



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC ESPECIALIZAÇÃO EM  
ENGENHARIA DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**PEDRO JERÔNIMO PROÊNÇA COSTA PINHO**

**ESTABELECIMENTO DOS LIMITES DOS INDICADORES DE CONTINUIDADE  
DEC E FEC ATRAVÉS UM CONTROLADOR FUZZY**

Salvador  
2013

**PEDRO JERÔNIMO PROENÇA COSTA PINHO**

**ESTABELECIMENTO DOS LIMITES DOS INDICADORES DE CONTINUIDADE  
DEC E FEC ATRAVÉS UM CONTROLADOR FUZZY**

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC como requisito parcial para obtenção do grau de especialista em engenharia do sistema de distribuição de energia elétrica.

Orientador: Msc Sérgio Souto Maia Malbouisson de Mello

Salvador  
2013

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
(Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da Faculdade de Tecnologia SENAI  
CIMATEC)

Pinho, Pedro Jerônimo Proença Costa Pinho

Estabelecimento dos limites dos indicadores de continuidade DEC e FEC através de um controlador Fuzzy/ Pedro Jerônimo Proença Costa Pinho. – Salvador, 2013.

58 f. : Il.

Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. Especialização Engenharia do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica, 2013.

Orientador: Sérgio Souto Maia Malbouisson de Mello .  
1. Energia Elétrica - Brasil. 2. Energia Elétrica - Distribuição. I. Mello, Sérgio, orient. II. Título.

CDD: 621

Gostaria de agradecer aos professores e alunos da turma do Curso de Especialização em Engenharia do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica pela convivência ao longo desta jornada, pela oportunidade das discussões dos diversos temas que ampliaram minha visão na área e que contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal. Agradecimento especial aos amigos da COELBA: Sergio Mello, Joe Morra, André Araújo, Cintia Rêgo, Leone Conceição e Antônio Ladislau que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço a toda minha família pelo incentivo dado para conclusão deste trabalho. E a minha namorada, Maria França, pela compreensão nos momentos de ausência e pela torcida pelo sucesso deste trabalho.

## RESUMO

Após a entrada em vigor dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que alterou as regras da Resolução ANEEL nº 024/2000, A Companhia de Distribuição de Energia Elétrica no Estado da Bahia (COELBA) registrou piora acentuada dos indicadores de qualidade de fornecimento de energia elétrica e um aumento significativo dos valores dos ressarcimentos feitos aos seus consumidores.

Essa nova realidade alertou para a necessidade de serem feitas mudanças na forma de gestão dos indicadores operacionais de qualidade e de se aperfeiçoar o processo de estabelecimento dos limites anuais dos indicadores de continuidade: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) dos conjuntos de unidades consumidoras, realizados normalmente a cada ciclo de revisão tarifária de acordo com o cronograma definido pela ANEEL.

Baseado na teoria dos números *fuzzy* foi desenvolvido, com recursos de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), um sistema para otimização da alocação dos investimentos entre os diversos conjuntos de unidades consumidoras da empresa. Neste trabalho, este sistema especialista foi utilizado especificamente para definir quais os conjuntos de unidades consumidoras devem, prioritariamente, ter os indicadores de continuidade DEC e FEC propostos pela agência reguladores modificados.

**Palavras-chave:** PRODIST. Lógica *Fuzzy*. Qualidade de Energia Elétrica. Conjuntos de Unidades Consumidoras, DEC, FEC.

## **ABSTRACT**

*After the entry into force of the Procedures for Distribution of Electrical Energy in the National Electric System (PRODIST), which changed the rules of ANEEL Resolution nº 024/2000 The Company of Electricity Distribution in the State of Bahia (COELBA) registered marked worsening of indicators of quality of electricity supply and a significant increase in the values of reimbursements made to its consumers.*

*This new reality alerted to the need for further changes in management of operational indicators of quality and to improve the process of establishing annual limits of continuity indicators: Average Interruption Duration Per Consumer (DEC) and Frequency Equivalent interruption Per Consumer (FEC) of the sets of consumer units, usually performed every tariff review cycle according to the schedule defined by ANEEL.*

*Based on the theory of fuzzy numbers was developed with funding projects Research and Development (R & D), a system for optimizing the allocation of investments among different sets of consumer units of the company. In this work, this expert system was used to specifically define which sets of consumer units should primarily have the continuity indicators proposed by the DEC and FEC modified regulatory agency.*

**Keywords:** *PRODIST. Fuzzy Logic. Power Quality. Set Consumers Units, DEC, FEC.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação da quantidade de multas pagas entre 2007 e janeiro 2010.	21
Figura 2 - Comparação dos valores pagos com multas entre 2007 e janeiro 2010...	21
Figura 3 - Comparação dos valores pagos com multas entre janeiro de 2010 e janeiro de 2009.....	22
Figura 4 - Representação dos conjuntos de consumidores no mapa da Bahia. ....	26
Figura 5 – Exemplo de cálculo do DEC e do DIC.....	29
Figura 6 – Exemplo de cálculo do FEC e do FIC. ....	29
Figura 7 – Função de pertinência da teoria clássica de conjuntos .....	34
Figura 8 – Função de pertinência na lógica <i>fuzzy</i> .....	35
Figura 9 - Representação gráfica de um número <i>fuzzy</i> triangular .....	36
Figura 10 - Representação gráfica de um número <i>fuzzy</i> trapezoidal .....	36
Figura 11 - Representação gráfica de um número <i>fuzzy</i> em forma de sino .....	37
Figura 12 – Funções de pertinência <i>fuzzy</i> .....	38
Figura 13 – Estrutura do controlador <i>fuzzy</i> .....	39
Figura 14 - Modelo esquemático do projeto .....	41
Figura 15 – Visão gráfica do modelo de <i>fuzzificação</i> .....	42
Figura 16 – Número <i>fuzzy</i> trapezoidal.....	44
Figura 17 – Cálculo do grau de pertinência.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelo <i>fuzzy</i> definido no projeto P&D.....	42
Tabela 2 - Conjuntos de uma concessionária .....	45
Tabela 3 - Valor normalizado .....	45
Tabela 4 - Número <i>fuzzy</i> que representa o número de desligamentos .....	46
Tabela 5 – Dados de entrada para o controlador <i>fuzzy</i> .....	49
Tabela 6 – Coeficiente heurístico dos dados de entrada do controlador <i>fuzzy</i> . .....	49
Tabela 7 - Número <i>fuzzy</i> definido pela COELBA .....	50
Tabela 8 – Conjuntos de unidades consumidoras prioritários.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRADEE	Associação Brasileira de Empresas de Distribuição de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração Individual de Interrupção por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção Por Unidade Consumidora
FIC	Frequência Individual de Interrupção Por Unidade Consumidora

## SUMÁRIO

Capítulo 1 .....	17
1.1 INTRODUÇÃO .....	17
<b>1.1.1 Contextualização .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2 A Reestruturação do Setor Elétrico .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1.3 Resolução 024/ANEEL de 27 de janeiro de 2000.....</b>	<b>19</b>
<b>1.1.4 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST.....</b>	<b>20</b>
1.2 ROTEIRO DO TRABALHO .....	23
Capítulo 2 .....	24
2.1 CONJUNTOS DE UNIDADES CONSUMIDORAS.....	24
2.2 INDICADORES OPERACIONAIS DA QUALIDADE DO SERVIÇO NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	27
<b>2.2.1 Indicadores Operacionais da Qualidade.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2 Compensações aos Consumidores .....</b>	<b>30</b>
Capítulo 3 .....	32
3.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR <i>FUZZY</i> .....	33
<b>3.1.1 Lógica Fuzzy .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.2 Funções de Pertinência <i>Fuzzy</i>.....</b>	<b>35</b>

3.1.3 Estrutura do Controlador <i>Fuzzy</i> .....	38
3.2 PROGRAMA PARA HIERARQUIZAÇÃO DE CONJUNTOS DE UNIDADES CONSUMIDORAS .....	40
3.2.1 Modelo de <i>Fuzzificação</i> .....	41
3.2.2 Validação do Modelo de Fuzzificação .....	42
3.2.3 Inferência e critério de ordenação.....	44
3.2.4 Exemplo de Aplicação do Modelo de <i>Fuzzificação</i> .....	45
Capítulo 4 .....	48
4.1 ESTABELECIMENTO DOS LIMITES ANUAIS DE DEC E FEC UTILIZANDO UM CONTROLADOR FUZZY .....	48
Capítulo 5 .....	52
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	52
5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	54
REFERENCIAS .....	55

## CAPÍTULO 1

### 1.1 INTRODUÇÃO

#### 1.1.1 Contextualização

Nas últimas décadas do século passado ocorreram às privatizações nos setores de infraestrutura do Brasil. No caso da indústria de energia elétrica foram necessárias algumas modificações para adaptação a uma estrutura competitiva (ARAÚJO, 2011). Entre as principais mudanças realizadas, destaca-se o tratamento diferenciado de cada uma das cadeias produtivas do setor elétrico brasileiro: geração, transmissão, distribuição e comercialização. Resumidamente as reformas para a reestruturação do setor elétrico brasileiro definiram para os seguimentos da indústria de energia elétrica um modelo de regulação e um agente responsável (ABREU, 1999).

- **Geração:** Competição e capital privado.
- **Transmissão:** Competição, operador independente do sistema.
- **Distribuição:** Monopólio natural, concessionárias.
- **Comercialização:** Competição, comercializadoras.

As reformas promovidas no setor elétrico brasileiro permitem a classificação do atual modelo como híbrido. Isso porque assim como no modelo de gestão que vigorava até 1996 preserva as características de monopólio na distribuição e assim como o modelo de gestão competitivo, que vigorou entre 1997 e 2004, garante que setores como geração, transmissão e comercialização sejam potencialmente competitivos.

O serviço de distribuição de energia elétrica, por se tratar de monopólio natural, está submetido à forte regulação. Então um importante marco deste novo modelo do setor elétrico brasileiro foi à criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 1996, que simbolizava a ação estatal através do equilíbrio

entre os interesses privados (competição, respeito aos direitos dos usuários, admissão da exploração lucrativa de atividade econômica) com as metas e objetivos de interesse público (universalização, redução de desigualdades, modicidade de preços e tarifas, maiores investimentos, etc.).

A qualidade do fornecimento de energia elétrica historicamente esteve associada à continuidade do fornecimento e à conformidade dos níveis de tensão, ou seja, ao fornecimento de energia sem interrupções e a variações dos níveis de tensão dentro de parâmetros pré-estabelecidos (ARAÚJO, 2011), cujos primeiros indicadores para aferição quanto a continuidade do fornecimento de energia foram formalmente estabelecidos pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) com a edição da Portaria DNAEE nº 046/78 (MME,1978). Nesta, a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e a Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) foram definidos, sendo utilizados até os dias atuais (MME, 1978).

