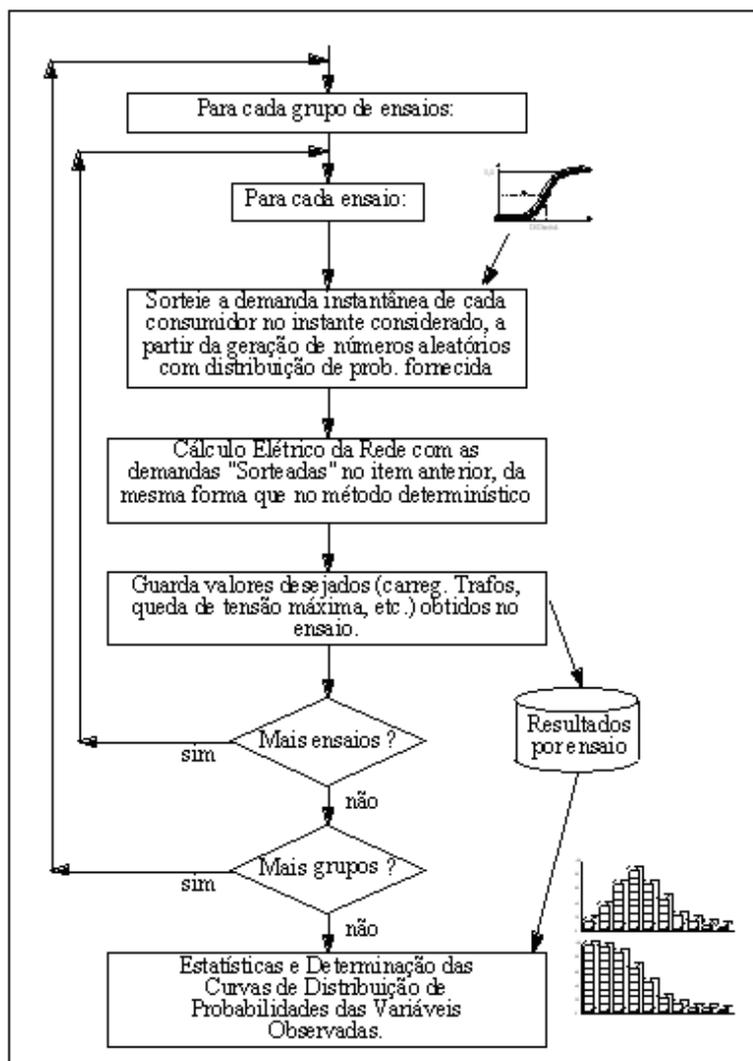
A partir de um programa de fluxo de potência, pode-se então avaliar os parâmetros elétricos (variáveis dependentes) da rede.

A figura 6.8 ilustra a “monitoração” do parâmetro carregamento total do circuito. O ensaio ‘i’ resulta em um valor de carregamento ( $S_{01}$ ) que contribui para a formação da correspondente curva de distribuição de probabilidades.



**Figura 6.8. Monitoração do Parâmetro Carregamento Total do Circuito ( $S_{01}$ ).**

Na figura 6.9 é apresentado o diagrama de blocos onde são mostrados os passos do fluxo de potência, com a modelagem probabilística.



**Figura 6.9. Diagrama de Blocos do Fluxo de Potência com a Modelagem Probabilística.**

Neste diagrama de blocos, pode-se observar, entre outras coisas, que para cada ensaio tem-se um resultado, que é salvo em uma base de dados para o seu posterior uso para fazer as estatísticas e determinar as curvas de distribuição de probabilidades de todas as variáveis dependentes.

### 6.3.3 Cálculo dos Indicadores a partir do Fluxo de Potência Probabilístico

Como foi apresentado anteriormente o fluxo de potência tem como finalidade determinar os seguintes parâmetros elétricos da rede: tensões em todos os nós da rede, correntes em todos os trechos, as quedas de tensão e as perdas técnicas da rede.

Neste trabalho, em função do elevado tempo de processamento, o aplicativo computacional desenvolvido, inicia com um a simulação de fluxo de potência determinístico, para quatro patamares de carga diferentes (caracterizando as condições de carga da manhã, tarde, noite e madrugada) para as redes de baixa tensão em estudo, e o resultado deste fluxo “disparará” ou não, a critério do usuário, o fluxo de potência probabilístico que requer um tempo de processamento maior.

A modelagem probabilística é baseada no método de Monte Carlo, que parte da execução de um número suficiente de ensaios e que identifica possíveis cenários diversificados para a representação das cargas de todos os consumidores da rede. Assim, os resultados são mais realistas no que se refere ao comportamento aleatório das cargas das redes de distribuição. Com os resultados obtidos do fluxo de potência probabilístico serão calculados os indicadores individuais de conformidade de tensão.

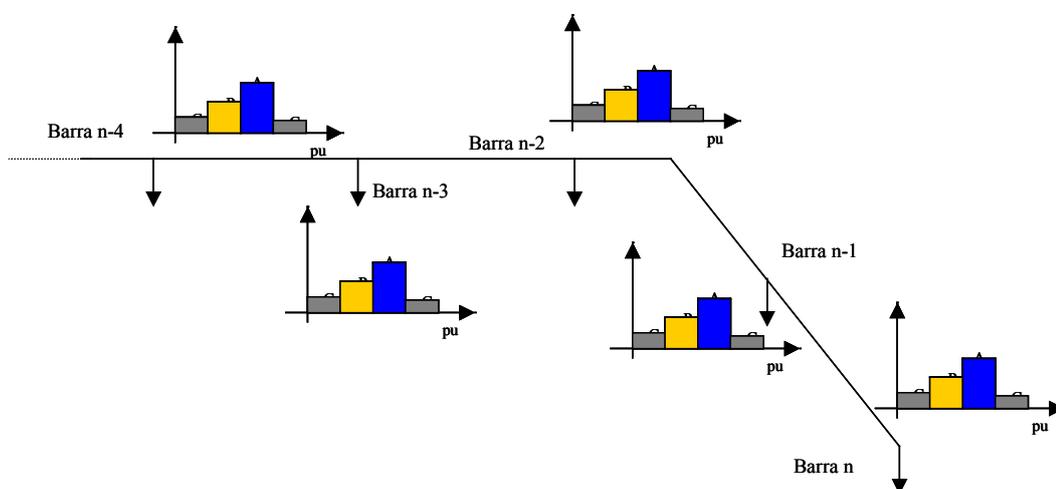
Para tanto, serão utilizadas as curvas típicas de carga em intervalos de 10 minutos (144 pontos) e, portanto, o fluxo de potência também será realizado em intervalos de 10 minutos, obtendo, assim, 144 valores de tensão para cada barra da rede em cada simulação.

As simulações serão realizadas em grupos de, por exemplo, 100 simulações, sendo realizados no mínimo 2 grupos. Durante as simulações, as tensões serão monitoradas de modo a obter as tensões médias ao término de cada grupo e, quando elas variarem menos que uma tolerância estabelecida pelo usuário o processo terá convergido e será interrompido. É importante ressaltar que, na comparação das médias, ao término do grupo  $n$ , sua média é obtida considerando-se as tensões obtidas nas simulações dos  $n$  grupos e é comparada com a média obtida nas simulações nos  $n - 1$  grupos anteriores.

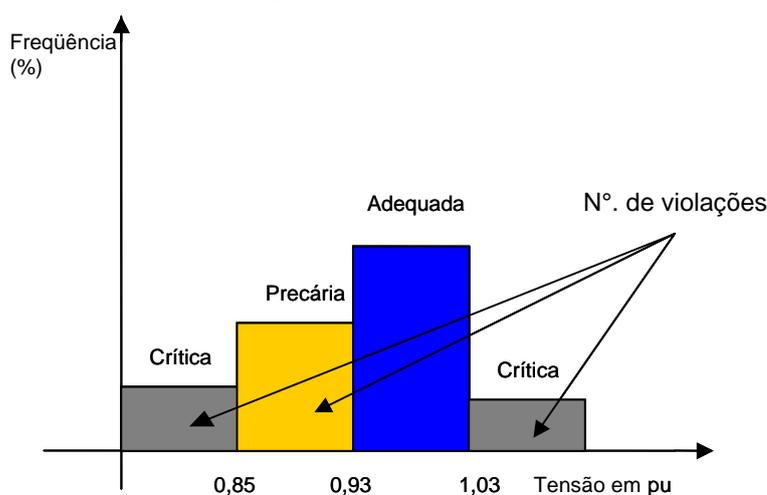
No método de Monte Carlo descrito, será feito um número determinado de simulações, com um fluxo de potência para cada um dos 144 pontos que fazem parte da curva de carga típica do dia, para cada barra do sistema. As tensões obtidas em cada fluxo de potência deste processo serão classificadas segundo as faixas de tensão

estabelecidas na Resolução ANEEL nº 505/2001, detalhada na seção 4.2 deste trabalho. O objetivo será obter um histograma de distribuição de freqüências das tensões das barras para cada poste, resumando os resultados das tensões, conforme a figura 6.10.

Esse histograma possuirá 4 barras, cada uma delas com limites superiores e inferiores de acordo com as faixas de tensão estabelecidas na resolução. Duas barras são utilizadas para a faixa de tensões críticas, uma para a faixa de tensões precárias e uma para a faixa de tensões adequadas, conforme detalhe na figura 6.11.



**Figura 6.10. Rede de distribuição com histograma para cada uma das barras.**



**Figura 6.11. Histograma com os valores de DRP e DRC probabilísticos.**

Com o total de pontos dentro de cada faixa do histograma e o total de pontos simulados para cada barra, calculam-se o DRP e o DRC. Tendo em vista que as simulações de fluxo de potência foram realizadas em intervalos de 10 minutos, conforme estabelecido na Resolução nº 505, e que o histograma apresenta exatamente o número de pontos dentro de cada faixa, os próprios percentuais dados pelo histograma para as tensões precárias e críticas são, respectivamente, o DRP e o DRC da barra. Como resultado de DRP e DRC probabilísticos de uma dada rede secundária, serão considerados os piores índices obtidos, por fase, entre o total de barras da rede.

$$\text{DRP}_{\text{probabilístico}} = \frac{\text{ntp}}{\text{nts}} \cdot 100 [\%] \quad (6.4)$$

na qual:

ntp: número de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra, com valores situados na faixa precária;

nts: número total de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra.

$$\text{DRC}_{\text{probabilístico}} = \frac{\text{ntc}}{\text{nts}} \cdot 100 [\%] \quad (6.5)$$

na qual:

ntc: número de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra, com valores situados na faixa crítica;

nts: número total de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra.

Pelo que foi apresentado até agora nota-se que a simulação de Monte Carlo demandará esforço computacional elevado. Por causa disso, o módulo computacional que foi desenvolvido executa um procedimento preliminar, denominado “filtro”, com o objetivo de determinar quais as redes secundárias que podem apresentar alguma

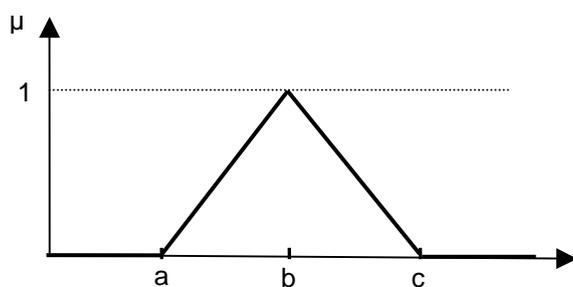
violação de tensão, a partir de simulações de fluxos de potência determinístico, em 4 patamares de carga, em todas as redes secundárias.

#### 6.4. Fluxo de Potência Fuzzy

Neste item, apresenta-se uma proposta de metodologia possibilística (Fuzzy) para o cálculo de fluxo de potência para redes de distribuição secundárias (redes de baixa tensão).

Nesta modelagem, as demandas, para a aplicação da metodologia do fluxo de potência fuzzy passam a ser variáveis fuzzy, representadas por números fuzzy.

Podendo-se utilizar para representação qualquer forma mais usual para números fuzzy encontradas na literatura: triangulares, trapezoidais e os em forma de sino. Neste trabalho será utilizada a forma triangular (T.F.N.) e trapezoidal, conforme a figura 6.12.



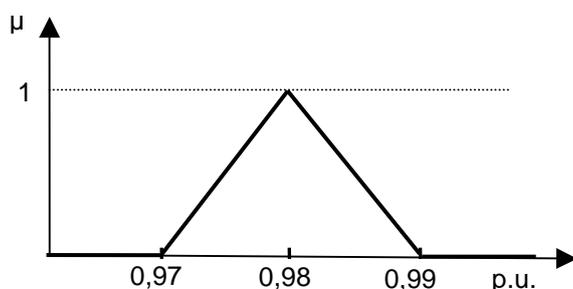
**Figura 6.12. Número fuzzy triangular**

O eixo vertical, identificado pela letra “ $\mu$ ”, representa o grau de pertinência de um elemento em relação ao conjunto, variante de 0 a 1.

### 6.4.1 Modelagem Fuzzy

Como citado anteriormente, nesta modelagem, as demandas, para a aplicação da metodologia do fluxo de potência fuzzy passam a ser variáveis fuzzy, representadas por números fuzzy. Por exemplo, a tensão  $v_i$  em um determinado nó  $i$ , passa a ser representada por um número fuzzy, identificado por  $\tilde{v}_i$ , com valores ( $v_{i\text{min}}$ ,  $v_{i\text{med}}$ ,  $v_{i\text{max}}$ ).

Para efeito de Ilustração numérica da tensão a tensão  $\tilde{v}_i$  em um determinado nó  $i$ , poderia assumir o valor (0,97,0,98,0,99) p.u. e pode-se imaginar a possibilidade apresentada na figura 6.13 a seguir.



**Figura 6.13. Ilustração da tensão a tensão  $\tilde{v}_i$  em um determinado nó  $i$**

Resulta que, as variáveis dependentes (por exemplo, tensão em cada nó, queda de tensão, carregamento e perdas – total e trecho por trecho – da rede) também passam a ser fuzzy, portanto, com um valor mínimo, médio e máximo definidos. Com este enfoque, a queda de tensão em um nó qualquer, por exemplo, deve ser entendida como um número fuzzy: “a queda de tensão no ponto ‘i’ possui um valor mínimo, médio e máximo esperado”.

Para a determinação dos resultados fuzzy variáveis dependentes, as demandas instantâneas dos consumidores serão assumidas a partir das suas respectivas curvas médias, avaliadas a partir das medições de curvas de carga diária típicas.

Logo, as cargas foram modeladas por T.F.N.'s, com um valor fuzzy de demanda para cada intervalo de 10 minutos, ou seja, 144 valores de demanda fuzzy para cada ponto de carga, considerando-se uma variação  $\pm k\%$  em torno do valor mais possível, que neste trabalho foi adotado como sendo o valor médio obtido da curva típica de carga de cada consumidor, que foi construída a partir do consumo médio mensal registrado para o consumidor aplicado a curva típica do consumidor em função da classe (residencial, comercial, industrial e outros) e faixa de consumo correspondente.

De certa forma, a escolha de diferentes valores de  $k$  para definição nos valores mínimo e máximo da demanda fuzzy pode restringir o espaço de possibilidades de valores, ao contrário da abordagem probabilística em que todas as possibilidades de ocorrência são testadas com maior ou menor frequência dependente da distribuição de probabilidade associada à carga simulada. Com isto, deve-se avaliar de forma criteriosa os resultados comparativos entre métodos probabilístico e fuzzy, quando a escolha dos valores de  $k$  abranger uma faixa de valores menor do que a faixa associada a distribuição de probabilidade da curva de carga considerada no método probabilístico.

Isto significa representar uma carga ligada ao ponto  $i$ , para uma determinada fase  $f$ , para um intervalo de tempo  $t$ , dentre os 144 valores possíveis, de valores de demanda ativa e reativa como:

$$\tilde{P}_{i,f,t} = ((1-k)P_{med}, P_{med}, (1+k)P_{med}) \text{ e } \tilde{Q}_{i,f,t} = ((1-k)Q_{med}, Q_{med}, (1+k)Q_{med}) \quad (6.6)$$

O modelo computacional desenvolvido para suportar as diversas simulações considera a simulação de uma rede completa, desde a barra com tensão controlada mais próxima, que em geral, nos sistemas de distribuição de energia elétrica em média e baixa tensão, corresponde a barra (terminal) secundária em média tensão dos transformadores de força das estações de transformação da distribuição (ETD's), de onde são ligados os diversos circuitos de média tensão.

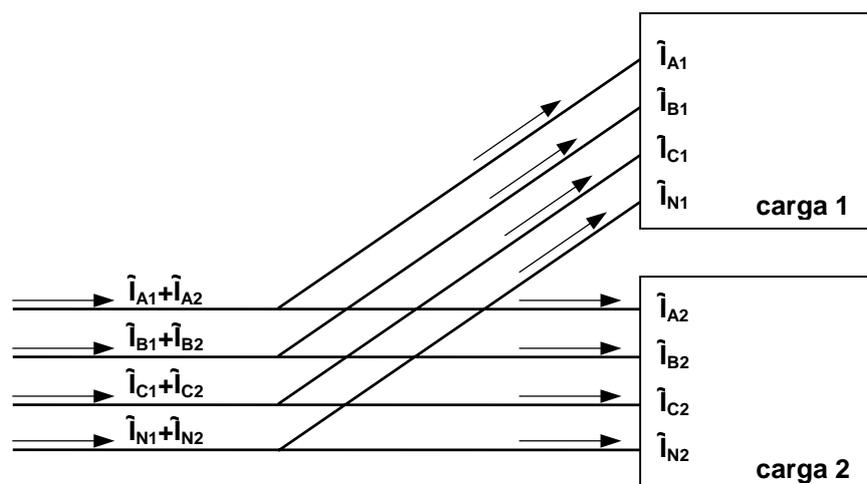
O modelo computacional desenvolvido utiliza base de dados de redes secundárias do software de análise de desempenho elétrico de redes de distribuição e planejamento interPlan<sup>1</sup>, que permite uma simulação trifásica da rede, de forma completa, oferecendo ao módulo de fluxo de potência fuzzy, valores de tensões secundárias para ET a ser simulada, para os 144 patamares de carga. Com isto, a partir do valor obtido de modo determinístico para a tensão secundária  $v_{i,f}$ , para um ponto  $i$  qualquer, para cada fase  $f$ , no lado baixa tensão de um transformador de distribuição, constrói-se o equivalente fuzzy de tensão no ponto para a primeira iteração da simulação do fluxo de carga.

Para este cálculo inicial, assume-se que as tensões nos diversos pontos da rede possuem o mesmo valor, que para um ponto  $i$  qualquer, para uma das fases  $f$ , possui o seguinte formato:

$$\tilde{V}_{i,f} = ((1 - k)v_{i,f}, v_{i,f}, (1 + k)v_{i,f}) \quad (6.7)$$

Com isto, conhecidos os valores de demanda ativa e reativa  $\tilde{P}_{i,f,t}$  e  $\tilde{Q}_{i,f,t}$ , de um ponto  $i$  da rede de baixa tensão, para uma determinada fase  $f$ , para um intervalo de tempo  $t$ , pode-se especificar as correntes nas barras de carga como  $\tilde{i}_{i,f,t} = \tilde{i}_{i,p} - j\tilde{i}_{i,q}$ .

