

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA MULTIVARIÁVEL PARA AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO E ESTABELECIMENTO DE LIMITES
DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO DE
ENERGIA UTILIZANDO A LÓGICA *FUZZY***

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nelson Knak Neto

Santa Maria, RS, Brasil, 2012

SISTEMA MULTIVARIÁVEL PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E ESTABELECIMENTO DE LIMITES DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO DE ENERGIA UTILIZANDO A LÓGICA *FUZZY*

por

Nelson Knak Neto

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Alzenira da Rosa Abaide
Co-orientadora: Prof.^a Dr.^a. Karine Faverzani Magnago

Santa Maria, RS, Brasil
2012

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de
Mestrado

**SISTEMA MULTIVARIÁVEL PARA AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO E ESTABELECIMENTO DE LIMITES
DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO DE
ENERGIA UTILIZANDO A LÓGICA *FUZZY***

elaborado por
Nelson Knak Neto

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

Comissão Examinadora

Alzenira da Rosa Abaide, Dr^a.
(Presidente/Orientadora)

Karine Faverzani Magnago, Dr^a. (Co-orientadora)

Daniel Pinheiro Bernadon, Dr.(UFSM)

Mauricio Sperandio, Dr.(UNIPAMPA)

Santa Maria, 13 de julho de 2012.

Ao alicerce da minha formação
pessoal e profissional: minha família.
O amor prevalece acima de tudo.

"O gênio, esse poder que deslumbra os olhos humanos, não é outra coisa senão a perseverança bem disfarçada."

Goethe

AGRADECIMENTOS

À professora Alzenira da Rosa Abaide, que além de orientadora, é uma grande amiga, agradeço por toda confiança, tempo e recursos a mim disponibilizados para que todos os trabalhos realizados fossem possíveis durante os mais de seis anos de parceria.

À professora Karine Faverzani Magnago, que teve papel fundamental no desenvolvimento da lógica matemática deste trabalho, agradeço pelo tempo, pelas cuidadosas revisões e por todas as ideias e ensinamentos a mim transmitidos.

Aos demais professores do Centro de Estudos em Energia em Meio Ambiente, agradeço por todas as ideias, discussões e sugestões visando o aperfeiçoamento do trabalho.

Aos amigos Bruno Niederauer Soares e Eduardo Lehnhart Vargas, que colaboraram com desenvolvimento deste trabalho, agradeço pela disposição, parceria e amizade.

Ao colega e amigo Fernando Guilherme Kaehler Guarda, agradeço pelas inúmeras colaborações e pela parceria durante todo o mestrado.

Aos demais colegas do CEEMA, agradeço pela amizade, parceria e conhecimento compartilhados.

Aos meus pais Rudi e Carmen, agradeço por me abrirem as portas para o mundo e por nunca imporem limites na minha busca pelo conhecimento.

As minhas irmãs, Iana e Anaí, agradeço pela amizade, carinho e por estarem sempre presentes na minha vida, por mais distantes que estivessem fisicamente de mim.

A minha namorada Simoni, agradeço pelo amor, carinho, companheirismo, paciência e palavras de incentivo nos momentos em que eu mais precisei.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

SISTEMA MULTIVARIÁVEL PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E ESTABELECIMENTO DE LIMITES DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO DE ENERGIA UTILIZANDO A LÓGICA *FUZZY*

Autor: Nelson Knak Neto
Orientadora: Alzenira da Rosa Abaide, Dra. Eng.
Co-orientadora: Karine Faverzani Magnago, Dra.
Data e Local da defesa: Santa Maria, 13 de Julho de 2012.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de desempenho e de definição de limites de continuidade de fornecimento de energia elétrica usando a Lógica *Fuzzy*, compreendendo desde o processo de seleção das variáveis que caracterizam o problema até o processo de determinação de ajustes para os limites dos indicadores de continuidade. O trabalho inicia-se com uma vasta pesquisa para selecionar as variáveis, visando caracterizar o problema de confiabilidade das redes de distribuição de energia da melhor forma possível. Após a seleção, o sistema é dividido em dois níveis de avaliação. No primeiro nível, as variáveis são agrupadas em três sistemas independentes, os quais definem índices que avaliam confiabilidade da rede devido a características operacionais, o padrão de rede e a influência do meio. No segundo nível, esses índices são avaliados juntamente com o histórico de desempenho dos conjuntos de consumidores de forma que sejam definidos ajustes para os limites de continuidade de fornecimento de energia. Dados da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D) são utilizados e os resultados obtidos a partir do sistema desenvolvido são avaliados. A partir dessa análise, torna-se possível identificar e propor adequações aos limites de desempenho, bem como definir conjuntos prioritários para ações de melhoria na qualidade do fornecimento de energia.

Palavras-chave: Limites de desempenho, Confiabilidade, Avaliação de Desempenho, Lógica *Fuzzy*.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Graduate Program in Electrical Engineering
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brazil.

MULTIVARIABLE SYSTEM FOR PERFORMANCE ASSESSMENT AND ESTABLISHMENT OF LIMITS OF POWER SUPPLY CONTINUITY USING FUZZY LOGIC

Author: Nelson Knak Neto
Advisor: Alzenira da Rosa Abaide, Dra. Eng.
Co-advisor: Karine Faverzani Magnago, Dra.
Date e Local of presentation: July 13, 2012, Santa Maria.

This Master's Dissertation presents the development of a methodology for performance assessment and establishment of limits of power supply continuity using Fuzzy Logic, including the processes of selecting variables that characterize the problem and determining adjustments to the limits of the continuity indexes. The study begins with extensive research to select variables that most closely characterize the reliability problem of power distribution networks. After this selection, the system is divided into two levels of assessment. At the first level, the variables are grouped into three independent systems defining indexes that evaluate network reliability due to operational characteristics, the quality of networks and the influence of the environment. At the second level, these indexes are evaluated on a new system together with the historical performance of consumer sets, from where adjustments are obtained and applied to the limits of power supply continuity established by ANEEL (Regulatory Agency). Data from the State Company of Electric Power Distribution (CEEE-D) is applied and the results of the developed system are evaluated. From the results obtained, it becomes possible to identify and propose adjustments to the limits of performance and to define priority targets for actions aimed at improving the quality of power supply.

Key-words: Performance Limits, Reliability, Performance Assessment, Fuzzy Logic.

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Variáveis consideradas no sistema de avaliação de desempenho.....	54
Tabela 4.2 – Variáveis de entrada do sistema de avaliação de desempenho– controladores <i>fuzzy</i> níveis secundário e principal.	56
Tabela 4.3 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Potência instalada por quilômetro de rede</i>	60
Tabela 4.4 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Tempo médio de execução de serviço</i>	62
Tabela 4.5 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora</i>	64
Tabela 4.6 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Percentual de Alimentadores Rurais</i>	66
Tabela 4.7 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Equipes por Conjunto</i>	68
Tabela 4.8 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a saída do controlador <i>Características Operacionais</i>	69
Tabela 4.9 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Dispositivos de seccionamento por extensão de rede</i>	74
Tabela 4.10 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Dispositivos de seccionamento por extensão de rede</i>	76
Tabela 4.11 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Taxa de Falha devido a componentes de rede</i>	79
Tabela 4.12 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a saída do controlador <i>Padrão de Rede</i>	80
Tabela 4.13 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Tempo Médio de Deslocamento</i>	84
Tabela 4.14 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Taxa de Falha devido a descargas atmosféricas</i>	87
Tabela 4.15 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Taxa de Falha devido à vegetação</i>	89
Tabela 4.16 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável <i>Percentual de Ocorrências em Clima Adverso</i>	91

Tabela 4.17 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a saída do controlador <i>Influência do Meio</i>	92
Tabela 4.18 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável de entrada $DEC_{relativo}$	96
Tabela 4.19 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a saída do controlador <i>Limite de DEC</i>	98
Tabela 4.20 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável de entrada $FEC_{relativo}$	103
Tabela 4.21 – Funções e parâmetros dos subconjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a saída do controlador <i>Limite de FEC</i>	105
Tabela 5.1 – Índice de confiabilidade devido a características operacionais	113
Tabela 5.2 – Indicador Padrão de Rede.....	118
Tabela 5.3 – Indicador Influência do Meio.....	122
Tabela 5.4 – Limite de DEC	127
Tabela 5.5 – Desempenho de DEC para o ano de 2011.....	129
Tabela 5.6 – Limite de FEC.....	133
Tabela 5.7 – Desempenho de FEC para o ano de 2011.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Indicadores de qualidade brasileiros – DEC. Fonte: (ANEEL, 2012b)	37
Figura 3.2- Indicadores de qualidade brasileiros – FEC. Fonte: (ANEEL, 2012b).....	37
Figura 4.1 - Mapeamento <i>f</i> entre entradas e saídas de um sistema de avaliação de desempenho. Fonte: (ANEEL, 2010b).	50
Figura 4.2 – Estrutura do modelo de avaliação de desempenho proposto.	57
Figura 4.3 – Controlador “Características Operacionais”.	58
Figura 4.4 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Potência instalada por quilômetro de rede</i>	61
Figura 4.5 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Tempo médio de execução de serviço</i>	63
Figura 4.6 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora</i>	65
Figura 4.7 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Percentual de Alimentadores Rurais</i>	67
Figura 4.8 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Equipes por conjunto</i>	68
Figura 4.9 – Subconjuntos da saída do controlador <i>Características Operacionais</i> . ..	70
Figura 4.10 – Controlador “ <i>Padrão de Rede</i> ”.	73
Figura 4.11 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Dispositivos de seccionamento por extensão de rede</i>	75
Figura 4.12 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Extensão Média de Alimentadores</i>	77
Figura 4.13 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Taxa de falha devido a componentes de rede</i>	79
Figura 4.14 – Subconjuntos da saída do controlador <i>Padrão de Rede</i>	81
Figura 4.15 – Controlador “ <i>Influência do Meio</i> ”.	83
Figura 4.16 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Tempo Médio de Deslocamento</i>	85
Figura 4.17 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Taxa de falha devido a descargas atmosféricas</i>	87
Figura 4.18 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Taxa de falha devido à vegetação</i>	89

Figura 4.19 – Subconjuntos da variável de entrada <i>Percentual de Ocorrências em Clima Adverso</i>	91
Figura 4.20 – Subconjuntos da saída do controlador <i>Influência do Meio</i>	93
Figura 4.21 – Controlador <i>Limite de DEC</i>	95
Figura 4.22 – Subconjuntos da variável de entrada $DEC_{relativo}$	97
Figura 4.23 – Subconjuntos da saída do controlador <i>Limite de DEC</i>	99
Figura 4.24 – Controlador <i>Limite de FEC</i>	101
Figura 4.25 – Subconjuntos da variável de entrada $FEC_{relativo}$	103
Figura 4.26 – Subconjuntos da saída do controlador <i>Limite de FEC</i>	105
Figura 5.1 – Fluxograma do processo de avaliação de desempenho.....	108
Figura 5.2 – Área de concessão da CEEE-D (CEEE, 2012).....	110
Figura 5.3 - Desempenho global da CEEE-D – indicador DEC.....	110
Figura 5.4 - Desempenho global da CEEE-D – indicador FEC.....	111
Figura 5.5 – Histograma das saídas do controlador Características Operacionais.....	113
Figura 5.6 – Relação entre desempenho do indicador DEC e o índice de confiabilidade devido a características operacionais.....	116
Figura 5.7 – Histograma das saídas do controlador Padrão de Rede.....	117
Figura 5.8 – Relação entre o desempenho do indicador FEC e o Padrão de Rede.....	120
Figura 5.9 – Histograma da saída do controlador Influência do Meio.....	121
Figura 5.10 – Relação entre os desempenhos de DEC e FEC e a Suscetibilidade ao Meio.....	124
Figura 5.11 – Histograma das saídas do controlador <i>Limite de DEC</i>	125
Figura 5.12 – Histograma das saídas do controlador <i>Limite de FEC</i>	132
Figura 5.13 – Tela inicial do software META.....	139
Figura 5.14 – Tela principal dos resultados.....	140
Figura 5.15 – Detalhamento de uma variável de entrada e de uma saída.....	142

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AL_{rural} e %AL Rural - Valor relativo ao percentual de alimentadores em meio rural.

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica.

CEEE-D - Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica.

CMM/UCeMWh/UC - Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora, em MWh.

CTA – Central de Tele atendimento.

DCRI- Duração de Interrupção Individual Ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora por Ponto de Conexão.

DEA - Data Envelopment Analysis.

DEC - Duração Equivalente de Interrupção por unidade Consumidora

$DEC_{relativo}$ - relação entre o desempenho registrado e o limite de continuidade atribuído ao conjunto de consumidores para o indicador DEC

DIC- Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão.

DMIC- Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão.

$Disp.seccionamento/km$ - Dispositivos de seccionamento por extensão de rede.

EN50160 - Recommended Levels for Different Power Quality Parameters.

ER/AL - Extensão Média de Alimentadores.

FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por unidade Consumidora

$FEC_{relativo}$ - relação entre o desempenho registrado e o limite de continuidade atribuído ao conjunto de consumidores para o indicador FEC.

FIC- Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão.

kVA/km de rede - Potência instalada por quilômetro de rede.

IEEE 519 - Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.

IEC 61000 –Standardization for Electromagnetic compatibility.

MT – Média Tensão.

PRODIST - Procedimentos de Distribuição.

Projeto RE-SEB -Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro.

REN – Resolução Normativa.

TMAE- Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais.

TMD - tempo médio de deslocamento da equipe de atendimento de emergência.

TME - tempo médio de execução do serviço até o restabelecimento do fornecimento de energia pela equipe atendimento de emergência.

$\lambda_{descargas\ atmosféricas}$ e TF 303 - taxa de falha da rede gerada por descargas atmosféricas.

$\lambda_{vegetação}$ e TF 304 - taxa de falha da rede gerada por vegetação.

SUMÁRIO

Introdução	18
1.1 Caracterização e justificativa.....	18
1.2 Objetivos	20
1.3 Organização do trabalho	21
2Revisão de Literatura	23
2.1Qualidade de energia e confiabilidade	24
2.2Indicadores de qualidade e metodologias de avaliação de desempenho	28
2.3 LógicaFuzzy e Qualidade de Energia.....	32
3Avaliação de desempenho e definição de limites de continuidade.....	36
3.1 Introdução	36
3.2 Evolução regulatória da Qualidade de Energia no Brasil	38
3.2.1 Mudanças no Setor Elétrico	38
3.2.2 Regulação da Qualidade de Energia.....	39
3.3 Indicadores de qualidade	40
3.3.1 Indicadores Individuais.....	40
3.3.2 Indicadores Coletivos	42
3.4Metodologia de avaliação e definição dos limites de desempenho	43
3.4.1 Avaliação de Desempenho.....	43
3.4.2 Definição dos limites de desempenho coletivos	46
3.4.3 Definição dos limites de desempenho individuais	49
3.5 Considerações do capítulo	49
4 Análise e Modelagem do Sistema de avaliação de desempenho	50
4.1 Introdução	50
4.2 Caracterização da continuidade de fornecimento e definição das variáveis de entrada	51
4.3 Estrutura do modelo de avaliação	54
4.4 Nível secundário do sistema de avaliação	58
4.4.1 Características Operacionais	58
4.4.1.1Potência instalada por quilômetro de rede.....	59
4.4.1.2 Tempo médio de execução de serviço.....	61

4.4.1.3	<i>Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora</i>	63
4.4.1.4	<i>Percentual de Alimentadores Rurais</i>	65
4.4.1.5	<i>Equipes por Conjunto</i>	67
4.4.1.6	<i>Confiabilidade devido a características operacionais</i>	68
4.4.1.7	<i>Base de regras para Características Operacionais</i>	70
4.4.2	<i>Padrão de Rede</i>	72
4.4.2.1	<i>Dispositivos de seccionamento por extensão de rede</i>	73
4.4.2.2	<i>Extensão Média de Alimentadores</i>	75
4.4.2.3	<i>Taxa de Falha devido a componentes de rede</i>	77
4.4.2.4	<i>Indicador Padrão de Rede</i>	79
4.4.2.5	<i>Base de regras para Padrão de Rede</i>	81
4.4.3	<i>Influência do Meio</i>	82
4.4.3.1	<i>Tempo Médio de Deslocamento</i>	83
4.4.3.2	<i>Taxa de falha devido a descargas atmosféricas</i>	85
4.4.3.3	<i>Taxa de falha devido à vegetação</i>	87
4.4.3.4	<i>Percentual de Ocorrências em Clima Adverso</i>	90
4.4.3.5	<i>Suscetibilidade ao Meio</i>	92
4.4.3.6	<i>Base de regras para Influência do Meio</i>	93
4.5	<i>Indicadores DEC e FEC - Nível principal do sistema de avaliação</i>	94
4.5.1	<i>Limite de DEC</i>	94
4.5.1.1	<i>Variáveis caracterizadoras do Limite de DEC</i>	95
4.5.1.2	<i>Ajuste de DEC</i>	97
4.5.1.3	<i>Base de regras para o Limite de DEC</i>	100
4.5.2	<i>Limite de FEC</i>	101
4.5.2.1	<i>Variáveis caracterizadoras do Limite de FEC</i>	101
4.5.2.2	<i>Ajuste de FEC</i>	104
4.5.2.3	<i>Base de regras para Limite de FEC</i>	106
5	<i>Avaliação do modelo: Estudo de Caso para A Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D</i>	108
5.1	<i>Introdução</i>	108
5.1.1	<i>A CEEE-D</i>	109
5.2	<i>Nível de avaliação secundário</i>	112
5.2.1	<i>Confiabilidade devido a características operacionais</i>	112
5.2.2	<i>Padrão de Rede</i>	117

5.2.3 Suscetibilidade ao meio.....	121
5.3 Nível de avaliação principal.....	125
5.4 Impacto sobre penalidades	137
5.5 Ferramenta computacional.....	138
6Considerações Finais.....	144
6.1 Conclusões.....	144
6.1.1 Sobre as variáveis avaliadas.....	144
6.1.2 Sobre a Lógica <i>Fuzzy</i> e a estrutura do sistema de avaliação	145
6.1.3 Sobre os resultados obtidos	147
6.2 Trabalhos futuros	149
6.3 Trabalhos publicados	150
Referências	151

INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização e justificativa

Desde a privatização do Setor Elétrico Brasileiro, em meados dos anos 90, tanto as concessionárias de distribuição de energia quanto o governo, através da agência reguladora do setor, a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - têm concentrado esforços com o objetivo de melhorar a qualidade de energia no país.

Apesar de o DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – já ter editado a Portaria nº46/1978, a qual marcou o início do processo de quantificação do desempenho das distribuidoras, sob o aspecto de continuidade, essa não foi plenamente implantada em todo o país (TANURE, 2004; SPERANDIO, 2006). Nesse sentido, a ANEEL editou duas resoluções específicas que tratam da qualidade de serviço (ANEEL, 2000) e dos níveis de tensão (ANEEL, 2001), nos anos de 2000 e 2001, respectivamente, representando um marco na regulação do setor. Ambas as resoluções estabeleceram um novo modelo de gerenciamento dos indicadores de qualidade de energia, principalmente àqueles relacionados à duração e à frequência das interrupções de fornecimento de energia. A partir do estabelecimento de padrões de desempenho para os indicadores DEC- Duração Equivalente de Interrupções por unidade Consumidora- e FEC- Frequência Equivalente de Interrupções por unidade Consumidora - tornou-se possível a aplicação de análises comparativas entre as concessionárias de energia a fim de estabelecer novos indicadores e novos limites de continuidade de fornecimento de energia. Estas medidas tornaram-se elementos motivadores para uma série de modificações tanto dos instrumentos legais e regulatórios, como para a própria organização das empresas no direcionamento e focalização de suas estratégias.

A metodologia de comparação aplicada pela ANEEL baseia-se em técnicas de agrupamentos, ou de formação de *clusters*, que permite identificar áreas geográficas com características técnicas, físicas e econômicas homogêneas, que, no entanto, podem apresentar padrões de desempenho diferenciados. Em geral, estas técnicas são utilizadas quando não se consegue escrever um conjunto de equações que permita definir com exatidão os valores a serem assumidos por

determinadas variáveis de um problema (TANURE, 2000). Assim, com base nos valores admitidos por estas variáveis, sob certas condições de contorno, busca-se prever os valores possíveis de serem adotados pelas mesmas com base numa análise estatística do seu comportamento em condições similares.

Com base nessas diferenças de desempenho podem ser identificados melhores padrões praticados pelos elementos agrupados em um mesmo “cluster” e tornando-o como referência, podem-se definir metas de desempenho a serem adotadas para os demais elementos, com desempenhos inferiores. Além disso, a aplicação dessa metodologia de análise comparativa de desempenho das concessionárias permite ao órgão regulador superar uma desvantagem natural, decorrente da grande assimetria de informações em relação às distribuidoras, assegurando um serviço adequado ao consumidor, maximizando o uso dos recursos disponíveis pelas concessionárias (ANEEL, 2006).