A partir da Resolução ANEEL nº 024/2000, iniciou-se um novo processo de regulação e fiscalização da qualidade da energia elétrica. Na abordagem proposta, as concessionárias deveriam estabelecer conjuntos elétricos e de consumidores dentro de sua área de concessão considerando sua capacidade de prover condições de atendimento homogêneas por área.

### **1.1.2 A Reestruturação do Setor Elétrico**

A reestruturação dos serviços públicos de energia elétrica teve como principal característica a criação e/ou simulação de um ambiente competitivo em sua cadeia produtiva, sendo um dos pontos críticos a conciliação entre a qualidade de fornecimento de energia elétrica e a lucratividade das empresas com a modicidade tarifária. É factível destacar que a função do regulador neste processo é garantir o equilíbrio entre as necessidades do consumidor (qualidade do produto e modicidade tarifária) e as práticas empresarias da concessionária (ARAÚJO, 2011).

Na tentativa de garantir esse equilíbrio, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desenvolveu mecanismos para garantir a qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias de eletricidade, baseados inicialmente na

Resolução ANEEL nº 024/2000 e depois na Resolução ANEEL nº 505/2000. Estas resoluções estabeleceram as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras e as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão em regime permanente, respectivamente (TANURE, 2000).

### **1.1.3 Resolução 024/ANEEL de 27 de janeiro de 2000**

De acordo com a lei nº 9.427/1996 a ANEEL tem a competência de regular os serviços de energia elétrica, estimular a melhoria do serviço prestado e zelar, pela sua boa qualidade, observando, o disposto na legislação vigente de proteção e defesa do consumidor.

A partir da Resolução ANEEL 024/2000, iniciou-se um novo processo de regulação e fiscalização da qualidade da energia. Na abordagem proposta, as concessionárias deveriam estabelecer conjuntos de consumidores dentro de sua área de concessão considerando sua capacidade de prover condições de atendimento homogêneas por área (ANEEL, 2000).

Para o tratamento estatístico dos conjuntos de unidades consumidoras formados pelas empresas, adotou-se o método de Análise de Agrupamentos ou *Cluster Analysis*, que consiste em uma técnica analítica cujo objetivo é classificar uma amostra de indivíduos ou objetos em um pequeno número de grupos mutuamente excludentes, com base nas similaridades entre as entidades (TANURE, 2000).

Para formação dos conjuntos de unidades consumidoras estabeleceu-se a utilização de seis atributos físico-elétricos, (1) área (km<sup>2</sup>); (2) extensão de rede primária (km); (3) média mensal de energia consumida nos últimos doze meses (kWh); (4) total de unidades consumidoras atendidas; (5) potência instalada (KVA); e (6) se pertencem ao sistema isolado ou interligado.

A metodologia foi inicialmente aplicada a 4.135 conjuntos de 56 concessionárias (TANURE, 2000), em cerca de 30 agrupamentos, com metas individuais e coletivas para os consumidores. Assim, por exemplo, grandes centros urbanos estariam agrupados em um *cluster* e cidades históricas e turísticas estariam

em outro agrupamento. A correta determinação desses *clusters* seria uma das etapas mais sensíveis da metodologia.

Conforme Resolução ANEEL nº 024/2000, para cada conjunto de unidades consumidoras devem ser estabelecidas metas anuais de continuidade aplicando técnica de análise comparativa de desempenho, tendo como referência atributos físico-elétricos dos conjuntos e os dados históricos de DEC e FEC. As metas de desempenho dos indicadores individuais: Duração Individual de Interrupção Por Unidade Consumidora (DIC) e Frequência Individual de Interrupção Por Unidade Consumidora (FIC) eram estabelecidas em função das metas dos indicadores coletivos. Além disso, a meta para a Duração Máxima de Interrupção Por Unidade Consumidora (DMIC) correspondia a 50% da meta mensal do DIC.

#### **1.1.4 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) tiveram a primeira versão aprovada pela Resolução ANEEL 345/2008 e foram criados com a finalidade substituir e revisar algumas das Resoluções da ANEEL. Por exemplo, o módulo 8, referente a qualidade da energia elétrica, substituiu a Resolução ANEEL nº 024/2000, sobre continuidade de fornecimento, e a Resolução ANEEL nº 505/2000, que regulava a qualidade de tensão de fornecimento (PRODIST, 2012).

As principais mudanças contidas no PRODIST foram: extinção das multas por violação dos indicadores coletivos (DEC e FEC), redução dos limites dos indicadores individuais (DIC, FIC e DMIC) e aumento do coeficiente de majoração (Kei), que está relacionado à severidade das multas. As consequências dessas alterações foram: O aumento da quantidade de clientes a serem compensados e o aumento do valor das compensações.

Após o início da vigência das regras do PRODIST, logo no primeiro mês, em janeiro de 2010, o número de clientes ressarcidos por violação dos indicadores individuais foi de mais de 370.000 clientes. A partir da Figura 1 é possível verificar o aumento expressivo dos clientes ressarcidos em 2010, quando se compara com os

valores obtidos com o ano anterior (2009). Em todo o ano de 2009, aproximadamente 306.000 clientes foram ressarcidos, ou seja, um número menor que o ocorrido somente no mês de janeiro de 2010.

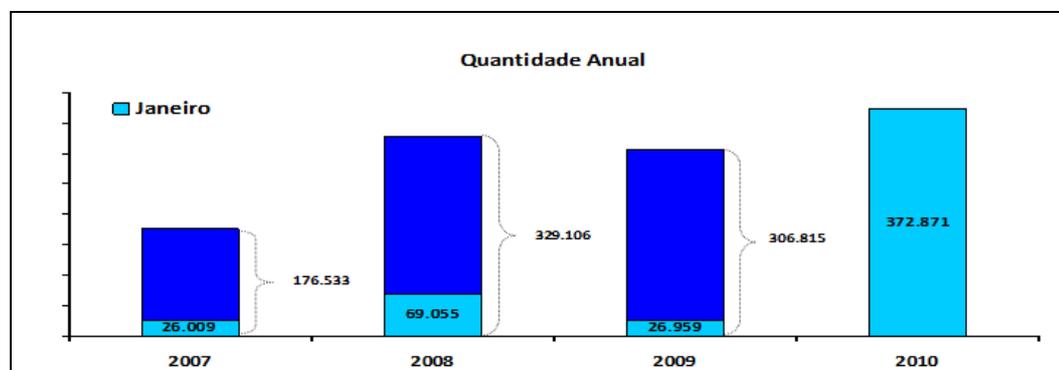


Figura 1 - Comparação da quantidade de multas pagas entre 2007 e janeiro 2010

Na Figura 2, verifica-se que os valores pagos no mês de janeiro de 2010 corresponderam a aproximadamente 50% do montante ressarcido em todo o ano de 2009.

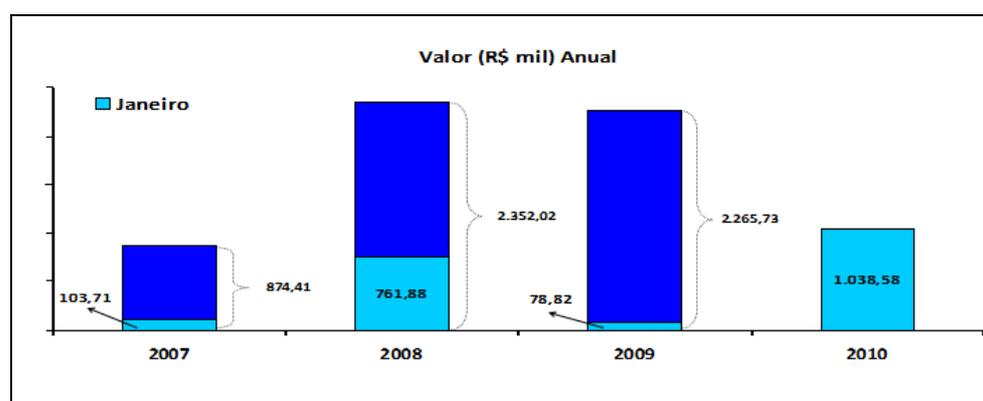


Figura 2 - Comparação dos valores pagos com multas entre 2007 e janeiro 2010

A análise de outras distribuidoras mostrava a mesma tendência de elevação substancial das multas. Na Figura 3 estão colocadas as variações dos valores das multas entre o mês de janeiro de 2010 comparadas com o mesmo mês de 2009 de 12 grandes empresas (E) distribuidoras de energia elétrica representantes de todas as regiões do país. Observa-se, por exemplo, que no mês de janeiro de 2010 as multas da distribuidora E1 foram 26 vezes maiores que os valores pagos por essa mesma distribuidora no mês de janeiro de 2009.

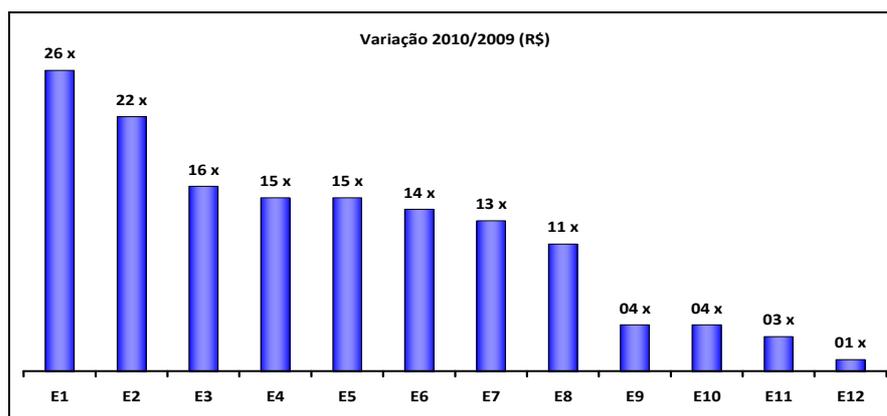


Figura 3 - Comparação dos valores pagos com multas entre janeiro de 2010 e janeiro de 2009

Fonte: (ABRADEE, 2012).

Os valores dos limites anuais dos indicadores de continuidade dos conjuntos de unidades consumidoras são disponibilizados por meio de audiências públicas e são estabelecidos em resolução específica, de acordo com a periodicidade da revisão tarifária da distribuidora.