Logo tem-se, de forma análoga ao fluxo de potência determinístico, o cálculo das correntes nos trechos obtidas pela soma das correntes de carga das barras a jusante do trecho com a corrente da carga da barra terminal do trecho, conforme ilustra a figura 6.14.



**Figura 6.14.** Ilustração da obtenção da corrente fuzzy em um trecho genérico.

Por conseqüência, as quedas de tensão nos trechos são calculadas a partir do produto da corrente fuzzy do trecho pela impedância série do trecho. Adotando-se um trecho genérico, que possua os terminais identificados por **p** e **q** respectivamente, a queda de tensão fuzzy é obtida por:

$$\Delta \tilde{v}_{r,pq} - j \Delta \tilde{v}_{i,pq} = (r_{pq} + jx_{pq}) \cdot (\tilde{i}_{i,p} - j \tilde{i}_{i,q}). \quad (6.9)$$

Diferentemente do método probabilístico, no método fuzzy o critério de “convergência” ou de “parada” não se justifica, enquanto no método probabilístico após sucessivas simulações de fluxos de carga realiza-se comparação entre a diferença em p.u. do valor de uma grandeza elétrica calculada entre dois cálculos consecutivos e um valor pré-definido de referência, no método fuzzy realiza-se uma única simulação de um fluxo de carga para cada intervalo de 10 minutos, conforme previamente estabelecido para este trabalho. Ou seja, o método fuzzy apresenta um desempenho em termos de tempo de processamento, muito melhor que a abordagem probabilística.

### 6.4.2 Cálculo dos Indicadores a partir do Fluxo de Potência Fuzzy

Obtidos os resultados das variáveis dependentes a partir do fluxo de potência fuzzy, com destaque para a tensão em cada nó da rede secundária em baixa tensão, faz-se necessário estabelecerem-se mecanismos para avaliar os resultados em comparação aos limites previstos na resolução específica que trata da qualidade de energia elétrica quanto a conformidade de tensão em regime permanente.

Esta avaliação pode ser realizada desde uma ação de comparação de tensões fuzzy com um conjunto de outros números representando as faixas de classificação de tensão (adequado, precário e crítico) até o estabelecimento de um indicador fuzzy para DRP e DRC. Nesta seção serão apresentadas 3 propostas de métodos de avaliação fuzzy dos resultados, que foram denominados da seguinte forma:

1. Comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy;
2. Comparação de áreas entre tensões fuzzy;
3. Indicadores DRP/DRC fuzzy.

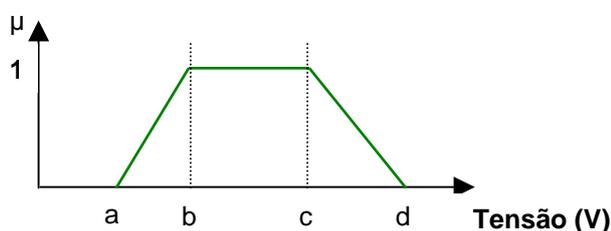
Sabe-se que, assim como em qualquer processo de comparação de valores faz-se necessário criar uma referência que permitirá estabelecerem-se as regras de comparação, definindo quais valores, por exemplo, estão acima ou abaixo de um determinado limite de valor para uma grandeza em observação.

Conforme visto no item 4.2. (Classificação da tensão de atendimento) existem para cada nível de tensão, faixas de valores a que são atribuídas classificações quanto às condições adequadas (faixa adequada) ou de não-conformidade do produto, sendo que a condição de não-conformidade é ainda sub-dividida em duas classificações relacionadas a severidade da não-conformidade (faixa precária e faixa crítica).

Logo, foi estabelecido um conjunto de números fuzzy, sendo que cada um destes números representa uma das faixas de classificação prevista na resolução ANEEL n.º 505/2001 (adequada, precária inferior, precária superior, crítica inferior e crítica superior).

Este conjunto fuzzy está inserido em um universo de discurso que compreende deste o valor de 0 volts até um valor de tensão superior (customizável pelo usuário), que em geral, para estudos envolvendo tensões monofásicas, está limitado ao valor de 200 volts, suficiente para este tipo de análise.

Nesta proposta, a faixa de classificação é representada por um número fuzzy de função trapezoidal, exemplo figura 6.15, com os valores inferiores e superiores da função sendo estabelecidos de forma aderente aos valores previsto na resolução.



**Figura 6.15. Ilustração número fuzzy de função trapezoidal.**

Uma possibilidade numérica da montagem desta faixa de classificação pode ser verificada no exemplo que está na tabela 6.1 a seguir.

**Tabela 6.1. Ilustração numérica para os números fuzzy que indicam as faixas de classificação prevista na resolução ANEEL n.º 505/2001.**

Número	Valor “a”	Valor “b”	Valor “c”	Valor “d”
Adequado	114	116	133	135
Precário inferior	107	109	115	117
Precário Superior	134	136	140	142
Crítico inferior	0	0	106	108
Crítico Superior	141	143	200	200

A definição destas faixas não seguiu nenhuma informação técnica ou resultado de medições prévias, foi feita uma escolha de valores para os extremos dos números trapezoidais observando-se os limites definidos pela resolução ANEEL n.º 505/2001, tendo como proposta criar uma possibilidade de pertinência de um valor de tensão em mais de uma faixa de classificação, seja adequada, precária ou crítica. No entanto após sucessivas simulações as escolhas apresentadas na tabela 6.1 revelaram-se adequadas para a avaliação da metodologia proposta e comparação entre os métodos, como poderá ser verificado no capítulo 7.

#### 6.4.2.1 Comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy

Este primeiro método proposto baseia-se no operador MAX-MIN da teoria de operação de conjuntos fuzzy, que consiste basicamente na comparação entre cada tensão fuzzy resultante da simulação, de cada fase, de cada barra, com os números que identificam os limites adequado, precário (superior e inferior) e crítico (superior e inferior).

O processo consiste em verificar o grau de pertinência de uma tensão calculada com as faixas de classificação, representadas por números fuzzy trapezoidais, a partir da aplicação do operador MAX-MIN que possibilita encontrar o grau de pertinência do número fuzzy que representa a tensão calculada com as faixas pré-definidas, classificando-o assim, como adequado, precário ou crítico. Para exemplificar, observa-se na figura 6.16 a seguir, que um resultado “ $v_1$ ” pertence tanto a faixa “precária inferior” com pertinência de grau “ $x$ ” quanto a faixa “adequada” com pertinência de grau “ $y$ ”, e sendo  $y > x$ , a tensão o número “ $v_1$ ” é classificada como adequada.

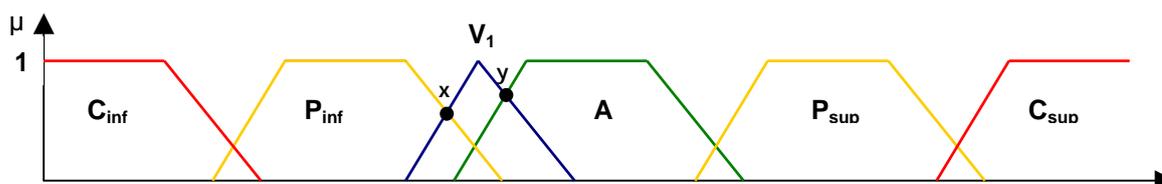


Figura 6.16. Ilustração de avaliação a partir da aplicação do operador MAX-MIN

Desta forma, apuram-se os indicadores de DRP e DRC fuzzy, no método que utiliza o operador MAX-MIN entre tensões fuzzy, da seguinte forma:

$$\text{DRP}_{\text{fuzzy}} = \frac{\text{ntpp}}{\text{nts}} \cdot 100 [\%] \quad (6.10)$$

na qual:

ntpp: número de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra, classificadas como tensões precárias em função de maior grau de pertinência associado a faixa precária;

nts: número total de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra.

$$\text{DRC}_{\text{fuzzy}} = \frac{\text{ntpc}}{\text{nts}} \cdot 100 [\%] \quad (6.11)$$

na qual:

ntpc: número de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra, classificadas como tensões críticas em função de maior grau de pertinência associado a faixa crítica;

nts: número total de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra.

É evidente a constatação de que este método possui uma limitação, pois ignora de forma “contudente” um grau de pertinência numericamente expressivo com relação a uma das faixas em situações quando os graus de pertinência forem de valores numéricos próximos e que leva a considerar o resultado de tensão classificado em uma das faixas mesmo ocupando área de tamanho semelhante, porém inferior, em outra faixa, e isto passa a ser relevante quanto busca-se conceber uma metodologia para avaliação e minimização de riscos de transgressão de tensão.

Para tanto, foi desenvolvido e inserido um artifício matemático nas regras de classificação, denominado de “penalidade” (p), de valor adimensional, que varia entre 0 e 1. A aplicação ocorre da seguintes forma, considere  $\mu_{va}$  como sendo o grau

de pertinência entre o número “v” e a faixa “a”, assim como, considere  $\mu_{vb}$  como sendo o grau de pertinência entre o número “v” e a faixa “b”, e ainda, assumindo uma condição desejada de que na proximidade numérica de  $\mu_{va}$  e  $\mu_{vb}$  a classificação seja sempre levada para indicação de v pertença a faixa “a”, tem-se:

$$v \in \text{faixa "a"}, \text{ quando } (\mu_{vb} - \mu_{va}) \leq p \quad (6.12)$$

Desta forma, em uma situação exemplo, quando o valor de  $\mu_{va}$  for 0,4 e  $\mu_{vb}$  for 0,6, estando pré-definido para “p” o valor de 0,2, a tensão “v” será classificada na faixa “a”, mesmo  $\mu_{vb}$  possuir um grau de pertinência maior que  $\mu_{va}$ .

#### 6.4.2.2 Comparação de áreas entre tensões fuzzy

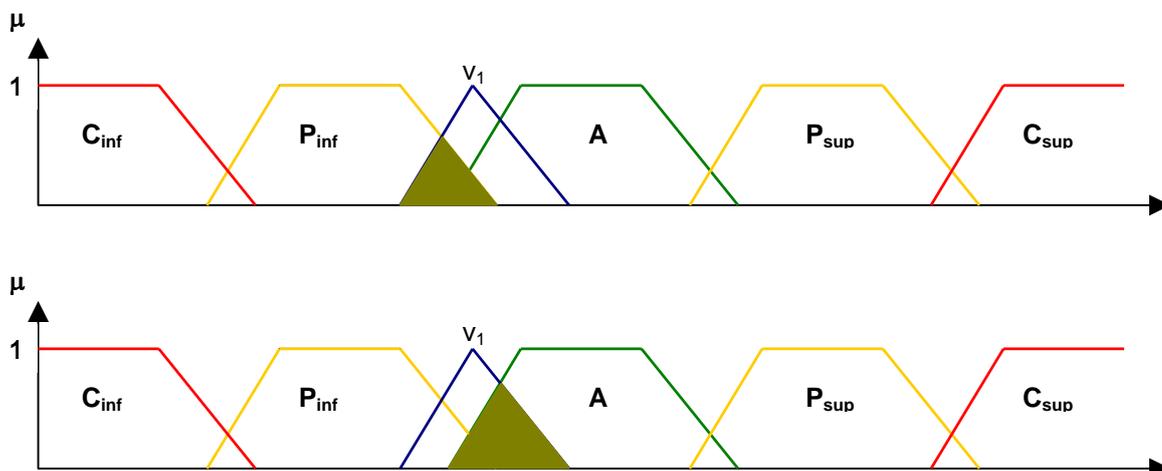
Este segundo método proposto baseia-se no cálculo da intersecção entre o número fuzzy das tensões simuladas e os números que representam as faixas de classificação das tensões, logo, consiste basicamente em comparar os resultados destas intersecções, considerando cada tensão fuzzy resultante da simulação, de cada fase, de cada barra.

O processo consiste em calcular a área resultante da intersecção da intersecção entre a área interna à forma geométrica da tensão fuzzy simulada com as áreas internas às formas geométricas dos números fuzzy trapezoidais que representam as faixas de classificação. O cálculo da área de intersecção possibilita classificar o número fuzzy que representa a tensão calculada como pertencente a uma das faixas pré-definidas, classificando-o assim, como adequado, precário ou crítico.

Para exemplificar, observa-se na figura 6.17, que um resultado “v<sub>1</sub>” pertence tanto a faixa “precária inferior” quanto a faixa “adequada”, porém a intersecção de “v<sub>1</sub>” com as faixas resultam em áreas de diferentes tamanhos.

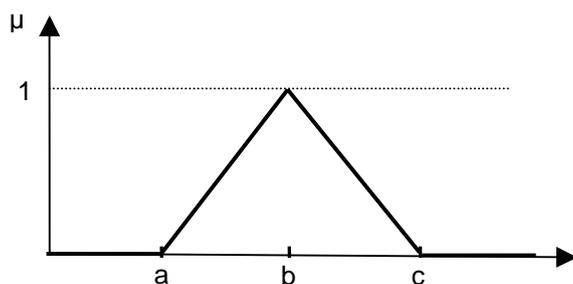
Neste caso de ilustração, a intersecção de “v<sub>1</sub>” com a faixa “precária inferior” resulta na área A<sub>1</sub> e a intersecção de “v<sub>1</sub>” com a faixa “adequada” resulta na área A<sub>2</sub>, sendo

$A_2 > A_1$ , a tensão “ $v_1$ ” é classificada como estando na faixa adequada, e conseqüentemente, como tensão adequada.



**Figura 6.17. Ilustração de avaliação da comparação de áreas entre tensões fuzzy**

Calcula-se a área de um número fuzzy triangular pelo produto da altura do triângulo pelo tamanho da base, que considerando a figura 6.18 a seguir, teremos área = (altura x base)/2, ou ainda assumindo que a altura do triângulo será sempre igual a 1, área = (c-a)/2.



**Figura 6.18. Número fuzzy triangular**

Desta forma, apuram-se os indicadores de DRP e DRC fuzzy, no método que utiliza a comparação de áreas entre tensões fuzzy, da seguinte forma:

$$\text{DRP}_{\text{fuzzy}} = \frac{\text{ntap}}{\text{nts}} \cdot 100 [\%] \quad (6.17)$$

na qual:

ntap: número de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra, classificadas como tensões precárias em função de uma maior área resultante entre a intersecção da área tensão simulada com a área do número que representa a faixa precária;

nts: número total de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra.

$$\text{DRC}_{\text{fuzzy}} = \frac{\text{ntac}}{\text{nts}} \cdot 100 [\%] \quad (6.18)$$

na qual:

ntac: número de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra, classificadas como tensões críticas em função de uma maior área resultante entre a intersecção da área tensão simulada com a área do número que representa a faixa crítica;

nts: número total de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra.

#### 6.4.2.3 Indicadores DRP/DRC fuzzy

Este terceiro método proposto baseia-se na montagem de indicadores fuzzy referentes ao DRP e DRC de cada fase para cada barra da rede de distribuição secundária e na defuzzificação destes números para obtenção de um valor percentual (%) para cada um destes indicadores.

Sabendo-se que os valores de tensão resultantes das simulações são representados por números fuzzy triangulares e que são descritos pelos valores mínimos, médios e máximos, como por exemplo, na figura a seguir 6.20, em que o resultado 01 é formado por  $(a_1, b_1, c_1)$ , inicia-se o processo calculando-se valores de DRP e DRC

para cada uma das 3 posições que definem um número fuzzy triangular, seja esta a posição mínima, média ou máxima, para cada fase, de cada barra simulada, conforme indicado nas expressões 6.15 e 6.16 respectivamente, com o objetivo de formatar os indicadores de DRP e DRC fuzzy.

$$\text{DRP}_{\text{posição}} = \frac{\text{ntp}}{\text{nts}} \cdot 100 [\%] \quad (6.15)$$

na qual:

posição: mínimo, médio ou máximo

ntp: número de tensões resultantes de simulação com valores situados na faixa precária, de uma determinada posição, de uma fase, de uma barra;

nts: número total de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra.

$$\text{DRC}_{\text{posição}} = \frac{\text{ntc}}{\text{nts}} \cdot 100 [\%] \quad (6.16)$$

na qual:

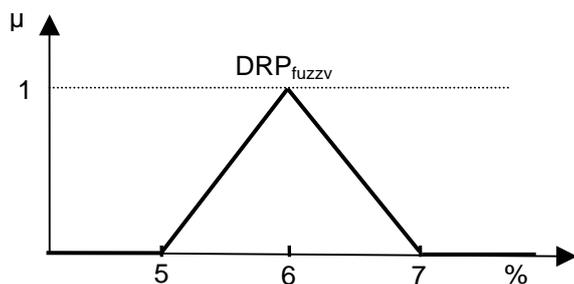
posição: mínimo, médio ou máximo

ntc: número de tensões resultantes de simulação com valores situados na faixa crítica, de uma determinada posição, de uma fase, de uma barra;

nts: número total de tensões resultantes de simulação, de uma fase, de uma barra.

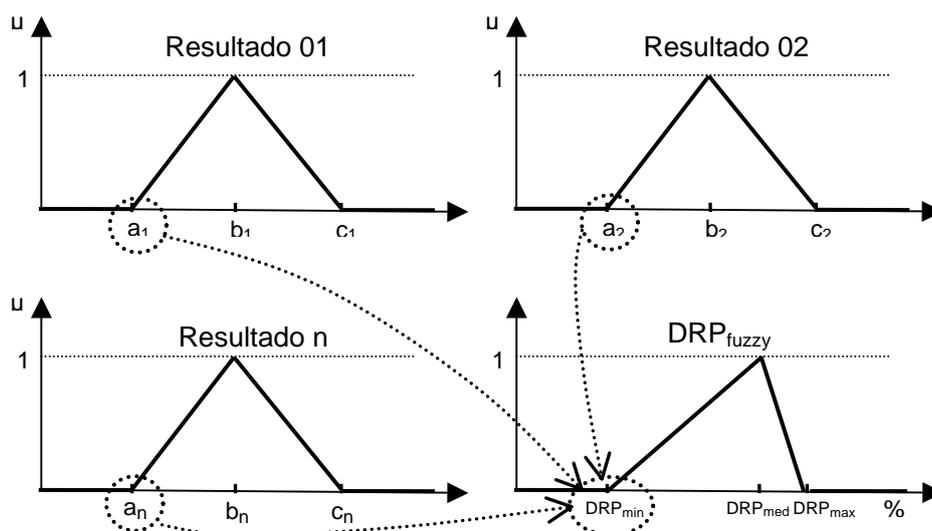
O resultado esperado para este procedimento é que se tenha para cada fase e cada barra, indicadores DRP e DRC fuzzy, descritos por um número fuzzy com valores mínimos, médios e máximos, conseqüentemente com diferentes graus de pertinência.