A partir dessas técnicas de classificação e de estabelecimento de metas foi possível notar grandes avanços quanto à qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras, observando a redução dos indicadores brasileiros apurados desde então. Entretanto, devido ao fato de o setor de distribuição de energia elétrica brasileiro apresentar um alto grau de heterogeneidade, no que diz respeito às concessionárias e/ou permissionárias de energia e suas respectivas áreas de atuação, o número de conjuntos de unidades consumidoras é muito grande se comparado ao número de *clusters*, acarretando em grandes diferenças entre conjuntos pertencentes ao mesmo cluster, fazendo com que as metas definidas sejam incompatíveis com as características da região e historicamente impossíveis de serem cumpridas por alguns conjuntos. Outro problema enfrentado pelas concessionárias é que parte dos conjuntos atuais apresenta significativa parcela de ocorrências nas redes elétricas provocadas por fatores não gerenciáveis, como furto de cabos, temporais, vandalismo, ou ligações ilegais de energia, entre outras. Além disso, há problemas na classificação dos conjuntos nos *clusters*, evidenciados por metas de DEC e FEC acentuadamente distintas para áreas contíguas e/ou com características socioeconômicas e densidade de consumidores semelhantes.

Passados dez anos desde a criação do novo modelo de avaliação das concessionárias de energia referente continuidade de fornecimento de energia a

ANEEL editou uma nova resolução com o objetivo de corrigir as incoerências apresentadas. Desde janeiro de 2010 está em vigência o PRODIST - Procedimentos de Distribuição - (ANEEL, 2012a) que, em seu Módulo 8 abrange tanto a qualidade do produto quanto a qualidade de serviço, estabelecendo novos critérios de avaliação das concessionárias em relação aos indicadores DEC e FEC.

O modelo de avaliação de desempenho também está em processo de evolução e adaptações, as quais estão direcionadas na adição de um processo de pré-clusterização, no qual seriam avaliadas mais características relacionadas à confiabilidade do sistema.

Inserido neste contexto, porém sob um diferente ponto de vista, a principal proposta desse trabalho de mestrado está focada no desenvolvimento de uma nova metodologia para definição de limites de desempenho, a qual permita avaliar individualmente cada conjunto de consumidores e determinar tais limites de acordo com características físicas, operacionais específicas de cada conjunto. Assim, essa proposta permitirá que concessionárias e o órgão regulador identifiquem quais conjuntos que realmente apresentam problemas e definir metas de tal forma que estes possam gradativamente melhorar a sua qualidade de fornecimento de energia.

1.2 Objetivos

Como objetivo geral deste trabalho tem-se o desenvolvimento de uma metodologia com a capacidade de determinar limites de desempenho de acordo com características físicas e operacionais de um conjunto de unidades consumidoras, contribuindo para que as concessionárias tenham limites de desempenho compatíveis com suas características. Para atingir esse objetivo foram traçados alguns objetivos específicos, os quais são:

- Caracterizar e compreender o problema de confiabilidade no setor de distribuição de energia no Brasil;
- Estabelecer as variáveis que influenciam no desempenho das distribuidoras de energia em relação à continuidade do fornecimento;

- Desenvolver um sistema de avaliação de desempenho, cuja principal função seja estabelecer limites de desempenho para os indicadores DEC e FEC;
- Aplicar a Lógica Fuzzy na avaliação e determinação dos limites de desempenho;
- Analisar resultados e validar a ferramenta desenvolvida.

1.3 Organização do trabalho

Visando alcançar os objetivos propostos nesse trabalho, este trabalho está organizado em um total de 6 capítulos, sendo o primeiro deles a presente introdução. Os demais capítulos são apresentados a seguir.

O capítulo 2 compreende a revisão de literatura, a qual está organizada em três tópicos fundamentais que visam delimitar a pesquisa ao foco do trabalho: qualidade de energia e confiabilidade, Indicadores de qualidade e metodologias de avaliação de desempenho e Lógica *Fuzzy* e qualidade de energia. A partir desses tópicos busca-se compreender e caracterizar o problema da qualidade de energia. São apresentados modelos de definição de indicadores de qualidade, bem como a padronização e normatização desses indicadores. Além disso, são estudados modelos de avaliação de desempenho de forma genérica e também de forma específica à qualidade de energia, bem como a aplicação da Lógica *Fuzzy* em estudos relacionados à qualidade de energia, visando identificar as vantagens e desvantagens de aplicação da metodologia.

O capítulo 3 expõe um estudo sobre a qualidade de energia no Brasil, apresentando um histórico das mudanças ocorridas no Setor Elétrico Brasileiro e o que isso significou em relação à qualidade de energia. São abordados aspectos como: mudanças regulatórias, os métodos de apuração dos indicadores de qualidade, bem como um detalhamento sobre as metodologias para definição de limites de continuidade utilizadas pela ANEEL, com o objetivo de adequar a proposta desse trabalho às características e normas do setor de distribuição de energia no Brasil.

O capítulo 4 aborda a etapa de modelagem do sistema de avaliação de desempenho, iniciando com a caracterização do problema de confiabilidade e definição das variáveis de entrada do sistema de avaliação. Também é apresentada a estruturação do sistema de avaliação, o qual é dividido em dois níveis - secundário e principal - compostos por um total de 5 controladores *fuzzy*. Para cada controlador são mostradas a caracterização e parametrização de todas as variáveis de entrada, bem como as saídas e processo de definição das bases de regras.

O capítulo 5 apresenta a aplicação do sistema desenvolvido em um estudo de caso para a Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D. Inicialmente, é apresentada uma breve caracterização da distribuidora e, então, são apresentados e discutidos os resultados para cada um dos controladores *fuzzy* do sistema de avaliação de desempenho.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho, nas quais são destacadas as contribuições da metodologia desenvolvida e algumas propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A eletricidade é um dos insumos mais importantes para a sustentabilidade da sociedade. Devido a sua versatilidade de conversão para os mais diversos tipos de energia, é cada vez mais difícil se imaginar a vida sem ela.

Desde os primórdios, a eletricidade foi usada e comercializada como um produto, e como tal, necessitou da definição de certos parâmetros que estabelecessem suas características de qualidade com o objetivo de garantir que esse produto chegasse ao seu consumidor final dentro desses parâmetros.

Durgan (DURGAN, 2003 apud KAGAN et. al, 2009, p. 1) define um problema de qualidade de energia como “Qualquer problema manifestado na tensão, na corrente ou na frequência que resulte em falha ou má operação de equipamento do consumidor”, ou seja, para o consumidor, a eletricidade só tem sua importância percebida quando deixa de ser fornecida ou quando sua qualidade está deteriorada a tal ponto de os efeitos serem percebidos.

Além disso, o crescimento exponencial da presença de dispositivos eletrônicos e de equipamentos e processos automáticos, tanto no cotidiano das pessoas quanto nos processos produtivos, tem elevado no mesmo grau a preocupação com a qualidade de energia elétrica nas últimas décadas.

Nesse aspecto, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente às técnicas de análise da qualidade de energia, tendo como foco a qualidade de serviço no setor elétrico brasileiro. Foram analisadas as questões mais relevantes no âmbito da regulação da qualidade de energia no setor elétrico brasileiro, bem como as metodologias aplicadas para avaliação de desempenho das distribuidoras de energia, com objetivo de nortear a formulação da metodologia proposta neste trabalho.

Visando maior organização e entendimento, a revisão de literatura é apresentada em três tópicos fundamentais que delimitam a pesquisa ao foco desse trabalho, que é o estabelecimento de limites de desempenho para indicadores de continuidade e a avaliação de desempenho das concessionárias. Dessa forma,

primeiramente é abordada a temática da qualidade de serviço, tendo como objetivo identificar as principais atividades desenvolvidas no âmbito da confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia. Após são analisados os indicadores mais utilizados nas avaliações de desempenho e os modelos matemáticos utilizados para avaliação da qualidade de energia, visando identificar pontos positivos e negativos de cada método. Além disso, busca-se identificar e conceituar o padrão metodológico existente para esse tema. Por fim, ainda é apresentada uma abordagem relativa à aplicação de Lógica *Fuzzy* no âmbito da qualidade de energia, visando destacar as vantagens de aplicação da metodologia utilizada neste trabalho.

2.1 Qualidade de energia e confiabilidade

Sob muitos aspectos, pode-se considerar que o desenvolvimento de uma sociedade está atrelado a sua necessidade de energia elétrica. Diz-se isso uma vez que o desenvolvimento econômico está intrinsecamente relacionado à industrialização assim como o processo de industrialização está relacionado à oferta de energia. De acordo com Costa,

“um país, para conseguir desenvolvimento, necessita possuir uma política energética estruturada, pois só assim criará um processo de desenvolvimento tecnológico capaz de adquirir energia e força criadora suficiente para atingir e manter sua relativa autonomia e não ficar na dependência de países com desenvolvimento tecnológico mais avançado”. (COSTA, 1996 p. 1 apud SILVERIO, A. S.; WINCK, C.A., 2003, p. 2),

Ao mesmo tempo em que há um desenvolvimento industrial, paralelamente haverá um desenvolvimento nos demais setores da sociedade. Então, na medida em que a energia elétrica se torna um fator essencial em um ciclo de desenvolvimento contínuo, a sua falta ou o seu fornecimento de forma precária impactam diretamente na evolução desse ciclo. Dessa forma, a preocupação com a qualidade de energia torna-se crescente também, como consequência desse contexto.

Apesar da qualidade de energia estar em destaque atualmente, não significa que não era importante no passado (BOLLEN, M.H.J., 2000, p. 2). Todavia, o crescente interesse se deve aos seguintes aspectos:

- Equipamentos se tornaram mais sensíveis;

- Equipamentos causam cada vez mais distúrbios;
- Possibilidade de mensurar essa qualidade;
- Necessidade maior na padronização e avaliação de desempenho;
- Mercado competitivo.

Nesse aspecto Martinho, (MARTINHO, 2009, p. 22-25), analisa a influência da qualidade de energia elétrica nos segmentos Industrial, Comercial e Residencial. Segundo Martinho, é no segmento industrial onde existe uma maior preocupação com a qualidade de energia, justificada pelo elevado nível de automação dos processos produtivos e também devido ao custo elevado de paradas de produção ocasionadas por falta de energia. Dentre os itens observados no segmento industrial está o fator de potência, o qual estando fora do valor de referência gera multa à indústria; e surtos e variações de tensão, geralmente originados por descargas atmosféricas. Já o segmento comercial não sofre com todos os problemas causados pelos distúrbios de energia, ainda segundo Martinho. Os maiores problemas enfrentados nesse setor são as variações e interrupções de tensão, sejam elas de curta ou longa duração. Devido à necessidade de constante fornecimento de energia, geralmente esses problemas são corrigidos pela utilização de condicionadores de energia, como nobreaks e geradores.

Finalizando, Martinho analisa o segmento residencial como o que apresenta menor preocupação com a qualidade de energia. Porém, esse é o segmento que vem apresentando a maior mudança de perfil, tanto de carga, devido à inserção cada vez maior de cargas não lineares no sistema, quanto de consumo. Essa situação é consequência tanto do advento do home - office, “trabalho residencial”, o qual demanda a utilização cada vez maior de equipamentos eletrônicos dentro de casa, que por sua vez necessitam de energia de boa qualidade, quanto do crescimento da automação residencial (alarmes monitorados, acionamentos eletrônicos de portas e portões, etc.) que também exigem níveis adequados de energia elétrica para que funcionem corretamente. Essas mudanças fazem com que o segmento residencial, que é o maior em número de consumidores, passe a se preocupar cada vez mais com a qualidade de fornecimento de energia.

Por outro lado, sob o ponto de vista do distribuidor de energia, à medida que o consumidor de energia passa a ser cada vez mais um elemento ativo no sistema, ele não pode ser mais visto apenas como uma carga e deve ser visto literalmente como um consumidor, o qual está pagando pela utilização de um produto que deve atender as suas necessidades. Assim, a eletricidade é vista como um produto que possui certas características, as quais podem ser mensuradas, analisadas, previstas e melhoradas com o objetivo de garantir padrões de qualidade.

Há ainda outro item citado por Bollen(BOLLEN, M.H.J., 2000, p. 2), que é um fator essencial na crescente preocupação da qualidade de energia: a competitividade cada vez mais acirrada no mercado de energia. Isso se deve ao fato da indústria de energia ter caminhado em direção à privatização e à desverticalização dos seus setores. Em especial, no Brasil, essa reestruturação do setor ocorreu no final da década de 90, o que gerou grandes mudanças em relação à qualidade de energia, pois essa passou a ser regulada e fiscalizada de forma mais efetiva (KAGAN et. al, 2009, p.1). Essa competitividade no mercado faz com que os distribuidores de energia pensem cada vez mais em seu desempenho, fazendo com que a qualidade da energia ganhe destaque.

Assim, sob o ponto de vista da qualidade de energia, agentes reguladores do setor de energia no Brasil e no mundo, não tem medido esforços no desenvolvimento de normas e regulamentações para a qualidade de energia e seus indicadores com o macro objetivo de garantir o desenvolvimento de forma equilibrada e sustentável.

Nesse aspecto, podem ser citadas algumas normas, entre elas a norma europeia EN50160, que fornece informações dos parâmetros aceitáveis de qualidade de energia sob as condições normais de operação para os consumidores no ponto da conexão comum, para baixas e médias tensões no sistema de distribuição (CEN, 1999). A mesma característica pode ser atribuída à norma IEEE 519, que descreve os níveis aceitáveis de harmônicas para o ponto de entrega de energia pela concessionária (IEEE, 1992). A norma IEC 61000 (IEC, 2000) apresenta vários capítulos sobre qualidade de energia, como medições, parâmetros para equipamentos, entre outros.

Especificamente no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL- é órgão que estabelece, padroniza e normatiza a qualidade de energia e seus indicadores. No âmbito da distribuição de energia, a ANEEL avalia a qualidade da energia em três aspectos: qualidade de atendimento, qualidade do produto e qualidade de serviço.

Em relação à Qualidade de Atendimento, a ANEEL, através das Seções VII e VIII do capítulo XII da Resolução Normativa nº 414, de 09 de setembro de 2010 (ANEEL, 2010a, pág. 83-88 passim), estabelece as condições de atendimento por meio de Central de Tele atendimento – CTA - das concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica. São definidas as formas para avaliar o atendimento comercial, ou seja, a relação entre a empresa e os clientes, definindo indicadores que mensurem a qualidade desse atendimento, bem como a forma de aplicar penalidades caso esses sejam ultrapassados.

Já, tanto a Qualidade de Produto, quanto a Qualidade de Serviço são regulamentadas através do Módulo 8 do PRODIST - Procedimentos de Distribuição (ANEEL, 2012a) - o qual entrou em vigor a partir de 1º de janeiro de 2010, tendo como respaldo legal a Resolução Normativa nº 395, de 15 de dezembro de 2009 (ANEEL, 2009a). No PRODIST são estabelecidos os critérios de amostragem, os valores de referência e os procedimentos relativos à qualidade do produto e do serviço. Entre os aspectos abrangidos estão: a tensão em regime permanente, o fator de potência, os componentes harmônicos, os desequilíbrios de tensão, a flutuação de tensão, as variações de tensão de curta duração e as variações de frequência. Além disso, estão definidos no PRODIST os indicadores e padrões de qualidade de serviço, cujos objetivos são fornecer mecanismos para acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras, fornecer subsídios para os planos de reforma, melhoramento e expansão da infraestrutura das distribuidoras e oferecer aos consumidores parâmetros para avaliação do serviço prestado pela distribuidora, entre outros.

Conforme se verifica, a qualidade de energia tem se tornado cada vez mais importante em um ambiente em que a energia se torna um fator fundamental no desenvolvimento econômico e social de uma sociedade. Dessa forma a regulamentação se torna imprescindível, visando à padronização de indicadores que

measured this quality and ensuring, in this way, means that enable the application of methodologies of performance evaluation.

2.2 Indicators of quality and methodologies of performance evaluation

Every organization or process needs to be evaluated through a standardized system to enable, within a continuous cycle, the revision of strategies and work methods, allowing for the improvement of results and also the practices applied at the most diverse levels. Thus, it becomes possible to work in an environment of constant change, to the extent that problems are more easily and rapidly identified and solved.

According to Tanure, "the incessant search for solutions that ensure better performances and present better cost/benefit or input/product ratios, has accompanied the history of humanity, but it has become more relevant since the Industrial Revolution" (TANURE, 2004 p. 29). Since then, these techniques have been applied in various areas of knowledge, as they have as a basic principle the allocation, in the most optimal or more productive way, of scarce resources.

In the energy sector, the thought is not different, as it is constantly persecuted the equilibrium in costs associated with the losses caused by quality problems of energy. In this way, the search for better performances becomes essential both from the perspective of concessionaires, as from the regulatory agents (KAGAN et al, 2009, p. 5).

Energy quality from the perspective of distribution can be evaluated from various aspects, but usually two are considered: technical and commercial. Commercial quality can be understood as the relationship existing between the company and the customer. Or, in other words, aspects such as accessibility to the *callcenter*, to the service agencies to the consumer and even commercial losses can be seen as commercial quality. As for the technical perspective, energy quality is viewed from aspects of conformity (voltage level, frequency, waveform, harmonics, etc.), continuity or

confiabilidade (duração e frequência das interrupções) e ainda sob o aspecto das perdas técnicas (TANURE, 2004, p. 41).

De acordo Bollen, o interesse em avaliar a confiabilidade e o desempenho de sistemas de energia se tornou crescente com o advento dos computadores, que se tornaram mais rápidos e baratos. Enquanto aspectos referentes à qualidade de energia como nível de tensão e harmônicas, entre outros, já possuíam metodologias simples e consolidadas de análise, a avaliação da confiabilidade requeria grandes computadores, simplificações muito grosseiras e longos tempos de cálculo (BOLLEN, 2000, p. 35). Ainda segundo Bollen, a maioria dos trabalhos publicados no âmbito da confiabilidade de sistemas atingiam apenas os setores de geração e transmissão. O estudo da confiabilidade nos sistemas de distribuição de energia entrou em cena apenas nos últimos anos, devido ao crescente interesse dos consumidores na qualidade da energia (BOLLEN, 2000, p. 56).

A avaliação de desempenho dos sistemas de distribuição de energia brasileiros tem como base a determinação de indicadores que mensurem esse desempenho. Fundamentalmente, ao se falar de confiabilidade de sistemas, fala-se em interrupções de fornecimento, o que remete aos indicadores de duração e frequência das interrupções. Nesse aspecto, a própria ANEEL tem definido, através do PRODIST, os procedimentos de cálculo desses indicadores, nominalmente conhecidos como DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora- e FEC- Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora. (ANEEL, 2012a, p. 40). Todavia, a utilização de outros indicadores pode acarretar uma avaliação mais completa e coerente de desempenho.

Nesse aspecto, a literatura define alguns conceitos básicos para avaliação de desempenho. Um deles é a definição de componentes estocásticos. Para fins de estudo da confiabilidade, pode-se considerar que cada componente da rede pode ter, pelo menos, dois estados: estado de operação e o estado de falha. E para cada componente de dois estados podem ocorrer dois eventos: a transição do estado de operação para o estado de falha e a transição do estado de falha para o estado de operação. Wang, Zeng, Ma e Wu (WANG et. al, 2011) desenvolveram uma metodologia integrada de avaliação de desempenho e confiabilidade aplicando Modelos de Markov baseando-se em estados estocásticos dos fatores dinâmicos

influenciadores da confiabilidade de um sistema. Wang, Zeng, Ma e Wu ainda destacam a obtenção das taxas de falha do sistema. Fotuhi e Ghafouri (FOTUHI, M.; GHAFOURI, A., 2007) também fazem uso de estados estocásticos para avaliação de índices de confiabilidade, porém afirmam que devido às incertezas do sistema a aplicação de modelos estocásticos torna-se complexa e demorada.

Há ainda outras duas quantidades comumente utilizadas para descrever o comportamento de um componente estocástico: a taxa de falha e o tempo médio de reparo (Bollen, 2000, p. 64). Kagan define a taxa de falha de um equipamento da rede elétrica, como o número médio de falhas que ocorrem por ano por unidade de comprimento de rede (KAGAN et. al, 2009, p. 31). Moon, Kim, Lee, Park, Yun e Lee (MOON et. al, 2004), ao utilizar as taxas de falha médias da rede de uma companhia de distribuição de energia coreana para avaliação de desempenho afirmam que a utilização dessas taxas é essencial para uma acurada avaliação da confiabilidade. O tempo médio de reparo também é considerado na avaliação de desempenho desenvolvida por Moon, Kim, Lee, Park, Yun e Lee. Já Tekcan, Kahramanoğlu e Gündüzalp (TEKCAN et. al, 2012), estabeleceram um novo indicador chamado *Fator de Risco de Falha*, o qual considera as taxas de falhas elétricas, mecânicas e as que envolvem o meio ambiente, com o objetivo de avaliar a confiabilidade de um sistema.

Kagan (KAGAN et. al, 2009, p. 31) afirma que, independente da metodologia aplicada, além dos indicadores acima citados, os seguintes critérios devem ser considerados para a obtenção de uma qualidade de serviço adequada:

- A topologia e as características do alimentador primário;
- Os dispositivos de proteção e seccionamento disponíveis no alimentador, bem como os pontos de socorro, com a indicação dos tipos de dispositivos disponíveis;
- A área de cobertura de cada um dos dispositivos de proteção, isto é, a área protegida por esse dispositivo;
- A energia absorvida e o número de consumidores primários distribuídos pelas barras da rede.

Considerando essas informações, diversas metodologias de avaliação de desempenho são encontradas na literatura.