O processo de estabelecimento dos limites dos indicadores de continuidade DEC e FEC inicia-se com emissão, pela agência reguladora, de ofício contendo a proposta para os limites anuais de DEC e FEC em conformidade com as regras do PRODIST.

Os limites são discutidos de acordo com cronograma definido pela agência reguladora. A concessionária pode se manifestar quanto aos limites propostos através de carta ou reunião com a superintendência de serviços de distribuição da ANEEL. Entretanto as alterações propostas devem seguir as seguintes premissas:

1. Respeitar os limites globais da distribuidora, que foram obtidos considerando o número de unidades consumidoras definidos pela ANEEL;
2. Não ultrapassar os limites dos conjuntos já estabelecidos em resolução;
3. Avaliar os conjuntos que possuem limites de continuidade elevados em relação aos demais conjuntos de sua área de concessão, de forma a uniformizar esses limites.

Caso existam contrapropostas por parte da distribuidora, estas deverão ser apresentadas por conjunto de unidades consumidoras, e com a fundamentação

pautada na realidade específica de cada conjunto pleiteado. Exceções às premissas supracitadas devem ser apresentadas para avaliação da ANEEL, mediante o envio de informações detalhadas.

No caso específico da COELBA, para definir os conjuntos de unidades consumidoras com limites anuais dos indicadores de continuidade DEC e FEC que prioritariamente devem ter os limites modificados utilizou-se ferramenta computacional, desenvolvida com os recursos de um projeto de P&D, baseado em lógica *fuzzy*. Este sistema permite ranquear os conjuntos de unidades consumidoras e identificar quais estão distantes das metas de qualidade estabelecidas pela agência reguladora e pelos padrões definidos pela concessionária a serem aplicados no ciclo de revisão tarifária (período de cinco anos).

## 1.2 ROTEIRO DO TRABALHO

Além da presente introdução este trabalho está estruturado em mais 4 capítulos. No capítulo 2 são conceituados os indicadores de qualidade coletivos de fornecimento (DEC e FEC), os indicadores de qualidade individuais (DIC, FIC e DMIC). São apresentadas também as fórmulas de cálculo dos valores dos ressarcimentos no caso de transgressão dos indicadores individuais.

No capítulo 3 são apresentados os conceitos da programação linear *fuzzy*. Além disso, também é apresentado o controlador *fuzzy* desenvolvido com os recursos de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P & D) da COELBA. O propósito deste sistema é o de hierarquizar os conjuntos de unidades consumidoras da COELBA utilizando programação linear *fuzzy* e determinar quais os conjuntos estão em condições mais desfavoráveis de atendimento aos padrões de qualidade exigidos pela agência reguladora.

No capítulo 4, está apresentado um estudo de caso elaborado a partir do controlador *fuzzy* apresentado no capítulo 3. Neste caso, as simulações determinaram os conjuntos de unidades consumidoras onde os limites anuais dos indicadores operacionais DEC e FEC devem ser renegociados com a ANEEL.

No capítulo 5 estão colocadas as considerações finais e as referências bibliográficas.

## CAPÍTULO 2

O fornecimento de energia elétrica é um dos mais importantes serviços públicos, pois está diretamente relacionado ao cotidiano e a qualidade de vida da população. Além disso, é considerado uma das bases para o desenvolvimento econômico do país (ARAÚO, 2011).

O processo de monitoramento e controle da qualidade do fornecimento de energia elétrica surgiu com a edição da Portaria DNAEE nº 046/78. Entretanto com reestruturação do setor elétrico e muitas concessionárias em processo de privatização, aspectos como falta de fiscalização, prazos dilatados para correção das não conformidades na qualidade do fornecimento e a ausência de punição pelo não cumprimento dos padrões de qualidade tornaram a Portaria DNAEE nº 046/78 incompatível com os interesses de um estado regulador (MELLO, 2012).

Com a edição da Resolução ANEEL nº 024/2000 avanços significativos foram alcançados. As principais mudanças introduzidas foram (ARAÚJO, 2011):

- a) As concessionárias passaram a ser punidas pelo não cumprimento dos indicadores de qualidade.
- b) Aumento da transparência nos processos a partir das audiências públicas e da presença do valor apurado para os indicadores individuais nas contas de energia dos consumidores.
- c) Aumento da fiscalização por parte da agência reguladora.
- d) Introdução de novos indicadores.

A partir de 2010, as atividades para o gerenciamento da qualidade do serviço as concessionárias de energia elétrica passaram a ser pautadas no PRODIST, mais especificamente no módulo 8 deste documento que trata da qualidade da energia elétrica (MELLO, 2012).

### 2.1 CONJUNTOS DE UNIDADES CONSUMIDORAS

No módulo 8 do PRODIST, a qualidade da energia elétrica é abordada sob dois aspectos: qualidade do serviço e qualidade do produto:

- a) A qualidade do serviço está associada com a disponibilidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Este módulo do PRODIST estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.
- b) Para a qualidade do produto, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem a ANEEL fixar padrões para os indicadores de qualidade de energia elétrica.

Para análise e acompanhamento dos indicadores de qualidade coletivos (DEC e FEC) foi necessário à criação de áreas que pudessem agrupar os consumidores. Dentro da metodologia proposta pelo PRODIST, na Resolução ANEEL n° 395/2009, determinou-se que os conjuntos de unidades consumidoras deveriam abranger toda área atendida pela concessionária, respeitando as seguintes condições:

- a) Quando um conjunto for subdividido/agrupado deverão ser definidos novos padrões de continuidade, levando-se em consideração o histórico existente;
- b) O conjunto definido deverá permitir a identificação geográfica da localização das unidades consumidoras.
- c) Não poderão ser agrupadas, em um mesmo conjunto, unidades consumidoras situadas em áreas não contíguas.

O conjunto de unidades consumidoras é definido por subestação que tenha o primário em alta tensão e o secundário em média tensão, e a sua abrangência é definida pela rede de média tensão a jusante da subestação e de propriedade da distribuidora, conforme pode ser observado na Figura 4.

Com o PRODIST, a COELBA passa a ter 194 conjuntos, vinculados as subestações com tensões primárias em 69 kV ou 138 kV, conforme pode ser observado na figura 4.

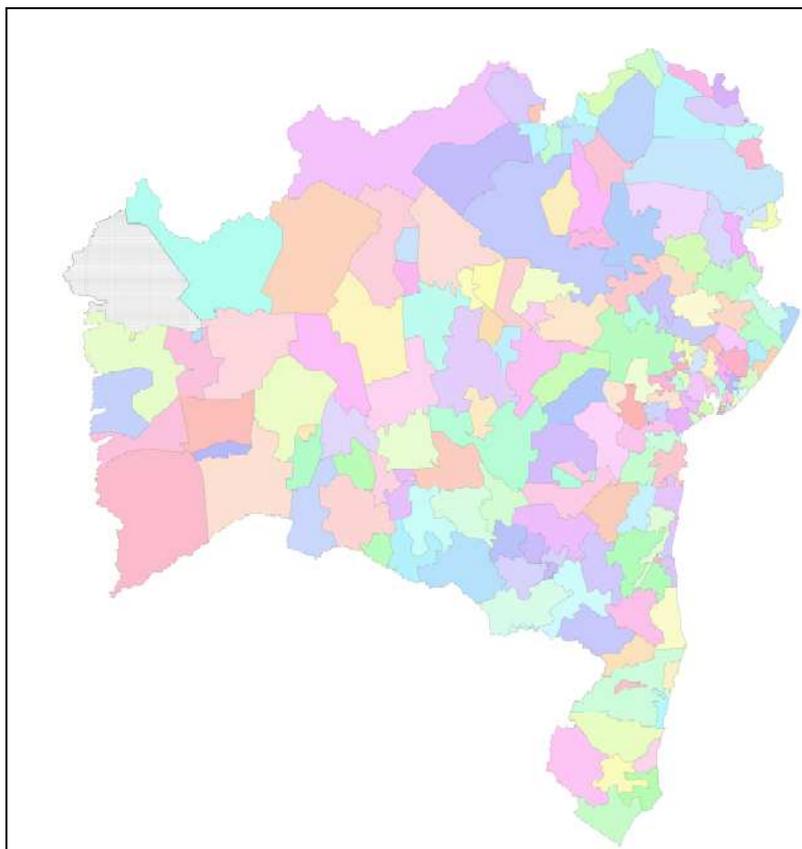


Figura 4 - Representação dos conjuntos de consumidores no mapa da Bahia.

A partir da formação dos conjuntos elétricos, é possível para o órgão regulador, verificar e comparar o desempenho das distribuidoras. Os conjuntos devem permitir a identificação geográfica da localização das unidades consumidoras que devem ser agrupadas em áreas contíguas. Tal restrição visa facilitar a fiscalização das metas de qualidade, já que a relativa flexibilidade da formação dos conjuntos não deve atrapalhar o processo de análise dos indicadores de qualidade. Neste caso, é fundamental a comparação dos indicadores de qualidade em áreas com aspectos sociais, econômicos e técnicos semelhantes.

Por esta razão a ANEEL definiu, através da Resolução ANEEL n° 395/2009, como estratégia, agrupar conjuntos semelhantes e estabelecer para cada agrupamento metas de qualidade que fizessem com que, no final de um horizonte, estes conjuntos tivessem desempenho semelhante (ANEEL, 2009).

Os conjuntos de unidades consumidoras determinados pelas regras do PRODIST mantêm os mesmos atributos das regras estabelecidos pela Resolução ANEEL n° 024/2000:

- a) Área (km<sup>2</sup>)
- b) Extensão da rede de média tensão (Km)
- c) Média mensal da energia consumida nos últimos 12 meses (MWh)
- d) Total de unidades consumidoras atendidas
- e) Potência instalada (KVA)
- f) Localização (sistema isolado ou interligado).

## 2.2 INDICADORES OPERACIONAIS DA QUALIDADE DO SERVIÇO NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

### 2.2.1 Indicadores Operacionais da Qualidade

A ANEEL, como forma de avaliar a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia elétrica, estabelece indicadores com o objetivo de controlar e monitorar as interrupções no fornecimento de energia elétrica. Estes indicadores são calculados para diferentes períodos de apuração: mensal, trimestral e anual. São subdivididos em indicadores individuais, calculados para todas as unidades consumidoras, e indicadores coletivos, que são verificados para os conjuntos de consumidores previamente definidos pela concessionária.

Desta forma, o órgão regulador na Resolução ANEEL n° 395/2009 exige que todas as empresas de distribuição de energia elétrica apurem e informem, nas faturas de energia, os seguintes indicadores para seus consumidores:

Duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DIC).