A título de ilustração a figura 6.19 a seguir, mostra um resultado numérico de um valor de DRP fuzzy para uma fase e barra qualquer.



**Figura 6.19.** Exemplo de resultado numérico de um valor de DRP fuzzy.

A figura 6.20 a seguir, ilustra o processo de composição dos indicadores DRP e DRC fuzzy, a partir da formação do valor mínimo esperado para um DRP fuzzy, de uma fase e barra qualquer.

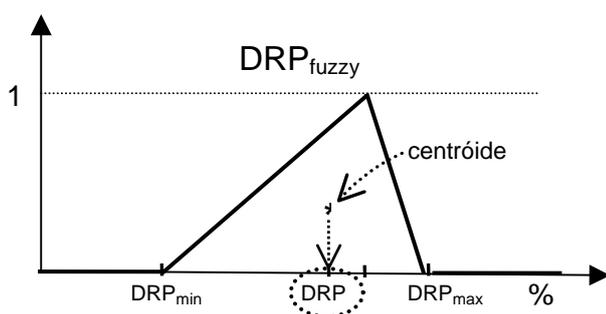


**Figura 6.20.** Exemplo do processo de composição dos indicadores DRP e DRC fuzzy.

O processo encerra-se com a defuzzyficação dos indicadores DRP e DRC fuzzy encontrando-se um valor percentual indicativo de DRP e DRC de cada fase e de cada barra.

O método de defuzzyficação escolhido neste trabalho é o da centróide, que prevê a determinação do valor inteiro para os indicadores pela projeção no eixo de percentuais do valor referente a centróide da área formada pela figura equivalente aos indicadores DRP e DRC fuzzy.

A figura 6.21 a seguir, ilustra a defuzzyficação de um indicador de DRP fuzzy genérico.



**Figura 6.21. Exemplo de defuzzyficação de um indicador de DRP fuzzy genérico.**

A próxima etapa do trabalho consiste em aplicar as metodologias probabilística e possibilística (fuzzy) em simulações de redes reais, comparando-se os resultados entre métodos e com valores medidos.

## 7. APLICAÇÃO DOS MODELOS EM CASOS REAIS

### 7.1. Visão Geral

A melhor forma avaliação de resultados consiste na aplicação dos modelos desenvolvidos em redes reais, comparando-se os resultados obtidos a valores reais de medição.

Para este trabalho, os modelos desenvolvidos utilizando métodos probabilísticos e fuzzy para avaliação dos riscos das violações de conformidade de tensão em sistemas de distribuição foram testados em 07 (sete) redes de baixa tensão, localizadas em pontos diversos da cidade de Campo Grande/M.S., de propriedade da Empresa Energética de Mato Grosso do Sul – ENERSUL, que por sua vez, pertence ao grupo Energias do Brasil.

Estas 07 (sete) redes de baixa tensão operam em tensão secundária nominal de 220/127 volts, supridas por transformadores de distribuição com tensão primária de 13,8 kV, sendo que os dados físicos e elétricos básicos destas redes estão detalhados na tabela 7.1.

**Tabela 7.1. Dados básicos do circuitos de baixa tensão analisados.**

Nº. Identificação	Subestação	Circuito Primário	Potência (kVA)	Extensão (m)	Bitola principal
14791	CGA	CGA 01	45	850	1/0 AWG CA
24702	CGA	CGA 01	30	178	1/0 AWG CA
28257	CGA	CGA 01	112,5	880	4/0 AWG CA
8336	CGA	CGA 10	112,5	1.018	4/0 AWG CA
7122	CGB	CGB 01	45	1.095	1/0 AWG CA
17917	CGL	CGL 03	45	625	1/0 AWG CA
6345	CGL	CGL 04	45	923	1/0 AWG CA

Sabe-se ainda que, para obter-se eficácia nos resultados, alguns fatores devem ser respeitados independente do método em aplicação, que são: adequada representação de hábitos de consumo (curvas de cargas), fidelidade do cadastro elétrico das redes e fidelidade do cadastro elétrico das cargas ligadas, seja no valor de consumo atribuído a cada ponto de carga, como para a posição das cargas na rede elétrica.

Desta forma, sabendo-se da dificuldade de encontrarem-se curvas de carga e dados de cadastro de redes e cargas com a qualidade que exigem estas análises, foram adotadas medidas para que o resultado fuzzy de tensão (valor médio) se aproximasse do valor resultante de medições em campo.

Estas medidas foram adotadas, pois os resultados esperados com a aplicação das técnicas propostas servirão para determinar o risco de transgressão dos limites estabelecidos para conformidade de tensão em sistemas de distribuição pelo órgão regulador, e não a obtenção de resultados de desempenho, como a curva de tensão em ponto determinado da rede de baixa tensão.

Para tanto, os valores de “despacho” em média tensão foram ajustados de tal forma a resultar em um perfil de tensão (valor médio do resultado fuzzy) nas cargas próximo ao resultado das medições. Isto significa que, os valores das tensões iniciais nos barramentos das subestações que conectam as redes de distribuição em média tensão foram ajustados no aplicativo de “load flow” para cada patamar de carga com o propósito de obterem uma curva de valores das tensões de simulação mais próxima possível da curva de tensão obtida na medição em campo.

Estas medições foram realizadas em função de reclamações de tensão de consumidores, executadas segundo exigências do regulador, respeitando o período de medição, integralização, precisão, entre outros parâmetros conforme estabelecido na resolução n.º 505/2001/ANEEL.

Em caráter geral, as medições eletrônicas de tensão foram realizadas por 168 horas, com integralização de 10 minutos, no ponto de entrega de energia elétrica dos consumidores reclamantes.

A implementação computacional das metodologias propostas utilizam como base o software de análise de desempenho elétrico de redes de distribuição e planejamento - interPlan, desenvolvido pela empresa Daimon-interplan, que é uma empresa especializada no desenvolvimento de software e estudos técnicos para Empresas do Setor Elétrico.

A modelagem probabilística, conforme descrita no item 6.2.1, foi integrada ao software interPlan, via módulo de cálculo específico com execução a partir do software, como resultado do desenvolvimento de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento da Empresa Energética de Mato Grosso do Sul – ENERSUL em parceria com o Enerq que está diretamente ligado ao Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP , sob o título “Desenvolvimento de modelos e ferramenta computacional para avaliação dos riscos e minimização das violações de conformidade de tensão em sistemas de distribuição”, integrante do ciclo de P&D 2002/2003.

A modelagem fuzzy foi implementada em duas etapas, separadas em cálculo de grandezas elétricas fuzzy para redes de distribuição de baixa tensão e tratamento dos resultados para obtenção de indicadores de conformidade de tensão.

A primeira que consistiu na montagem do fluxo de carga fuzzy, foi desenvolvida em linguagem C++ Builder Interprise, sendo utilizadas as mesmas bases de dados de redes utilizadas no pelo software interPlan nas simulações probabilísticas, garantindo assim a possibilidade de comparação de resultados.

Na segunda etapa que consistiu no cálculo envolvendo os resultados fuzzy para obtenção de indicadores de conformidade de tensão, considerando os métodos propostos no capítulo 6, foi desenvolvida rotina de cálculo para simulação no software Matlab, conhecido ambiente para desenvolvimento de simulações matemáticas utilizado por diversos pesquisadores em todo mundo.

## 7.2. Resultados alcançados

As simulações foram feitas em 07 (sete) redes de baixa tensão, localizadas em pontos diversos da cidade de Campo Grande/M.S, sendo avaliados resultados de DRP e DRC probabilísticos e fuzzy conforme métodos detalhados no capítulo 6 deste trabalho. As simulações foram feitas para os seguintes métodos e parâmetros:

- Probabilístico:

Grupos de 100 simulações, simulação de no mínimo 2 (dois) grupos, com tensões monitoradas de modo a obter as tensões médias ao término de cada grupo e, tolerância estabelecida para valores menores ou iguais 0,01 pu das tensões médias simuladas de cada grupo.

- Fuzzy - Comparação de áreas entre tensões fuzzy (FUZZY ÁREA):

Nas simulações são atribuídas tensões fuzzy no secundário do transformador de distribuição, utilizando uma representação triangular de valor  $(0,995.V_s; V_s; 1,005.V_s)$ , sendo  $V_s$  o resultado obtido na simulação determinística de fluxo de carga tradicional para cada intervalo de simulação. Foram realizadas simulações considerando valores de potência nos pontos de carga variando em torno do valor médio obtido da curva típica de cada consumidor, utilizando número fuzzy triangular com os seguintes valores:  $(0,8.P_m; P_m; 1,2.P_m)$ ;  $(0,6.P_m; P_m; 1,6.P_m)$ ;  $(0,5.P_m; P_m; 2,0.P_m)$ ; sendo  $P_m$  o resultado encontrado de potência utilizando a curva de carga de cada consumidor para cada intervalo.

- Fuzzy - Comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN):

Nas simulações são atribuídas tensões fuzzy no secundário do transformador de distribuição, utilizando uma representação triangular de valor  $(0,995.V_s; V_s; 1,005.V_s)$ , sendo  $V_s$  o resultado obtido na simulação determinística de fluxo de carga tradicional para cada intervalo de simulação. Foram realizadas simulações considerando valores de potência nos pontos de carga variando em torno do valor médio obtido da curva típica de cada consumidor, utilizando número fuzzy

triangular com os seguintes valores:  $(0,8.P_m; P_m; 1,2. P_m)$ ;  $(0,6. P_m; P_m; 1,6. P_m)$ ;  $(0,5. P_m; P_m; 2,0. P_m)$ ; sendo  $P_m$  o resultado encontrado de potência utilizando a curva de carga de cada consumidor para cada intervalo. Para variação de potência testada foram utilizadas 3 opções de valores da variável “penalidade”, conforme explicada no capítulo 6, com valores: 0,3, 0,4 e 0,5.

- Fuzzy - Indicadores DRP/DRC fuzzy (FUZZY DRP/DRC):

Nas simulações são atribuídas tensões fuzzy no secundário do transformador de distribuição, utilizando uma representação triangular de valor  $(0,995.V_s; V_s; 1,005.V_s)$ , sendo  $V_s$  o resultado obtido na simulação determinística de fluxo de carga tradicional para cada intervalo de simulação. Foram realizadas simulações considerando valores de potência nos pontos de carga variando em torno do valor médio obtido da curva típica de cada consumidor, utilizando número fuzzy triangular com os seguintes valores:  $(0,8.P_m; P_m; 1,2. P_m)$ ;  $(0,6. P_m; P_m; 1,6. P_m)$ ;  $(0,5. P_m; P_m; 2,0. P_m)$ ; sendo  $P_m$  o resultado encontrado de potência utilizando a curva de carga de cada consumidor para cada intervalo.

As funções fuzzy trapezoidais que definem as faixas de classificação de tensão, conforme previsto na resolução n.º 505/ANEEL/2001, foram criadas com os seguintes limites (valores em volts):

Adequado = [113 116 133 136];

Precário Inferior = [106 109 112 115];

Precário Superior = [134 137 140 143];

Crítico Inferior = [0 0 105 108];

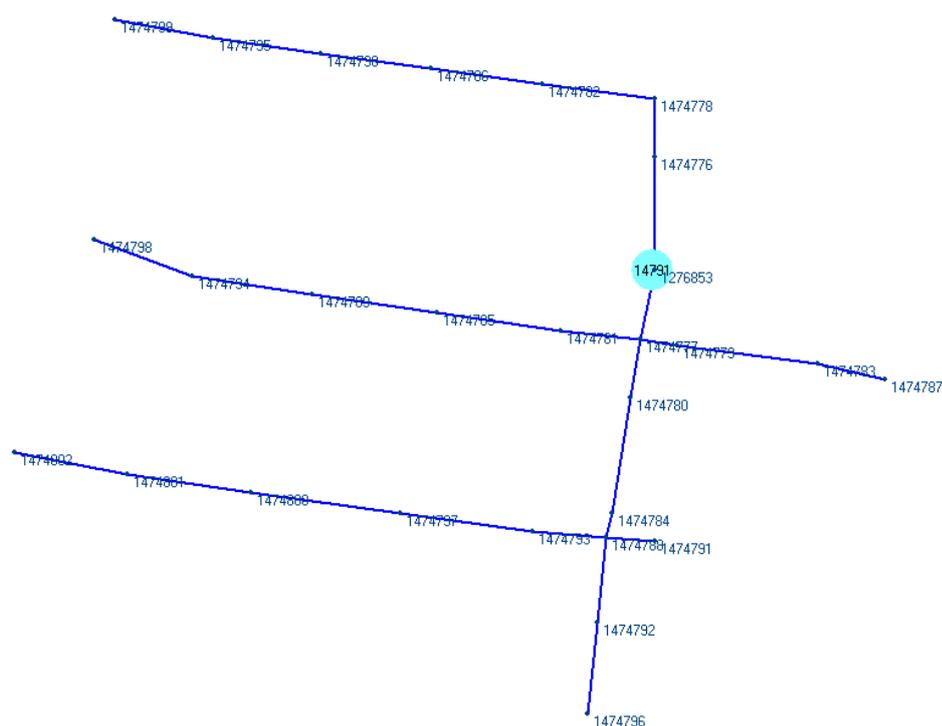
Crítico Superior = [141 144 200 200];

Com relação aos modelos de carga adotados nas simulações de fluxo de potência, a combinação percentual de cada modelo, foi a seguinte: 40% potência constante e 60% corrente constante.

Por fim, destaca-se a informação descrita no item 6.3.1, que a escolha de diferentes valores de  $k$  para definição nos valores mínimo e máximo da demanda fuzzy pode restringir o espaço de possibilidades de valores, ao contrário da abordagem probabilística em que todas as possibilidades de ocorrência são testadas com maior ou menor frequência dependente da distribuição de probabilidade associada à carga simulada. Com isto, deve-se avaliar de forma criteriosa os resultados comparativos entre métodos probabilístico e fuzzy, quando a escolha dos valores de  $k$  abranger uma faixa de valores menor do que a faixa associada a distribuição de probabilidade da curva de carga considerada no método probabilístico.

### 7.2.1. Estação Transformadora n. 14791

A estação transformadora n. 14791 supre uma rede de baixa tensão trifásica, potência nominal de 45 kVA, com extensão total de 850 metros, com a configuração apresentada pela figura 7.1.

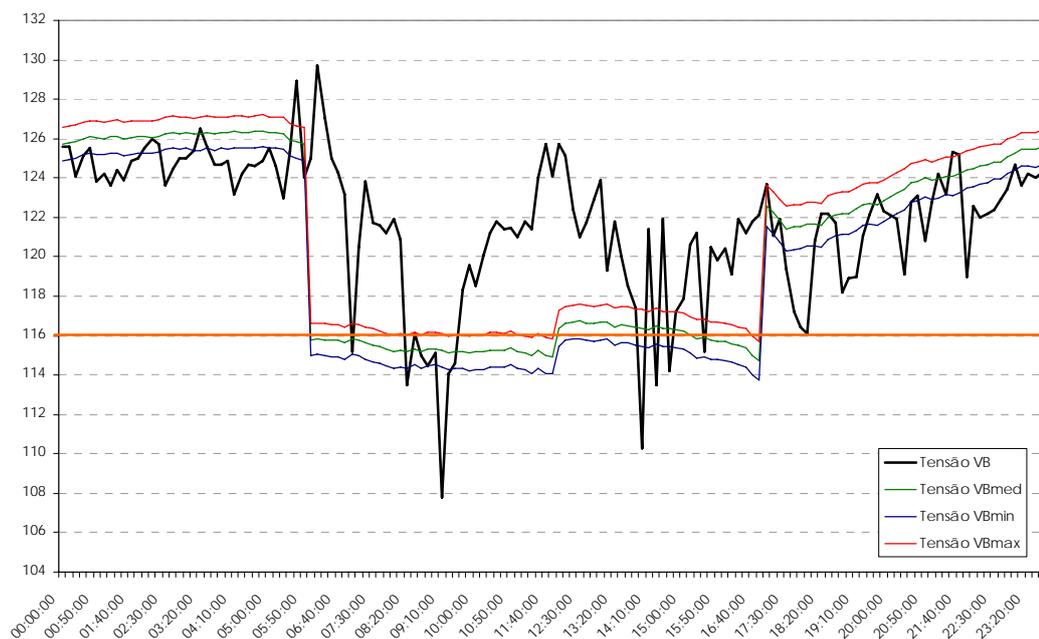


**Figura 7.1. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 14791.**

A reclamação de tensão que gerou a reclamação está localizada na barra n.º 1474799, também indicada na figura 7.1.

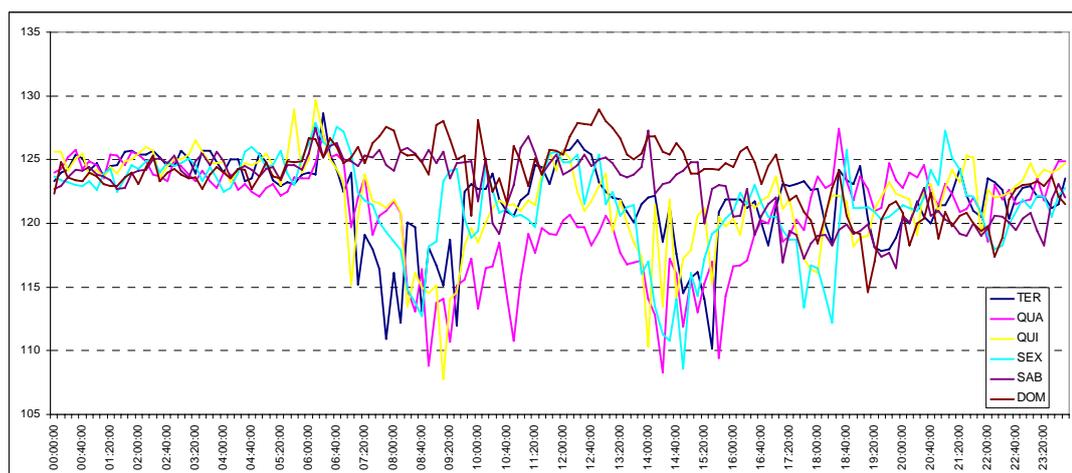
O resultado da medição efetuada de 7 dias indicou valores de  $DRP = 6,05\%$  e  $DRC = 0,39\%$ .

Após as alterações nas tensões de “despacho” o perfil de tensão resultando do fluxo fuzzy comparado ao resultado da medição, pode ser observado na figura 7.2 a seguir:



**Figura 7.2. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 14791.**

Os valores de tensão resultantes de medição apresentados na figura 7.2. correspondem a apenas um dia de medição e o comportamento dos demais dias pode ser avaliado pela figura 7.3, sendo apresentados todos os valores registrados de tensão agrupados em dias da semana (exatamente conforme ocorreram) e utilizada a mesma fase escolhida para apresentação da figura 7.2, neste caso a fase “C”.