Meliopoulos e Cokkinides (MELIOPOULOS, A.; COKKINIDES, F., 2002) desenvolveram uma metodologia para avaliar a confiabilidade de um sistema de distribuição. Primeiramente, a metodologia faz uso de análises no domínio do tempo e frequência para analisar e quantificar a influência de distúrbios da rede causados por descargas atmosféricas próximas a rede e então, utilizando simulações de Monte Carlo avaliam a confiabilidade do sistema. Já Pylvänänen, Verho e Järvinen (PYLVÄNÄINEN et. al, 2005), também desenvolveram uma metodologia de avaliação da confiabilidade de redes de distribuição de energia radiais também através de simulações de Monte Carlo, porém considerando uma modelagem avançada de taxas de falha do sistema.

Utilizando Modelos de Preditivos de Confiabilidade, Agüero, Spare, Phillips, O'Meally, Wang e Brown (AGÜERO et. al, 2009) desenvolveram uma metodologia de avaliação da confiabilidade de um sistema de distribuição norte-americano. O sistema desenvolvido toma como referência um padrão de desempenho e estabelece padrões para as características avaliadas, tais como configuração da rede, taxa de falhas de equipamentos e histórico de desempenho dos indicadores de continuidade. Definidos os padrões o sistema estabelece a relação custo/benefício para as medidas corretivas a serem tomadas.

Simulações de Monte Carlo também são utilizadas por Shavuka, Awodele, Chowdhury e Chowdhury (SHAVUKA et. al, 2010) na avaliação de desempenho de um sistema de distribuição de energia. Essas simulações, associadas aos históricos dos indicadores de continuidade são utilizadas em uma metodologia analítica, a qual, através de análises da distribuição de probabilidades, estima os indicadores de continuidade para cada alimentador.

Análises estatísticas também são utilizadas por Yu, Nguyen e Haddawy (YU et. al, 1999) na avaliação de desempenho de sistemas de potência. Redes Bayesianas são utilizadas com o intuito de representar estatisticamente as probabilidades de balanço entre a disponibilidade de suprimento de energia e a demanda de carga o que possibilitou identificar se as principais causas de contingência e probabilidades de falha para trechos da rede.

De forma geral, o que se observa na literatura é a associação de análises estatísticas e algum método de simulação e modelagem, buscando associar os benefícios de cada metodologia. Ao passo que as técnicas de simulação e modelagem permitem uma grande flexibilidade na obtenção de parâmetros de saída (SHAVUKA et. al, 2010, p. 1), as análises estatísticas multivariadas permitem considerar um grande número de variáveis de entrada para cada indivíduo avaliado (TANURE, 2004, p. 94). Assim, a proposta apresentada neste trabalho tem como base de desenvolvimento essas premissas.

2.3 Lógica Fuzzy e Qualidade de Energia

A Lógica *Fuzzy*, ou Lógica Difusa, tem ganhado destaque nas mais diversas áreas científicas. O fato de introduzir o conceito de *inteligência artificial*, possibilitando a emulação de características do comportamento humano no controle de processos, garantiu a introdução da lógica *fuzzy* como uma alternativa de modelagem matemática de processos complexos e até então de difícil modelagem. Em outras palavras, o seu advento se deu pela necessidade de um método capaz de expressar sistematicamente quantidades imprecisas, vagas ou mal definidas (SIMÕES, M. G; SHAW, I. S., 1999).

Todavia, sua aplicação em massa teve diversas restrições, justamente por que sua conceituação se contrapunha aos conceitos da sociedade, que até então eram baseados numa conceituação precisa, na bivalência, no ser ou não ser (SIMÕES, M. G; SHAW, I. S., 1999, p.8).

De acordo com El-Hawary (EL-HAWARY, M. E., 1998, p. 7), apesar de conceitos de conjuntos *fuzzy* já terem sido aplicados em metodologias de tomada de decisão em sistemas de potência já na década de 70, apenas no fim dos anos 90 cresceu o interesse da aplicação da lógica, principalmente por se ter pouco conhecimento sobre a metodologia e a falta de implementação em sistemas disponíveis. Ainda conforme El-Hawary, a aplicação da Lógica *Fuzzy* nos Sistemas de Potência tem atingido tanto a área de planejamento quando de operação. O planejamento inclui planejamento da expansão do sistema, bem como planejamento de manutenção de médio e longo prazo e a operação inclui avaliação de segurança, previsão de carga, proteção e diagnósticos (EL-HAWARY, M. E., 1998, p. 9).

Ainda segundo El-Hawary, o ponto central de análise da confiabilidade de um sistema são as incertezas características do ciclo de falhas e reparo dos equipamentos. Todavia essas incertezas sempre foram vistas de forma generalizada, apenas considerando a sequência de eventos de falhas e, conseqüentemente, dos reparos, o que justifica assumir os estados estocásticos e utilizar modelos probabilísticos na análise de confiabilidade. Essa generalização acaba impossibilitando a análise em situações específicas, como no caso de decisões operacionais de curto prazo. Assim, havendo a possibilidade de descrever uma das variáveis de entrada na avaliação da confiabilidade por um modelo *fuzzy*, a análise de confiabilidade *fuzzy* torna-se necessária (EL-HAWARY, M. E., 1998, p. 224).

Nesse aspecto, El-Sayed (EL-SAYED, M. A. H., et al., 1995), avaliou os efeitos das incertezas apresentadas nos dados de entrada de um sistema de avaliação da confiabilidade, utilizando análises de efeitos de falha e técnicas de Markov. Os resultados apresentados mostraram que na medida em que aumentou o grau de incerteza das interrupções, a confiabilidade do sistema piorou. Isso ocorreu porque os métodos tradicionais de avaliação, que envolvem métodos probabilísticos e estados estocásticos, não conseguiam estimar essas falhas quando maior fosse a incerteza sobre a ocorrência (EL-HAWARY, M. E., 1998, p. 224). Li e Kapur (LI, Z; KAPUR, K., 2011) também afirmam que a aplicação de métodos estocásticos se torna complicada na avaliação da confiabilidade devido às incertezas relacionadas aos eventos de falha. Assim, desenvolvem uma metodologia aplicando a lógica *fuzzy* para redefinir os estados estocásticos, que deixam de ser binários e passaram a estar em um domínio contínuo.

Todavia, análise da confiabilidade do sistema não deve ser restringida a apenas as falhas do sistema. Bollen afirma que apesar dos indicadores de continuidade serem informações interessantes na análise da confiabilidade, eles não lidam diretamente com a causa das interrupções (BOLLEN, 2000, p. 43). Além disso, os indicadores de confiabilidade apenas mostram o desempenho passado. Isso significa que nem sempre essas informações são úteis na avaliação do desempenho e previsão de desempenho futuro, principalmente quando as mudanças na topologia da rede, mudanças de esquemas de proteção e de manobra de cargas não são consideradas nessa avaliação (EMJEDI, M. R. et. al, 2010).

Assim, a aplicação da lógica *fuzzy* vai muito além do entendimento das incertezas relacionadas as falhas do sistema, ao permitir avaliar a influência de diversas características que afetam a confiabilidade de uma rede de distribuição de energia (EMJEDI, M. R. et. al, 2010).

Nesse contexto, são encontrados na literatura diversos modelos de avaliação da confiabilidade aplicando à lógica *fuzzy*.

Lang e Pahwa (LANG, B. P.; PAHWA, A. 2000) utilizaram a lógica *fuzzy* para avaliar a influência de diversas configurações variáveis na confiabilidade. Em seu estudo, utilizaram informações tais como exposição, comprimento e idade, bem como o tipo de dispositivos de seccionamento e os tipos de condutores presentes numa rede de distribuição para obter um índice de risco de interrupção para cada alimentador, o qual foi utilizado como referência na priorização de atividades de manutenção.

Fotuhi e Ghafouri (FOTUHI, M.; GHAFOURI, A., 2007) dividiram a análise da confiabilidade de linhas de transmissão em dois blocos *fuzzy*. Um deles recebeu informações referentes às condições climáticas, temperatura e da curva de carga do sistema com o objetivo de obter um coeficiente de capacidade de transmissão de energia das linhas de transmissão. Então, o segundo bloco considera esse coeficiente, o qual é associado ao horário do dia e o dia do ano para determinar um ajuste às taxas de falha da linha de transmissão, e assim, poder calcular os indicadores de confiabilidade da rede. Já, Farahat e Al-Shammari, (FARAHAT, M.A.; AL-SHAMMARI, B.M., 2004) aplicaram a lógica *fuzzy* para avaliar a confiabilidade de um sistema de transmissão de energia através das taxas de falha dos componentes, bem como o tempo médio de reparo, configuração da rede, tempos de manobra, número de consumidores e fluxo de carga para estimar indicadores de confiabilidade, tais como Probabilidade de Perda de Carga e Valores esperados de Demanda Não Suprida e Energia Não Suprida.

Emjedi, Awodele, Chowdhury e Chowdhury (EMJEDI, M. R. et. al, 2010) foram mais além, ao estabelecer o nível de confiabilidade de uma rede de distribuição através de quatro controladores *fuzzy* independentes. Com o objetivo de simplificar a avaliação, as características foram inicialmente classificadas em controladores que avaliavam a configuração da rede, confiabilidade da subestação,

as políticas de manutenção e topologia da rede e também a influência climática. Num segundo nível *fuzzy*, os resultados obtidos nesses controladores foram considerados entradas com o objetivo de obter o índice geral de confiabilidade das redes. Emjedi, Awodele, Chowdhury e Chowdhury afirmam que essa avaliação em dois níveis simplifica o modelo de avaliação, reduzindo a complexidade na relação entre as entradas e o número de regras de inferência (EMJEDI, M. R. et. al, 2010, p. 2). Essa estrutura de avaliação foi utilizada como base na elaboração da proposta apresentada neste trabalho.

Com base nessa revisão de literatura apresentada, a metodologia apresentada nos capítulos subsequentes se insere no contexto atual da qualidade de energia e do serviço prestado pelas empresas de energia, o qual está em constante reestruturação, adaptação e evolução. Toma como base muitas das técnicas apresentadas, bem como características avaliadas, porém busca inovar ao associar os modelos de avaliação e previsão de desempenho a um modelo de definição de limites de continuidade de fornecimento que vise não só definir metas de desempenho como também permitir a busca de condições ideais de fornecimento de energia através do direcionamento de estratégias no planejamento e na operação dos sistemas de distribuição de energia.

3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E DEFINIÇÃO DE LIMITES DE CONTINUIDADE

3.1 Introdução

Fundamentalmente, a avaliação da qualidade de energia é vista sob dois aspectos: os aspectos comerciais e os aspectos técnicos. A qualidade comercial basicamente mensura a relação existente entre a concessionária e os clientes. Por outro lado a qualidade técnica está relacionada à qualidade do produto e a qualidade do serviço. A qualidade de produto refere-se à conformidade do fornecimento de energia, ou seja, nível de tensão, forma de onda, transitórios, etc. Já, a qualidade de serviço se refere à continuidade do fornecimento de energia, conforme a definição de Kagan:

A qualidade do serviço pode ser basicamente entendida como a continuidade de fornecimento, lidando basicamente com as interrupções no sistema elétrico, provocadas por falhas no sistema (manutenção corretiva) e por atividades de manutenção programada (manutenção preventiva), em função de serviços necessários a serem realizados no sistema. (KAGAN, et al., 2009, p. 2).

A avaliação da qualidade de energia, seja comercial ou técnica, é feita a partir de indicadores objetivos, os quais são definidos a partir de registros feitos pela própria concessionária. No Brasil, a padronização dos indicadores de qualidade de energia se deu no início dos anos 2000, a partir do estabelecimento da Resolução Normativa nº24 - REN nº 24/2000, a qual tinha como foco a qualidade de serviço, e da REN nº 505/2001, cujo foco era a qualidade do produto.

Especificamente falando da qualidade do serviço, a partir do estabelecimento da REN nº 24/2000, introduziu-se uma nova sistemática de avaliação de desempenho através do estabelecimento de limites de continuidade de fornecimento para as concessionárias de energia elétrica, permitindo a diferenciação de indicadores de qualidade entre as diversas regiões do país e entre as diversas possíveis subdivisões de uma área de concessão. Uma vez que os indicadores de continuidade passaram a ser apurados de forma uniforme por todas as concessionárias, foram estabelecidas as condições necessárias para análises comparativas entre as empresas de energia.

Apesar das medidas tomadas pelos agentes reguladores do setor, não foi possível observar uma significativa melhora na continuidade do fornecimento de energia no Brasil a partir de 2000, conforme apresentam as figuras 3.1 e 3.2 a seguir.

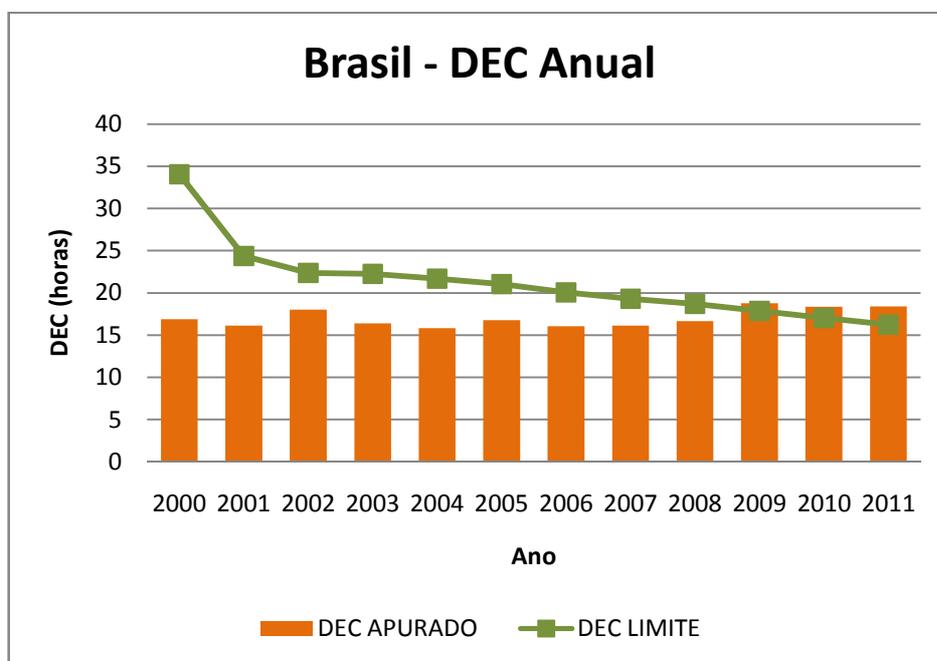


Figura 3.1- Indicadores de qualidade brasileiros– DEC. Fonte: (ANEEL, 2012b)

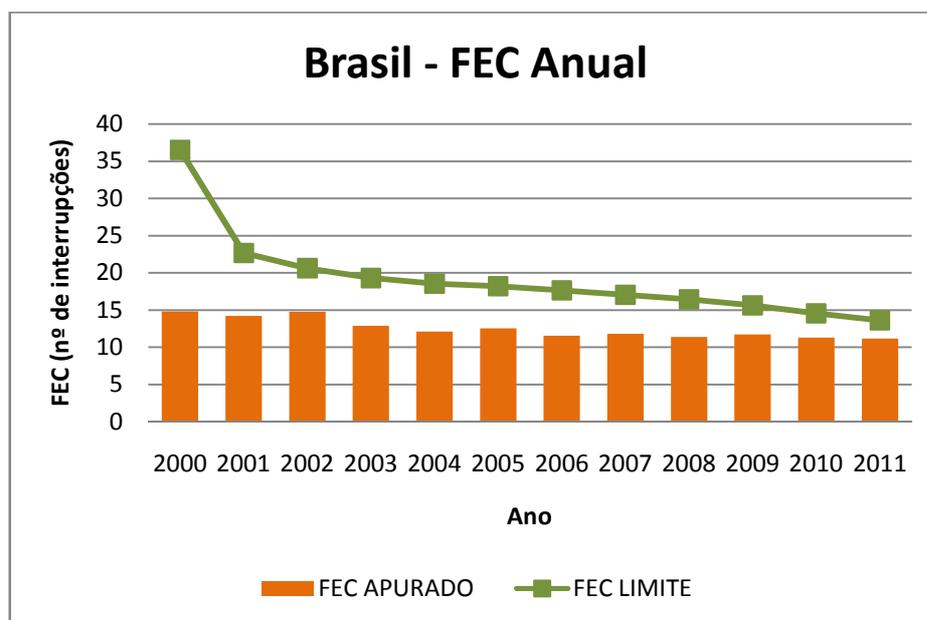


Figura 3.2- Indicadores de qualidade brasileiros– FEC. Fonte: (ANEEL, 2012b)

Os gráficos das figuras 3.1 e 3.2 confrontam a média nacional de duração e frequência das interrupções com os respectivos limites estabelecidos pela ANEEL. É

possível observar que os limites estabelecidos apresentaram variação significativa no sentido de induzir um melhor desempenho, todavia os valores apurados tanto para duração quanto para frequência mantiveram-se praticamente constantes ou apresentaram sensível piora no desempenho, como no caso da duração média das interrupções. Apesar de essa ser uma análise generalista, ela mostra que não há uma relação direta entre o limite de desempenho e o desempenho observado.

Nesse aspecto, esse capítulo tem como objetivo analisar as diretrizes da regulação da qualidade de energia no Brasil, bem como apresentar o modelo de avaliação de desempenho aplicado pelo agente regulador visando estabelecer critérios e parâmetros para um novo modelo de avaliação de desempenho.

3.2 Evolução regulatória da Qualidade de Energia no Brasil

3.2.1 Mudanças no Setor Elétrico

O esgotamento do modelo do setor elétrico brasileiro vigente até meados da década de 90, caracterizado pela inadimplência e ineficiência operacional das empresas públicas de energia, bem como a incapacidade do Estado de investir na expansão na produção de energia frente ao crescimento da demanda foram alguns dos fatores cruciais para a reestruturação do setor elétrico brasileiro.

A partir do Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (Projeto RE-SEB), implantado em 1996 e coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, uma série de medidas foram tomadas. Entre as principais, estavam a desverticalização do setor, ou seja, a divisão das empresas de energia nos segmentos de geração transmissão e distribuição de energia, e a privatização de empresas do setor, que acabou ocorrendo principalmente no segmento da distribuição de energia (ANEEL, 2008).

Ao introduzir essas mudanças, introduziu-se também o conceito de competição nos setores de geração e comercialização de energia, ficando a transmissão e distribuição condicionadas a uma estabilidade na regulação de forma a reduzir os riscos dos investidores, uma vez que esses são considerados monopólios naturais. Surgiu, assim, a necessidade de instituir uma agência

reguladora autônoma, capaz de blindar institucionalmente o setor. Foi criada então, em 1996, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL- com o objetivo de fiscalizar e regular a operação de empresas que até então estavam sob o comando do Estado. Desde então, a agência tem se consolidado como órgão regulador, ao fortalecer as relações entre os agentes do setor, o poder público e os consumidores de energia, buscando o equilíbrio para a implantação de regras que garantam novos investimentos ao mesmo tempo em que não gerem ônus aos consumidores, além de garantir um fornecimento de energia de qualidade.

3.2.2 Regulação da Qualidade de Energia

Dentro de suas atribuições, a ANEEL esteve constantemente buscando adequar e melhorar as metodologias e normas aplicadas regulamentadoras do setor elétrico. Nesse contexto, apesar de a REN nº 24/2000 e a REN nº 505/2001 terem sido um marco regulatório para a qualidade de energia, ambas deram lugar ao Módulo 8 do PRODIST-Procedimentos de Distribuição- a partir de 2010.

O Módulo 8 do PRODIST estabelece todos os procedimentos relativos à qualidade de energia, abordando tanto a qualidade de produto quanto a de serviço. Para a qualidade do produto tem como objetivo definir terminologias, caracterizar fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão. Já para a qualidade de serviço tem como objetivo estabelecer a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento as ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Especificamente, ao estabelecer os indicadores de qualidade e os padrões de desempenho para a qualidade de serviço, o módulo 8 do PRODIST tem o papel de estabelecer parâmetros de gerenciamento das redes de distribuição, possibilitando a aplicação de mecanismos para o acompanhamento e controle, assim como fornecendo subsídios para planos de reforma e melhoramento da infraestrutura das distribuidoras. Além disso, desenvolve o papel de fiscalização ao oferecer aos consumidores parâmetros para a avaliação da confiabilidade de uma forma simples e direta, através dos indicadores de continuidade de fornecimento (ANEEL, 2012a, p 32).

3.3 Indicadores de qualidade

A qualidade do serviço é caracterizada em termos de indicadores coletivos ou individuais. Os indicadores coletivos objetivam mensurar o desempenho das concessionárias de uma forma mais ampla, servindo como um referencial para o órgão regulador. Já os indicadores individuais remetem diretamente ao padrão de desempenho observado pelos consumidores. Além disso, a continuidade do fornecimento de energia é fundamentalmente avaliada sob dois aspectos, duração e frequência de interrupções de fornecimento de energia.

Os indicadores relacionados à duração das interrupções de fornecimento de energia estão intimamente ligados aos recursos humanos e materiais empregados para a recomposição e reparo da rede após cada interrupção. Em outras palavras, pode-se entender que a duração das interrupções está relacionada à operacionalidade e flexibilidade da rede de distribuição e ao preparo e disponibilidade de equipes de manutenção, os quais devem garantir a recomposição do estado normal de operação da rede o mais rápido possível. Já os indicadores referentes à frequência das interrupções remetem diretamente à robustez do sistema frente ao meio ambiente (causas externas) e a degradação do sistema por envelhecimento e/ou falta de manutenção. Ou seja, a frequência das interrupções está relacionada à qualidade da rede e a sua susceptibilidade ao meio, seja por condições climáticas ou mesmo por ações do homem.