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \tag{2.1}$$

Frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão (FIC).

$$FIC = n \quad (2.2)$$

Duração máxima de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DMIC).

$$DMIC = t(i) \max \quad (2.3)$$

Sendo:

- I = Índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a n
- t (i) = tempo de duração da interrupção (i) na unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração.
- t (i) max = valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção contínua (i), no período de apuração, verificada na unidade consumidora considerada, expresso em horas e centésimos de hora.

São avaliados os índices de continuidade por conjunto de consumidores a seguir discriminados:

Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC).

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c}$$

(2.4)

Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC).

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c} \quad (2.5)$$

Nas quais:  $i$ , é o índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto e  $C_c$  é número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT.

As figuras 5 e 6 apresentam exemplos numéricos para o cálculo dos indicadores DEC, FEC, DIC e FIC:

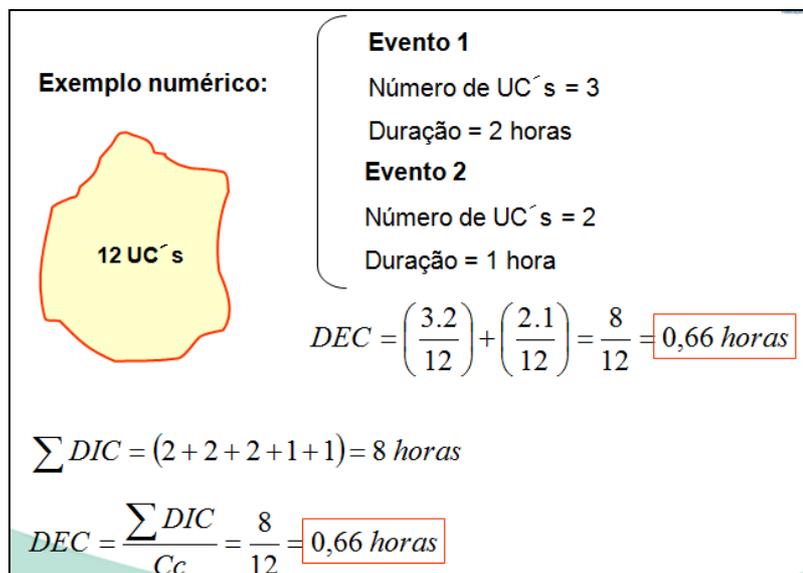


Figura 5 – Exemplo de cálculo do DEC e do DIC.

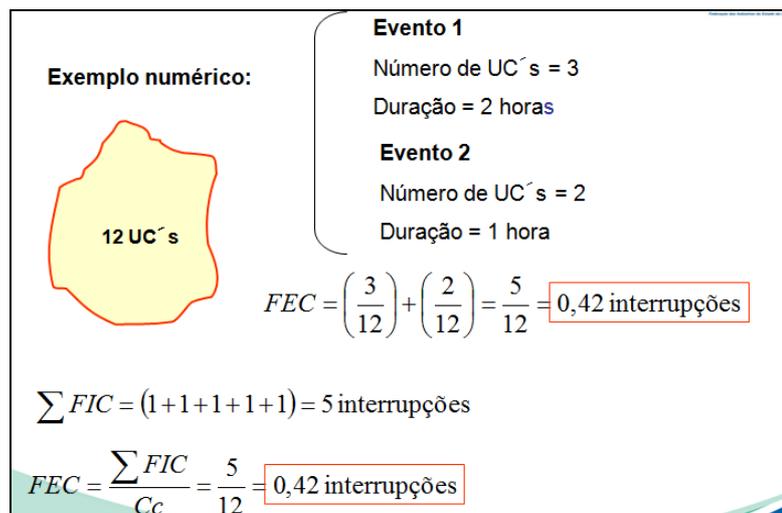


Figura 6 – Exemplo de cálculo do FEC e do FIC.

### 2.2.2 Compensações aos Consumidores

Quando os indicadores individuais da qualidade do serviço estabelecidos pelo órgão regulador (DIC, FIC e DMIC), ultrapassam as metas estabelecidas pelo órgão regulador os consumidores afetados devem ser ressarcidos conforme estabelecido na Resolução ANEEL nº 395/2009. De acordo com o estabelecido no PRODIST a penalidade aplicada à concessionária, no caso de violação nos indicadores de um consumidor, deve ser calculada conforme abaixo:

Para o DIC:

$$Penalidade = \left( \frac{DIC_v}{DIC_p} - 1 \right) \cdot DIC_p \cdot \frac{CM}{730} \cdot kei \quad (2.6)$$

Para o DMIC:

$$Penalidade = \left( \frac{DMIC_v}{DMIC_p} - 1 \right) \cdot DMIC_p \cdot \frac{CM}{730} \cdot kei \quad (2.7)$$

Para o FIC:

$$Penalidade = \left( \frac{FIC_v}{FIC_p} - 1 \right) \cdot FIC_p \cdot \frac{CM}{730} \cdot kei \quad (2.8)$$

Sendo:

- a) **DIC<sub>v</sub>** - Duração de Interrupção por Unidade Consumidora, verificada no período em horas e centésimos de hora;
- b) **DIC<sub>p</sub>** - Metas de continuidade estabelecidas no período para o indicador de Duração de Interrupção Individual em horas e centésimos de hora;
- c) **DMIC<sub>v</sub>** - Duração Máxima de Interrupção Contínua, verificada, por interrupção, em horas e centésimos de hora;

- d) **DMICp** - Metas de continuidade estabelecidas para o indicador, por interrupção, em horas;
- e) **FICv** - Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora verificada, em número de interrupções por período;
- f) **FICp** - Metas de continuidade estabelecidas no período para o indicador de Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora, em número de interrupções por período;
- g) **CM** - Média aritmética do valor das faturas mensais do consumidor afetado, relativas às tarifas de uso, referentes aos 3 (três) meses anteriores à ocorrência;
- h) **730** - Número médio de horas no mês;
- i) **kei** - Coeficiente de majoração, que variará de 10 a 50, e cujo valor, fixado inicialmente em 10 (dez), poderá ser alterado pela ANEEL a cada revisão ordinária das tarifas.

### CAPÍTULO 3

A restrição nos investimentos faz com que uma organização busque formas de identificar quais são os investimentos prioritários para alcançar seus objetivos ou para permitir o incremento e/ou a manutenção de seus níveis técnicos e de qualidade (PINHO,1997).

Os conjuntos de unidades consumidoras definidos a partir da Resolução ANEEL nº 024/2000 e ratificados pelas regras do PRODIST através da Resolução ANEEL nº 345/2008 e suas revisões, são unidades utilizadas para determinar o grau de adequação da concessionária às regras estabelecidas pela agência reguladora (MELLO, 2012).

Então na estruturação do processo para otimização dos investimentos, na COELBA, optou-se por um, utilizando os recursos de um projeto de P&D, *software* que possibilitasse hierarquizar os conjuntos de unidades consumidoras, baseando-se na criação de um *ranking* utilizando diversos indicadores de qualidade da energia elétrica, tais como DEC e FEC e outros mais que podem ser definidos pelos próprios usuários do sistema, tais como: percentual de clientes com reclamações, quantidade de medições de tensão fora da faixa adequada, valor dos ressarcimentos por descumprimento dos limites individuais (DIC, FIC e DMIC), dentre outros (MELLO, 2012).

De forma mais objetiva e preliminar, pode-se definir lógica *fuzzy* como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores (STRAUCH, 2009).

No desenvolvimento do projeto de P&D os indicadores foram incorporados a um sistema, que utiliza a lógica *fuzzy* como ferramenta de análise, para determinar quais conjuntos unidades consumidoras devem, prioritariamente, receber o maior volume de investimentos da empresa (MELLO, 2012).

### 3.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY

#### 3.1.1 Lógica Fuzzy

A lógica *fuzzy* está relacionada com a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Introduzida por *Zadeh* (ZADEH, 1965), sendo geralmente utilizadas em problemas que envolvem incerteza. Essa incerteza pode ser pela visão que se tem do problema a ser solucionado ou porque a natureza do problema é, de fato, incerta. O problema de programação linear *fuzzy* com números *fuzzy* pode ser considerado como o modelo de problemas de decisão onde a estimativa humana é influente (TANAKA; ASAI, 1984).

A característica especial da lógica *fuzzy* é a de apresentar uma forma inovadora de manuseio de informações imprecisas. A lógica *fuzzy* provê um método para se converter a experiência humana em uma forma compreensível para os computadores. Sendo assim o enfoque *fuzzy* possibilita estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos (SIMÕES, 1999).

A ideia básica em controle *fuzzy* é modelar as ações a partir do conhecimento dos especialistas ao invés de modelar o processo em si. A motivação para essa abordagem veio de casos onde o conhecimento especialista de controle era disponível, seja por meio de operadores ou projetistas e os modelos matemáticos envolvidos eram muito custosos (MELLO, 2012).

Na teoria clássica de conjuntos, a pertinência de um elemento a um conjunto é avaliada em termos binários de acordo com uma condição bivalente, um elemento pertence ou não pertence a um conjunto. De forma diferente a teoria de conjuntos *fuzzy* permite uma avaliação gradual da pertinência dos elementos em um determinado conjunto. Isto é descrito com auxílio de uma função de pertinência que varia gradualmente entre zero e um (OLIVEIRA, 2012).

Na teoria clássica de conjuntos, dado um universo  $U$  e um elemento particular  $x \in U$ , o grau de pertinência  $\mu_A(x)$  com respeito a um conjunto  $A \subseteq U$  é dado pela equação 3.1:

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

A função  $\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\}$  é chamada de função característica. Frequentemente uma generalização desta ideia é utilizada, por exemplo, para manipulação de dados com erros limitados. Conforme apresentado na figura 7, todos os números dentro de um erro percentual possuem fator de pertinência um enquanto que os demais possuem fator de pertinência zero.

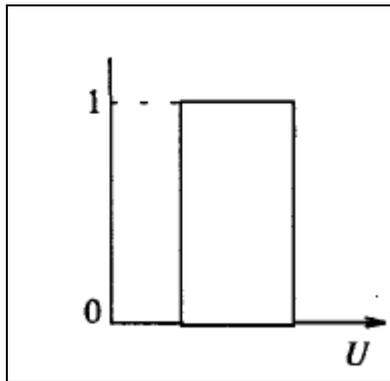


Figura 7 – Função de pertinência da teoria clássica de conjuntos

A teoria dos conjuntos *fuzzy* oferece uma forma de modelar a incerteza dos dados sem necessidade de recorrer aos processos estocásticos (RAMIK; ROMMELFANGER, 1996). Essa teoria de conjuntos tem apresentado popularidade em diversas aplicações práticas incluindo-se gerenciamento econômico, medicina e controle de processos (OLIVEIRA, 2012). Os últimos anos testemunharam um rápido crescimento de popularidade dos sistemas de controle *fuzzy* em aplicações de engenharia. O recente interesse em controladores de lógica *fuzzy* pode ser atribuído à sua capacidade explorar tolerância para imprecisão e incerteza com objetivo de alcançar robustez e solução de baixo custo (OLIVEIRA, 2012).