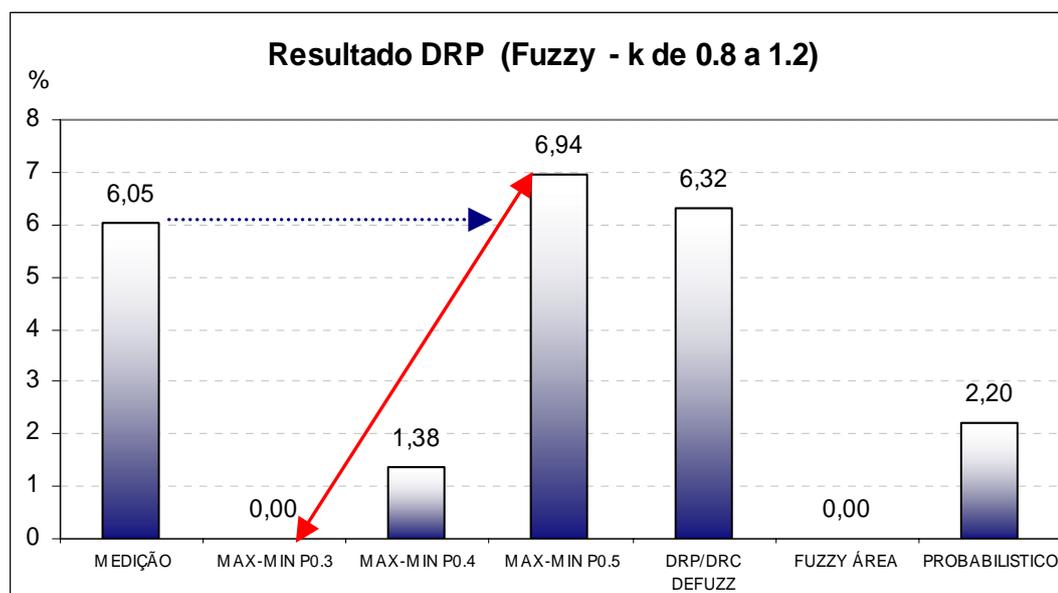
**Figura 7.3. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 14791.**

Os resultados obtidos para a aplicação dos métodos, nos diversos ajustes de parâmetros realizados estão mostrados na tabela 7.2.

**Tabela 7.2. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 14791.**

	Kcarga	Penalidade	DRP(%)	DRC(%)	Desvio DRP	Desvio DRC
<b>MEDIÇÃO</b>			6,05	0,39		
<b>PROBABILÍSTICO</b>			2,20	0,90	-3,85	0,51
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,8 - 1,2		0,00	0,00	-6,05	-0,39
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,6 - 1,6		1,38	0,00	-4,67	-0,39
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,5 - 2,0		0,69	0,00	-5,36	-0,39
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,3	0,00	0,00	-6,05	-0,39
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,4	1,38	1,38	-4,67	0,99
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,5	6,94	6,94	0,89	6,55
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,3	0,69	0,00	-5,36	-0,39
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,4	5,56	4,17	-0,50	3,78
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,5	20,83	20,83	14,78	20,44
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,3	3,47	0,00	-2,58	-0,39
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,4	12,50	4,16	6,45	3,77
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,5	38,88	37,50	32,83	37,11
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,8 - 1,2		6,32	0,00	0,27	-0,39
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,6 - 1,6		8,92	0,00	2,87	-0,39
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,5 - 2,0		11,75	0,00	5,70	-0,39

Os resultados podem ser melhor avaliados quando apresentados graficamente, conforme figura 7.4, escolhendo para apresentação resultado de DRP na barra 1474799, na opção de variação de potência nas cargas entre 80 e 120% do valor obtido pela curva típica de carga (pu da demanda média) para cada intervalo.



**Figura 7.4. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 14791.**

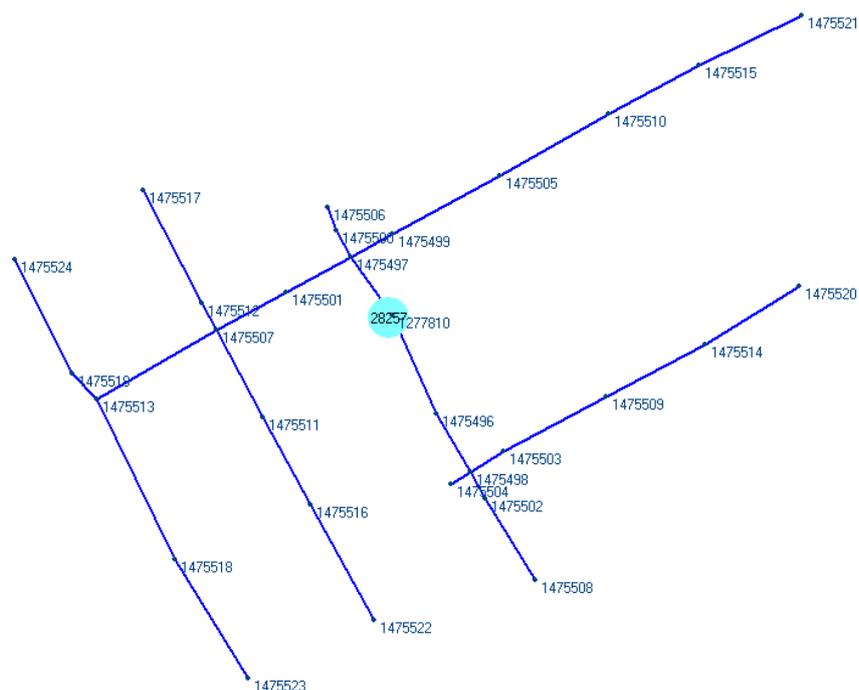
A avaliação dos resultados mostra que o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN) mostrou-se interessante quanto comparados os 3 resultados que utilizaram diferentes valores de “penalidade”, pois o resultado de DRP obtido via medição eletrônica (6,9%) está dentro da faixa de valores que compreende o resultado do método com “penalidade” 0,3 (0,0%) que é o menor valor e o resultado com “penalidade” 0,5 que é o maior valor (6,94%).

Nesta simulação, o método que utiliza indicadores DRP/DRC fuzzy (FUZZY DRP/DRC) também levou a resultados bem próximos ao obtido na medição eletrônica, como no método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN) com o valor de 6,32%.

Por sua vez, o resultado envolvendo o método probabilístico (2,20%) não apresentou resultado com a precisão desejada a fim de indicar a existência de risco de transgressão do indicador de conformidade de tensão.

### 7.2.2. Estação Transformadora n. 28257

A estação transformadora n. 28257 supre uma rede de baixa tensão trifásica, potência nominal de 112,5 kVA, com extensão total de 880 metros, com a configuração apresentada pela figura 7.5.

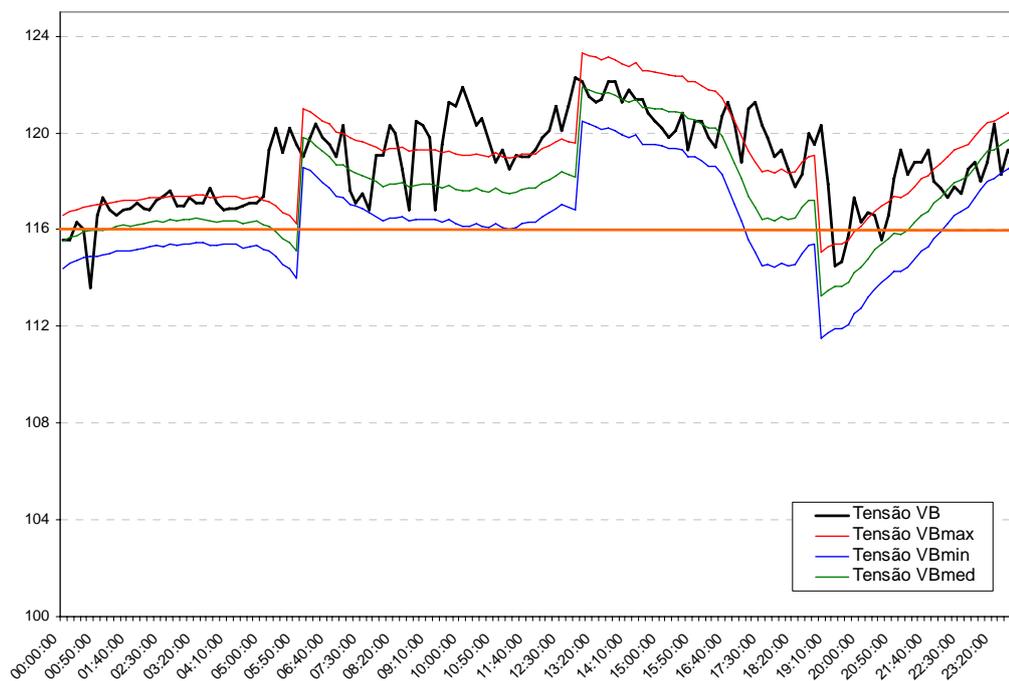


**Figura 7.5. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 28257.**

A reclamação de tensão que gerou a reclamação está localizada na barra n.º 1475518, também indicada na figura 7.5.

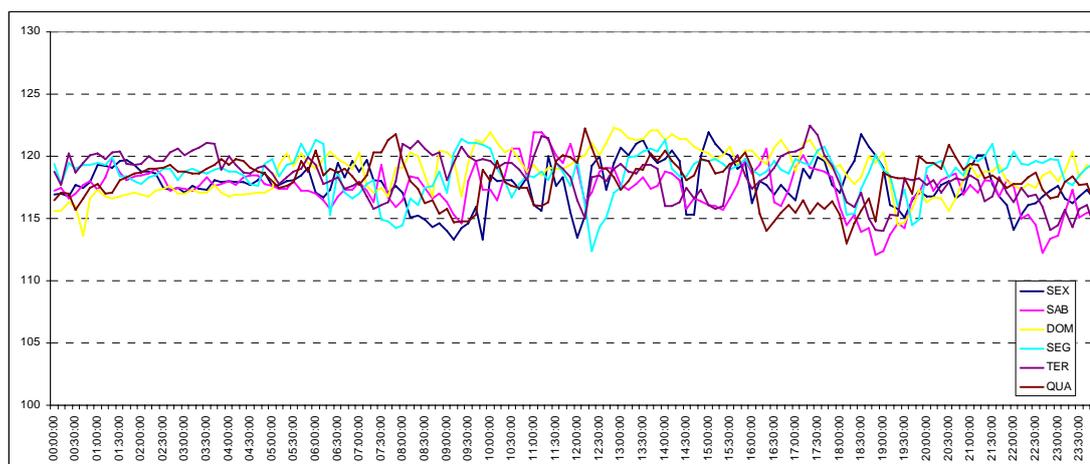
O resultado da medição efetuada de 7 dias indicou valores de  $DRP = 23,51\%$  e  $DRC = 0,0\%$ .

Após as alterações nas tensões de “despacho” o perfil de tensão resultando do fluxo fuzzy comparado ao resultado da medição, pode ser observado na figura 7.6.



**Figura 7.6. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 28257.**

Os valores de tensão resultantes de medição apresentados na figura 7.6. correspondem a apenas um dia de medição e o comportamento dos demais dias pode ser avaliado pela figura 7.7 a seguir, sendo apresentados todos os valores registrados de tensão agrupados em dias da semana (exatamente conforme ocorreram) e sendo utilizada a mesma fase escolhida para apresentação da figura 7.6, neste caso a fase “B”.



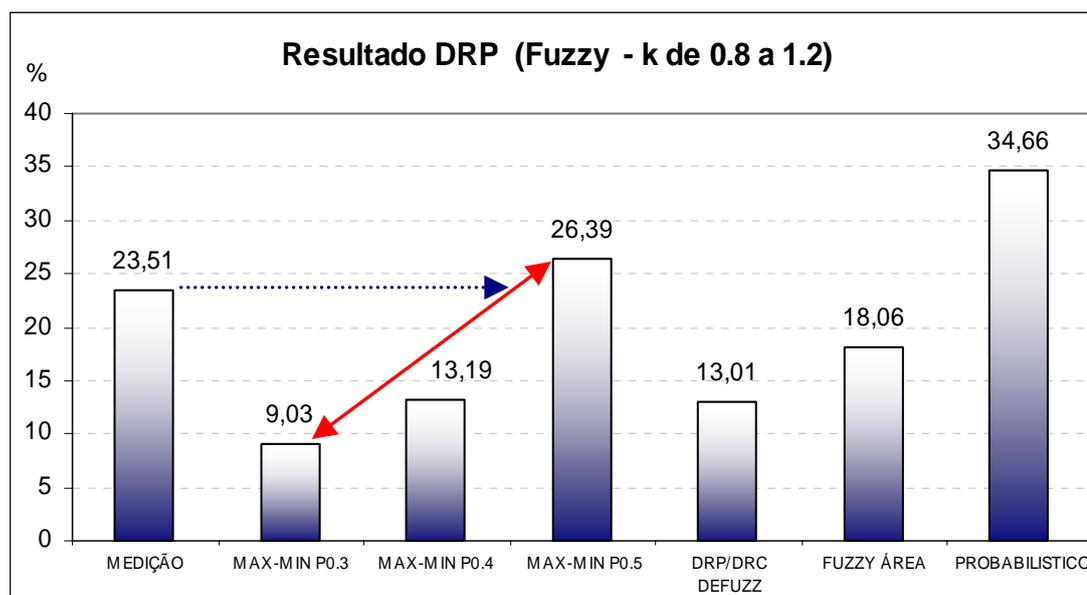
**Figura 7.7. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 28257.**

As resultados obtidos para a aplicação dos métodos, nos diversos ajustes de parâmetros realizados estão mostrados na tabela 7.3.

**Tabela 7.3. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 28257.**

	Kcarga	Penalidade	DRP(%)	DRC(%)	Desvio DRP	Desvio DRC
<b>MEDIÇÃO</b>			23,51	0		
<b>PROBABILISTICO</b>			34,66	34,42	11,15	34,42
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,8 - 1,2		18,06	0,00	-5,46	0,00
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,6 - 1,6		31,94	0,00	8,43	0,00
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,5 - 2,0		41,67	0,00	18,16	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,3	9,03	0,00	-14,48	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,4	13,19	2,78	-10,32	2,78
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,5	26,39	20,83	2,88	20,83
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,3	15,97	0,00	-7,54	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,4	19,44	0,00	-4,07	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,5	34,72	16,67	11,21	16,67
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,3	20,83	0,00	-2,68	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,4	27,08	0,00	3,57	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,5	37,50	8,33	13,99	8,33
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,8 - 1,2		13,01	0,00	-10,50	0,00
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,6 - 1,6		20,42	0,42	-3,09	0,42
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,5 - 2,0		25,86	3,93	2,35	3,93

Os resultados podem ser melhores avaliados quando apresentados graficamente, conforme figura 7.8, escolhendo para apresentação resultado de DRP na barra 1475518, na opção de variação de potência nas cargas entre 80 e 120% do valor obtido pela curva típica de carga (pu da demanda média) para cada intervalo.



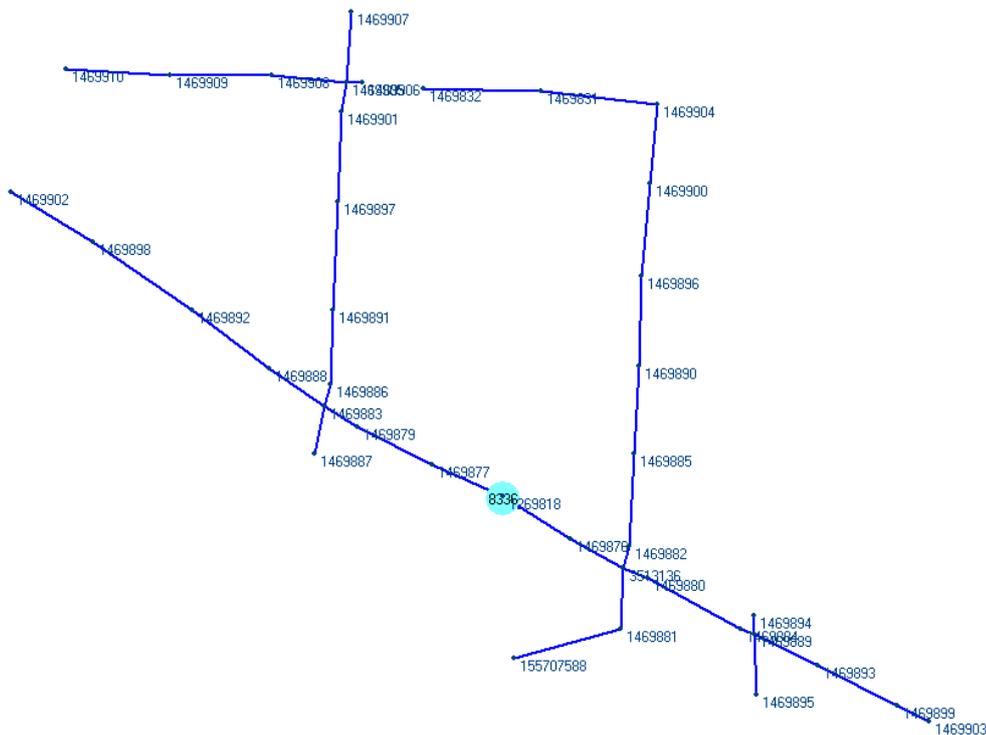
**Figura 7.8. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 28257.**

Novamente, a avaliação dos resultados mostra que o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN) mostrou-se interessante quanto comparados os 3 resultados que utilizaram diferentes valores de “penalidade”, pois o resultado de DRP obtido via medição eletrônica (23,51%) está dentro da faixa de valores que compreende o resultado do método com “penalidade” 0,3 (9,03%) que é o menor valor e o resultado com “penalidade” 0,5 que é o maior valor (26,39%)..

Nesta simulação, os métodos que utilizam: indicadores DRP/DRC fuzzy (FUZZY DRP/DRC), comparação de áreas entre tensões fuzzy (FUZZY ÁREA) e o Probabilístico não levaram a resultados próximos ao obtido na medição eletrônica, como o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN), porém estes resultados são importantes para sinalização de problemas, ou seja, caráter indicativo, mesmo que o valor final não tenha resultados numericamente próximos.

### 7.2.3. Estação Transformadora n. 8336

A estação transformadora n. 8336 supre uma rede de baixa tensão trifásica, potência nominal de 112,5 kVA, com extensão total de 1.018 metros, com a configuração apresentada pela figura 7.9.