O módulo 8 do PRODIST estabelece detalhadamente os procedimentos de cálculo, tanto dos indicadores coletivos, quanto dos indicadores individuais referentes à duração e frequência das interrupções, os quais já foram estabelecidos na REN nº 24, da ANEEL.

3.3.1 Indicadores Individuais

Os indicadores individuais são apurados, atualmente, para todas as unidades consumidoras de uma distribuidora de energia. Esses devem ser apurados mensalmente, trimestralmente e anualmente. No PRODIST, está determinada a apuração de quatro indicadores individuais, que são:

- a) DIC- Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão. É calculada através da equação (3.1):

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i); \quad (3.1)$$

- b) FIC- Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão. É calculada através da equação (3.2):

$$FIC = n; \quad (3.2)$$

- c) DMIC- Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão. É calculada através da equação (3.3):

$$DMIC = t(i)_{max}; \quad (3.3)$$

- d) DICRI- Duração de Interrupção Individual Ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora por Ponto de Conexão. É calculada através da equação (3.4):

$$DICRI = t_{crítico}; \quad (3.4)$$

em que:

DIC: duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

FIC: frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em número de interrupções;

DMIC: duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

DICRI: duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

i: índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a *n*;

n : número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração;

$t(i)$: tempo de duração da interrupção (i) da 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 horas;

$t_{crítico}$: duração da interrupção ocorrida em dia crítico.

Os indicadores individuais DIC, FIC e DMIC são indicadores consolidados desde a Resolução nº24/2000, da ANEEL, sendo informados mensalmente nas faturas de energia de todas as unidades consumidoras com os respectivos limites de desempenho.

Já o indicador DICRI foi estabelecido na última revisão do módulo 8 do PRODIST, a qual entrou em vigor em fevereiro de 2012. A definição de dia crítico foi estabelecida com o objetivo de diferenciar dias com atividades emergenciais intensas. Um dia é considerado crítico se a quantidade de atividades emergenciais superar a média acrescida de três desvios padrões dos valores diários, sendo a média e o desvio padrão obtidos do histórico referente aos últimos 24 meses (ANEEL, 2012c, p. 30). De acordo com a ANEEL (ANEEL, 2011, p.2) esse novo indicador visa melhorar a análise dos demais indicadores e viabilizar o estabelecimento de limites mais eficientes.

3.3.2 Indicadores Coletivos

Os indicadores coletivos são apurados atualmente para todos os conjuntos de consumidores das distribuidoras de energia. A apuração desses indicadores ocorre mensalmente, trimestralmente e anualmente. Os indicadores coletivos definidos no PRODIST são:

- a) DEC-Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora. É calculado através da equação (3.5):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC(i)}{Cc}; \quad (3.5)$$

- b) FEC- Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora. É calculado através da equação (3.6):

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC(i)}{Cc}; \quad (3.6)$$

em que:

DEC: duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;

FEC: frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções;

i: índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto;

Cc: número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT.

Cabe ressaltar que são consideradas efetivamente interrupções aquelas com duração igual ou superior a três minutos.

3.4 Metodologia de avaliação e definição dos limites de desempenho

3.4.1 Avaliação de Desempenho

Apesar das privatizações ocorridas no setor de distribuição a partir do Projeto de Reestruturação do Setor, a distribuição de energia no Brasil continuou caracterizada pela estrutura monopolista, na qual a concessionária não enfrenta nenhum tipo de concorrência dentro da sua área de atuação. Dessa forma, foram buscadas técnicas de avaliação capazes de induzir melhorias nos padrões de

desempenho ao emular um ambiente competitivo entre as concessionárias. Nesse aspecto, a metodologia de avaliação de desempenho aplicada pela ANEEL, a qual foi inicialmente desenvolvida por Tanure (TANURE, 2000), é baseada em análises comparativas de desempenho, as quais partem do pressuposto que elementos que possuem características semelhantes devem apresentar desempenhos semelhantes.

Nesse caso, os elementos são os conjuntos de unidades consumidoras, que representam um agrupamento de consumidores dentro de uma área contígua. Esse conceito foi introduzido na resolução nº24/2000 da ANEEL, visando à definição de uma unidade mínima de avaliação que possibilitasse a aplicação da metodologia. Com o PRODIST, o conceito de conjunto tornou-se mais técnico e específico, definindo com unidade mínima de um conjunto a área abrangida por uma subestação de distribuição.

Partindo desse conceito e considerando o período de observação dos indicadores DEC e FEC, tornou-se possível estabelecer atributos definidores desses conjuntos, de modo que fosse possível a aplicação de análises comparativas para atribuição de padrões de desempenho. Atualmente, após atualização metodológica, os conjuntos e concessionárias são definidos pelos seguintes atributos:

- a) Área em quilômetros quadrados (km²);
- b) Extensão da rede MT, segregada em urbana e rural, em quilômetros (km);
- c) Energia consumida nos últimos 12 meses, segregada pelas classes residencial, industrial, comercial, rural e outras classes, em megawatt-hora (MWh);
- d) Número de unidades consumidoras atendidas, segregadas pelas classes residencial, industrial, comercial, rural e outras classes;
- e) Potência instalada em quilovolt-ampère (kVA);
- f) Padrão construtivo da rede (aérea ou subterrânea);
- g) Localização (sistema isolado ou interligado).

A análise de desempenho é realizada através de técnicas de *Cluster Analysis*, ou análises de agrupamentos, sendo inicialmente aplicado o método de k-médias (não hierárquico). O objetivo da formação dos *clusters* é garantir o agrupamento de indivíduos em diferentes classes sendo cada uma homogênea em sua constituição. Em outras palavras, busca-se classificar em um mesmo cluster elementos com o maior grau de homogeneidade possível enquanto entre os *clusters* busca-se o maior grau de heterogeneidade.

No método de k-médias, a primeira etapa para identificar os agrupamentos, ou *clusters*, a serem formados, é o estabelecimento de medidas de proximidade ou similaridade dos elementos a serem analisados. O critério utilizado para a avaliação de similaridade foi a Distância Euclidiana, que define a distância entre dois pontos como:

$$D(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}, \quad (3.7)$$

Todavia, por se tratarem de grandezas de ordens diferentes, se faz necessária a normalização dos dados. Nesse caso, foi utilizada a normalização por variância, a qual é obtida reduzindo do valor de cada atributo a média e dividindo-o pelo respectivo desvio padrão, conforme a equação:

$$A_j = \frac{A_i(j) - \bar{X}(A_i)}{\sigma_{A_i}}, \quad (3.8)$$

em que:

A_j : Atributo normalizado;

$A_i(j)$: Valor original do atributo;

$\bar{X}(A_i)$: Média aritmética do atributo;

σ_{A_i} : Desvio Padrão do atributo.

Na metodologia desenvolvida por Tanure (TANURE, 2000), é definido o número de *clusters*, a partir de uma análise preliminar, no caso 30. A partir dessa definição, centroides são escolhidos aleatoriamente entre o universo de todos os

conjuntos todos e, então os demais conjuntos são agrupados ao cluster que apresentasse maior semelhança entre as características.

Na atualização metodológica apresentada no anexo da Nota Técnica nº28 de 2010 (ANEEL, 2010b), foi proposta uma etapa adicional de classificação, chamada *pré-clusterização*, na qual são comparadas primeiramente as distribuidoras. Essa etapa de *pré-clusterização* tem como propósito possibilitar uma maior diferenciação entre os *clusters* ao agregar características relacionadas à qualidade de serviço que são de difícil obtenção para um conjunto, mas podem ser obtidas em nível de área de concessão.

Realizada a comparação entre empresas, o passo seguinte é comparar os conjuntos das empresas consideradas semelhantes.

Resumidamente, o novo método de avaliação de desempenho proposto pela ANEEL consiste nas seguintes etapas:

- a) Clusterização das distribuidoras (*pré-clusterização*), aplicando o método Ward¹, a partir de atributos definidos;
- b) Clusterização dos conjuntos das distribuidoras em cada *pré-cluster*, usando k-médias, a partir de atributos definidos;
- c) Definição dos limites para os indicadores DEC e FEC.

3.4.2 Definição dos limites de desempenho coletivos

A etapa de definição dos limites de desempenho proposta por Tanure (TANURE, 2000) é baseada em dois modelos clássicos de regulação por desempenho: *Yardstick Competition* e *Benchmark* (TANURE, 2000, p. 79).

¹ O método de Ward é um método de clusterização hierárquico que utiliza o critério da perda de informação, também chamado de menor erro e considera o somatório dos quadrados das diferenças entre cada cluster a ser agrupado e o valor central de cada cluster já formado. Assim, avaliando o aumento deste erro para cada combinação dos clusters existentes, identifica-se qual a melhor sequência de agrupamento para estes conjuntos ou clusters. (ANEEL, 2010a)

No modelo Yardstick as empresas são estimuladas a adotarem um desempenho baseado em um comportamento padrão, que é decorrente das análises de desempenho dos agentes que compõem o universo considerado e o padrão que se deseja atingir. Já no modelo Benchmark as empresas são estimuladas a adotarem um padrão de desempenho baseado no comportamento do melhor elemento do universo analisado.

Assim, após a formação dos agrupamentos, ordena-se então, os conjuntos em forma crescente com relação aos seus padrões de desempenho relativos à DEC e à FEC, gerando duas listas ordenadas de conjuntos. São formados pares de desempenhos, a partir dessas listas. Ao final, para cada cluster há um valor de meta final para DEC e FEC dos seus conjuntos. Essas metas correspondem ao segundodecil de desempenho do conjunto, ou seja, os 20% do total de melhores pontos formados, que podem ou não corresponder a um conjunto existente (ANEEL, 2010b).

Após a definição dos limites é definido o tempo de transição. Essa taxa define o tempo em que se pretende fazer a transição do patamar inicial de desempenho para o patamar desejado. Esse período deve ser definido levando em consideração as características de cada sistema e a variação de desempenho requerida.

O tempo médio para transição é definido como o período de duas revisões tarifárias, ou seja, oito anos (ANEEL, 2006, p.4). Para o cálculo do Tempo de Transição, adota-se uma taxa de melhoria constante, definida por:

$$V_{ano}(x) = \left(\frac{V_{meta}}{V_{atual}}\right)^{\frac{x}{8}} \cdot V_{atual}, (3.9)$$

em que:

x : ano considerado;

$V_{ano}(x)$: Meta para o ano x ;

V_{meta} : Valor da meta final;

V_{atual} : Desempenho atual.

Na proposta apresentada pela ANEEL (ANEEL, 2010b), há três opções para definição dos limites: percentil, Benchmark ou DEA (*Data Envelopment Analysis*), sendo esse o mais promissor. O DEA, conhecido também como técnicas de análise envoltória de dados, é um método conhecido pela ampla aplicação em unidades de produção. Tem como objetivo estimar a eficiência dessa unidade de produção em termos comparativos aos melhores padrões de uma amostra. A eficiência da unidade de produção é definida como uma relação entre insumos e produtos – quanto mais produtos uma unidade produz para uma determinada quantidade de insumos (lógica do produto), ou alternativamente, quanto menos insumos uma unidade gasta para obter alguma quantidade fixa de produtos (lógica do insumo), mais eficiente é a unidade.

No caso das concessionárias, as unidades de produção são os conjuntos e os insumos, seus atributos. O produto é a qualidade de energia elétrica. O objetivo é estabelecer qual seria a qualidade da continuidade do fornecimento de energia elétrica, medida segundo os valores apurados dos indicadores DEC e FEC, se os conjuntos de unidades consumidoras atuassem de forma eficiente dado os dispêndios de insumos. Ou seja, quanto poderiam ser os produtos (DEC e FEC), dada a utilização atual de insumos.

A qualidade do fornecimento é considerada como o produto do modelo DEA. Para adequar o produto medido à lógica do DEA, foi considerado como produtos o inverso dos indicadores, conforme as equações (3.10) e (3.11):

$$DEC_p = \frac{1}{DEC_{apurado}}; \quad (3.10)$$

$$FEC_p = \frac{1}{FEC_{apurado}}; \quad (3.11)$$

Em que $DEC_{apurado}$ e $FEC_{apurado}$ são os desempenhos registrados para os indicadores DEC e FEC. Tal adequação também foi adotada no trabalho de Pessanha (PESSANHA, 2006 apud. ANEEL, 2010b).

Apesar de ter sido aberta a discussão em relação a qual o melhor método para definição dos limites, não há referências, mesmo no sítio da ANEEL sobre qual é a metodologia aplicada atualmente. Além disso, essa metodologia foi desenvolvida para entrar em vigor a partir do início do terceiro ciclo de revisão tarifária, o qual teve

início em 2011. Assim, não há dados consolidados que permitam analisar o impacto dessa nova metodologia nos limites de desempenho estabelecidos para todas as concessionárias.

3.4.3 Definição dos limites de desempenho individuais

Definidos os limites de continuidade coletivos (DEC e FEC) a definição dos limites individuais (DIC, FIC e DMIC) obedece aos limites coletivos, a localização (urbano ou rural) e a tensão contratada. Os valores dos limites individuais estão definidos nas tabelas 1 a 5 dos anexos do módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2012c).

3.5 Considerações do capítulo

Tanto as mudanças regulatórias quanto as adaptações metodológicas propostas pela ANEEL são resultado dos esforços da própria ANEEL, bem como dos demais agentes do setor. Seja qual for a metodologia utilizada para a definição de metas, ou limites aceitáveis, de desempenho a serem cumpridos pelas concessionárias, o objetivo é contribuir para a evolução do desempenho das concessionárias de distribuição.

Assim, a proposta apresentada neste trabalho é fundamentada em dois pilares: a avaliação do desempenho técnico da concessionária de forma individual, a partir das características definidoras de cada elemento avaliado (conjuntos de consumidores) e a definição de valores esperados para desempenho dos indicadores coletivos DEC e FEC a partir do desempenho apresentado. A metodologia desenvolvida tem como base a Lógica *Fuzzy*, conforme será visto nos próximos capítulos.

4 ANÁLISE E MODELAGEM DO SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

4.1 Introdução

Para a definição de um sistema de avaliação de desempenho adequado, três aspectos muito importantes devem ser considerados:

- O problema de desempenho deve ser definido, ou seja, as características que influenciam no desempenho devem ser conhecidas;
- Deve haver um padrão de avaliação, ou seja, uma metodologia padrão que realize a avaliação uniforme de todos os elementos;
- Deve-se estabelecer uma pontuação ou indicador para o desempenho avaliado.

Associando esses aspectos à avaliação de confiabilidade, é necessário estabelecer as características que influenciam no desempenho dos sistemas de distribuição em relação à qualidade de serviço, determinar um padrão metodológico para realizar essa avaliação, para então, obter um índice de desempenho.

Todavia, essa não é uma tarefa trivial. Conforme a ANEEL (ANEEL, 2010b), é muito difícil apresentar um modelo funcional para a atribuição dos limites de continuidade, pois cada indicador é influenciado por diversas características. Um exemplo de um sistema de avaliação da confiabilidade com diversas entradas e uma saída é apresentado na figura 4.1.

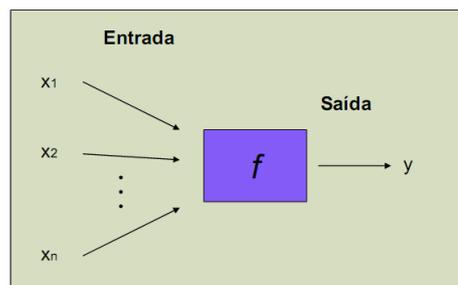


Figura 4.1- Mapeamento f entre entradas e saídas de um sistema de avaliação de desempenho.

Fonte: (ANEEL, 2010b).

Entre as dificuldades mencionadas pelo agente regulador estão a incerteza associada aos parâmetros de entrada e a dificuldade em relacionar os parâmetros de entrada com a saída do sistema de forma a refletir a qualidade do serviço de fornecimento de energia através de seus indicadores de confiabilidade.

Atendendo aos aspectos relacionados à definição do modelo de avaliação de desempenho e às preocupações apresentadas pelo agente regulador, a escolha da Lógica *Fuzzy* como metodologia a ser aplicada tornou-se natural, pois essa pode representar de forma adequada o problema analisado. Uma vez que essas incertezas possam ser expressas por variáveis linguísticas, a confiabilidade de um sistema e, conseqüentemente, os limites de desempenho de uma concessionária de energia podem ser avaliados através da abordagem *Fuzzy*. Além disso, El-Sayed (EL-SAYED, M. A. H., et al., M., 1995) afirma que a aplicação de técnicas que traduzam essas informações imprecisas e incertas, tais como eventos climáticos e falhas de equipamentos da rede, torna-se essencial para a avaliação da confiabilidade de sistemas.

Partindo dessas premissas, este capítulo apresenta a etapa de modelagem do problema utilizando um sistema *fuzzy* para realizar a avaliação de desempenho. São apresentados o processo de escolha e organização das variáveis de entrada, o processo de modelagem *fuzzy*, o qual mostra a definição e o ajuste dos conjuntos *fuzzy*, a etapa de definição das regras e o processo de *defuzzificação* a partir da saída de cada controlador, o qual terá como resultado final, os limites de continuidade de fornecimento de energia.

4.2 Caracterização da continuidade de fornecimento e definição das variáveis de entrada

A escolha das variáveis a serem consideradas como entrada de sistema *fuzzy* é uma etapa fundamental no desenvolvimento da metodologia, pois elas devem representar as características que influenciam a confiabilidade do fornecimento de energia da forma mais precisa possível.

Conforme El-Hawary, a avaliação da confiabilidade através de um modelo *fuzzy* não depende apenas da confiabilidade dos componentes – os quais apenas

ajudam a descrever os eventos de falha da rede – mas também das características de consumo - as quais ajudam a descrever as consequências desses eventos(EL-HAWARY, M. E., 1998, p. 224). Ou seja, as variáveis a serem consideradas no sistema *fuzzy* não devem estar somente relacionadas ao evento de falha da rede propriamente dito, mas também à *causa-consequência* deste. Deve se levar em conta ainda que mesmo que uma das variáveis não seja necessariamente *fuzzy*, ou seja, não esteja caracterizada pela incerteza, ela pode ser descrita por um modelo *fuzzy*. Nesse aspecto, Zadeh afirma que “na maioria dos casos é possível construir o mesmo produto sem a lógica *fuzzy*, porém a lógica *fuzzy* é mais rápida e mais barata” (MATHWORKS, 1997, p 1-4).

As variáveis características do sistema de distribuição a serem consideradas na resolução do sistema proposto devem levar em conta os seguintes aspectos:

- As variáveis devem ter um significado claro, tanto para o consumidor quanto para a distribuidora de energia;
- A apuração e/ou obtenção dessa variável deve ser viável e padrão;
- A fiscalização e validação dessas entradas também devem ser viáveis;
- As variáveis devem ser robustas e flexíveis, ou seja, ao mesmo tempo em que devem ser claras e objetivas, devem caracterizar da melhor forma possível o problema analisado.

Em outras palavras, a escolha das variáveis de entrada deve, ao mesmo tempo, caracterizar de forma coerente o problema da continuidade de fornecimento de energia, atender aos padrões estabelecidos pelo agente regulador quanto à fiscalização, apuração e padronização das informações e atender aos anseios das concessionárias e consumidores.

Sabe-se que, para as redes de distribuição de energia elétrica, os parâmetros fundamentais que definem a qualidade de energia relativa à continuidade de fornecimento são os indicadores DEC e FEC, ou seja, duração e frequência das interrupções. Porém, a cada um desses indicadores, algumas características podem ser associadas. De acordo com Tanure, a duração das interrupções está associada à capacidade da concessionária de efetivamente recompor o serviço quando houver

a ocorrência de defeito. Essa capacidade relaciona-se diretamente à capacidade da distribuidora de identificar e localizar o defeito na rede, mobilizar e deslocar as equipes de operação e manutenção necessárias até o local dessa falha para então realizar as operações necessárias de manobra de carga e/ou reparo para recompor o sistema. Intrinsecamente relacionados a essa sequência de eventos, estão a logística e localização das equipes de manutenção e o próprio preparo dos técnicos para a atuação em situações de emergência. Em suma, pode-se dizer que estes indicadores estão sujeitos diretamente à capacidade e eficácia de gestão de recursos materiais e humanos postos a disposição da concessionária (TANURE, 2004). Por outro lado, a frequência das interrupções está diretamente associada às condições físicas das redes, ou seja, reflete a qualidade e periodicidade da manutenção realizada, bem como à vida útil dessa rede. Essa qualidade da manutenção remete à qualidade dos materiais e equipamentos empregados e às estratégias de manutenção adotadas. Em suma, a frequência das interrupções também está sujeita a qualidade física da rede e dos recursos materiais que a concessionária dispõe (TANURE, 2004).

Todavia há diversas outras características que se relacionam à continuidade de fornecimento de energia e que não estão diretamente relacionadas às redes. Nesse aspecto, no processo de consulta pública conduzido em 2010 pela ANEEL, o qual visava coletar subsídios para a revisão da metodologia de definição de limites de desempenho, as concessionárias apresentaram uma série de sugestões de atributos, os quais deveriam representar as distribuidoras de energia quanto à qualidade de fornecimento. Entre outros, foram citados aspectos relacionados a eventos climáticos, tais como índice pluviométrico e índice de descargas atmosféricas, aspectos relacionados à caracterização da área do conjunto, tais como índice de desenvolvimento humano, renda per capita e outros relacionados à acessibilidade aos locais de falha, tais como densidade de estradas pavimentadas e quantidade de consumidores de regiões rurais (ANEEL, 2010b, p. 18-20 *passim*).