Zadeh (ZADEH, 1965) propôs uma caracterização mais ampla na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. Sendo assim o fator de pertinência pode assumir qualquer valor entre zero e um, sendo que o valor zero indica total exclusão e o valor um representa completa pertinência.

Ou seja, a lógica *fuzzy* é uma forma de gerenciamento de incertezas, através da expressão de termos com um grau de certeza, num intervalo numérico  $[0,1]$ , onde a certeza absoluta é representada pelo valor 1 (SIMÕES, 1999).

Neste contexto, expressões verbais, imprecisas, qualitativas, inerentes da comunicação humana, que possuem vários graus de incertezas, são perfeitamente manuseáveis através da lógica *fuzzy* (SIMÕES, 1999). Isso porque o método consiste em se realizar uma tarefa de acordo com a experiência prévia, com regras práticas ou “dicas” e estratégias já frequentemente utilizadas (método heurístico).

Por exemplo, para expressar a ideia de que uma temperatura por volta de 25°C, pode se utilizar uma função de pertinência triangular, com pico em 25°C, para sugerir a ideia de que quanto mais perto do número 25, mais ele se identifica com o conceito representado (conforme apresentado na figura 8).

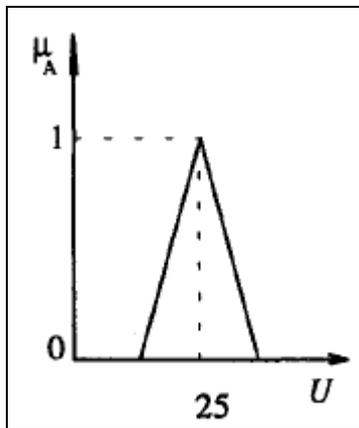


Figura 8 – Função de pertinência na lógica *fuzzy*

Os dois principais componentes de um sistema *fuzzy* são as funções de pertinência utilizadas e a estrutura do controlador *fuzzy*.

### 3.1.2 Funções de Pertinência *Fuzzy*

Funções de pertinência *fuzzy* representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas dos sistemas *fuzzy*. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso (SIMÕES, 1999). Universo de discurso de uma variável é o conjunto de todos os valores possíveis que uma variável específica pode assumir (SIMÕES, 1999).

As funções de pertinência *fuzzy* mais comuns são as triangulares, trapezoidais e em forma de sino. As equações 3.2, 3.3 e 3.4 e as figuras 9, 10 e 11 apresentam as funções de pertinência definidas para os números *fuzzy* triangulares, trapezoidais e em forma de sino respectivamente (BEZDEK, 2000):

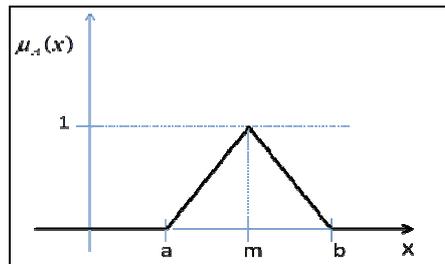


Figura 9 - Representação gráfica de um número *fuzzy* triangular

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x = m \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (3.2)$$

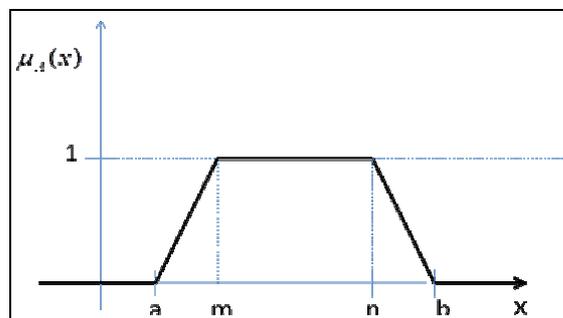


Figura 10 - Representação gráfica de um número *Fuzzy* trapezoidal

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (3.3)$$

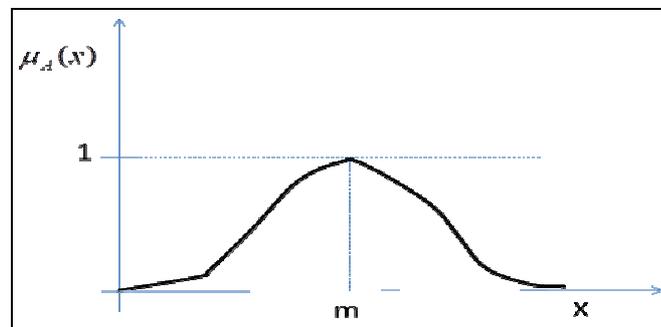


Figura 11 - Representação gráfica de um número *Fuzzy* em forma de sino

$$\mu_A(x) = \{\varepsilon - k(x-m)^2\}, \text{ com } k > 1 \quad (3.4)$$

A quantidade de funções em um mesmo universo de discurso e seu formato deve ser escolhida com base na experiência humana e na natureza do processo a ser controlado. Um número prático de conjuntos fuzzy linguísticos (funções de pertinência) é algo entre 2 e 7. Quanto maior o número de conjuntos maior a precisão, mas a demanda computacional também é mais significativa (SIMÕES, 1999). Por exemplo, experiências mostraram que uma mudança de 5 conjuntos triangulares para 7 aumenta a precisão em torno de 15%, a partir de valores maiores não há melhorias significativas (SIMÕES, 1999).

As funções de pertinência não precisam ser simétricas ou igualmente espaçadas. O grau de superposição entre as funções de pertinência *fuzzy* determinados experimentalmente como adequados é no mínimo 25% e no máximo

75%, sendo 50% um compromisso adequado para um sistema em malha fechada (SIMÕES, 1999).

A figura 12 mostra um conjunto contendo três de funções de pertinência fuzzy: duas trapezoidais e uma triangular, neste caso, a superposição é equidistante e os rótulos dos conjuntos podem ser denominados convenientemente, por exemplo, BAIXA, MÉDIA e ALTA.

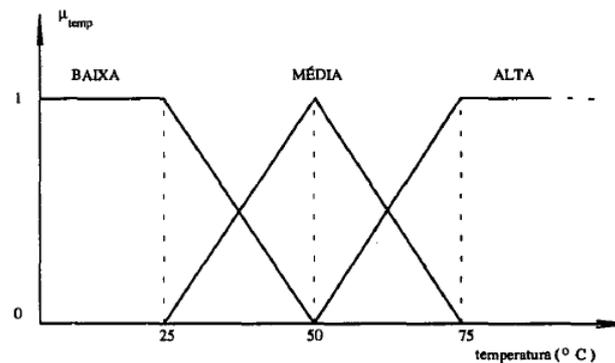


Figura 12 – Funções de pertinência fuzzy  
Fonte: (SIMÕES, 2009)

### 3.1.3 Estrutura do Controlador *Fuzzy*

A Lógica *fuzzy* foi criada para atender a uma necessidade de se dispor de um método capaz de expressar de uma maneira sistemática quantidades imprecisas ou vagas. A vantagem de controladores inteligentes é permitir que regras heurísticas possam capturar a lógica humana. Dessa forma podemos dizer que os controladores *fuzzy* aproximam o processo de decisão computacional da decisão humana. Isto é feito de forma que a decisão não se resume apenas a um “SIM” ou “NÃO”, mas também que seja possível se ter decisões abstratas, do tipo “próximo de”, “em torno de”, “muito alto”, etc, (SIMÕES, 1999).

Entre as principais características de um controlador *fuzzy*, tem - se que:

- a) Expressam imprecisões e incertezas.
- b) É baseado em regras linguísticas.
- c) “Raciocínio” é executado de forma aproximada.

- d) Tem capacidade de fazer aproximações em sistemas não lineares complexos.

A estrutura de um processo controlado por um controlador *fuzzy* é mostrada na figura 13. Nesta figura estão apresentados a configuração básica e os blocos funcionais de um controlador *fuzzy*: a interface de fuzzificação, a base de conhecimento, lógica de tomada de decisão e a interface de defuzzificação.

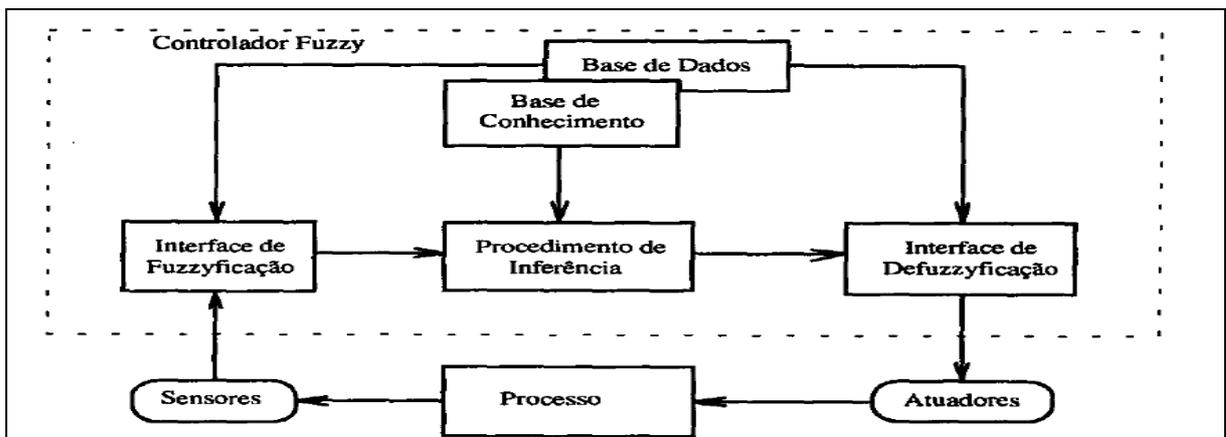


Figura 13 – Estrutura do controlador *fuzzy*

Essa estrutura de controlador representa a transformação que ocorre do domínio do mundo real, que usa números reais, para o domínio *fuzzy*, que usa números *fuzzy*. Nessa transformação um conjunto de inferências *fuzzy* é usado para as tomadas de decisões, e por fim há uma transformação inversa do domínio *fuzzy* para o domínio do mundo real, para que ocorra o acoplamento entre a saída do algoritmo *fuzzy* e as variáveis de atuação (SIMÕES, 1999).