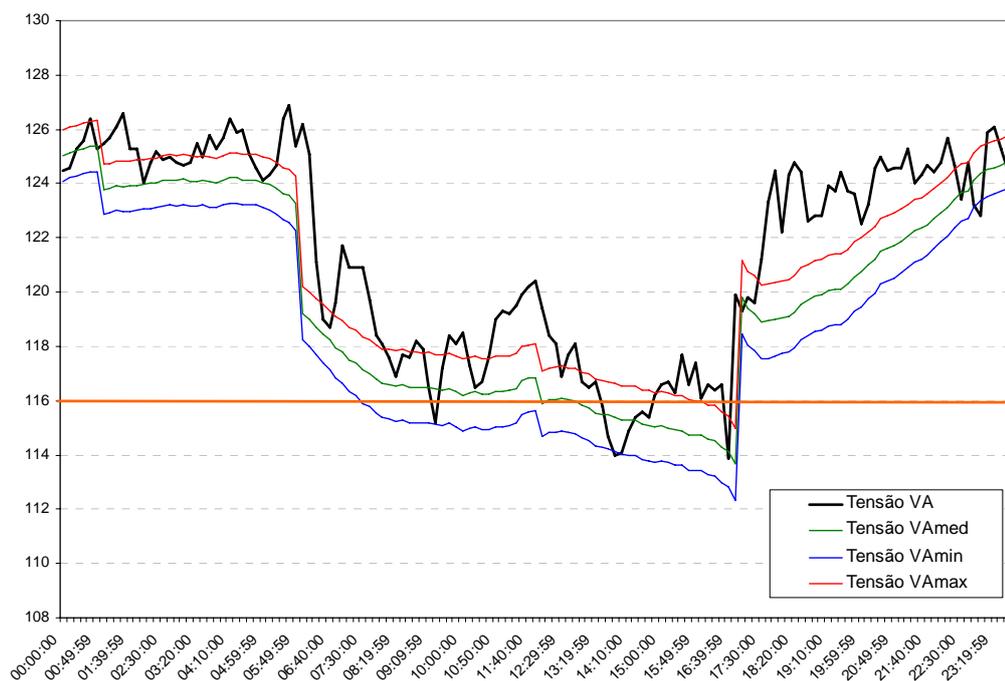


**Figura 7.9. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 8336.**

A reclamação de tensão que gerou a reclamação está localizada na barra n.º 1469891, também indicada na figura 7.9.

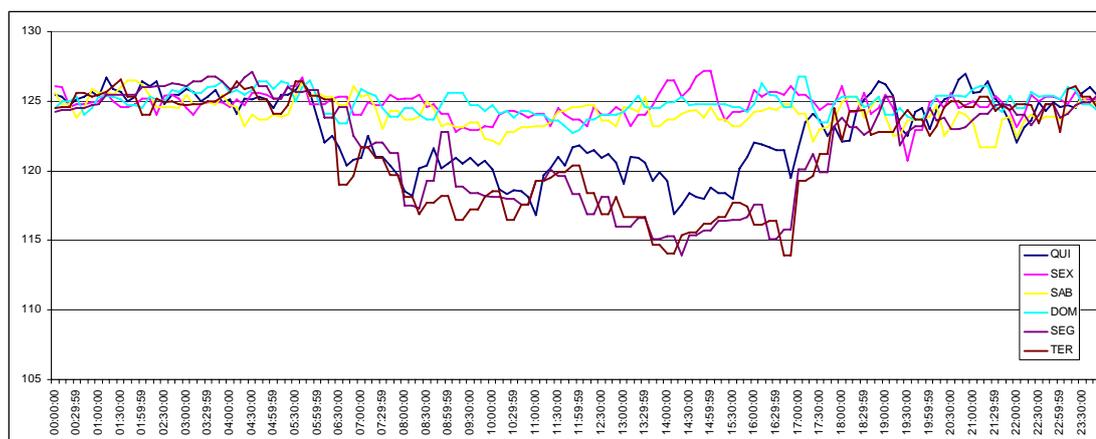
O resultado da medição efetuada de 7 dias indicou valores de  $DRP = 3,47\%$  e  $DRC = 0,0\%$ .

Após as alterações nas tensões de “despacho” o perfil de tensão resultando do fluxo fuzzy comparado ao resultado da medição, pode ser observado na figura 7.10.



**Figura 7.10. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 8336.**

Os valores de tensão resultantes de medição apresentados na figura 7.10. correspondem a apenas um dia de medição e o comportamento dos demais dias pode ser avaliado pela figura 7.11, sendo apresentados todos os valores registrados de tensão agrupados em dias da semana (exatamente conforme ocorreram) e sendo utilizada a mesma fase escolhida para apresentação da figura 7.10, neste caso a fase “A”.



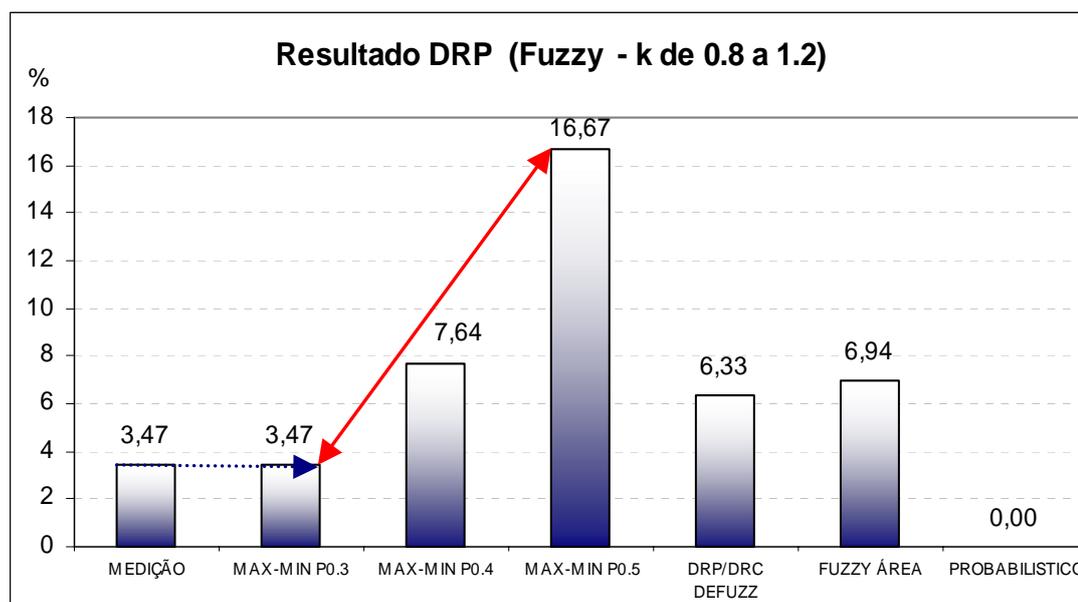
**Figura 7.11. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 8336.**

As resultados obtidos para a aplicação dos métodos, nos diversos ajustes de parâmetros realizados estão mostrados na tabela 7.4.

**Tabela 7.4. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 8336.**

	Kcarga	Penalidade	DRP(%)	DRC(%)	Desvio DRP	Desvio DRC
<b>MEDIÇÃO</b>			3,47	0		
<b>PROBABILISTICO</b>			0,00	0,00	-3,47	0,00
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,8 - 1,2		6,94	0,00	3,47	0,00
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,6 - 1,6		16,67	0,00	13,20	0,00
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,5 - 2,0		9,72	0,00	6,25	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,3	3,47	0,00	0,00	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,4	7,64	4,17	4,17	4,17
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,5	16,67	15,28	13,20	15,28
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,3	8,33	0,00	4,86	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,4	12,50	0,00	9,03	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,5	22,22	15,28	18,75	15,28
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,3	4,86	0,00	1,39	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,4	10,42	6,94	6,95	6,94
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,5	19,44	18,06	15,97	18,06
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,8 - 1,2		6,33	0,00	2,86	0,00
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,6 - 1,6		11,48	0,00	8,01	0,00
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,5 - 2,0		6,64	0,00	3,17	0,00

Os resultados podem ser melhores avaliados quando apresentados graficamente, conforme figura 7.12, escolhendo para apresentação resultado de DRP na barra 1469891, na opção de variação de potência nas cargas entre 80 e 120% do valor obtido pela curva típica de carga (pu da demanda média) para cada intervalo.



**Figura 7.12. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 8336.**

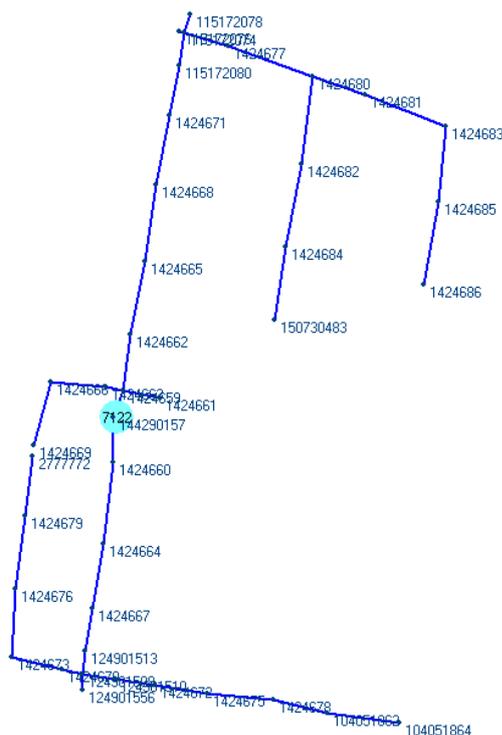
Assim como nas simulações anteriores, a avaliação dos resultados mostra que o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN) mostrou-se interessante quanto comparados os 3 resultados que utilizaram diferentes valores de “penalidade”, pois o resultado de DRP obtido via medição eletrônica (3,47%) está dentro da faixa de valores que compreende o resultado do método com “penalidade” 0,3 (3,47%) que é o menor valor e o resultado com “penalidade” 0,5 que é o maior valor (16,67%).

Nesta simulação, os métodos que utilizam: indicadores DRP/DRC fuzzy (FUZZY DRP/DRC) e comparação de áreas entre tensões fuzzy (FUZZY ÁREA) não levaram a resultados próximos ao obtido na medição eletrônica, como o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN), porém estes resultados também são importantes para sinalização de problemas, ou seja, caráter indicativo, mesmo que o valor final não tenha resultados numericamente próximos.

O resultado envolvendo o método probabilístico (0,0%) não indicou a existência de risco de transgressão do indicador de conformidade de tensão.

#### 7.2.4. Estação Transformadora n. 7122

A estação transformadora n. 7122 supre uma rede de baixa tensão trifásica, potência nominal de 45 kVA, com extensão total de 1.095 metros, com a configuração apresentada pela figura 7.13.

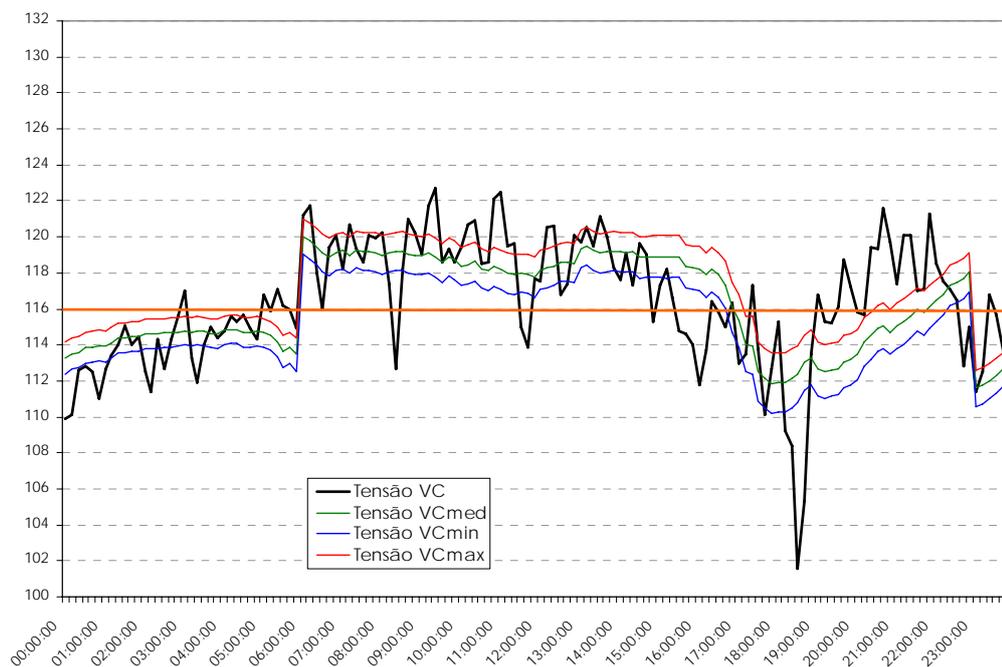


**Figura 7.13. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 7122.**

A reclamação de tensão que gerou a reclamação está localizada na barra n.º 150730483, também indicada na figura 7.13.

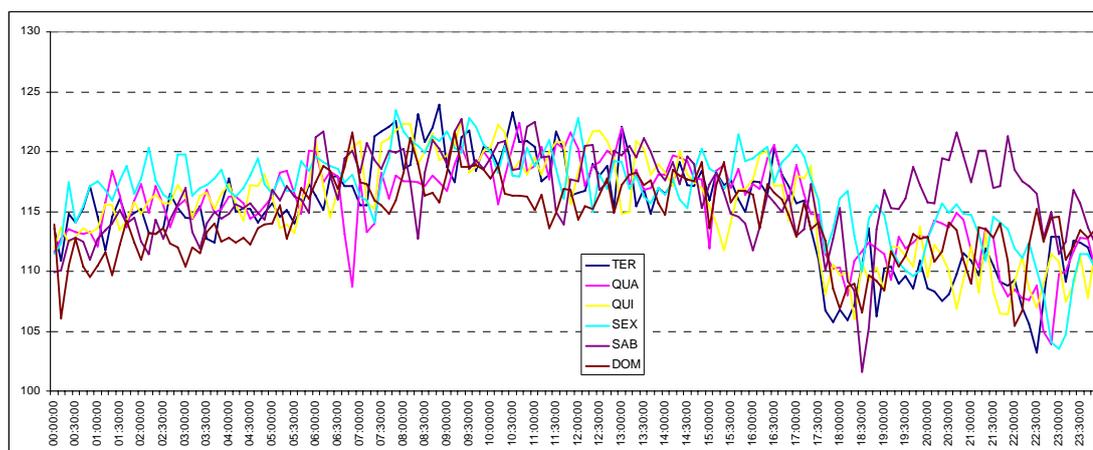
O resultado da medição efetuada de 7 dias indicou valores de  $DRP = 41,96\%$  e  $DRC = 6,34\%$ .

Após as alterações nas tensões de “despacho” o perfil de tensão resultando do fluxo fuzzy comparado ao resultado da medição, pode ser observado na figura 7.14.



**Figura 7.14. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 7122.**

Os valores de tensão resultantes de medição apresentados na figura 7.14. correspondem a apenas um dia de medição e o comportamento dos demais dias pode ser avaliado pela figura 7.15, sendo apresentados todos os valores registrados de tensão agrupados em dias da semana (exatamente conforme ocorreram) e sendo utilizada a mesma fase escolhida para apresentação da figura 7.14, neste caso a fase “C”.



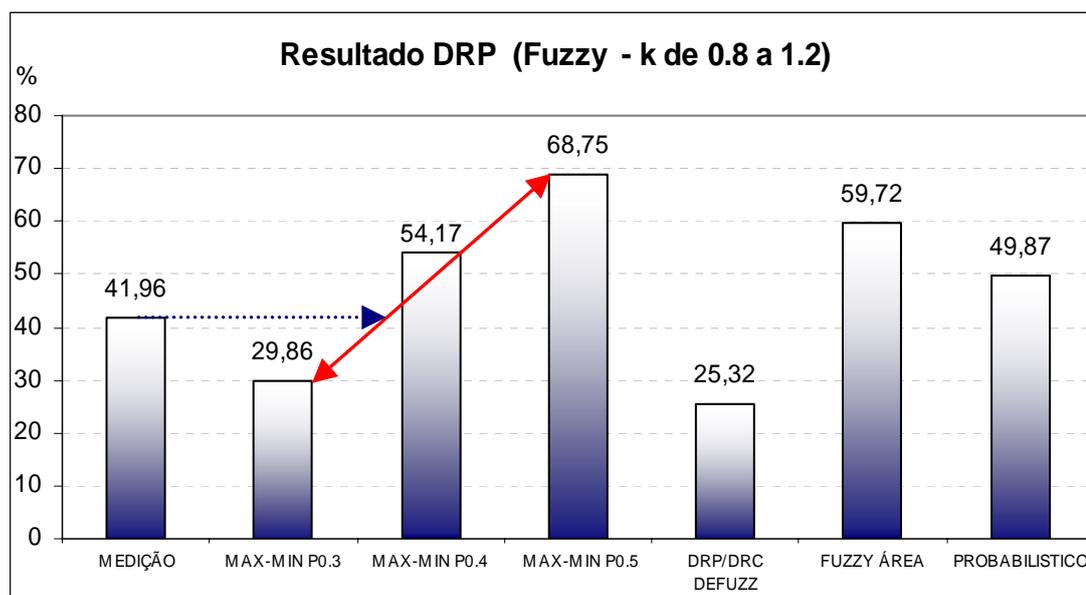
**Figura 7.15. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 7122.**

As resultados obtidos para a aplicação dos métodos, nos diversos ajustes de parâmetros realizados estão mostrados na tabela 7.5.

**Tabela 7.5. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 7122.**

	Kcarga	Penalidade	DRP(%)	DRC(%)	Desvio DRP	Desvio DRC
<b>MEDIÇÃO</b>			41,96	6,34		
<b>PROBABILISTICO</b>			49,87	22,90	7,91	16,56
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,8 - 1,2		59,72	0,00	17,76	-6,34
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,6 - 1,6		83,33	0,00	41,37	-6,34
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,5 - 2,0		94,44	0,00	52,48	-6,34
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,3	29,86	0,00	-12,10	-6,34
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,4	54,17	27,78	12,21	21,44
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,5	68,75	45,83	26,79	39,49
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,3	41,67	0,00	-0,29	-6,34
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,4	55,56	16,67	13,60	10,33
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,5	66,67	38,89	24,71	32,55
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,3	47,22	0,00	5,26	-6,34
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,4	47,92	0,00	5,96	-6,34
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,5	61,81	25,00	19,85	18,66
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,8 - 1,2		25,32	0,00	-16,64	-6,34
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,6 - 1,6		25,90	0,49	-16,06	-5,85
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,5 - 2,0		29,27	3,03	-12,69	-3,31

Os resultados podem ser melhores avaliados quando apresentados graficamente, conforme figura 7.16, escolhendo para apresentação resultado de DRP na barra 150730483, na opção de variação de potência nas cargas entre 80 e 120% do valor obtido pela curva típica de carga (pu da demanda média) para cada intervalo.