Tendo em vista essas premissas, a escolha das variáveis de entrada do sistema *fuzzy* foi realizada tentando atender o maior número de características possíveis, respeitando os aspectos relacionados à Lógica *Fuzzy* e os relacionados à engenharia. Tendo como unidade de avaliação um conjunto de unidades

consumidoras, foram escolhidas inicialmente 14 variáveis, as quais são apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Variáveis consideradas no sistema de avaliação de desempenho.

Variáveis de entradas
Consumo médio mensal por unidade consumidora
DEC_{relativo}
Equipamentos de seccionamento por extensão de rede
Equipes por conjunto
Extensão média de alimentadores
FEC_{relativo}
Percentual de alimentadores rurais
Percentual de ocorrências em clima adverso
Potência instalada por quilômetro de rede
Taxa de falha devido a componentes de rede
Taxa de falha devido a descargas atmosféricas
Taxa de falha devido à vegetação
Tempo médio de deslocamento de equipes
Tempo médio de execução de serviço

A justificativa da escolha de cada uma das variáveis é apresentada nos itens 4.4 e 4.5.

4.3 Estrutura do modelo de avaliação

Primeiramente, o modelo proposto deve definir limites de desempenho para os indicadores DEC e FEC. Sabe-se, conforme mencionado anteriormente, que cada um desses indicadores é influenciado por diferentes características, logo, a definição de dois modelos diferentes, um para cada indicador, deve ser considerada. Outro fator relevante que é a quantidade de variáveis pode dificultar a análise. Isso se deve ao fato de que o número de termos linguísticos de cada variável de entrada determina o número máximo de regras *fuzzy* que podem ser definidas (LEE, C. C., 1990, p.410). Se considerarmos que cada uma das entradas seja descrita por 3 termos linguísticos, o número de combinações possíveis para regras estaria na ordem de 3^{14} , ou seja, seriam 4782969 regras a serem estabelecidas.

Para contornar esse problema é possível propor um sistema *fuzzy* com dois níveis, no qual as variáveis são avaliadas em controladores independentes entre si,

o que resulta em um menor número de regras e, conseqüentemente, em uma análise menos complexa (EMJEDI, M. R. et. al, 2010, p. 2).

Dessa forma o modelo proposto nesse trabalho apresenta dois níveis de avaliação. O primeiro nível, chamando de nível secundário, é responsável pela avaliação de desempenho. Já o segundo nível, chamando nível principal, é responsável pela definição dos limites dos indicadores DEC e FEC.

O nível secundário avalia a confiabilidade de um conjunto de unidades consumidoras através de três controladores *fuzzy* independentes, os quais são denominados:

- Características operacionais;
- Padrão de rede;
- Influência do meio.

Cada controlador do nível secundário gera um índice de confiabilidade devido às características avaliadas. Já o nível principal define os limites de desempenho a partir dos índices obtidos no nível secundário. Dessa forma, além de reduzir a complexidade, é possível obter informações mais detalhadas sobre a confiabilidade do sistema avaliado, através desses índices obtidos.

A tabela 4.2 apresenta todas as variáveis de entrada associadas aos respectivos controladores *fuzzy* do nível secundário e do nível principal.

Tabela 4.2 – Variáveis de entrada do sistema de avaliação de desempenho – controladores *fuzzy* níveis secundário e principal.

Nível	Controlador Fuzzy	Variáveis de entradas
Nível secundário	Características operacionais	Potência instalada por quilômetro de rede (kVA/km de rede)
		Tempo médio de execução de serviço (TME)
		Consumo médio mensal por unidade consumidora (MWh/UC)
		Percentual de alimentadores rurais (% AL _{Rural})
	Padrão de rede	Equipes por conjunto (Equipes/cjto)
		Dispositivos de seccionamento por extensão de rede (Disp. Seccionamento/km de rede)
		Extensão média de alimentadores (ER/AL)
		Taxa de falha devido a componentes de rede (TF Comp.)
	Influência do meio	Tempo médio de deslocamento de equipes (TMD)
		Taxa de falha devido à vegetação (TF 303)
		Taxa de falha devido a descargas atmosféricas (TF 304)
		Percentual de ocorrências em clima adverso
Nível Principal	Limite DEC	DEC _{relativo}
		Características operacionais
		Padrão de rede
		Influência do meio
	Limite FEC	FEC _{relativo}
		Características operacionais
		Padrão de rede
		Influência do meio

A figura 4.2 apresenta a proposta para solução do problema utilizando um modelo *fuzzy* com dois níveis.

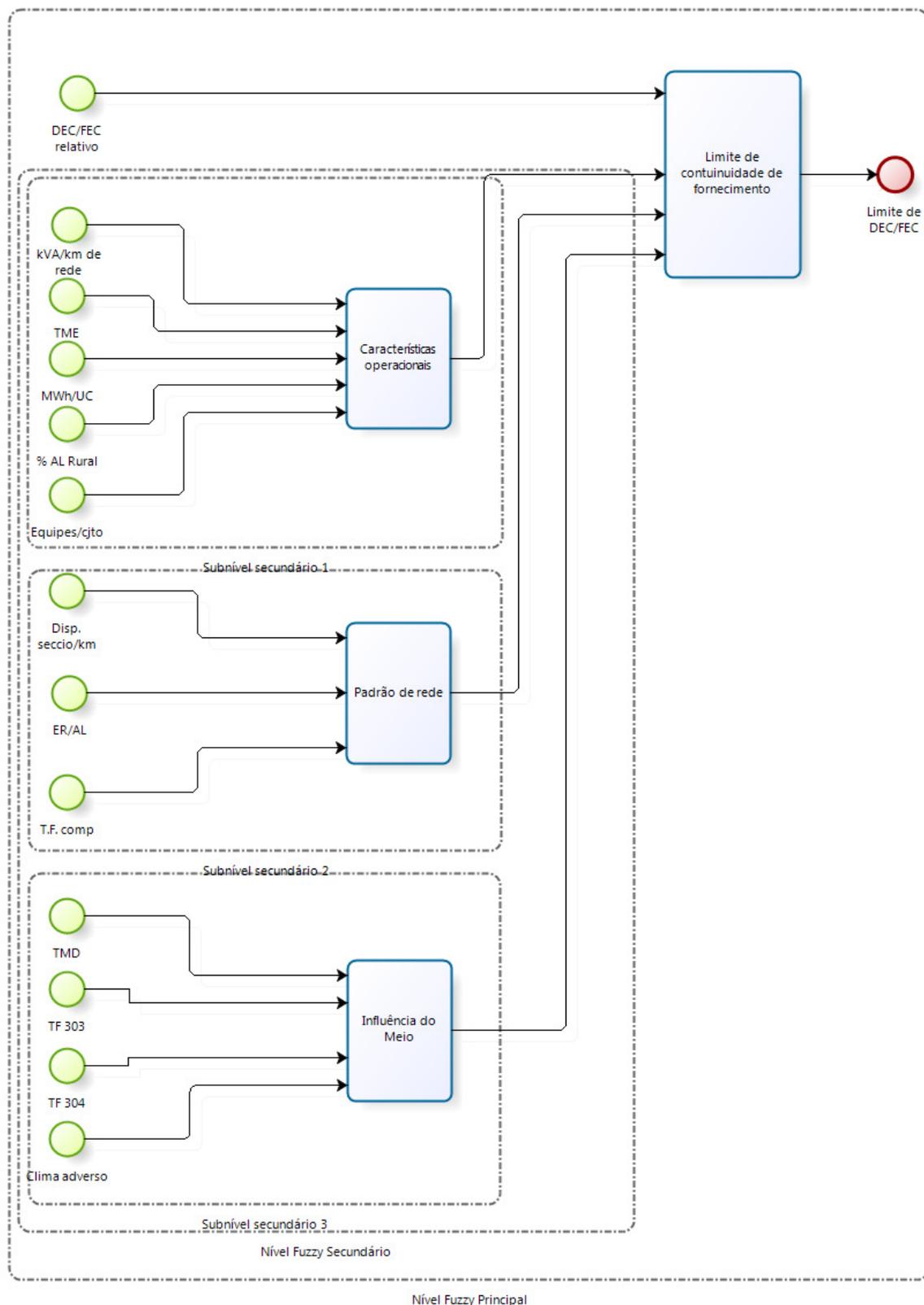


Figura 4.2 – Estrutura do modelo de avaliação de desempenho proposto.

A partir da proposta apresentada, cada controlador é modelado isoladamente, considerando apenas as entradas a ele associadas, conforme é apresentado a seguir.

4.4 Nível secundário do sistema de avaliação

4.4.1 Características Operacionais

As variáveis que definem as características operacionais de uma rede de distribuição de energia elétrica são avaliadas no controlador *fuzzy* chamado *Características operacionais*. Esse controlador é definido por cinco variáveis de entrada, as quais caracterizam ou, de alguma forma, influenciam nas atividades de operação de um sistema de distribuição. Ao estabelecer as relações entre essas variáveis na base de regras, obtém-se como valor de saída um índice que representa a confiabilidade do sistema devido às características operacionais do conjunto. A figura 4.3 apresenta o controlador “*Características operacionais*”, no qual as variáveis: *Potência instalada por quilômetro de rede*, *Tempo médio de execução de serviço*, *Consumo médio mensal por unidade consumidora*, *Percentual de alimentadores rurais* e *Equipes por conjunto* são representadas pelas siglas “*kVA/ km de rede*”, “*TME*”, “*MWh/UC*”, “*% AL Rural*” e “*Equipes/cjto*”, respectivamente.

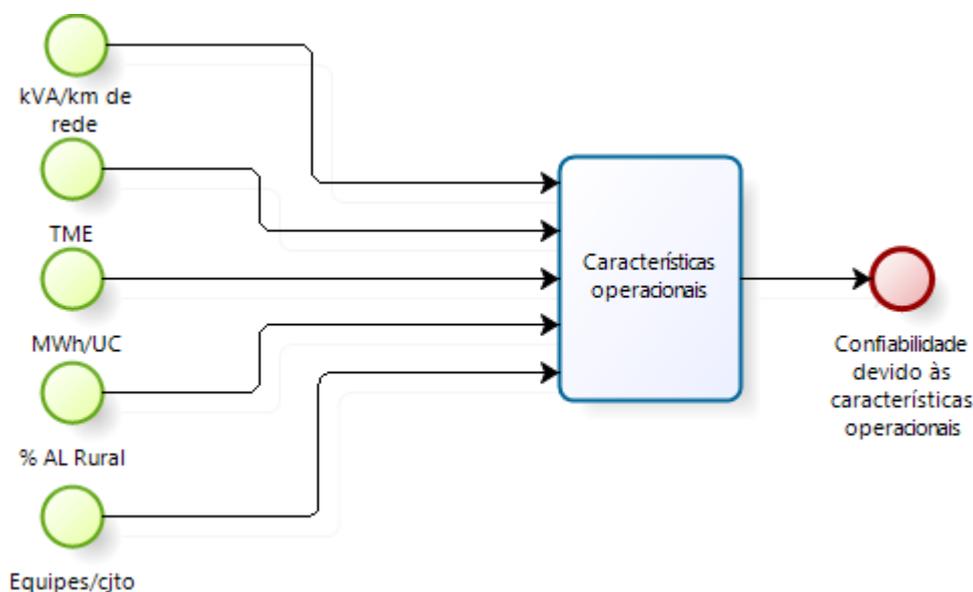


Figura 4.3 – Controlador “Características Operacionais”.

A seguir são detalhadas as respectivas variáveis que definem as características operacionais dos conjuntos de consumidores.

4.4.1.1 Potência instalada por quilômetro de rede

A variável *Potência instalada por quilômetro de rede* por si só não é suficiente para descrever o desempenho em relação à continuidade de fornecimento de energia. Todavia é possível estabelecer algumas relações a partir dessa variável. Analisando isoladamente o fator potência instalada é possível estabelecer uma relação direta com o consumo, por exemplo. Em geral, conjuntos que apresentem grande capacidade instalada, apresentam elevado consumo de energia, fato que caracteriza regiões industrializadas e de grande faturamento para a distribuidora. Logo, pode-se presumir que regiões com maior potência instalada, apresentam maior confiabilidade, uma vez que a presença de grandes clientes exige atendimento diferenciado. Todavia essa relação não é tão simples de se estabelecer. Conforme Tanure, a quantidade de transformadores influencia bastante, pois “em geral, grande capacidade instalada em poucos transformadores resulta menor flexibilidade de manobra entre transformadores sujeitos a defeito e vice-versa” (TANURE, 2004, p. 141). Nesse aspecto, ao relacionar potência instalada com extensão de rede primária, busca-se, indiretamente, caracterizar essa relação, ao diferenciar áreas de uso mais denso da rede, as quais apresentam maior concentração de potência instalada de áreas de uso mais disperso, as quais apresentam menor concentração, tais como redes rurais, por exemplo. A variável é obtida a partir da equação (4.1):

$$kVA/km\text{derede} = \frac{PI}{ERP} ; \quad (4.1)$$

em que:

PI é Potência total instalada para o conjunto, em kVA;

ERP é Extensão da Rede Primária, em km.

Essa caracterização é muito importante, pois auxilia na definição dos subconjuntos e termos linguísticos *fuzzy*, uma vez que não existem padrões ou critérios pré-estabelecidos para a definição das fronteiras dos subconjuntos (os pontos que definem as funções de pertinência). Na maioria das vezes, a definição dessas fronteiras exige do pesquisador a criação de hipóteses e convenções, com base no seu conhecimento científico e na experiência. No caso deste trabalho, as

fronteiras foram definidas seguindo o conhecimento de especialistas da área e posteriormente, ajustes foram realizados a partir de históricos de dados referentes a cada variável de entrada.

Para a variável de entrada *Potência instalada por quilômetro de rede* foram considerados quatro subconjuntos: *Dispersa*, *Normal*, *Concentrada* e *Muito Concentrada*. A definição de quatro subconjuntos foi realizada buscando apresentar maior diferenciação na análise. Inicialmente, é definido o universo de análise para a variável, o qual é representado pelo conjunto $[0, 1000]$. Ou seja, considera-se que pode haver uma concentração de potência instalada variando entre 0 kVA/km de rede até 1000 kVA/km de rede. De modo geral, a escolha da representação dos conjuntos por uma função triangular se dá quando se necessita particularizar uma avaliação, ou seja, quando deseja-se atribuir que apenas em um ponto particular há grau de pertinência máximo, o qual é definido pela letra *m*. Os pontos *a* e *b* definem o suporte da função, ou seja, definem o intervalo no qual os elementos pertencem a função com pertinência maior que 0. Por outro lado, a escolha da função trapezoidal é feita quando se deseja uma avaliação mais generalista, ou seja, nesse caso é definido um intervalo, para o qual a pertinência ao conjunto é máxima, sendo o intervalo definido pelas letras *m* e *n*. A tabela 4.3 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros que definem as fronteiras de cada subconjunto da variável de entrada *Potência Instalada por quilômetro de rede*.

Tabela 4.3—Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Potência instalada por quilômetro de rede*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Dispersa	Triangular	0	0	-	150
Normal	Trapezoidal	0	100	150	250
Concentrada	Trapezoidal	150	250	400	500
Muito Concentrada	Trapezoidal	400	500	1000	1000

A figura 4.4 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de *Potência instalada por quilômetro de rede*.

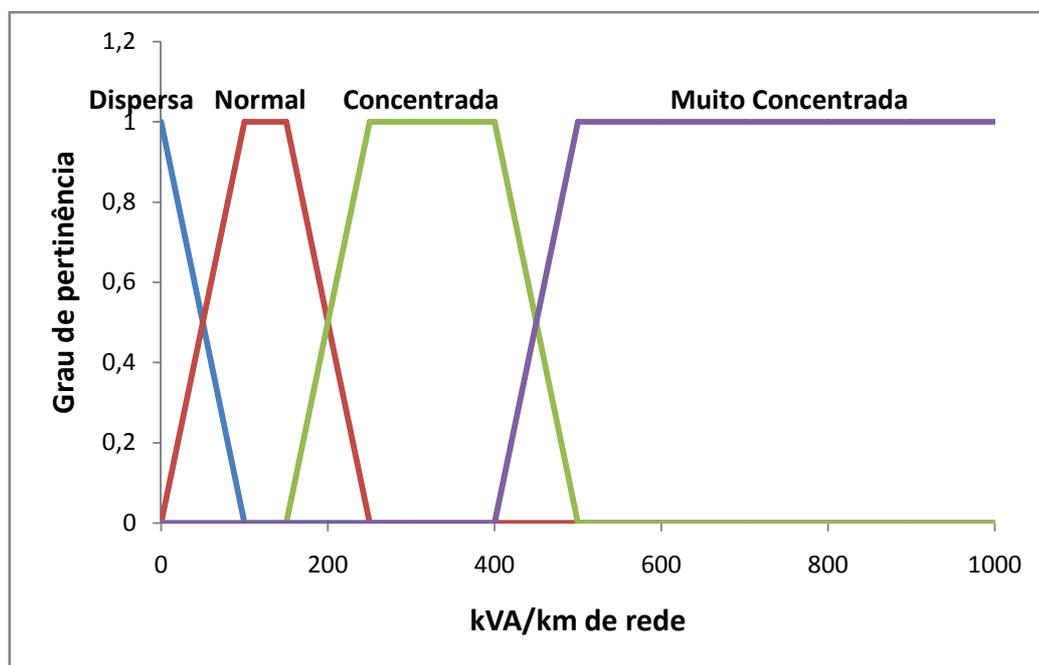


Figura 4.4 – Subconjuntos da variável de entrada *Potência instalada por quilômetro de rede*.

4.4.1.2 Tempo médio de execução de serviço

A variável de entrada *Tempo médio de execução de serviço (TME)* é um indicador estabelecido no PRODIST (ANEEL, 2012a) e apurado por todas as distribuidoras de energia. O *TME* é apurado através equação (4.2):

$$TME = \frac{\sum_{i=1}^n TE(i)}{n}, \quad (4.2)$$

em que:

- *TME* é o tempo médio de execução do serviço até o restabelecimento do fornecimento de energia pela equipe atendimento de emergência, expresso em minutos;

- *TE* é tempo de execução do serviço até o restabelecimento do fornecimento de energia pela equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial, expresso em minutos;

- n é número de ocorrências emergenciais verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado.

Esse indicador compõe outro indicador, o *TMAE - Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais* - cujo propósito é avaliar a eficiência da distribuidora na identificação de falhas e despacho de equipes, deslocamento e localização das equipes, bem como a eficiência na realização dos reparos. Dessa forma, ao considerar o *TME* na avaliação de desempenho, busca-se introduzir a análise aspectos relacionados ao treinamento e preparo das equipes de manutenção para lidar com situações emergenciais.

O *TME* está diretamente relacionado à confiabilidade do sistema, uma vez que quantifica a eficácia do restabelecimento do sistema de distribuição pelas equipes de manutenção e operação (ANEEL, 2012a). Ao comparar o *TME* com o indicador DEC, pode-se observar a relação: quanto maior for o *Tempo Médio de Execução de Serviço*, maior será a duração da interrupção e, assim, maior será o DEC. Em outras palavras, quanto maior for o *TME*, pior será a confiabilidade do sistema.

Para a variável de entrada *Tempo médio de execução de serviços* são estabelecidos três subconjuntos *fuzzy*: *Rápido*, *Médio* e *Lento*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto [0, 400]. Dessa forma, considera-se que pode haver tempos médios entre 0 e 400 minutos. A definição das fronteiras e das funções seguiu o mesmos critérios definidos na variável *Potência instalada por quilômetro de rede*. A tabela 4.4 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.4 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Tempo médio de execução de serviço*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Rápido	Trapezoidal	0	0	20	80
Médio	Trapezoidal	0	80	140	200
Lento	Trapezoidal	140	200	400	400

A figura 4.5 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Tempo médio de execução de serviço*.