**Funções da Interface de *fuzzificação*:** os valores discretos das variáveis de entrada geralmente são provenientes de sensores das grandezas físicas ou de dispositivos de entrada computadorizado. Um fator de escala pode ser usado para converter os valores reais de entrada para outros que sejam cobertos pelos universos de discurso pré-definidos para cada variável de entrada. A interface de *fuzzificação* usa funções de pertinência contidas na base de conhecimento, convertendo os sinais de entrada em um intervalo [0,1] que pode estar associado a rótulos linguísticos (SIMÕES, 1999).

**Base de conhecimento:** representa o modelo do sistema a ser controlado. Fornece as definições numéricas às funções de pertinência usadas nos conjuntos de regras *fuzzy*. A base de regras caracteriza as estratégias de controle utilizadas pelos especialistas (SIMÕES, 1999).

**Lógica de tomada de decisões:** usa implicações *fuzzy* para simular tomadas de decisão humana. Gera ações de controle inferidas a partir de um conjunto de condições de entrada (SIMÕES, 1999).

**Interface de defuzzificação:** consiste em obter-se um único valor discreto numa ação de controle concreta no mundo real, a partir de valores *fuzzy* de saída obtidos (SIMÕES, 1999).

**Fuzzificação:** é um mapeamento do domínio de número reais para o domínio *fuzzy*. As funções de pertinência atribuem valores linguísticos às variáveis de entrada. Na *defuzzificação* o valor da variável linguística inferida pelas regras *fuzzy* deve ser traduzido para valores discretos (SIMÕES, 1999).

### 3.2 PROGRAMA PARA HIERARQUIZAÇÃO DE CONJUNTOS DE UNIDADES CONSUMIDORAS

A constatação da necessidade de uma melhor identificação dos locais cujos investimentos em melhorias de qualidade do fornecimento reflita em uma redução das multas e uma elevação dos indicadores de DEC e FEC, demonstrou a necessidade de criação de um sistema especialista para tratar o assunto. A solução adotada, pela COELBA, foi criar um sistema baseado em lógica *fuzzy*. A escolha desse método se deu pela necessidade de agregar num só modelo a experiência dos técnicos na avaliação dos indicadores, os próprios indicadores que são medidos em grandezas diferentes e ainda possibilitar análises com vieses distintos (STRAUCH, 2009).

A metodologia foi desenvolvida através de uma técnica mista de pesquisa bibliográfica e entrevistas com os especialistas, onde se buscou determinar quais conhecimentos deveriam ser incorporados ao sistema especialista.

O resultado do projeto foi à criação de um sistema especialista, que utiliza lógica *fuzzy* para tratar os dados de entrada em diversos cenários (técnico,

econômico, gerencial, descritivo ou qualquer combinação entre eles) e indicar os conjuntos de unidades consumidoras que devem ter prioridade da empresa para receber investimentos de melhoria.

### 3.2.1 Modelo de *Fuzzificação*

O sistema, desenvolvido com os recursos de um projeto de P&D, tem o objetivo de indicar de forma hierárquica a necessidade de investimentos, nos conjuntos de unidades consumidoras da COELBA. A Figura 14 ilustra o modelo esquemático do projeto desenvolvido.

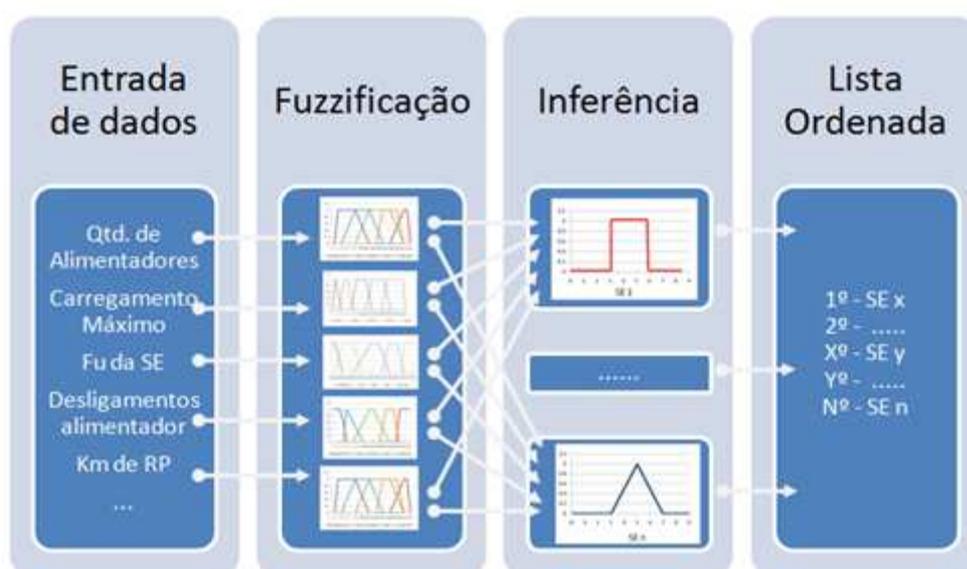


Figura 14 - Modelo esquemático do projeto  
Fonte: (STRAUCH, 2009)

**Entrada de dados:** os dados utilizados podem ser todos que os técnicos acreditam que influenciam direta ou indiretamente os níveis de continuidade do sistema elétrico. Cada dado deve ser classificado segundo uma categoria ( técnico, gerencial ou descritivo) (STRAUCH, 2009).

**Fuzzificação:** a definição do modelo *fuzzy* que classifica os dados foi feita respeitando a experiência dos especialistas da concessionária.

O modelo de fuzzyficação definido é composto por cinco conjuntos *fuzzy* linguístico (funções de pertinência) trapezoidais, cada um destes números corresponde a uma posição classificatória, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Modelo fuzzy definido no projeto P&amp;D

NÚMERO FUZZY	A1	A2	A3	A4
F1	0	2	2	4
F2	3	5	6	8
F3	7	9	12	14
F4	13	15	18	19
F5	18	20	25	25

Portanto um dado cujo valor fique classificado na faixa 1 seria irrelevante para definir a necessidade de investimento nesse conjunto, já um dado cujo valor esteja na faixa 5 é importantíssimo para definir a necessidade de investimento no conjunto. De maneira que as faixas podem ser definidas como: “irrelevante”, “pouco importante”, “importante”, “muito importante”, “importantíssimo” (STRAUCH, 2009). O modelo de *fuzzificação* pode ser observado na figura 15.

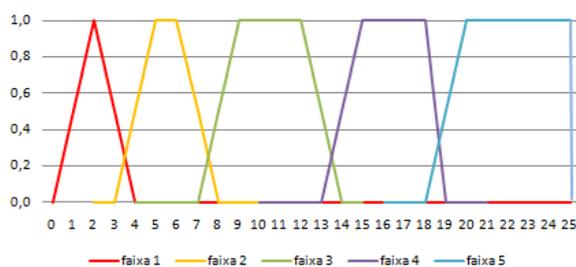


Figura 15 – Visão gráfica do modelo de *fuzzificação*  
 Fonte: (STRAUCH, 2009)

### 3.2.2 Validação do Modelo de *Fuzzificação*

A validação do modelo de *fuzzificação* foi feita utilizando dados reais da COELBA. Definiu-se um cenário onde os dados de entrada para o modelo de *fuzzificação* foram às características físicas dos conjuntos de unidades consumidoras. Então verificou-se se os conjuntos foram hierarquizados em função de suas características físicas, que são bem conhecidas pelos especialistas da concessionárias (STRAUCH, 2009). Por exemplo, utilizou-se como dado de entrada apenas o número de consumidores de cada conjunto de unidade consumidora da COELBA os conjuntos foram hierarquizados. Então verificou-se se os conjuntos foram ordenados em função desta característica física.

A metodologia foi desenvolvida através de uma técnica mista de pesquisa bibliográfica e entrevistas com os especialistas, onde se buscou determinar quais conhecimentos deveriam ser incorporados ao sistema especialista, esse conhecimento foi incorporado na definição da função de *fuzzyficação* e na determinação dos cenários de análise. Na bibliografia pesquisada buscou-se identificar métodos de análise que tornassem a metodologia robusta e simples, agilizando o desenvolvimento do projeto, como por exemplo, a possibilidade de realizar a hierarquização sem a necessidade de defuzzificar os dados (STRAUCH, 2009).

O protótipo de software, apesar de não obedecer aos modelos de projetos de software comerciais, foi desenvolvido em Java, que é uma linguagem aberta e robusta, e sofreu testes de funcionalidade. Como o objetivo era apenas de validar a metodologia não se investiu muito em otimização do software, como tempo de processamento e gravação em banco. Caso deseje-se transformar o protótipo em um software administrativo será necessário investir no seu desenvolvimento (STRAUCH, 2009).

Para o desenvolvimento da metodologia proposta neste projeto, utilizaram-se os seguintes conceitos da lógica fuzzy: uso de sistemas especialistas com números *fuzzy*, *fuzzyficação*, operações aritméticas *fuzzy*, comparação de números *fuzzy*.

Para mapear as opiniões dos especialistas por meio de funções de pertinência, que estão associadas a cada um dos atributos considerados na análise, foi utilizada como base a metodologia FMEA/fuzzy descrita no trabalho (ARAUJO, 2008). Foi possível observar também a transição das faixas de valores de um conjunto para outro sem que haja perda de informação.

As operações de adição, subtração, multiplicação escalar, formas de comparar e ordenar números *fuzzy* são discutidas em (PINHO, 1997). Além disso, o trabalho também trata a questão da transformação dos dados em números *fuzzy*, através do conhecimento de um especialista (uso de heurística), que é uma pessoa experiente na área de análise que não tem possibilidade de levantar dados

estatísticos, mas que é capaz de suportar a faixa de variação de cada valor, classificando-os dentro de conjuntos *fuzzy*.

### 3.2.3 Inferência e critério de ordenação

A opção utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi realizar a ordenação dos conjuntos e subestações sem fazer a *defuzzificação* dos dados, essa possibilidade simplifica o processamento e acelera o resultado pretendido.

É possível comparar números *fuzzy* trapezoidais, definindo quais são os maiores ou menores e estabelecendo uma lista ordenada (hierarquização). Em (PINHO, 1997) foram definidos três critérios de ordenação para os números *fuzzy* triangulares, que devem ser usados na ordem indicada sempre que o critério anterior não for suficiente para definir o ranking dos números. As mesmas regras podem ser aplicadas para todos os números *fuzzy* trapezoidais. A figura 16 ilustra a definição de um número *fuzzy* trapezoidal (PINHO, 1997).