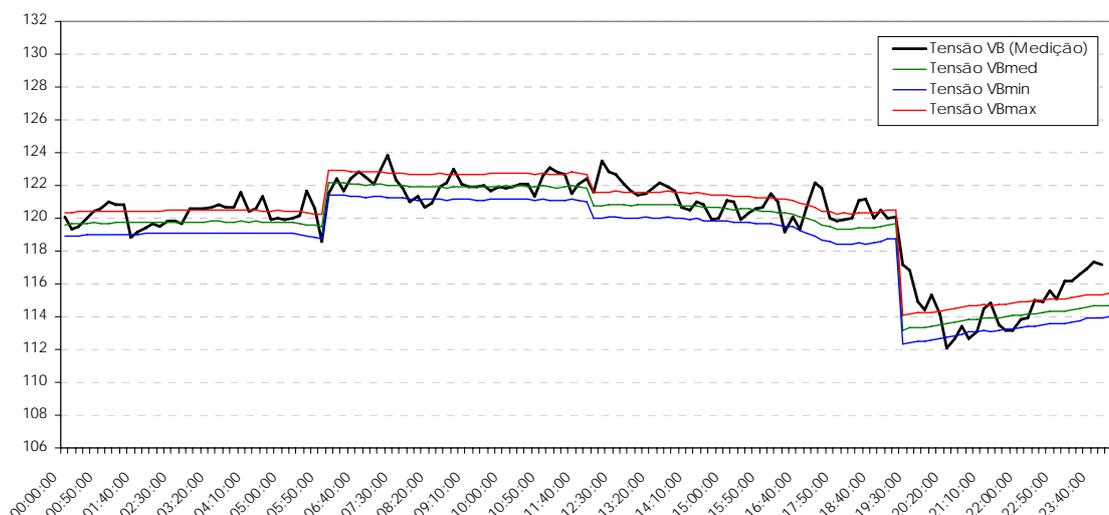


**Figura 7.16. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 7122.**

Assim como nas simulações anteriores, a avaliação dos resultados mostra que o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN) mostrou-se interessante quanto comparados os 3 resultados que utilizaram diferentes valores de “penalidade”, pois o resultado de DRP obtido via medição eletrônica (41,96%) está dentro da faixa de valores que compreende o resultado do método com “penalidade” 0,3 (29,86%) que é o menor valor e o resultado com “penalidade” 0,5 que é o maior valor (68,75%).

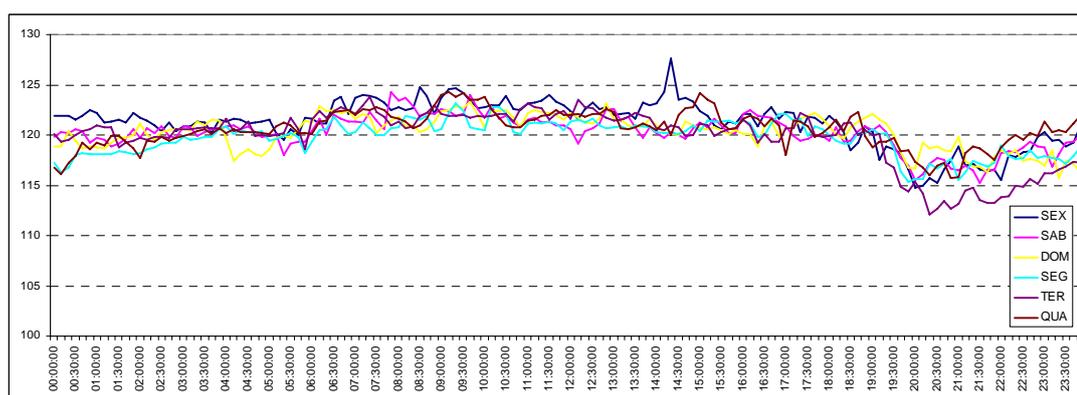
Nesta simulação, os métodos que utilizam: indicadores DRP/DRC fuzzy (FUZZY DRP/DRC), comparação de áreas entre tensões fuzzy (FUZZY ÁREA) e o Probabilístico não levaram a resultados numericamente próximos ao obtido na medição eletrônica, como o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN), porém estes resultados são importantes para sinalização de problemas, ou seja, caráter indicativo. Dentre estes resultados destaca-se o resultado método probabilístico que obteve resultado de 49,87% para DRP.





**Figura 7.18 – Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 17917.**

Os valores de tensão resultantes de medição apresentados na figura 7.18. correspondem a apenas um dia de medição e o comportamento dos demais dias pode ser avaliado pela figura 7.19, sendo apresentados todos os valores registrados de tensão agrupados em dias da semana (exatamente conforme ocorreram) e sendo utilizada a mesma fase escolhida para apresentação da figura 7.18, neste caso a fase “B”.



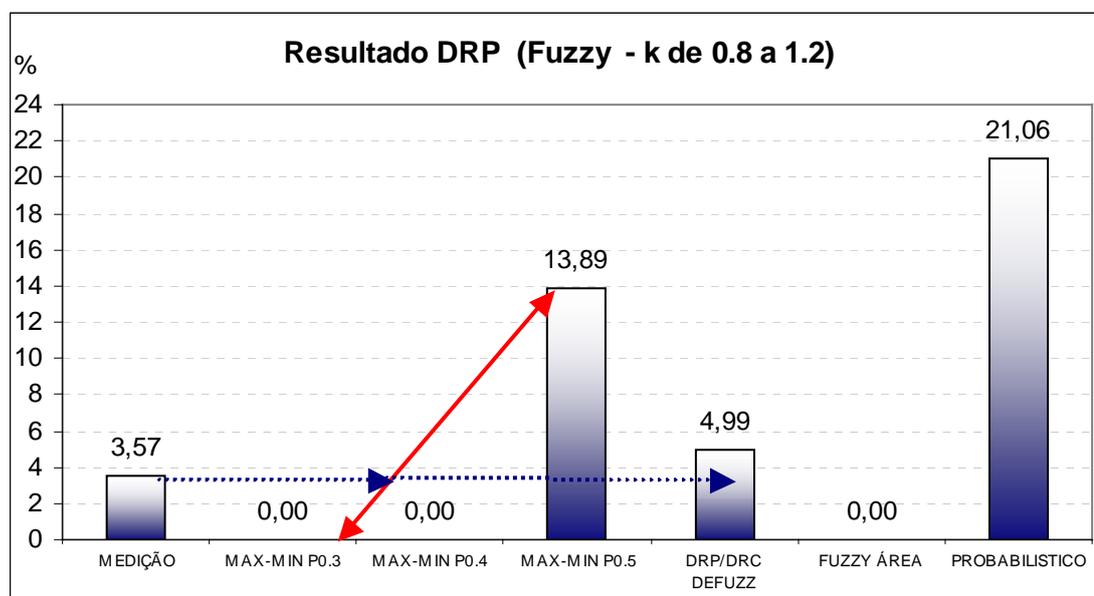
**Figura 7.19. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 17917.**

As resultados obtidos para a aplicação dos métodos, nos diversos ajustes de parâmetros realizados estão mostrados na tabela 7.6.

**Tabela 7.6. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 17917.**

MEDIÇÃO	Kcarga	Penalidade	DRP(%)	DRC(%)	Desvio DRP	Desvio DRC
PROBABILISTICO			3,57	0		
PROBABILISTICO			21,06	2,65	17,49	2,65
FUZZY ÁREA	0,8 - 1,2		0,00	0,00	-3,57	0,00
FUZZY ÁREA	0,6 - 1,6		0,00	0,00	-3,57	0,00
FUZZY ÁREA	0,5 - 2,0		0,00	0,00	-3,57	0,00
FUZZY MAX-MIN	0,8 - 1,2	0,3	0,00	0,00	-3,57	0,00
FUZZY MAX-MIN	0,8 - 1,2	0,4	0,00	0,00	-3,57	0,00
FUZZY MAX-MIN	0,8 - 1,2	0,5	13,89	13,89	10,32	13,89
FUZZY MAX-MIN	0,6 - 1,6	0,3	0,00	0,00	-3,57	0,00
FUZZY MAX-MIN	0,6 - 1,6	0,4	8,33	8,33	4,76	8,33
FUZZY MAX-MIN	0,6 - 1,6	0,5	22,22	22,22	18,65	22,22
FUZZY MAX-MIN	0,5 - 2,0	0,3	0,00	0,00	-3,57	0,00
FUZZY MAX-MIN	0,5 - 2,0	0,4	6,94	2,78	3,37	2,78
FUZZY MAX-MIN	0,5 - 2,0	0,5	27,78	27,78	24,21	27,78
FUZZY DRP/DRC	0,8 - 1,2		4,99	0,00	1,42	0,00
FUZZY DRP/DRC	0,6 - 1,6		5,62	0,00	2,05	0,00
FUZZY DRP/DRC	0,5 - 2,0		6,14	0,00	2,57	0,00

Os resultados podem ser melhores avaliados quando apresentados graficamente, conforme figura 7.20, escolhendo para apresentação resultado de DRP na barra 1488499, na opção de variação de potência nas cargas entre 80 e 120% do valor obtido pela curva típica de carga (pu da demanda média) para cada intervalo.



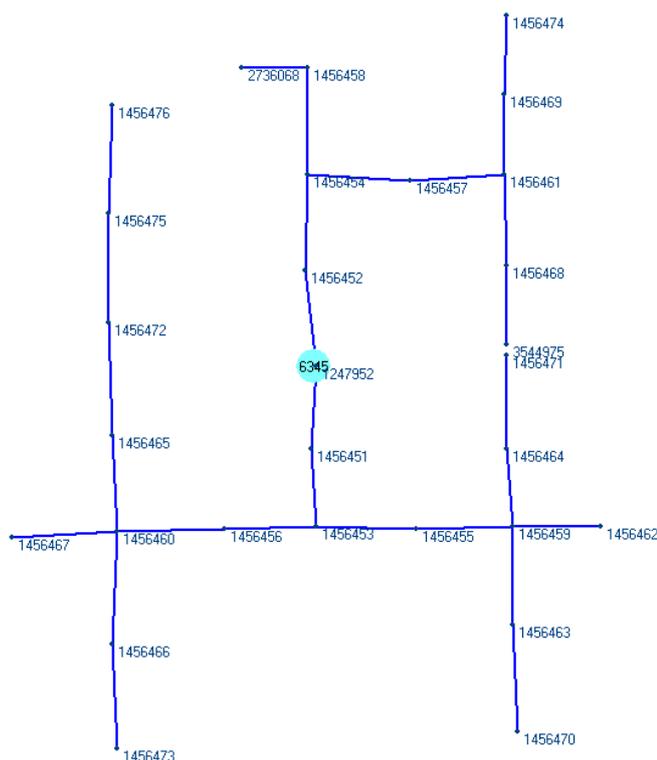
**Figura 7.20. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 17917.**

Assim como nas simulações anteriores, a avaliação dos resultados mostra que o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN) mostrou-se interessante quanto comparados os 3 resultados que utilizaram diferentes valores de “penalidade”, pois o resultado de DRP obtido via medição eletrônica (3,57%) está dentro da faixa de valores que compreende o resultado do método com “penalidade” 0,3 (0,0%) que é o menor valor e o resultado com “penalidade” 0,5 que é o maior valor (13,89%).

Nesta simulação, os métodos que utilizam: comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN) e o Probabilístico não levaram a resultados próximos ao obtido na medição eletrônica, sendo que estes resultados não oferecem uma sinalização de confiável quanto a existência problemas. Por outro lado, os indicadores DRP/DRC fuzzy (FUZZY DRP/DRC), destaca-se por obteve resultado de 4,99% para DRP, muito próximo ao resultado da medição.

#### **7.2.6. Estação Transformadora n. 6345**

A estação transformadora n. 6345 supre uma rede de baixa tensão trifásica, potência nominal de 45 kVA, com extensão total de 923 metros, com a configuração apresentada pela figura 7.21.

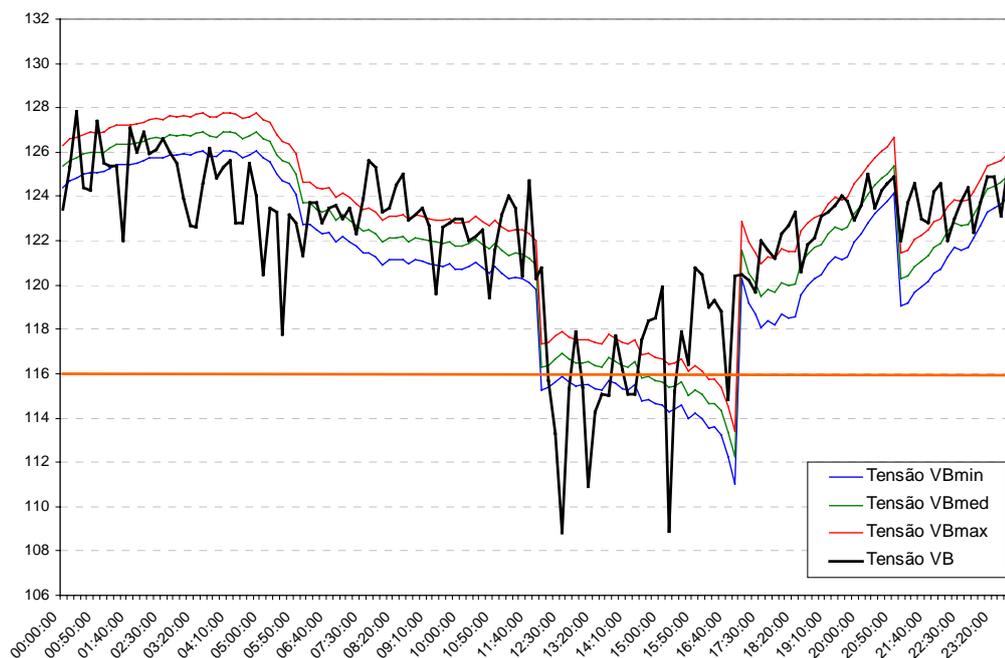


**Figura 7.21. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 6345.**

A reclamação de tensão que gerou a reclamação está localizada na barra n.º 1456476, também indicada na figura 7.21.

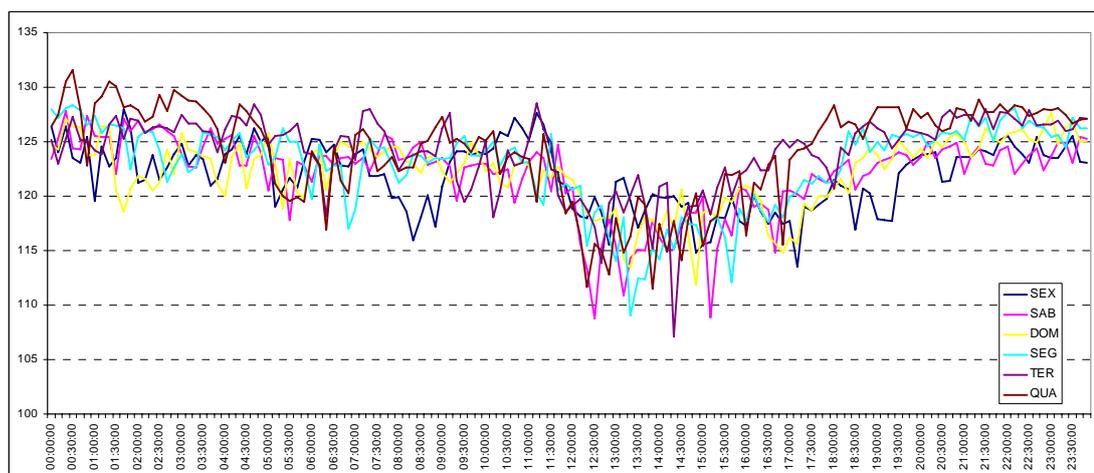
O resultado da medição efetuada de 7 dias indicou valores de  $DRP = 4,86\%$  e  $DRC = 0,39\%$ .

Após as alterações nas tensões de “despacho” o perfil de tensão resultando do fluxo fuzzy comparado ao resultado da medição, pode ser observado na figura 7.22.



**Figura 7.22 Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 6345.**

Os valores de tensão resultantes de medição apresentados na figura 7.22. correspondem a apenas um dia de medição e o comportamento dos demais dias pode ser avaliado pela figura 7.23, sendo apresentados todos os valores registrados de tensão agrupados em dias da semana (exatamente conforme ocorreram) e sendo utilizada a mesma fase escolhida para apresentação da figura 7.22, neste caso a fase “B”.



**Figura 7.23. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 6345.**

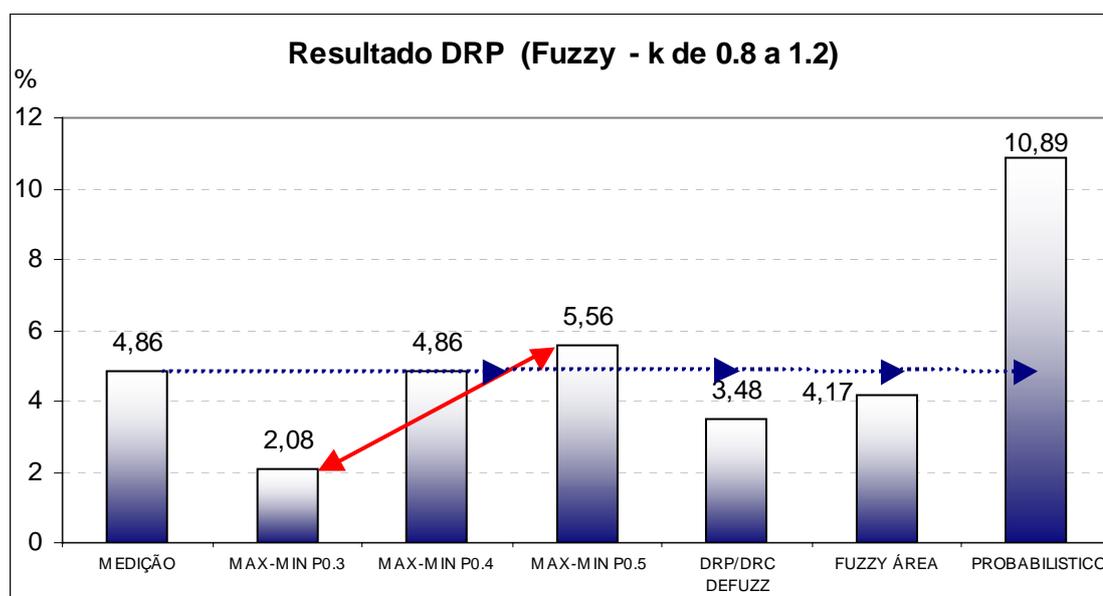
As resultados obtidos para a aplicação dos métodos, nos diversos ajustes de parâmetros realizados estão mostrados na tabela 7.7.