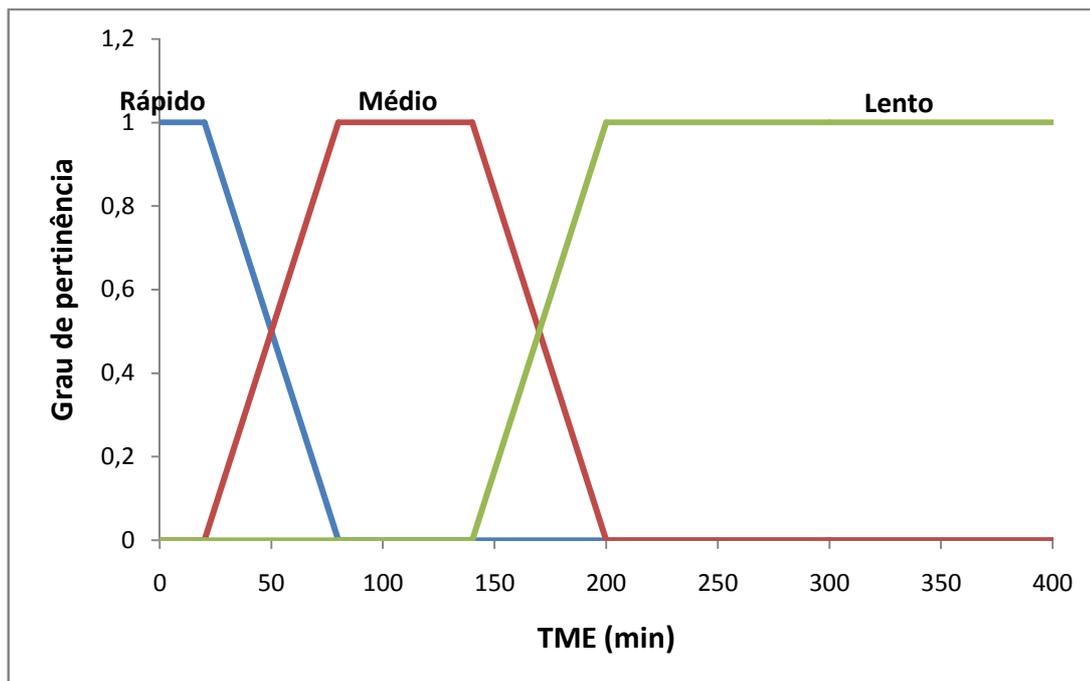


Figura 4.5 – Subconjuntos da variável de entrada *Tempo médio de execução de serviço*.

4.4.1.3 Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora

Outra variável que compõe o controlador “*Características operacionais*” é a variável *Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora*, a qual é obtida pela equação (4.3):

$$CMM/UC = \frac{\sum_{i=1}^n CMM(i)}{n}, \quad (4.3)$$

em que:

$CMM(i)$ é Consumo médio mensal para a unidade consumidora i , em MWh;

n é o número de unidades consumidoras do conjunto;

CMM/UC é Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora, em MWh.

Essa variável não apresenta relação direta com a confiabilidade do sistema, todavia permite estabelecer algumas relações com o problema. De acordo com Morishita (MORISHITA, C., 2011), a caracterização do consumo de energia, principalmente na classe residencial, sofre influência de aspectos como estrutura do prédio, condições climáticas (temperatura média), e comportamento do consumidor,

por exemplo. Entretanto, o fator que mais influencia no consumo é a renda média do consumidor. Dessa forma, ao definir como variável de entrada o *Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora*, busca-se estabelecer um perfil de consumidores para o conjunto de consumidores avaliado. Considerando que cada consumidor conectado a rede, em geral, significa a introdução de mais um ponto de possível defeito na rede (ramal de entrada e ramal de ligação) (TANURE, 2004), é possível inferir, por exemplo, que um conjunto que apresente um baixo consumo médio é caracterizado por unidades consumidoras de baixa renda. Uma vez que a renda está relacionada à qualidade das instalações é possível inferir que a confiabilidade desse conjunto será baixa, pois as próprias cargas são elementos adicionais que podem interferir no desempenho de um sistema de distribuição. Por outro lado, um conjunto que apresenta uma alta média de consumo é caracterizado por regiões industrializadas, as quais em geral, conforme já mencionado, apresentam maior confiabilidade (TANURE, 2004).

Para a variável de entrada *Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora* foram estabelecidos três subconjuntos *fuzzy*: *Consumo baixo*, *Consumo médio* e *Consumo elevado*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 2]$. Dessa forma, foi considerado que poderia haver consumos entre 0 e 2MWh por unidade consumidora. A tabela 4.5 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.5 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Consumo baixo	Triangular	0	0	-	0,2
Consumo médio	Trapezoidal	0	0,2	0,5	0,7
Lento	Trapezoidal	0,5	0,7	2	2

A figura 4.6 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora*

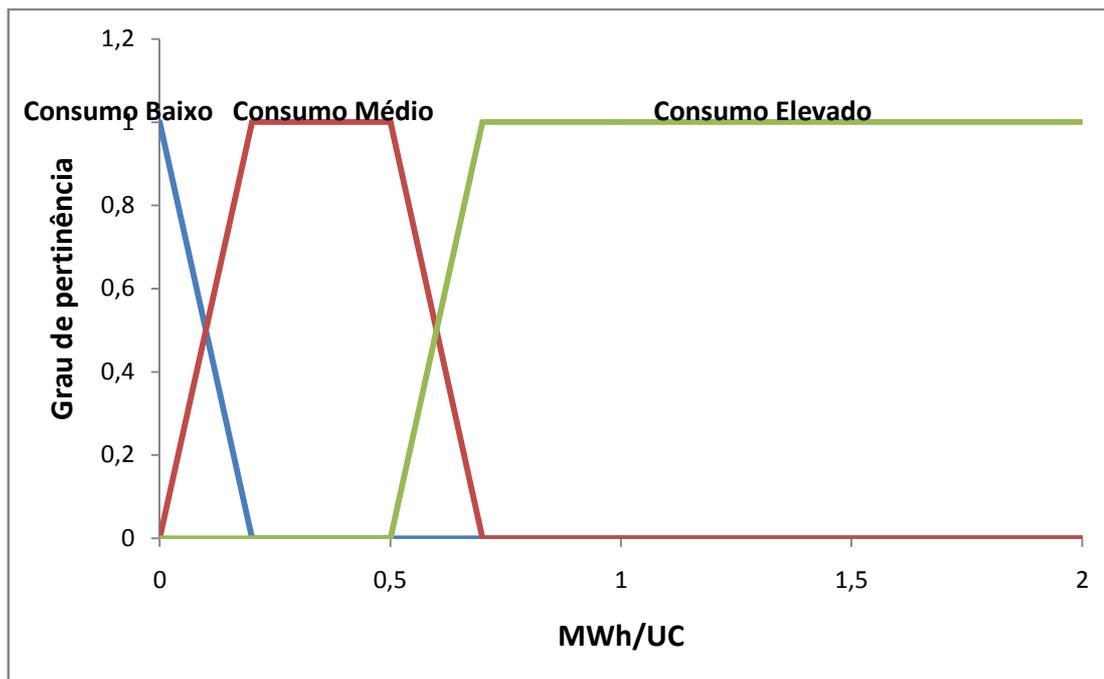


Figura 4.6 – Subconjuntos da variável de entrada *Consumo Médio Mensal por Unidade Consumidora*.

4.4.1.4 Percentual de Alimentadores Rurais

A quarta variável do controlador *Características Operacionais* é a variável *Percentual de Alimentadores Rurais*, a qual é obtida pela equação (4.4):

$$AL_{rural} = \frac{ERP_{rural}}{ERP_{total}}, \quad (4.4)$$

em que:

AL_{rural} é o valor relativo ao percentual de alimentadores em meio rural;

ERP_{rural} é a extensão de rede primária em meio rural, em km;

ERP_{total} é a extensão de rede primária total do conjunto, em km.

Não é difícil estabelecer a relação dessa variável com a confiabilidade. As regiões rurais são caracterizadas por longas extensões de alimentadores, com cargas bem dispersas. Por serem linhas mais extensas, demandam maiores deslocamentos para as equipes em caso de ocorrência de falha, bem como maiores trechos de verificação para identificar falhas. Além disso, a acessibilidade ao local de falha é mais difícil, pois essas regiões geralmente são caracterizadas por serem

mais arborizadas e com estradas em condições precárias, muitas vezes sem calçamento adequado. Dessa forma, é possível inferir que um conjunto em que haja um maior percentual de redes localizadas em áreas rurais apresentará uma confiabilidade inferior a um conjunto predominantemente urbano. Assim, o propósito dessa variável de entrada é justamente possibilitar esse discernimento entre regiões urbanas e rurais.

Para a variável de entrada *Percentual de Alimentadores Rurais* foram estabelecidos três subconjuntos *fuzzy*: *Predominantemente urbano*, *Misto* e *Predominantemente rural*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 1]$. Ou seja, são considerados valores entre 0 e 1, obtidos da relação estabelecida pela equação (4.4). As funções definidas para os subconjuntos são trapezoidais para inserirem um caráter generalista a avaliação. A tabela 4.6 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.6 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Percentual de Alimentadores Rurais*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Predominantemente urbano	Trapezoidal	0	0	0,10	0,25
Misto	Trapezoidal	0,10	0,25	0,75	0,9
Predominantemente urbano	Trapezoidal	0,75	0,90	1	1

A figura 4.7 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Percentual de Alimentadores Rurais*.

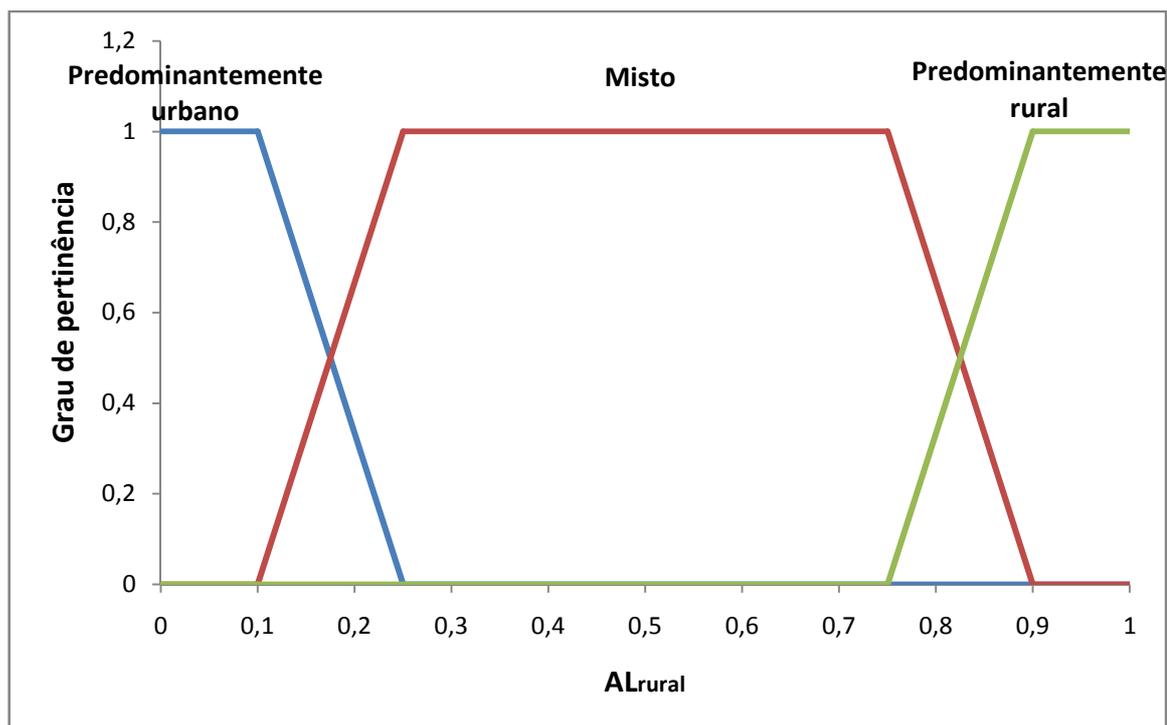


Figura 4.7 – Subconjuntos da variável de entrada *Percentual de Alimentadores Rurais*.

4.4.1.5 Equipes por Conjunto

A última variável de entrada do controlador é a variável *Equipes por Conjunto*, a qual se refere diretamente à quantidade de equipes de manutenção disponíveis para o atendimento de ocorrências emergenciais. Essa variável necessita de cuidado, uma vez que a alocação de equipes é definida a partir de uma série de critérios, tais como área do conjunto, quantidade média de ocorrências, etc. No entanto, entende-se que, em geral, a confiabilidade de um sistema é maior quanto maior for o número de equipes disponíveis.

Para a variável *Equipes por Conjuntos* são definidos três subconjuntos *fuzzy*: *Insuficiente*, *Intermediário* e *Bom*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 10]$, ou seja, considera-se que poderia haver conjuntos com até 10 equipes alocadas. A tabela 4.7 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.7 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Equipes por Conjunto*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Insuficiente	Triangular	0	0	-	3
Intermediário	Trapezoidal	0	3	4	7
Bom	Trapezoidal	4	7	10	10

A figura 4.8 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Equipes por Conjunto*.

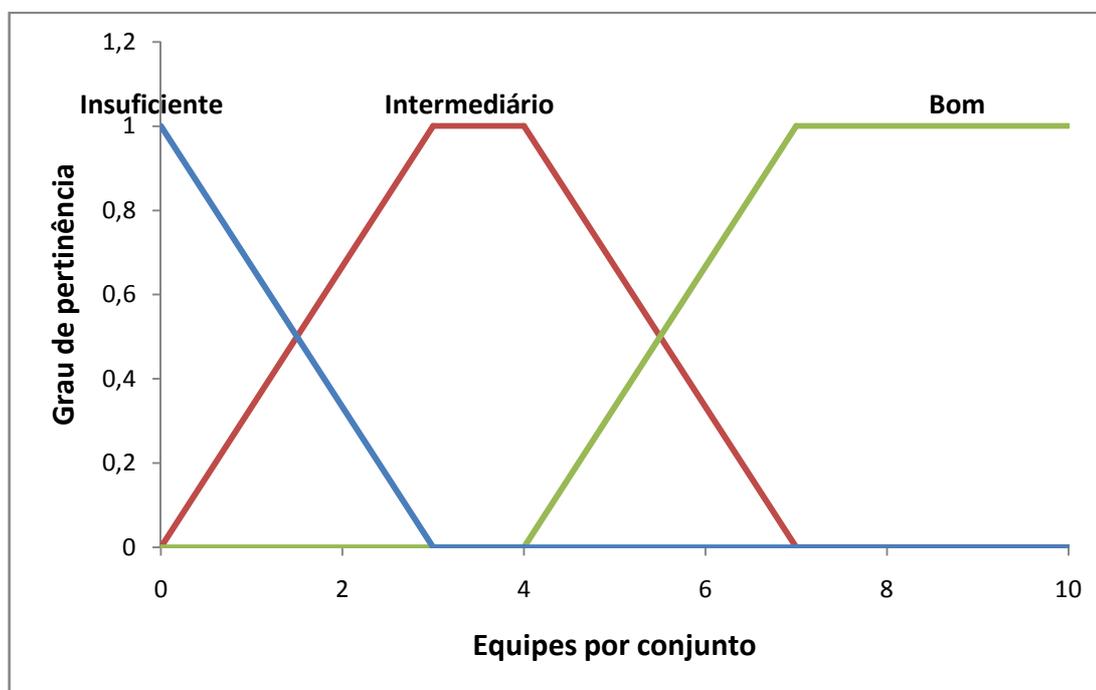


Figura 4.8 – Subconjuntos da variável de entrada *Equipes por conjunto*.

4.4.1.6 Confiabilidade devido a características operacionais

A saída do controlador *Características Operacionais* deve expressar um índice de confiabilidade referente às características operacionais do conjunto de unidades consumidoras. Para a definição desse índice, adotou-se como padrão o intervalo de avaliação [0,1], ou seja, o índice estabelecido pelo controlador *fuzzy* estará definido nesse intervalo. Essa escolha foi realizada visando uma

padronização na definição desses índices e também porque facilita a interpretação, pois caracteriza a nota de uma avaliação. Deve se considerar ainda que essa variável será uma entrada do nível *fuzzy* principal, como será visto no item 4.5.

A saída do controlador é chamada *Confiabilidade devido às características operacionais* e tem atribuídos quatro subconjuntos *fuzzy*: *Muito ruim*, *Ruim*, *Bom* e *Muito Bom*. A tabela 4.8 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto da saída.

Tabela 4.8 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a saída do controlador *Características Operacionais*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Muito ruim	Triangular	0	0	-	0,25
Ruim	Trapezoidal	0	0,25	0,4	0,6
Bom	Trapezoidal	0,4	0,6	0,75	1
Muito bom	Triangular	0,75	1	-	1

Os parâmetros apresentados na tabela 4.8 correspondem aos parâmetros das equações (7) e (8) do Apêndice A - das funções de pertinência triangular e trapezoidal, respectivamente. Os subconjuntos que limitam o universo de avaliação, isto é, os subconjuntos *Muito Ruim* e *Muito Bom*, são mais específicos na sua forma de avaliar, ao serem representados por funções triangulares. Em outras palavras isso significa que apenas em uma situação específica é atribuída pertinência máxima. Para o subconjunto *Muito Ruim* isso ocorre em 0 e para o subconjunto *Muito Bom* em 1. Já os subconjuntos intermediários são representados por funções trapezoidais, fato que os dá mais importância na determinação da saída, pois dão mais peso às regras para as quais foram atribuídos. Para o subconjunto *Ruim* foi definido um suporte no intervalo entre 0 e 0,6 e para o subconjunto *Bom* no intervalo entre 0,4 e 1. Isso garante uma avaliação mais equilibrada de forma que não sejam atribuídas notas nem muito baixas, nem muito elevadas, uma vez que os dois conjuntos cobrem todo o universo de análise. A figura 4.9 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a saída do controlador *Características Operacionais*.

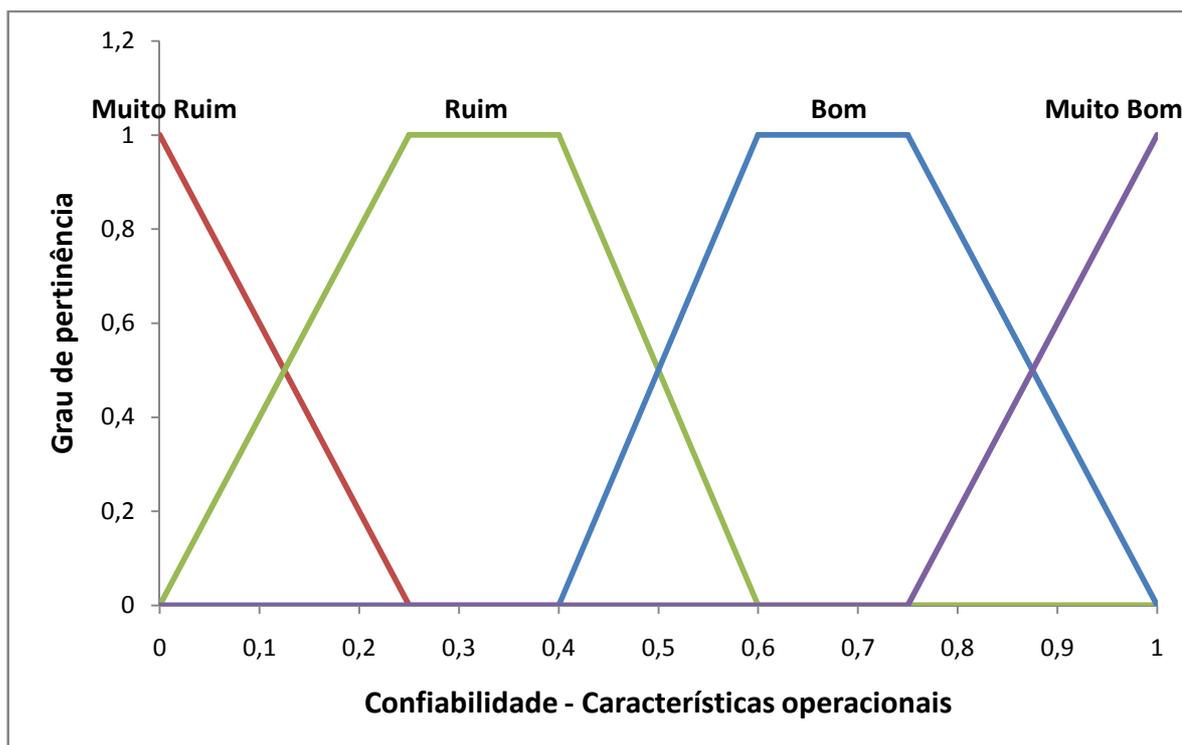


Figura 4.9 – Subconjuntos da saída do controlador *Características Operacionais*.

4.4.1.7 Base de regras para *Características Operacionais*

A base de regras de um sistema *fuzzy* de múltiplas entradas e apenas uma saída apresenta uma estrutura é descrita da seguinte maneira:

$$\text{Se } A \text{ é } A_1 \text{ E } B \text{ é } B_2 \text{ E } C \text{ é } C_3 \text{ então } X \text{ é } X_1; \quad (4.5)$$

em que A , B e C são as variáveis de entrada; A_1 , B_2 e C_3 são algum dos termos linguísticos dos subconjuntos das respectivas variáveis de entrada; e X e X_1 são a saída e um de seus respectivos termos linguísticos.

Considerando que o total de regras de um sistema *fuzzy* é igual à combinação de todos os subconjuntos das variáveis de entrada, a qual é expressa pelo produto do número de termos linguísticos de cada variável, no caso do controlador *Características Operacionais* se teria um total de 324 regras possíveis.