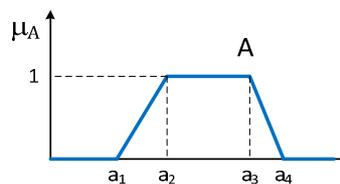


Figura 16 – Número fuzzy trapezoidal

Fonte: (STRAUCH, 2009)

O primeiro critério é o do *ordinary representative* que consiste na determinação de um número que representa o número trapezoidal em questão, conforme equação 3.5:

$$\hat{A} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4} \quad (3.5)$$

O segundo critério define como o maior, o número *fuzzy* que possui o maior  $a_3$ . Ou seja, o maior número com pertinência igual a um nos diversos números trapezoidais.

O terceiro critério utiliza a divergência de um número *fuzzy* trapezoidal que é medida pela diferença entre  $a_4$  e  $a_1$

A hierarquização é feita através do valor *fuzzy* que representa cada conjunto de unidade consumidora, dessa maneira não é preciso realizar a *defuzzificação* dos dados, pois o objetivo é apenas a relação ordenada dos conjuntos, o que pode ser alcançado utilizando os dados *fuzzificados*.

### 3.2.4 Exemplo de Aplicação do Modelo de *Fuzzificação*

Os valores dos dados de entrada devem ser normalizados para a faixa de valores usada no modelo de *fuzzyficação* e para cada valor normalizado é definido um grau de pertinência com os cinco números *fuzzy* (faixas) que compõem o modelo.

Por exemplo, supondo que houvesse apenas seis conjuntos numa determinada concessionária, e que cada conjunto apresentasse para o dado “número de desligamentos da subestação” valores conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Conjuntos de uma concessionária

Conjunto	Número de desligamentos
Conjunto 1	170
Conjunto 2	36
Conjunto 3	235
Conjunto 4	24
Conjunto 5	543
Conjunto 6	325

Normalizando o número de desligamento para o modelo de *fuzzyficação* definido na tabela 1, cujos valores máximo e mínimo variam de vinte e cinco a zero, teríamos o número de desligamento normalizados para o universo de discurso do modelo de *fuzzificação*, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Valor normalizado

Conjunto	Número de desligamentos	Número de desligamentos normalizado
Conjunto 1	170	7,83
Conjunto 2	36	1,66
Conjunto 3	235	10,82

Conjunto 4	24	1,1
Conjunto 5	543	25
Conjunto 6	325	14,96

A partir do valor normalizado é definido, o grau de pertinência entre esse valor e as cinco faixas que formam o modelo de *fuzzyficação*, conforme ilustrado na figura 17 (SOUZA, 2010).

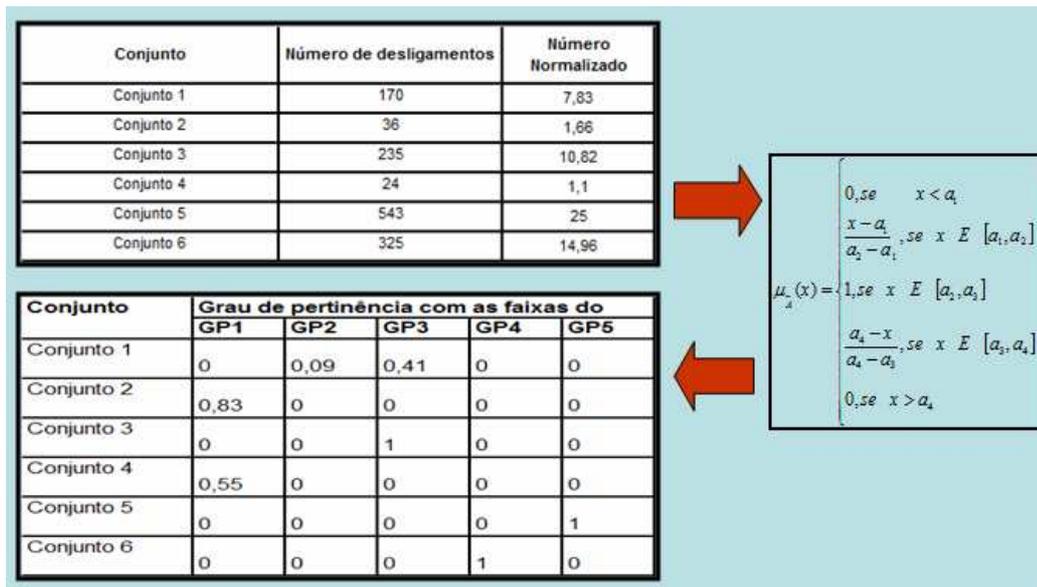


Figura 17 – Cálculo do grau de pertinência

A partir da definição do grau de pertinência e dos números *fuzzy* que compõem as faixas do modelo de *fuzzyficação* é possível definir o valor *fuzzy* que representa cada valor do dado “número de desligamentos da subestação” utilizando a equação 3.6:

$$V_{Fuzzy} = Gp_1 \times F_1 + Gp_2 \times F_2 + Gp_3 \times F_3 + Gp_4 \times F_4 + Gp_5 \times F_5 \tag{3.6}$$

Para o exemplo, tem-se:

Tabela 4 - Número *Fuzzy* que representa o número de desligamentos

Conjunto	Desligamentos	Valor <i>fuzzy</i> calculado			
Conjunto 1	170	3,15	4,15	5,48	6,48
Conjunto 2	36	0	1,66	1,66	3,31

Conjunto 3	235	7	9	12	14
Conjunto 4	24	0	1,1	1,1	2,21
Conjunto 5	543	18	20	25	25
Conjunto 6	325	13	15	18	19

---

A opção utilizada foi realizar a ordenação dos conjuntos sem fazer a *defuzzificação* dos dados, essa possibilidade simplifica o processamento e acelera o resultado pretendido. É possível comparar números *fuzzy* trapezoidais, definindo quais são os maiores ou menores e estabelecendo uma lista ordenada (hierarquização), conforme os três critérios de ordenação apresentados anteriormente.

## CAPÍTULO 4

Conforme definido no PRODIST o estabelecimento dos limites anuais dos indicadores de continuidade DEC e FEC inicia-se com a emissão, pela agência reguladora, de ofício contendo a proposta para os limites anuais de DEC e FEC.

A concessionária pode se manifestar quanto aos limites propostos através de carta ou reunião com a superintendência de serviços de distribuição da ANEEL.

No caso específico da COELBA, para definir os conjuntos de unidades consumidoras com limites anuais dos indicadores de continuidade DEC e FEC que prioritariamente devem ter os limites modificados utilizou-se ferramenta computacional, apresentada no capítulo 3 deste trabalho, baseado em lógica *fuzzy*. Então este sistema permitiu ranquear os conjuntos de unidades consumidoras e identificar quais estão distantes das metas de qualidade estabelecidas pela agência reguladora e pelos padrões definidos pela concessionária a serem aplicados no ciclo de revisão tarifária (período de cinco anos).

### 4.1 ESTABELECIMENTO DOS LIMITES ANUAIS DE DEC E FEC UTILIZANDO UM CONTROLADOR FUZZY

A aplicação prática do controlador *fuzzy* para identificação dos conjuntos de unidades de consumidoras da COELBA que devem ter os limites anuais de DEC e FEC propostos pela agência reguladora modificados é o objeto do presente estudo de caso.

A metodologia aplicada para elaboração do referido estudo, baseou-se em simulações realizadas a partir do protótipo de software, desenvolvido no projeto de P&D, para hierarquização dos conjuntos de consumidores apresentado no capítulo 3 deste documento.

Os dados de entrada, para o controlador *fuzzy* foram:

**Redução do DEC 2013/2018:** representa a relação entre a meta de DEC proposta para o ano de 2013 e a meta de DEC proposta para 2018 de cada conjunto de unidade consumidora.

**Redução do FEC 2013/2018:** representa a relação entre a meta de FEC proposta para o ano de 2013 e a meta de FEC proposta para 2018 de cada conjunto de unidade consumidora.

**Multas 2011:** representa o a relação entre o montante total de ressarcimentos aos consumidores de cada conjunto com o montante total de ressarcimentos pagos pela concessionária no ano de 2011.

**Desempenho relativo de DEC 2011/2013-2018:** representa a variação absoluta do DEC de 2011 até 2018.

**Desempenho relativo de FEC 2011/2013-2018:** representa a variação absoluta do FEC de 2011 até 2018.

**Média EUSD 2012:** representa a média do Encargo de Uso do Sistema de Distribuição (EUSD) mensal, no ano de 2012, para cada conjunto de unidade consumidora.

A tabela 5 apresenta, como exemplo, os dados de entrada apurados para os conjuntos de unidades consumidoras de Rio Branco, Cerrado e Rio das Éguas.

Tabela 5 – Dados de entrada para o controlador Fuzzy.

CONJUNTO	Redução DEC 2013/2018	Redução FEC 2013/2018	Multas 2011	Desempenho relativo DEC 2011/2013-2018	Desempenho relativo FEC 2011/2013-2018	Média EUSD
RIO BRANCO	0,4167	0,4286	0,0563	11,3465	3,3058	0,0027
CERRADO	0,4783	0,3571	0,0579	7,2456	3,9728	0,0047
RIO DAS EGUAS	0,3000	0,3529	0,0296	6,3295	3,7505	0,0016

A cenarização foi feita definindo um coeficiente heurístico para cada uma das classes de dados, conforme apresentado na Tabela 6. Conforme dito anteriormente o coeficiente heurístico representa o peso do dado para a lógica de hierarquização.

Tabela 6 – Coeficiente heurístico dos dados de entrada do controlador *fuzzy*.

Cenário	Redução DEC 2013/2018	Redução FEC 2013/2018	Multas 2011	Desempenho relativo DEC 2011/2013-2018	Desempenho relativo FEC 2011/2013-2018	Média EUSD %
1	0,7	0,3	1	0,7	0,3	0,3

A definição do modelo *fuzzy* que classifica os dados foi feita respeitando a experiência dos especialistas da concessionária. De modo que o modelo de fuzzyficação foi composto por cinco números trapezoidais, cada um destes números correspondendo a uma posição classificatória, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Número *Fuzzy* definido pela COELBA

NÚMERO FUZZY	A1	A2	A3	A4
F1	0	2	2	4
F2	3	5	6	8
F3	7	9	12	14
F4	13	15	18	19
F5	18	20	25	25

O resultado da aplicação do modelo de Fuzzy encontra-se apresentado na tabela 8. Como dito anteriormente, o resultado da modelagem foi uma lista ordenada dos conjuntos de unidades consumidoras da COELBA que, prioritariamente, os limites anuais de DEC e FEC propostos pela agência reguladora devem ser revisados.