**Tabela 7.7. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 6345.**

	Kcarga	Penalidade	DRP(%)	DRC(%)	Desvio DRP	Desvio DRC
<b>MEDICÃO</b>			4,86	0,39		
<b>PROBABILISTICO</b>			10,89	8,08	6,03	7,69
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,8 - 1,2		4,17	0,00	-0,69	-0,39
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,6 - 1,6		9,72	0,00	4,86	-0,39
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,5 - 2,0		*	*		
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,3	2,08	0,00	-2,78	-0,39
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,4	4,86	2,78	0,00	2,39
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,5	5,56	4,17	0,69	3,78
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,3	4,86	0,00	0,00	-0,39
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,4	5,56	0,00	0,70	-0,39
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,5	10,42	6,94	5,56	6,55
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,3	*	*		
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,4	*	*		
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,5	*	*		
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,8 - 1,2		3,48	0,00	-1,38	-0,39
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,6 - 1,6		6,01	0,00	1,15	-0,39
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,5 - 2,0		9,81	0,19	4,95	-0,20

As posições marcadas com “\*” indicam a impossibilidade simulação para aquelas representações de carga.

Os resultados podem ser melhores avaliados quando apresentados graficamente, conforme figura 7.23, escolhendo para apresentação resultado de DRP na barra 1456476, na opção de variação de potência nas cargas entre 80 e 120% do valor obtido pela curva típica de carga (pu da demanda média) para cada intervalo.



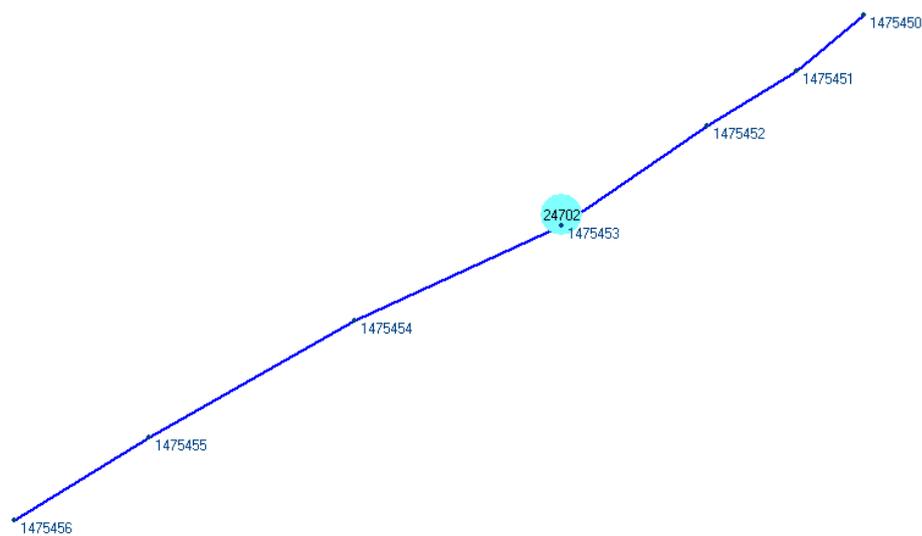
**Figura 7.23. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 6345.**

A avaliação dos resultados mostra que o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN) mostrou-se interessante quando comparados os 3 resultados que utilizaram diferentes valores de “penalidade”, pois o resultado de DRP obtido via medição eletrônica (4,86%) está dentro da faixa de valores que compreende o resultado do método com “penalidade” 0,3 (2,08%) que é o menor valor e o resultado com “penalidade” 0,5 que é o maior valor (5,56%). Sendo que o resultado deste método, com “penalidade” 0,4, obteve o mesmo resultado da medição com o valor de 4,86%.

Nesta simulação, apenas o método Probabilístico não levou a resultados próximos ao obtido na medição eletrônica.

### 7.2.7. Estação Transformadora n. 24702

A estação transformadora n. 24702 supre uma rede de baixa tensão trifásica, potência nominal de 30 kVA, com extensão total de 178 metros, com a configuração apresentada pela figura 7.24.

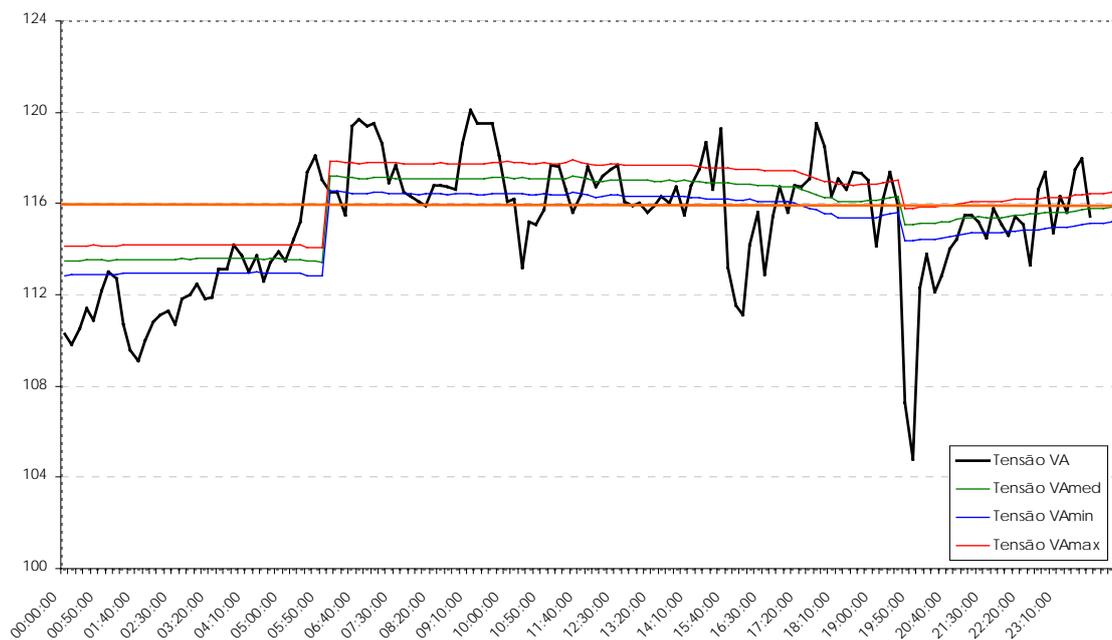


**Figura 7.24. Arranjo topológico da rede atendida pela estação transformadora n. 24702.**

A reclamação de tensão que gerou a reclamação está localizada na barra n.º 1475456, também indicada na figura 7.24.

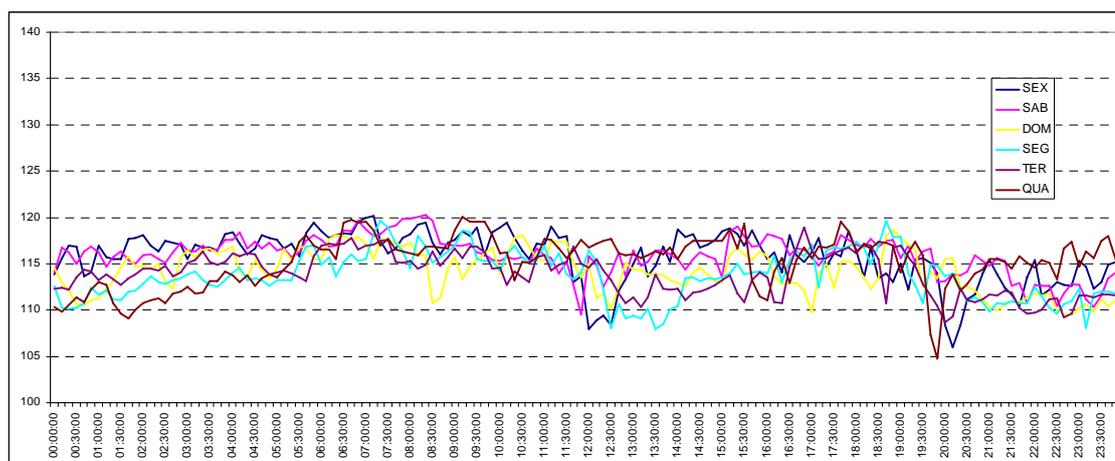
O resultado da medição efetuada de 7 dias indicou valores de  $DRP = 55,45\%$  e  $DRC = 1,58\%$ .

Após as alterações nas tensões de “despacho” o perfil de tensão resultando do fluxo fuzzy comparado ao resultado da medição, pode ser observado na figura 7.25.



**Figura 7.25. Comparação de resultados medição x simulação fuzzy, estação transformadora n. 24702.**

Os valores de tensão resultantes de medição apresentados na figura 7.25. correspondem a apenas um dia de medição e o comportamento dos demais dias pode ser avaliado pela figura 7.26, sendo apresentados todos os valores registrados de tensão agrupados em dias da semana (exatamente conforme ocorreram) e sendo utilizada a mesma fase “A” para apresentação da figura 7.25.



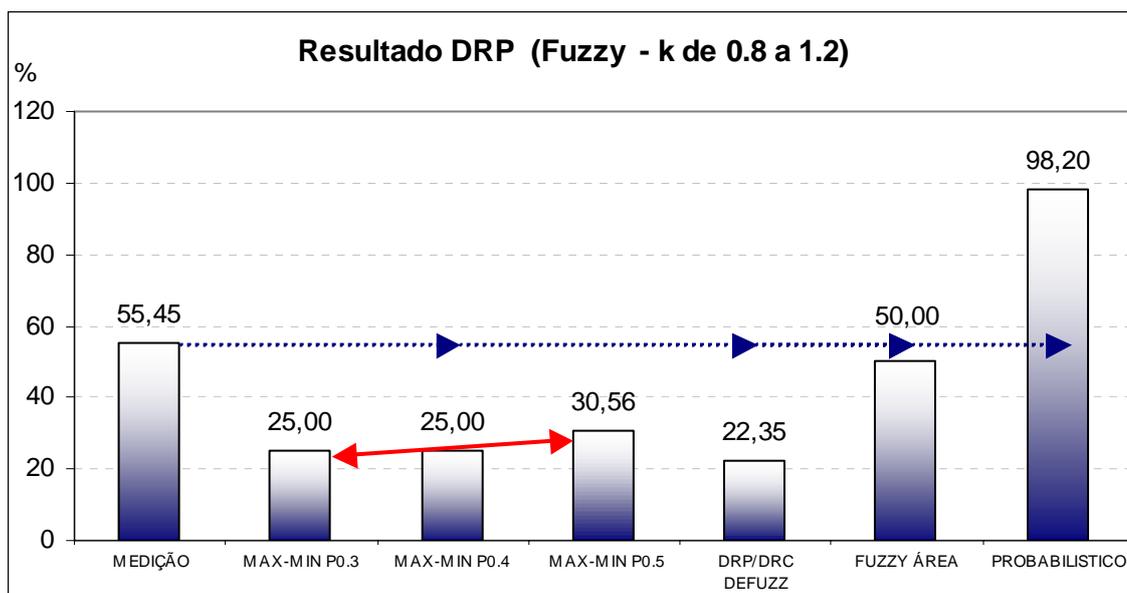
**Figura 7.26. Resultados da medição tensão em ponto da rede baixa tensão atendido pela estação transformadora n. 24702.**

As resultados obtidos para a aplicação dos métodos, nos diversos ajustes de parâmetros realizados estão mostrados na tabela 7.8.

**Tabela 7.8. Resultados a partir de medições e simulações para estação transformadora n. 24702.**

	Kcarga	Penalidade	DRP(%)	DRC(%)	Desvio DRP	Desvio DRC
<b>MEDIÇÃO</b>			55,45	1,58		
<b>PROBABILISTICO</b>			98,20	1,80	42,75	0,22
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,8 - 1,2		50,00	0,00	-5,45	-1,58
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,6 - 1,6		50,00	0,00	-5,45	-1,58
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,5 - 2,0		50,00	0,00	-5,45	-1,58
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,3	25,00	0,00	-30,45	-1,58
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,4	25,00	0,00	-30,45	-1,58
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,8 - 1,2	0,5	30,56	5,56	-24,90	3,98
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,3	25,00	0,00	-30,45	-1,58
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,4	25,00	0,00	-30,45	-1,58
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,6 - 1,6	0,5	34,72	9,72	-20,73	8,14
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,3	25,00	0,00	-30,45	-1,58
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,4	27,78	2,78	-27,67	1,20
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,5	41,67	16,67	-13,78	15,09
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,8 - 1,2		22,35	0,00	-33,10	-1,58
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,6 - 1,6		23,25	0,00	-32,20	-1,58
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,5 - 2,0		24,51	0,00	-30,94	-1,58

Os resultados podem ser melhores avaliados quando apresentados graficamente, conforme figura 7.27, escolhendo para apresentação resultado de DRP na barra 1475456, na opção de variação de potência nas cargas entre 80 e 120% do valor obtido pela curva típica de carga (pu da demanda média) para cada intervalo.



**Figura 7.27. Gráfico comparativo de resultados de medição e simulações para estação transformadora n. 24702.**

Diferentemente dos demais casos simulados, a avaliação dos resultados mostra que o método de comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy (FUZZY MAX-MIN), quando avaliados os 3 resultados que utilizaram diferentes valores de “penalidade” revelam um distanciamento com o resultado da medição, pois o DRP obtido via medição eletrônica (55,45%) está fora da faixa de valores que compreende o resultado do método com “penalidade” 0,3 (25,00%) que é o menor valor e o resultado com “penalidade” 0,5 que é o maior valor (30,56%), ficando numericamente bem abaixo do resultado com a medição.

Nesta simulação, apenas o método Probabilístico não levou a resultados próximos ao obtido na medição eletrônica.

## **8. CONCLUSÃO**

### **8.1. Aspectos Gerais e Específicos**

Nesta tese foi apresentado um trabalho focado no objetivo de estabelecer uma análise comparativa entre as técnicas probabilística e fuzzy na avaliação dos riscos de violações de conformidade de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica, especificamente aqueles que operam em baixa tensão ( $< 2,3$  kV).

Este objetivo foi alcançado e ainda revelou o grande potencial da aplicação da Teoria Conjuntos Difusos (Lógica Fuzzy) na representação das grandezas elétricas dos circuitos de distribuição, tanto relacionado à qualidade dos resultados como na redução no tempo necessário para processamento de diferentes cenários de carga, por exemplo.

Pela capacidade de levar em consideração a aleatoriedade da carga, os fluxos de potência probabilístico e fuzzy apresentam uma grande vantagem em relação ao fluxo de potência determinístico, já que este apresenta os resultados só como um cenário de carga o que faz dele uma ferramenta muito conservadora.

Especificamente quanto ao método fluxo de potência com modelagem probabilística, técnica amplamente testada pela comunidade acadêmica conforme referências anteriormente citadas, baseia-se em simulações de fluxos de potência determinísticos com cargas modeladas segundo parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) e, por meio de simulações de Monte Carlo, são gerados um grande número de cenários e a correspondente probabilidade de ocorrência destes. Com os resultados obtidos do fluxo de potência probabilístico são calculados os indicadores individuais de conformidade de tensão.

O método probabilístico proposto não especifica o intervalo de tempo a ser utilizado para discretização das curvas de carga utilizadas nas simulações, esta definição depende do objetivo específico de cada trabalho de investigação. Neste trabalho específico de avaliação de indicadores de conformidade de tensão em regime

permanente foram utilizadas as curvas típicas de carga em intervalos de 10 minutos (144 pontos) e, portanto, o fluxo de potência também é realizado em intervalos de 10 minutos, obtendo, assim, 144 valores de tensão para cada barra da rede em cada simulação.

Foi demonstrado que, com o total de pontos simulados dentro de cada faixa do histograma de distribuição de frequências das tensões (faixas representando os limites adequado, precário e crítico), e considerando que as simulações de fluxo de potência foram realizadas para intervalos de 10 minutos, o que está aderente ao formato estabelecido na Resolução ANEEL nº 505/2001, os próprios percentuais dados pelo histograma para as tensões precárias e críticas são, respectivamente, o DRP e o DRC probabilísticos das barras.

Foi possível observar que a eficácia nos resultados do método probabilístico depende de alguns fatores que devem ser respeitados, mas que principalmente depende da adequada representação de hábitos de consumo (curvas de cargas), curvas típicas de carga, para cada categoria de consumo, devidamente caracterizadas por classes e faixas de consumo, que serão “agrupadas” respeitando entre outros aspectos o fator de carga e a participação no mercado de suas respectivas categorias.

Além desta condição necessária de correta caracterização da carga para mitigação dos erros de imprecisão nos resultados, o método probabilístico caracteriza-se por ser um método que exige elevado esforço computacional e elevado tempo de simulação, que fica evidenciado pela necessidade da realização de inúmeras e sucessivas simulações até quando os valores médios e de desvio-padrão das variáveis que estão sendo observadas dentro do critério de convergência param de variar (ou que a variação seja menor que uma tolerância pré-determinada), entre dois grupos consecutivos, quando existe indicação de convergência do processo.

O método fuzzy foi apresentado neste trabalho pela proposta de cálculo de fluxo de potência para redes de distribuição secundárias (redes de baixa tensão), utilizando números difusos (fuzzy) para representação da variabilidade das cargas em cada ponto da rede, utilizando-se neste caso números difusos triangulares, e com isto

obtêm-se parâmetros elétricos de desempenho difusos da rede, como correntes e tensões difusos.

Conhecidas os valores de tensões difusas (fuzzy) para cada barra da rede elétrica simulada foram propostos métodos de avaliação dos riscos de violações de conformidade de tensão. Estes métodos de avaliação estão baseados na realização na comparação de tensões fuzzy com um conjunto de outros números representando as faixas de classificação de tensão (adequado, precário e crítico) e no o estabelecimento de um indicador fuzzy para DRP e DRC. Os métodos de avaliação fuzzy foram denominados da seguinte forma: “Comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy”, “Comparação de áreas entre tensões fuzzy” e “Indicadores DRP/DRC fuzzy”.

O método “Comparação via operador MAX-MIN entre tensões fuzzy” baseia-se no operador MAX-MIN da teoria de operação de conjuntos fuzzy, que consiste basicamente na comparação entre cada tensão fuzzy resultante da simulação, de cada fase, de cada barra, com os números que identificam os limites adequado, precários (superior e inferior) e crítico (superior e inferior), avaliando o grau de pertinência de uma tensão calculada com as faixas de classificação difusas, construídas a partir dos limites da Resolução ANEEL n° 505/2001, representadas por números fuzzy trapezoidais.

O método “Comparação de áreas entre tensões fuzzy” baseia-se no cálculo da intersecção entre o número fuzzy das tensões simuladas e os números que representam as faixas de classificação das tensões, logo, consiste basicamente em comparar os resultados destas intersecções, considerando cada tensão fuzzy resultante da simulação, de cada fase, de cada barra.

O processo consiste em calcular a área resultante da intersecção de uma área calculada para a tensão simulada com as áreas calculadas para os números fuzzy trapezoidais que representam as faixas de classificação. O cálculo da área de intersecção possibilita classificar o número fuzzy que representa a tensão calculada

como pertencente a uma das faixas pré-definidas, classificando-o assim, como adequado, precário ou crítico.

O método “Indicadores DRP/DRC fuzzy” baseia-se na montagem de indicadores fuzzy referentes ao DRP e DRC de cada fase para cada barra da rede de distribuição secundária e na defuzzycação destes números para obtenção de um valor percentual (%) para cada um destes indicadores.