Apesar de não ser uma quantidade muito grande de regras, é possível estabelecer algumas simplificações com o objetivo de otimizar a avaliação. Ao analisar a variável de entrada *Percentual de Alimentadores Rurais* considera-se que quando se tratar do subconjunto *Predominantemente Rural*, não há necessidade de

estabelecer regras diferenciadas para a variável de entrada *Potencia instalada por quilômetro de rede* e para a variável de entrada *Consumo médio mensal por unidade consumidora*, uma vez que as áreas rurais são caracterizadas por potência instalada dispersa e, em geral, baixo consumo médio de energia. Nesse caso, apenas o fator mais relevante é que a rede é *Predominantemente Rural*. Além disso, quando se tratar do subconjunto *Misto*, também se considera que não há necessidade de estabelecer regras diferenciadas em relação a variável de entrada *Potencia instalada por quilômetro de rede*. Assim, após essa simplificação, a nova combinação resultou em um total de 153 regras. Essa simplificação não elimina a regra, apenas afirma que em determinada situação não há necessidade de avaliação diferenciada. Considerando as seguintes regras:

- **Se** *kVA/km de rede é Dispersa* **e** *TME é Lento* **e** *MWh/UC é Consumo Baixo* **e** *AL_{rural} é Predominantemente rural* **e** *Equipes/conjunto é Insuficiente* **então...**;
- **Se** *kVA/km de rede é Muito Concentrada* **e** *TME é Lento* **e** *MWh/UC é Consumo Médio* **e** *AL_{rural} é Predominantemente rural* **e** *Equipes/conjunto é Insuficiente* **então...**;

é possível afirmar que elas terão o mesmo julgamento, ou seja, o mesmo consequente, pois os antecedentes referentes às variáveis de entrada *kVA/km de rede* e *MWh/UC* quando *AL_{rural} é Predominantemente rural* são desconsiderados. Ambas as regras são representadas apenas por uma regra, tal como:

- **Se** *TME é Lento* **e** *AL_{rural} é Predominantemente rural* **e** *Equipes/conjunto é Insuficiente* **então...**

Para a definição do julgamento da regra, ou seja, na definição do consequente, é necessário o conhecimento sobre a dinâmica do sistema *fuzzy*. Esse conhecimento, muitas vezes é empírico ou resultante da experiência do pesquisador. Logo, também não existem critérios ou métodos pré-definidos para a determinação do julgamento. Assim, partir da definição das variáveis linguísticas o pesquisador define as convenções que norteiam o julgamento. Para esse controlador, os princípios que norteiam a definição das regras são:

- Para a variável de entrada *Potência instalada por quilômetro de rede*, considera-se que sendo *Dispersa* e *Muito Concentrada* a potência, pior é a confiabilidade. Ou seja, *Normal* e *Concentrado* são os subconjuntos que apresentaram melhor confiabilidade;
- Para a variável *TME*, quanto maior o tempo, pior é a confiabilidade, sendo o inverso também verdadeiro;
- Para a variável *MWh/UC*, em geral, quanto maior o consumo, maior é a confiabilidade, sendo o inverso também verdadeiro;
- Para a variável *ALrural*, quanto mais urbano o conjunto, maior é a confiabilidade, sendo o inverso também verdadeiro;
- Para a variável *Equipes por Conjunto*, quanto maior o número de equipes, maior é a confiabilidade, sendo o inverso também verdadeiro.

4.4.2 Padrão de Rede

As variáveis que caracterizam o padrão de uma rede de distribuição são avaliadas no controlador *Padrão de Rede*. Esse controlador é definido por três variáveis de entrada, as quais objetivam caracterizar o padrão físico das redes de distribuição de energia, definindo aspectos referentes aos tipos de materiais empregados nas redes, à qualidade dos mesmos, bem como relacionando indiretamente aspectos referentes à vida útil de componentes da rede. Ao estabelecer as relações entre essas variáveis na base de regras, obtém-se como valor de saída um índice que representa a confiabilidade do sistema devido ao padrão de rede do conjunto de consumidores. A figura 4.10 apresenta o controlador “*Padrão de Rede*”, no qual as entradas *Equipamentos de seccionamento por extensão de rede*, *Extensão média de alimentadores*, *Taxa de falha devido a componentes de rede* são representadas pelas siglas “*Disp. Seccionamento/km*”, “*ER/AL*” e “ $\lambda_{componentes\ de\ rede}$ ”, respectivamente.

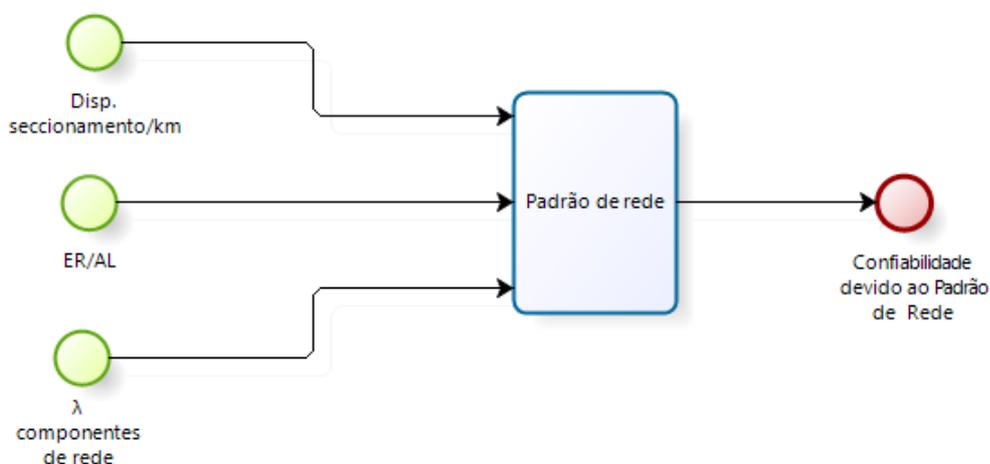


Figura 4.10 – Controlador “Padrão de Rede”.

4.4.2.1 Dispositivos de seccionamento por extensão de rede

A primeira variável de entrada que compõe o controlador *Padrão de Rede* é a variável *Dispositivos de seccionamento por extensão de rede*. O número de dispositivos de seccionamento, ou de manobra, é um aspecto muito relevante à confiabilidade da rede. Esses equipamentos têm como funcionalidade lidar com eventos indesejáveis, tornando a rede mais robusta e eficaz frente a interrupções de fornecimento.

A relação entre a quantidade de dispositivos e a confiabilidade é intuitiva e direta. Ao considerar duas redes semelhantes em relação a outras características, a rede que possuir mais dispositivos instalados será mais flexível, permitindo que sejam isolados apenas os trechos defeituosos do sistema e, assim, conseqüentemente, essas apresentarão melhores desempenhos nos indicadores de continuidade DEC e FEC (TANURE, 2004). De acordo com Brown, a aplicação desse tipo de equipamento é uma das formas mais diretas e eficazes para melhorar a confiabilidade de uma rede (BROWN, 2002).

Ao relacionar a quantidade de equipamentos por extensão de rede primária, busca-se estabelecer um valor padronizado, que permita estabelecer as fronteiras dos subconjuntos *fuzzy*. Essa relação é obtida a partir da equação (4.6):

$$Disp. seccionamento/km = \frac{N_{dispositivos\ de\ seccionamento}}{ER}; \quad (4.6)$$

em que:

$N_{dispositivos\ de\ seccionamento}$ é a quantidade de dispositivos de seccionamento instalados no conjunto (considerando todos os tipos de equipamentos);

ER é a extensão de rede instalada, em km.

O ideal para essa variável seria poderar a existência de equipamentos automatizados na rede, uma vez que esses garantem maior confiabilidade, todavia, em estudo preliminar, constatou-se que não há dados padronizados que garantissem a correta consideração da variável de entrada. Dessa forma, a variável considera todos os dispositivos, sendo automatizados ou não.

Para a variável *Dispositivos de seccionamento por extensão de rede* foram definidos três subconjuntos *fuzzy*: *Pouco Flexível*, *Flexível* e *Muito Flexível*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto [0, 10], ou seja, considerou-se que poderia haver conjuntos com até 10 equipamentos instalados em um quilômetro de alimentador. A tabela 4.9 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.9 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Dispositivos de seccionamento por extensão de rede*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Pouco Flexível	Triangular	0	0	-	2,5
Intermediário	Trapezoidal	0	2,5	5	7,5
Bom	Trapezoidal	5	7,5	10	10

A figura 4.11 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Dispositivos de seccionamento por extensão de rede*.

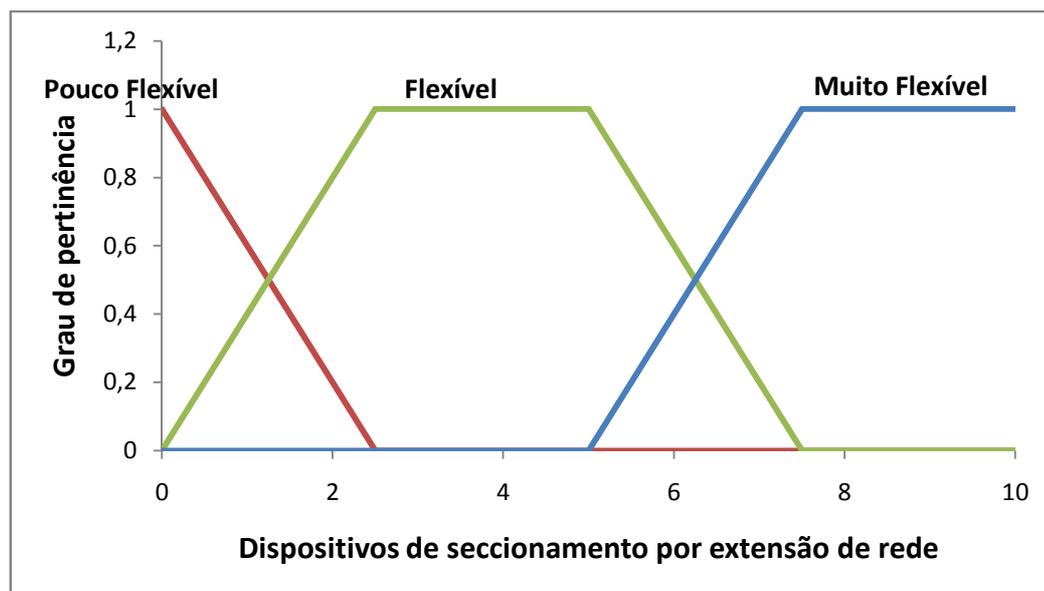


Figura 4.11 – Subconjuntos da variável de entrada Dispositivos de seccionamento por extensão de rede.

4.4.2.2 Extensão Média de Alimentadores

A segunda variável de entrada do controlador *Padrão de Rede* é a variável *Extensão Média de Alimentadores*. Essa variável é obtida a partir da equação (4.5):

$$ER/AL = \frac{ER}{N_{AL}}; \quad (4.5)$$

em que:

ER é a extensão de rede instalada no conjunto, em km;

N_{AL} é a quantidade de alimentadores do conjunto.

Ao avaliar essa variável juntamente com as demais variáveis de entrada do controlador *Padrão de Rede*, é possível estabelecer importantes relações com a confiabilidade de uma rede de distribuição. Em geral, conforme já mencionado, redes mais extensas, demandam mais tempo de deslocamento e tempos de inspeção para localização de falhas. Há ainda aspectos relacionados aos níveis de tensão. Redes mais longas comumente exigem a instalação de reguladores de tensão devido à queda de tensão acentuada. Por outro lado, a quantidade de alimentadores associada à quantidade de dispositivos de manobra dá maior flexibilidade à rede, possibilitando manobras de carga e isolamento de regiões com

defeito. Dessa forma, ao considerar dois conjuntos com extensão de rede primária semelhantes, pode-se inferir que aquele que possuir um maior número de alimentadores, ou seja, uma *Extensão Média de Alimentadores* menor vai apresentar maior confiabilidade, pois é mais flexível e possivelmente apresenta menos problemas relacionados a níveis de tensão.

Para a variável “*Extensão Média de Alimentadores*” foram definidos três subconjuntos *fuzzy*: *Normal*, *Extenso* e *Muito Extenso*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 500]$, ou seja, considera-se que pode haver conjuntos, nos quais a extensão média dos alimentadores chega a 500 km. É um valor relativamente elevado, o qual garante que nenhum elemento fique fora da análise. A tabela 4.10 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.10 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Dispositivos de seccionamento por extensão de rede*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Normal	Trapezoidal	0	0	50	100
Extenso	Trapezoidal	50	100	200	250
Muito Extenso	Trapezoidal	200	250	500	500

.A figura 4.12 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Extensão Média de Alimentadores*.

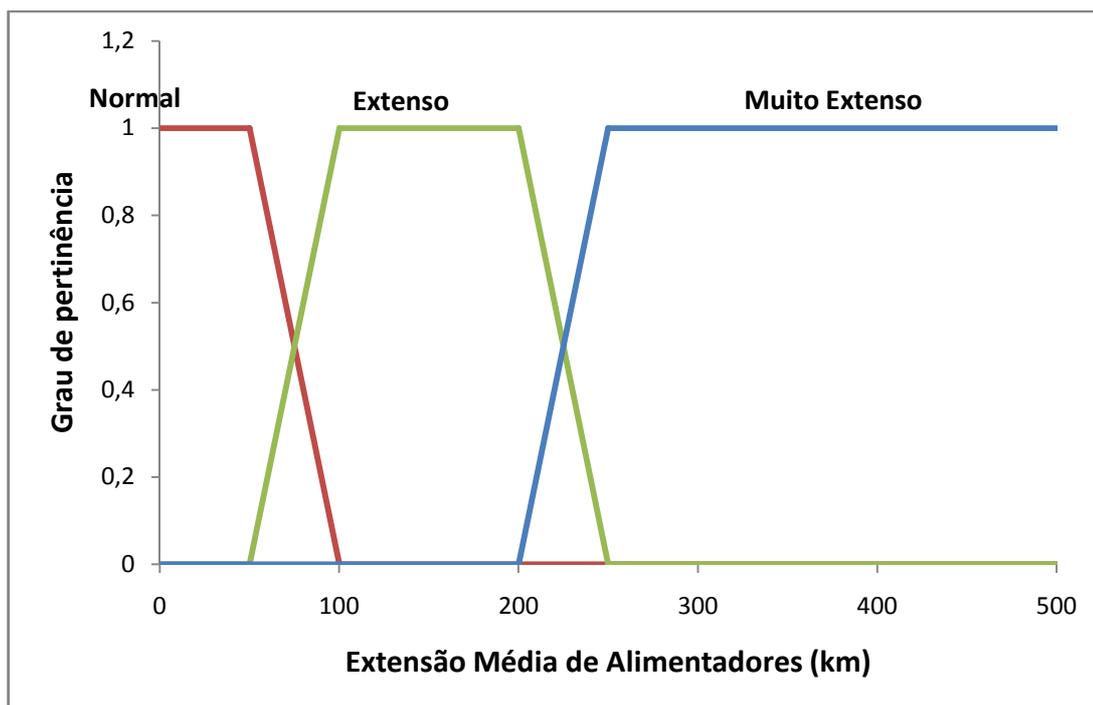


Figura 4.12 – Subconjuntos da variável de entrada *Extensão Média de Alimentadores*.

4.4.2.3 Taxa de Falha devido a componentes de rede

A última variável atribuída ao controlador *Padrão de Rede* é a *Taxa de Falha devido a componentes de rede*. Kagan define a taxa de falha, para o caso de trechos de rede, como o número médio de falhas que ocorrem por ano e por unidade de comprimento de rede (KAGAN et. al, 2009, p. 31). Para os demais equipamentos de rede a taxa de falha corresponde ao número médio de falhas por ano. Uma avaliação constante dessas taxas permite um acompanhamento preciso da rede levando a parâmetros mais eficazes para a gestão da manutenção. A taxa de falha de trechos da rede pode ser obtida a partir dos registros de ocorrências das distribuidoras de energia, sendo obtida através da equação (4.6):

$$\lambda = \frac{N_{falhas}}{ER}; \quad (4.6)$$

em que:

λ é ataxa de falha da rede, expressa em falhas/km;

N_{falhas} é o total de falhas registradas em um ano para a rede;

ER é a extensão da rede, expresso em km.

A variável *Taxa de Falha devido a componentes de rede* é, na verdade, uma fração da Taxa de falha da rede. O PRODIST estabelece que todas as distribuidoras devem registrar todas as ocorrências emergências, detalhando, entre outros aspectos, o fato gerador dessa ocorrência (ANEEL, 2012a). A partir desses dados, é possível obter a taxa de falha da rede devido à falha de componentes, a qual é expressa pela equação (4.7):

$$\lambda_{componentes\ de\ rede} = \frac{N_{falhas\ componentes\ de\ rede}}{ER}, \quad (4.7)$$

em que:

λ é a taxa de falha da rede gerada por componentes da rede, expressa em falhas/km;

N_{falhas} é o total de falhas registradas geradas por componentes da rede em um ano;

ER é a extensão da rede, expresso em km.

Nesse caso, são considerados componentes de rede elementos tais como: isoladores, pararraios, transformadores, condutores, capacitores, religadores, reguladores de tensão, chaves, conexões, postes, entre outros. A avaliação dessa variável tem como objetivo considerar, indiretamente, aspectos relacionados à vida útil da rede. Pode-se inferir que redes que estejam no final de sua vida útil – o mesmo valendo para os componentes – apresentarão taxas de falha mais elevadas. Assim, a relação da variável *Taxa de Falha devido a componentes de rede* com a confiabilidade do sistema é clara. Quanto maior for a taxa de falha, pior será a confiabilidade.

Para a variável *Taxa de Falha devido a componentes de rede* foram definidos três subconjuntos *fuzzy*: *Baixa*, *Média* e *Elevada*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 5]$, ou seja, considera-se que pode haver conjuntos, nos quais a taxa de falha gerada apenas por componentes de rede chega a 5 falhas/km ao ano. A tabela 4.11 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.11 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Taxa de Falha devido a componentes de rede*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Baixa	Triangular	0	0	-	1,5
Média	Trapezoidal	0	1,5	2,5	4
Elevada	Trapezoidal	2,5	4	5	5

A figura 4.13 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Taxa de Falha devido a componentes de rede*.

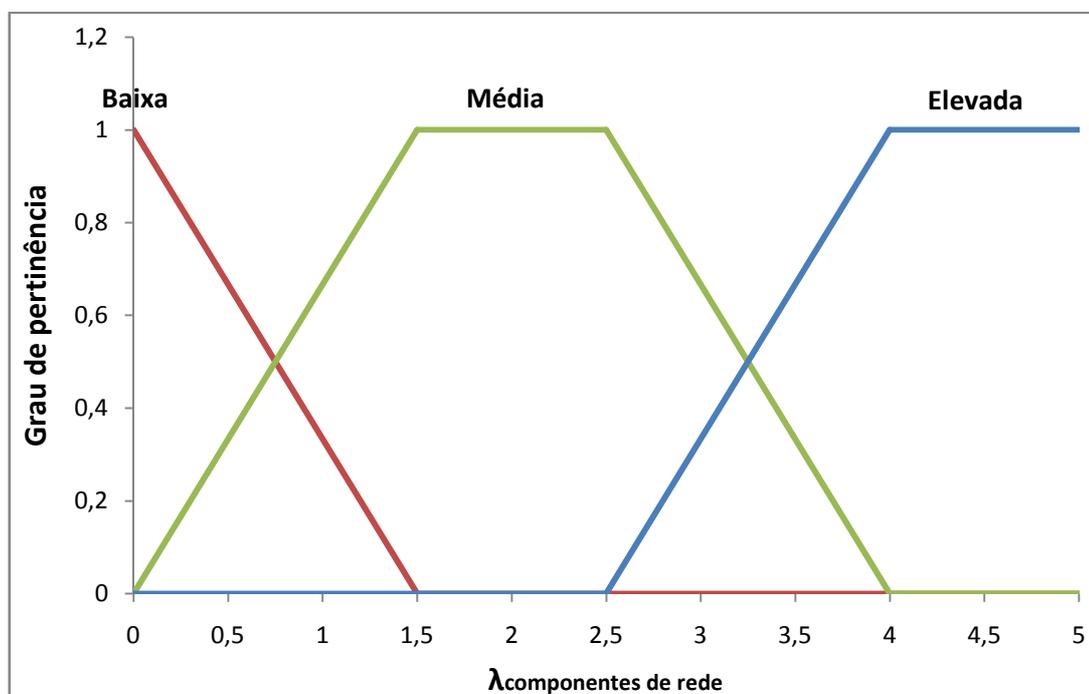


Figura 4.13 – Subconjuntos da variável de entrada *Taxa de falha devido a componentes de rede*.

4.4.2.4 Indicador *Padrão de Rede*

De forma semelhante ao controlador *Características Operacionais*, a saída do controlador *Padrão de rede* deve expressar um índice referente às características físicas das redes do conjunto de unidades consumidoras. Para a definição desse índice, adota-se como padrão o intervalo de avaliação [0,1], da mesma forma como foi atribuído ao controlador *Características Operacionais*. Conforme já foi

mencionado, a escolha foi realizada visando uma padronização na definição desses índices. Deve-se considerar ainda que essa variável também é uma variável de entrada do nível *fuzzy* principal.

A saída do controlador é chamada *Padrão de rede* e tem quatro subconjuntos *fuzzy* definidos: *Muito baixo*, *Baixo*, *Bom* e *Muito Bom*. A tabela 4.12 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto da saída.

Tabela 4.12 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a saída do controlador *Padrão de Rede*.