Tabela 8 – Conjuntos de unidades consumidoras prioritários.

Conjuntos	Critérios de Ordenação			Número Fuzzy			
	Ordinary Representative	A3	Divergênc	A1	A2	A3	A4
RIO BRANCO	62,54918671	70,6742	21,4484	50,5	57,0742	70,6742	71,9484
RODA VELHA	43,08190918	48,9319	17,1638	33,7	38,8319	48,9319	50,8638
RIO DAS EGUAS	31,01679993	34,9908	15,8273	22,7954	27,6584	34,9908	38,6227
RIACHAO DAS NEVES	30,52214241	34,2791	19,059	20,8427	27,0652	34,2791	39,9016
POSTO DA MATA	29,97576141	33,1372	17,7143	20,8686	27,3143	33,1372	38,5829
SAUIPE	28,09931755	31,5642	14,8164	20,2276	25,5615	31,5642	35,044
ANGICAL	26,81447601	29,732	18,032	17,6485	24,1969	29,732	35,6805
MUCUGE	26,62374878	29,7044	13,9292	19,2342	24,3931	29,7044	33,1633
RIO DAS PEDRAS	25,32221603	28,4652	12,686	18,5725	22,9926	28,4652	31,2586
CATU	25,0431633	28,0404	17,5414	16,2104	22,1701	28,0404	33,7518
CERRADO	24,87908936	27,7449	9,27793	19,8151	22,8633	27,7449	29,0931
PEDRA BRANCA	23,98423767	26,8448	11,2916	17,9135	21,9737	26,8448	29,205
BARRA GRANDE	23,69216537	26,2422	12,4843	17,2	21,6422	26,2422	29,6843
LICINIO DE ALMEIDA	23,68731689	26,7791	12,09	17,2982	21,2838	26,7791	29,3882
ITABUNA II 34,5kV	23,04276657	26,09	15,2095	15,363	20,1455	26,09	30,5725
FUNIL - CHESF	22,83961105	25,4899	16,2263	14,6515	20,3394	25,4899	30,8778
COPEC	22,76624107	25,2667	13,8886	15,662	20,5857	25,2667	29,5506
RODELAS	22,13365364	24,6899	11,3152	16,0875	20,3545	24,6899	27,4027
MASSANGANO II	22,08289528	24,2845	12,2466	15,7096	20,3813	24,2845	27,9562
CORRENTINA II	22,05291367	24,9537	14,698	14,6289	19,3022	24,9537	29,3269

Então, os números *Fuzzy* que representam cada conjunto foram comparados e ordenados de maneira que quanto maior o número *fuzzy*, mais relevantes serão os investimentos para que este conjunto melhore seus índices de qualidade.

#### 4.2 CONCLUSÕES DAS SIMULAÇÕES

As simulações, no programa de hierarquização de conjuntos, permitiram ranquear os conjuntos de unidades consumidoras, definidos a partir da subestação de média tensão, e identificar quais estão mais distantes de dos limites anuais dos indicadores operacionais DEC e FEC estabelecidos pela agência reguladora a serem aplicados no terceiro ciclo da revisão tarifária (2014-2018).

Na tabela 8 foram apresentados os vinte conjuntos que, prioritariamente, devem ter os limites dos indicadores de continuidade revisados.

Observou-se que os conjuntos priorizados, em sua maioria, são caracterizados basicamente por:

- a) Baixa densidade de unidades consumidoras por km<sup>2</sup>;
- b) Forte trajetória de redução dos limites de continuidade entre 2013 e 2018;
- c) Locais de difícil acesso em condições climáticas severas;
- d) Rede rural;
- e) Sistema radial.

## CAPÍTULO 5

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a entrada em vigor dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), a COELBA registrou piora significativa dos indicadores de qualidade de fornecimento de energia elétrica e um aumento significativo dos valores dos ressarcimentos feitos aos seus consumidores.

De imediato este novo contexto evidenciou a necessidade de mudanças na forma de gerenciamento dos indicadores operacionais de qualidade. Por conseguinte, também foi verificado a necessidade de se aperfeiçoar o processo de estabelecimento dos limites anuais dos indicadores de continuidade: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) dos conjuntos de unidades consumidoras, realizados normalmente a cada ciclo de revisão tarifária de acordo com o cronograma definido pela ANEEL.

Baseado na teoria dos números *fuzzy* foi desenvolvido, com recursos de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), um sistema para otimização da alocação dos investimentos entre os diversos conjuntos de unidades consumidoras da COELBA. A utilização do software de otimização de investimentos se mostrou uma excelente ferramenta de apoio aos órgãos de planejamento e operação da empresa, principalmente num cenário de restrição de investimentos, onde é fundamental que a alocação dos recursos seja feita em conjuntos elétricos ou alimentadores que produzem o melhor benefício possível para a empresa.

Neste trabalho, este sistema especialista foi utilizado especificamente para definir quais os conjuntos de unidades consumidoras devem, prioritariamente, ter os indicadores de continuidade DEC e FEC propostos pela agência reguladores modificados.

Os valores dos limites anuais dos indicadores de continuidade dos conjuntos de unidades consumidoras são disponibilizados por meio de audiências públicas e são estabelecidos em resolução específica, de acordo com a periodicidade da revisão tarifária da distribuidora.

Os limites estabelecidos são discutidos de acordo com cronograma definido pela agência reguladora. A concessionária pode se manifestar quanto aos limites propostos através de carta ou reunião com a superintendência de serviços de distribuição da ANEEL.

Neste trabalho os dados de entrada para o controlador *fuzzy* foram: redução do DEC 2013/2018, redução do FEC 2013/2018, multas 2011, desempenho relativo de DEC 2011/2013-2018, desempenho relativo de FEC 2011/2013-2018, média EUSD 2012. Através da aplicação prática de um controlador *fuzzy*, os conjuntos de unidades consumidoras da COELBA foram ranqueados e os resultados da hierarquização foram apresentados na tabela 8. Então estes conjuntos devem prioritariamente ter os limites anuais dos indicadores de qualidade renegociados com a agência reguladora para o período entre 2014 e 2018.

A partir das simulações realizadas no controlador *fuzzy* foi possível ranquear os conjuntos de unidades consumidoras e verificar quais estão mais distantes dos limites anuais de DEC e FEC propostos pela ANEEL para o terceiro ciclo da revisão tarifária (2014-2018). No capítulo 4 deste documento foram apresentados os vinte conjuntos que, prioritariamente, devem ter os limites dos indicadores de continuidade revisados.

Observou-se que os conjuntos priorizados, em sua maioria, são caracterizados basicamente por: baixa densidade de unidades consumidoras por km, forte trajetória de redução dos limites de continuidade entre 2013 e 2018, locais de difícil acesso em condições climáticas severas, rede rural, sistema radial.

Neste contexto observou-se que a ferramenta de otimização de investimentos também pode ser utilizada para verificar quais os conjuntos de unidades consumidoras devem, prioritariamente, ter os limites anuais dos indicadores de DEC e FEC modificados.

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

É possível parametrizar a função de *fuzzyficação* e carregar outros tipos de dados, fazendo com que o programa possa ser usado por outras áreas da empresa que possuam o mesmo tipo de problema (hierarquização de entidades através de dados relacionados a alguma atividade), desde que os especialistas desta nova área parametrizem a função *fuzzy* para atender a sua classificação. Além disso, os dados carregados no programa podem ser acessados e visualizados facilmente por qualquer área da empresa que necessitem dessas informações.

As sugestões propostas para continuidade da pesquisa são: Adequar o sistema *fuzzy* para que possa operar, até nível de alimentador, que é a menor unidade de formação dos conjuntos elétricos. Adequar o sistema para priorização de manutenção de equipamentos de subestações.

## REFERENCIAS

ARAUJO, R. J. **Otimização do desempenho de indicadores de continuidade do serviço em concessionária de distribuição utilizando algoritmos evolutivos.** 2011. Tese (Doutorado)- Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, 2011.

TANURE, J. E. P. S. **Análise Comparativa de empresas de distribuição para o estabelecimento de metas de desempenho para indicadores de continuidade do serviço de distribuição.** 2000. Dissertação (Mestrado)- Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução/ANEEL n.º 024/2000, de 27 de janeiro de 2000. Estabelece as disposições relativas à Continuidade da Distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras.** Disponível em: <[www.aneel.gov.br/cedoc/res2000024.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000024.pdf)>. Acesso em: 11 jan. 2012.

ABRADEE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. [**Portal institucional**]. Disponível em: <[www.abradee.com.br](http://www.abradee.com.br)> Acesso em: 8 ago. 2012.

PINHO, A. F. ; MONTEVECHI, J. A. B. ; PAMPLONA, E. de O. **Aplicação de números *Fuzzy* triangulares em análises de investimentos em situações de incerteza: método baseado na teoria dos jogos.** Itajubá (MG): Unifei, 1997.

STRAUCH, M. et al. **Relatório final do projeto de pesquisa metodologia de otimização da multa global de continuidade através de técnicas de análises multivariadas.** Salvador: ANEEL, 2009.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v.8, n.3, p.338, 1965.

ARAUJO et al. **Aplicação da metodologia FMEA e lógica Fuzzy a indicadores de continuidade individuais em sistemas de distribuição.** In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA, 2008. Mar Del Plata – Argentina. **Anais...** 2008.

ABREU, Y. **A reestruturação do setor elétrico brasileiro: questões e perspectivas.** 1999. Dissertação (Mestrado de Engenharia Elétrica)- Universidade de São Paulo – USP, 1999.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Portarias DNAEE 046/78 E 047/78.** Brasília, 1978.

SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem *Fuzzy*.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999.

SOUZA, O. **Relatório final de iniciação científica: introdução a teoria dos conjuntos *fuzzy*.** Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 2010. Disponível em: <<http://www.uel.br/pessoal/valle/PDFfiles/osmar10.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2012.

OLIVEIRA, Juliana Teixeira Pains. **Controle Preditivo para mitigação do desgaste de atuadores empregando prognósticos de falhas**. 2012. 95f. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos

MELLO, Sérgio M. M. **Ferramentas para Gestão da Qualidade de Fornecimento e Otimização de Investimentos numa Empresa de Distribuição de Energia Elétrica**. 2012. 105f. Tese de Mestrado – Universidade Salvador – Salvador

PRODIST. **Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**. Disponível em: <[www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82](http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82)>. Acesso em: 10 ago. 2012.

Salvador, 6 de Março de 2013

Pedro Jerônimo Proença Costa Pinho

Orientador: Msc Sérgio Souto Maia Malbouisson de Mello