As aplicações dos três métodos de avaliação nos diversos casos simulados levaram a resultados qualitativos interessantes, que independente da precisão dos resultados das simulações envolvendo as metodologias apresentadas, demonstraram grande potencial de sinalização de problemas, ou seja, possuem caráter indicativo, mesmo que os valores finais não sejam numericamente próximos aos obtidos em medições eletrônicas, podem oferecer informações importantes para direcionar trabalhos de inspeção e medição, com vistas a antecipação à reclamações de consumidores por não-conformidade da tensão oferecida no ponto de entrega ou na antecipação da verificações de transgressões de conformidade de tensão durante processo de medições amostrais conforme determina a . Resolução ANEEL n° 505/2001.

Destaca-se a consideração apresentada no item 6.3.1, sobre a utilização do fator K da modelagem Fuzzy, em que a escolha de diferentes valores de k para definição nos valores mínimo e máximo da demanda fuzzy pode restringir o espaço de possibilidades de valores, ao contrário da abordagem probabilística em que todas as possibilidades de ocorrência são testadas com maior ou menor frequência dependente da distribuição de probabilidade associada à carga simulada. Com isto, deve-se avaliar de forma criteriosa os resultados comparativos entre métodos probabilístico e fuzzy, quando a escolha dos valores de k abranger uma faixa de valores menor do que a faixa associada a distribuição de probabilidade da curva de carga considerada no método probabilístico.

Isto que significa que, para uma comparação direta entre métodos, o mais adequado seria comparar os resultados do método probabilístico com o método fuzzy considerando a maior variação numérica de k, que nas simulações teve a maior

amplitude quando  $k$  teve valor inferior de 0,5 e  $k$  superior igual a 2, conforme tabela 8.1.

**Tabela 8.1. Resultados a partir de Simulações para estação transformadora n. 7122, comparação método probabilístico e método fuzzy com variação numérica de  $k$  entre 0,5 e 2.**

	Kcarga	Penalidade	DRP	DRC
<b>PROBABILISTICO</b>			49,87	22,90
<b>FUZZY ÁREA</b>	0,5 - 2,0		94,44	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,3	47,22	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,4	47,92	0,00
<b>FUZZY MAX-MIN</b>	0,5 - 2,0	0,5	61,81	25,00
<b>FUZZY DRP/DRC</b>	0,5 - 2,0		29,27	3,03

Por fim, destaca-se que foi possível observar que o tratamento probabilístico exige elevado esforço computacional, pois simula o sistema diversas vezes (método de Monte Carlo) até alcançar a convergência do processo, e por sua vez o método fuzzy requer esforço computacional muito menor, pois os resultados são gerados em apenas uma simulação para cada intervalo de tempo. E que ainda, para obter-se eficácia nos resultados, alguns fatores devem ser respeitados independente do método em aplicação, que são: adequada representação de hábitos de consumo (curvas de cargas), fidelidade do cadastro elétrico das redes e fidelidade do cadastro elétrico das cargas ligadas, seja no valor de consumo atribuído a cada ponto de carga, como para a posição das cargas na rede elétrica.

Não se objetivou neste trabalho demonstrar que a modelagem possibilística deva substituir a modelagem probabilística, mas que ambas podem ser extremamente úteis e perfeitamente aplicáveis, como demonstrado pelos desenvolvimentos teóricos de conjuntos fuzzy e teoria de conjuntos probabilísticos, como práticas concretas de se conseguir uma análise dos sistemas de potência.

Acredita-se que as metodologias desenvolvidas neste trabalho representam uma grande contribuição para a comunidade científica, na apresentação de mais uma aplicação para estas técnicas de conjuntos fuzzy e conjuntos probabilísticos e indicando que há ainda espaço para futuros desenvolvimentos, e para as concessionárias de distribuição de energia elétrica mostrando a viabilidade de

antecipar-se a possíveis problemas de tensão em suas redes de baixa tensão por meio de simulação digital e aplicação destas técnicas.

## **8.2. Sugestões para trabalhos futuros**

O desenvolvimento do trabalho despertou várias questões que embora pertinentes ao tema situam-se fora do escopo estrito desta pesquisa. Assim cumpre destacar algumas abordagens alternativas que podem vir a ser objeto de pesquisas específicas, podendo trazer novos avanços para a aplicação das propostas desta tese e contribuições para o setor elétrico. Dentre estas propostas estão:

- a) Aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais na identificação de redes de baixa tensão com possível risco de transgressão dos indicadores de conformidade de tensão, utilizando para tanto características elétricas e físicas das redes existentes e com histórico de ocorrências de transgressão.
- b) Utilização de outras funções, como por exemplo, a função senoidal, na representação das variáveis do problema de fluxo de carga fuzzy, em alternativa à aplicação da função triangular (T.F.N.).
- c) Aprimoramento da técnica de representação fuzzy para cargas em baixa e média tensão para aplicação de simulação digital na avaliação de condições operativas das redes elétrica, e por consequência, substituição de campanhas de medições eletrônicas em campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Zadeh, L. A. – **Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility**, Fuzzy Sets and System, 1, 3-28, 1978.
- [2] Miranda, V.; Matos, M.A.A.C.; Saraiva, J.T. – **Fuzzy load flow - New algorithms incorporating uncertain generation and load representation**, Proceedings of the Tenth Power systems Computation Conferece, Graz, Austria, pp. 621-627, 1990.
- [3] Pereira, M. A.; Murari, C. A. F.; Murad, M. – **Uma nova metodologia para fluxos de carga fuzzy**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, Florianópolis. XIII CBA, 2000, p. 1-6, 2000.
- [4] Oliveira, C. C. B. – **Configuração de redes de distribuição de energia elétrica com múltiplos objetivos e incertezas através de procedimentos heurísticos**. 1997. 225 p. Tese (Doutorado) - ESCOLA POLITECNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- [5] Kagan, N.; Oliveira, C. C. B. – **A fuzzy constrained decision planning tool to model uncertainties in multiobjective configuration problems**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS, ISAP96, Orlando, EUA. Anais, 2006.
- [6] Meza, E.B.M.; Souza, J.C.S.; Schilling, M.TH.; Do Couto Filho, M.B. – **Utilização de Relações Fuzzy para o Processamento de Alarmes em Sistemas de Potência**. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática (XIV CBA), pp. 2325-2330, Natal - RN, 2002.
- [7] Neumann, J.; Ulam, S. – **The Monte Carlo method**. Journal of the American Statistical Association, Washington, v.44, p.335-41, 1949.
- [8] Rubinstein, R.Y. – **Simulation and the Monte Carlo method**, John Wiley and Sons, New York, 1981

- [9] Oliveira, C. C. B.; Pelegrini, M. A.; Filho M. M.; Silva L. N.; Oliveira H. R. – **Sistema para gerenciamento de medições de tensão – SISMED**, VI SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, 2005.
- [10] Kagan, N.; Bovolato, M. C. – **Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Utilizando Programação Matemática Probabilística**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, Anais do CBA, 1996.
- [11] Kagan, N.; Gouvea M. R.; Arango, H. – **Probabilistic Model For Technical And Economic Evaluation Of Voltage Levels On Low Voltage Supply Systems**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION – CIRED, CIRED Reports. Buenos Aires, Argentina, 1996.
- [12] Valente, A. – **Modelo Probabilístico para Avaliação do Desempenho de Redes de Distribuição Primária**. Tese (Doutorado) - ESCOLA POLITECNICA, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- [13] Strauch, M.; Valente, A.; Ramalho, J.; Pinho, R.; Almeida, A. – **Probabilistic simulator of technical losses in secondary distribution network**. In: CIDEL - Congresso de Distribuição de, 2002, Buenos Aires. CIDEL – Anais, v. Único, 2002.
- [14] Silva, A. M. L. – **Probabilistic Load Flow Computational Techniques**. Tese de Doutorado, Victoria University of Manchester, Inglaterra, 286p, 1980.
- [15] Jorgensen P.; Christensen J. S.; Tande J. O. – **Probabilistic load flow calculation using Monte Carlo techniques for distribution network with wind turbines**, Proceedings of the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, pp. 1146-1151, 14-16 October 1998.
- [16] Borkowska B. – **Probabilistic Load Flow**, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-93, No. 3, pp. 752-759, May/June 1974.

- 
- [17] Ringlee R. J. – **Métodos Probabilísticos para Projeto e Planejamento de Sistemas Elétricos**. Santa Maria, Edições UFSM, 1983.
- [18] Allan, R.N.; Al-Shakarchi, M.R.G. – **Probabilistic Techniques in AC Load Flow Analysis**, Proc. of the IEE, Vol. 124, No. 2, pp. 154-160, Feb. 1977.
- [19] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução n.º 505**, Estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, 26 de novembro de 2001.
- [20] Casolari, R. P. – **Curvas de Carga de Consumidores Industriais – Agregação com Outras Cargas**, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 127p, 1996.
- [21] Figueiredo, F. M. – **Estudo Sobre Curvas de Carga de Consumidores Comerciais**, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 140p, 1994.
- [22] Rodríguez, R. A. – **Modelo Probabilístico para o Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição**, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 118p, 2002.
- [23] Vieira, C. A. H. – **Estabelecimento de Curva Diária de Carga de Consumidores Residenciais**, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 70p, 1993.
- [24] Ahn, S. U. – **Política de Carregamento Econômico dos Transformadores de Distribuição**, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 167p, 1993.
- [25] Belchior, V. D. – **Gerenciamento de Transformadores de Distribuição com Análise na Perda de Vida**, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 134p, 1997.
- [26] Oliveira, C. C. B.; Méffe A.; Gemignani M. – **NOTA DE TRABALHO 1 - Curvas Típicas de Carga da Enersul**, Projeto de Pesquisa e

- Desenvolvimento “Desenvolvimento de Modelos e Ferramenta Computacional para Avaliação dos Riscos e Minimização das Violações de Conformidade de Tensão em Sistemas de Distribuição”, São Paulo, 45p, 2004.
- [27] Kagan, N.; Oliveira, C. C. B.; Robba E. J. – **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**, 1ª edição, São Paulo, Editora Edgar Blucher, p. 149-206, 2005.
- [28] Monticelli, A. – **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 164 p, 1983.
- [29] Gouvêa, M. R. – **Bases conceituais para o planejamento de investimentos em sistemas de distribuição de energia elétrica**, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [30] Aldenderfer, M.S.; Blashfield, R.K. – **Cluster Analysis**, Series: Quantitative Applications in the Social Sciences, SAGE publications.
- [31] Mamdani E. H. – **Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant**, Proc. IEE, vol.121, no.12, pp. 1585 –1588, 1974.
- [32] Togai M.; Watanabe H. – **Expert System on a Chip: An Engine for Real-Time Approximate Reasoning**, IEEE Expert, pp. 55-62, 1986.
- [33] Yasunobu S.; Miyamoto S.; Ihara H. – **Fuzzy Control for Automatic Train Operation System**, 4th Conference on Control in Transportation Systems, Baden-Baden, F.R.G., 1983.
- [34] Yamakawa T. – **Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed Fuzzy Logic Controller Hardware System**, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 32, pp. 161-180.,1987.
- [35] Zadeh, L.A. – **Fuzzy Sets**, Information and Control, 8, 338-353, 1965.

- [36] DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Portaria n.º 47**, dispõe sobre condições técnicas e a qualidade do serviço de energia elétrica., 17 de Abril de 1978.

## Apêndice A: Parâmetros da Rede - ET 7122

A seguir listam-se os dados de um dos circuitos de distribuição utilizados em simulação referente a ET 7122, tendo a barra 1295246 a barra início do circuito.

Código do trafo: 17917

Snom (kVA): 45,00

Tensão de linha (V): 220,00

Tipo de ligação trafo: TRIFÁSICA

Rede: Aérea vertical - cabos nus

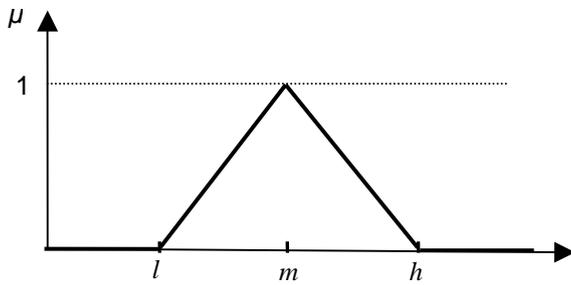
Trechos	Barra inic	Barra fim	Comp (m)	Condutor de Alumínio	
				Fase	Neutro
1	1295246	1488472	14.00	1/0 AWG	2 AWG
2	1295246	1488473	29.00	1/0 AWG	2 AWG
3	1488472	1488474	16.00	2 AWG	2 AWG
4	1488472	1488475	8.00	1/0 AWG	2 AWG
5	1488472	1488476	20.00	2 AWG	2 AWG
6	1488473	2997097	8.00	1/0 AWG	2 AWG
7	1488475	1488478	16.00	1/0 AWG	2 AWG
8	1488476	1488479	41.00	2 AWG	2 AWG
9	1488478	1488483	21.00	1/0 AWG	2 AWG
10	1488481	1488484	18.00	1/0 AWG	2 AWG
11	1488482	1488485	41.00	2 AWG	2 AWG
12	1488483	1488486	22.00	2 AWG	2 AWG
13	1488483	1488487	22.00	1/0 AWG	2 AWG
14	1488483	1488488	6.00	2 AWG	2 AWG
15	1488484	1488489	7.00	1/0 AWG	2 AWG
16	1488485	1488490	39.00	2 AWG	2 AWG
17	1488487	1488491	33.00	1/0 AWG	2 AWG
18	1488488	1488492	31.00	2 AWG	2 AWG
19	1488489	1488493	17.00	2 AWG	2 AWG
20	1488489	1488494	14.00	1/0 AWG	2 AWG
21	1488489	1488495	20.00	2 AWG	2 AWG
22	1488492	1488496	36.00	2 AWG	2 AWG
23	1488494	1488497	19.00	1/0 AWG	2 AWG
24	1488495	1488498	36.00	2 AWG	2 AWG
25	1488496	1488499	30.00	2 AWG	2 AWG
26	2997097	1488480	24.00	2 AWG	2 AWG
27	2997097	1488481	26.00	1/0 AWG	2 AWG
28	2997097	1488482	18.00	2 AWG	2 AWG

## Apêndice B: Modelagem Fluxo de Potência Fuzzy

Define-se a potência aparente fuzzy por fase, de uma barra “b” qualquer, como:

$$\tilde{S}_{fb} = \tilde{P}_{fb} + j\tilde{Q}_{fb}$$

Sendo que, as parcelas ativas e reativas fuzzy são descritas por números fuzzy triangulares, como  $\tilde{P}_{fb} = (P_{fbl}; P_{fbm}; P_{fbh})$ , sendo os valores “l”, “m” e “h”, os valores que descrevem a base do número fuzzy, tendo o ponto “m” pertinência unitária, conforme figura exemplo abaixo:



Seja um sistema exemplo, formado por duas barras, “1” e “2”, as barras estão conectadas por uma rede formada por “n” fases, sendo a impedância de fase de cada ramo definida como  $z_{12}$ .

A tensão no início do circuito é dado por  $\tilde{V}_{fb} = \tilde{V}_{fb_{real}} + j\tilde{V}_{fb_{imag}}$ , sendo as parcelas real e imaginária definidas por  $\tilde{V}_{fb_{real}} = (V_{fb_{real}l}; V_{fb_{real}m}; V_{fb_{real}h})$  e  $\tilde{V}_{fb_{imag}} = (V_{fb_{imag}l}; V_{fb_{imag}m}; V_{fb_{imag}h})$ .

Para iniciar o cálculo do fluxo de potência fuzzy pode-se adotar uma partida tipo “flat-start” em que são atribuídos valores nominais às tensões, e com isto, as parcelas “l”, “m” e “h” passam a ter o mesmo valor.

Desta forma, considerando uma carga na barra “2” de potência  $\tilde{S}_{f2} = \tilde{P}_{f2} + j\tilde{Q}_{f2}$ , pode-se calcular as correntes no ramo que ligas as barras “1” e “2”, adotando-se modelo de carga 100% corrente constante e aplicando operações fuzzy, da seguinte forma:

$$\dot{I}_{f2l} = \frac{\dot{S}_{f2l}^*}{\dot{V}_{f2h}} = \frac{S_{f2l} \angle -\varphi^\circ}{\dot{V}_{f2h} \angle 0^\circ} = I_{f2l} \angle -\varphi^\circ = I_{f2l_{real}l} - jI_{f2l_{imag}l} \quad (A)$$

$$\dot{I}_{f_{21}^m} = \frac{\dot{S}_{f_{2m}}^*}{\dot{V}_{f_{2m}}} = \frac{S_{f_{2m}} \angle -\varphi^\circ}{\dot{V}_{f_{2m}} \angle 0^\circ} = I_{f_{21}^m} \angle -\varphi^\circ = I_{f_{21}^{real}^m} - jI_{f_{21}^{imag}^m} \quad (A)$$

$$\dot{I}_{f_{21}^h} = \frac{\dot{S}_{f_{2h}}^*}{\dot{V}_{f_{2l}}} = \frac{S_{f_{2h}} \angle -\varphi^\circ}{\dot{V}_{f_{2l}} \angle 0^\circ} = I_{f_{21}^h} \angle -\varphi^\circ = I_{f_{21}^{real}^h} - jI_{f_{21}^{imag}^h} \quad (A)$$

Com isto, a corrente calculada será  $\tilde{I}_{f_{21}} = \tilde{I}_{f_{21}^{real}} + j\tilde{I}_{f_{21}^{imag}}$ , sendo as parcelas real e imaginária  $\tilde{I}_{f_{21}^{real}} = (I_{f_{21}^{real}l}; I_{f_{21}^{real}m}; I_{f_{21}^{real}h})$  e  $\tilde{I}_{f_{21}^{imag}} = (I_{f_{21}^{imag}l}; I_{f_{21}^{imag}m}; I_{f_{21}^{imag}h})$ .

Sabe-se que a queda de tensão no trecho entre as barras “1” e “2” é dada por  $\Delta\tilde{V}_{f_{21}} = \Delta\tilde{V}_{f_{21}^{real}} + j\Delta\tilde{V}_{f_{21}^{imag}}$ .

E pode ser calculado por:

$$\Delta\tilde{V}_{f_{21}} = \dot{z}_{12} \cdot \tilde{I}_{f_{21}}$$

Com isto, pode-se finalmente, determinar a tensão fuzzy na barra “2”, pela expressão:

$$\tilde{V}_{f_2} = \tilde{V}_{f_1} - \Delta\tilde{V}_{f_{21}}$$

Tratando-se de modelagem de carga por corrente constante apenas uma iteração é suficiente, porém nos casos de potência constante ou impedância constante, ou pela combinação destes modelos, deverá ser utilizado processo iterativo adequado ao problema, com critério e limite de erro para convergência aderente a precisão requerida para aplicação em avaliação.