Subconjunto	Função	Parâmetros		
		a	m	b
Muito Baixo	Triangular	0	0	0,35
Baixo	Triangular	0	0,35	0,65
Bom	Triangular	0,35	0,65	1
Muito Bom	Triangular	0,65	1	1

Como se pode observar na tabela 4.12, no caso dessa saída, foram utilizadas apenas funções triangulares. Essa definição foi realizada de acordo com dois fatores. O primeiro diz respeito ao processo de *defuzzificação*, o que é realizado através do centro de gravidade, o que significa que a forma das funções define um “peso” para cada subconjunto. Outra questão considerada refere-se ao número de regras, como será visto a seguir, é pequeno, o que dá um peso maior a cada regra. Dessa forma, as fronteiras dos subconjuntos foram definidas buscando equilibrar o peso de cada subconjunto e de cada regra. Os subconjuntos *Muito Baixo* e *Muito Bom*, limitam o universo de análise, tendo o ponto *m* definido em 0 e em 1, respectivamente. O suporte dessas funções é abrangente, o qual é definido nos intervalos: entre 0 e 0,35 para o subconjunto *Muito Baixo*; e entre 0,65 e 1 para o subconjunto *Muito Bom*. Já, os subconjuntos *Baixo* e *Bom* são caracterizados por suportes abrangentes, variando entre 0 e 0,65 e entre 0,35 e 1, respectivamente, fazendo com que juntos cubram todo o universo de análise. Os pontos de pertinência máxima são 0,35 para o subconjunto *Baixo* e 0,65 para o subconjunto *Bom*. A figura 4.14 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a saída do controlador *Padrão de Rede*.

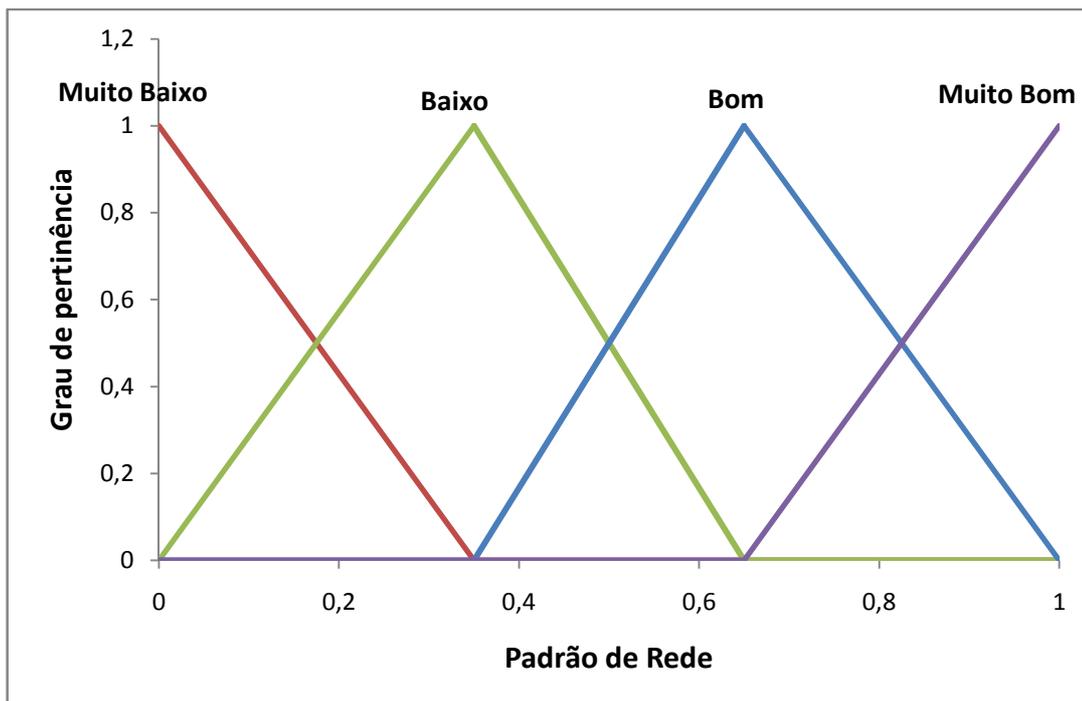


Figura 4.14 – Subconjuntos da saída do controlador *Padrão de Rede*.

4.4.2.5 Base de regras para *Padrão de Rede*

A base de regras do controlador *Padrão de Rede* é bem menor e mais simples que a do controlador *Características operacionais*. Considerando a combinação de todas as variáveis linguísticas (subconjuntos), tem-se o total de 27 regras.

Devido ao número reduzido de regras, não há a necessidade de aplicar alguma simplificação. Para esse controlador, os princípios que norteiam a definição das regras são:

- Em geral, quanto mais dispositivos de seccionamento estiverem instalados, melhor será o padrão de rede e assim, melhor a confiabilidade do sistema;
- Para os alimentadores, quanto menor for a sua extensão, menores serão os problemas relacionados à qualidade de energia e, assim, melhor o padrão de rede e a confiabilidade;

- Para a taxa de falha, quanto menor for a taxa de falha devido aos componentes, melhor será o padrão de rede e a confiabilidade.

4.4.3 *Influência do Meio*

Estudos mostram que uma grande parcela das interrupções é causada por fatores não gerenciáveis (CHOWDHURY, A.A.;BERTLING, L. 2006; BENNER, C. L., et al, 2008). Em outros termos, grande parcela das interrupções não é causada por problemas de gestão da rede por parte da concessionária. Esse fato, além de tornar a avaliação da confiabilidade mais difícil, também influencia na definição de estratégias da distribuidora. A utilização de informações referentes à influência desses fatores na avaliação da confiabilidade das redes de distribuição torna-se importante ao garantir limites de continuidade coerentes à realidade de cada distribuidora de energia.

Nesse sentido, a influência do meio é avaliada no controlador *Influenciado Meio*, qual possui quatro variáveis de entrada e tem por objetivo determinar o quanto a confiabilidade de um sistema é suscetível a fatores como acessibilidade e clima, por exemplo. Ao estabelecer as relações dessas variáveis de entrada na base de regras, obtém-se na saída do controlador um índice que determina o quanto um sistema de distribuição é suscetível a fatores não gerenciáveis da rede. A figura 4.15 apresenta o controlador “*Influência do Meio*”, no qual as entradas *Tempo Médio de Deslocamento*, *Taxa de Falha devido a descargas atmosféricas*, *Taxa de falha devido à vegetação* e *Percentual de ocorrências em Clima Adverso* são representadas pelas siglas “*TMD*”, “ $\lambda_{descargas\ atmosféricas}$ ”, “ $\lambda_{vegetação}$ ” e “*Clima Adverso*”, respectivamente.

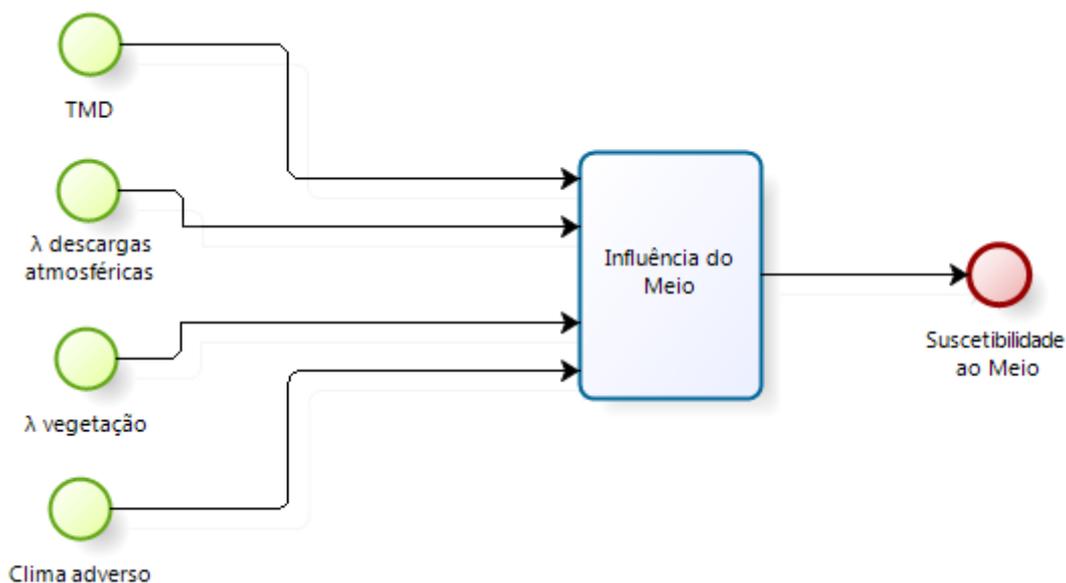


Figura 4.15 – Controlador “Influência do Meio”.

4.4.3.1 Tempo Médio de Deslocamento

A primeira variável de entrada que compõe o controlador *Influência do Meio* é a variável *Tempo Médio de Deslocamento*, a qual é um indicador estabelecido no PRODIST (ANEEL, 2012a) e apurado por todas as distribuidoras de energia. O *TMD* é apurado através equação (4.8):

$$TMD = \frac{\sum_{i=1}^n TD(i)}{n}; \quad (4.8)$$

em que:

TD é o tempo de deslocamento da equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial, expresso em minutos;

n é o número de ocorrências emergenciais verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado;

TMD é o tempo médio de deslocamento da equipe de atendimento de emergência, expresso em minutos.

Esse indicador, juntamente com o *TME*, compõe o indicador *TMAE – Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais* – e tem como propósito medir a eficácia da localização geográfica das equipes de manutenção (ANEEL, 2012a).

Além disso, esse indicador traz, indiretamente, informações relacionadas à acessibilidade aos locais de ocorrências de falha na rede.

A relação dessa variável com a confiabilidade é direta, principalmente se tratando do indicador DEC. Mesmo que a equipe esteja bem localizada geograficamente, questões como tráfego e mesmo condições das estradas, vão afetar no deslocamento das equipes até o local de falha. Dessa forma, ao considerar essa variável no sistema de avaliação de desempenho busca-se avaliar a influência do trânsito e da correta localização das equipes de manutenção na confiabilidade do sistema. Se considerarmos dois conjuntos que possuam demais características semelhantes, o conjunto que apresentar um tráfego de veículos mais intenso ou mesmo uma estrutura de estradas e rodovias mais complexa, fará com que a chegada da equipe até o local onde devem ser realizados os serviços de manutenção seja mais demorada e, assim contribuirão para um maior indicador. O mesmo ocorre para conjuntos que possuam muitas estradas sem calçamento. Assim, de forma geral, quanto maior for o *TMD*, mais suscetível é sistema de distribuição a fatores não gerenciáveis, logo, pior será a confiabilidade.

Para a variável de entrada *Tempo Médio de Deslocamento* são estabelecidos três subconjuntos *fuzzy*: *Rápido*, *Médio* e *Lento*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 200]$. Dessa forma, considera-se que pode haver tempos médios entre 0 e 200 minutos. Por se tratar de uma média anual dos deslocamentos, esse intervalo é muito abrangente, todavia, considera-se necessária essa definição para evitar que algum registro não seja incluído na análise. A tabela 4.13 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.13 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Tempo Médio de Deslocamento*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Rápido	Triangular	0	0	-	30
Médio	Trapezoidal	0	30	60	90
Lento	Trapezoidal	60	90	200	200

A figura 4.16 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Tempo médio de Deslocamento* (o gráfico apresenta valores apenas até 200 minutos, pois não há variação de no valor de pertinência a partir desse valor, conforme já definido).

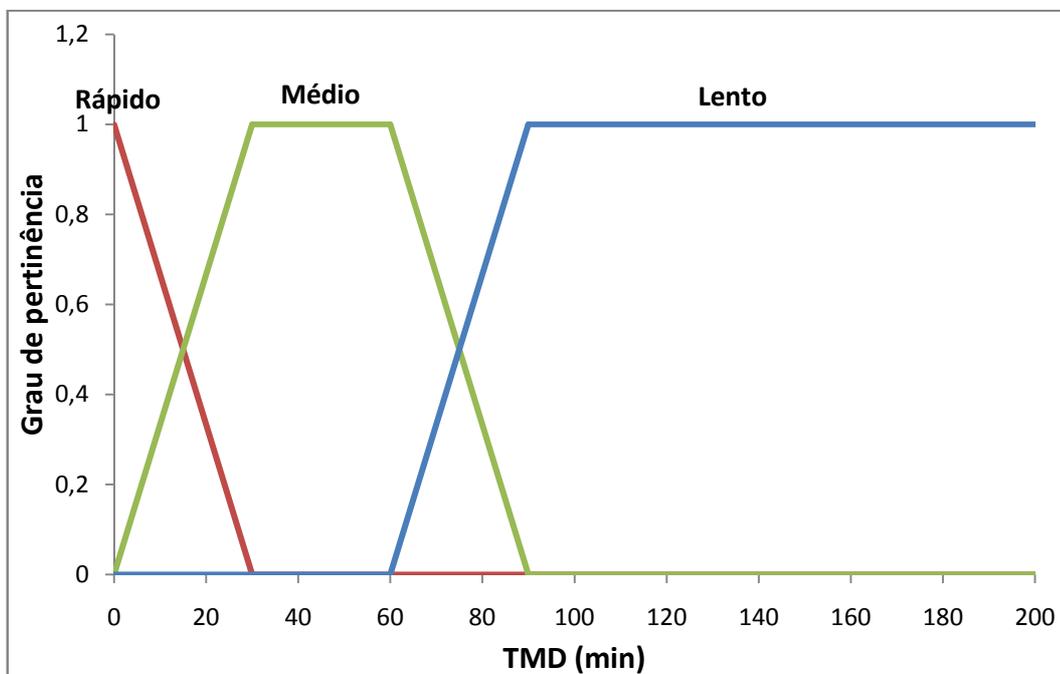


Figura 4.16 – Subconjuntos da variável de entrada *Tempo Médio de Deslocamento*.

4.4.3.2 Taxa de falha devido a descargas atmosféricas

A segunda variável que compõe o controlador *Influência do Meio* é a variável *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas*. Assim como a variável *Taxa de falha devido a componentes de rede*, essa variável também corresponde a uma fração da Taxa de falha da rede, expressa pela equação (4.6), referindo-se especificamente as falhas da rede geradas por descargas atmosféricas. A variável *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas* é obtida a partir da equação (4.9):

$$\lambda_{descargas\ atmosféricas} = \frac{N_{falhas\ descargas\ atmosféricas}}{ER}, \quad (4.9)$$

em que:

$\lambda_{descargas\ atmosféricas}$ é taxa de falha da rede gerada por descargas atmosféricas, expressa em falhas/km;

$N_{falhas\ descargas\ atmosféricas}$ é o total de falhas registradas geradas por descargas atmosféricas em um ano;

E é a extensão da rede instalada, expresso em km.

As descargas atmosféricas correspondem a grande parte das interrupções de fornecimento em redes de média tensão e não devem ser desconsideradas (PARVIAMEN, M. et al, 2008). Por se tratar de um evento da natureza, não há como prever seu acontecimento e também, muitas vezes o sistema de proteção da rede não é capaz de suportar essa descarga, devido a sua amplitude (BROWN, R. E., 2002). No Brasil, o INPE é responsável por medir e apurar o Índice Ceráunico, ou seja, a densidade de descargas atmosféricas de uma região, todavia essa apuração não é uniforme para todo Brasil, o que dificulta a utilização dessa informação em um sistema de avaliação de desempenho (ANEEL, 2010b), considerando que as unidades avaliadas são conjuntos de consumidores e os dados disponibilizados pelo INPE são por municípios. Nesse sentido, ao considerar a variável *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas* – dado que pode ser facilmente obtido do histórico de falhas de uma distribuidora -, busca-se, de alguma forma, considerar a influência das descargas na confiabilidade de um sistema. A relação da *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas* com a suscetibilidade da rede é direta e simples de ser estabelecida. Quanto maior é a *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas*, mais suscetível é a rede, pois há uma maior incidência de descargas atmosféricas, logo a confiabilidade da rede é menor.

Para a variável *Taxa de Falha devido a descargas atmosféricas* foram definidos três subconjuntos *fuzzy*: *Baixa*, *Média* e *Elevada*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 2]$, ou seja, considera-se que pode haver conjuntos nos quais a taxa de falha gerada apenas por descargas atmosféricas chega a 2 falhas/km ao ano. É um valor muito elevado, todavia não interfere na análise, evitando que algum valor dessa amplitude seja desconsiderado da análise. A tabela 4.14 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.14 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Taxa de Falha devido a descargas atmosféricas*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Baixa	Triangular	0	0	-	0,2
Média	Trapezoidal	0	0,2	0,3	0,5
Elevada	Trapezoidal	0,3	0,5	2	2

A figura 4.17 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Taxa de Falha devido a descargas atmosféricas*.

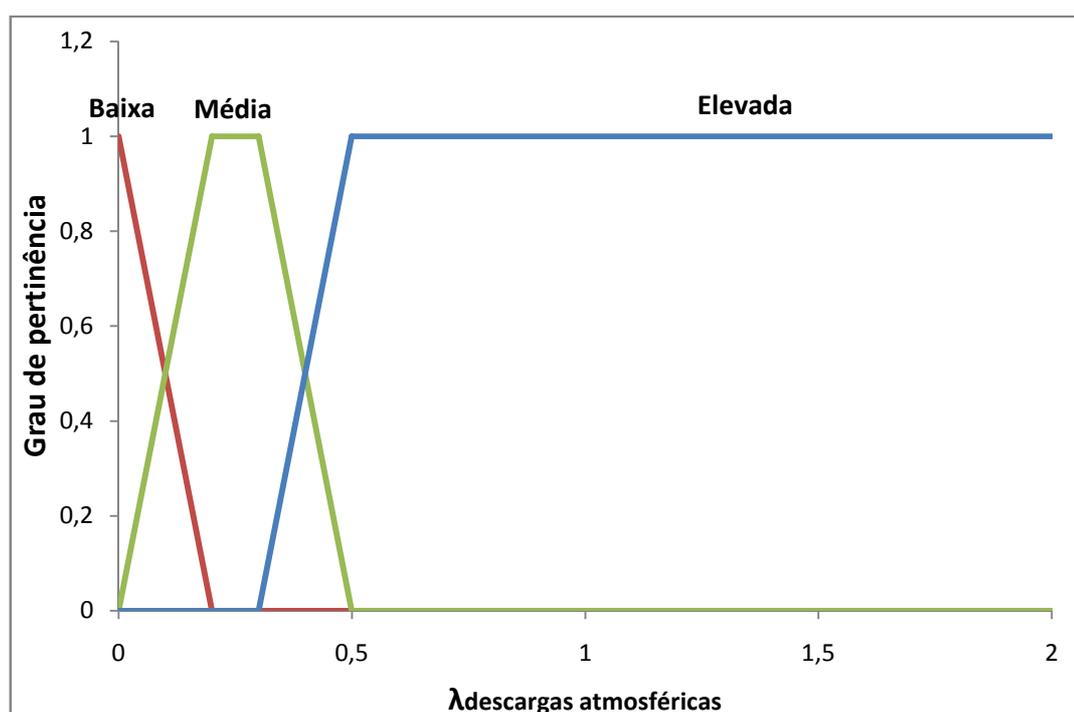


Figura 4.17 – Subconjuntos da variável de entrada *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas*.

4.4.3.3 Taxa de falha devido à vegetação

A *Taxa de falha devido à vegetação* é a terceira variável que compõe o controlador *Influência do Meio* e também corresponde a uma fração da Taxa de falha expressa pela equação (4.6), porém refere-se especificamente às falhas

cujacausa foi vegetação. A variável *Taxa de falha devido à vegetação* é obtida através da equação (4.10):

$$\lambda_{vegetação} = \frac{N_{falhas\ vegetação}}{ER}; \quad (4.10)$$

em que:

$\lambda_{vegetação}$ é a taxa de falha da rede gerada por vegetação, expressa em falhas/km;

$N_{falhas\ vegetação}$ é o total de falhas registradas geradas por vegetação em um ano;

ER é a extensão da rede, expressa em km.

Assim como as descargas atmosféricas, as árvores, em específico, estão, frequentemente, entre as principais causas de interrupções, principalmente no caso de linhas aéreas (APPELT, P.J; GOODFELLOW, J.W, 2004; KURUTACH, W.; TUPPADUNG, Y, 2004). A vegetação pode influenciar a confiabilidade de diversas maneiras, seja devido ao crescimento desordenado das plantas, pelo contato direto com a rede devido ao vento ou pela quebra de galhos (BROWN, R. E., 2002). Esses fatores muito específicos, os quais dependem de outras variáveis como tipo de vegetação, de solo e clima, dificultando a definição de estratégias de prevenção e a avaliação da confiabilidade da rede. Assim, ao considerar a *Taxa de falha devido à vegetação*, busca-se garantir que todas essas informações estejam inseridas nessa taxa, a qual traduz a influência da vegetação nos índices de continuidade, através de um valor médio de falhas anuais por extensão de rede. Logo é possível inferir que quanto maior for a *Taxa de falha devido à vegetação*, mais suscetível ao meio será a rede de distribuição e assim, pior será a confiabilidade.

Para a variável *Taxa de Falha devido à vegetação* foram definidos três subconjuntos *fuzzy*: *Baixa*, *Média* e *Elevada*. Essa variável tem caracterização idêntica à variável *Taxa de Falha devido a descargas atmosféricas*, pois possuem características muito semelhantes. Logo, tanto o universo de análise, quanto os subconjuntos e as funções que a representam são os mesmos. o universo de análise considerado está definido no intervalo entre 0 e 2 falhas/km ao ano. A tabela

4.15 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.15 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Taxa de Falha devido à vegetação*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Baixa	Triangular	0	0	-	0,2
Média	Trapezoidal	0	0,2	0,3	0,5
Elevada	Trapezoidal	0,3	0,5	2	2

A figura 4.18 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Taxa de Falha devido à vegetação* (o gráfico apresenta valores apenas até 2 falhas/km ao ano, pois não há variação de no valor de pertinência a partir desse valor).

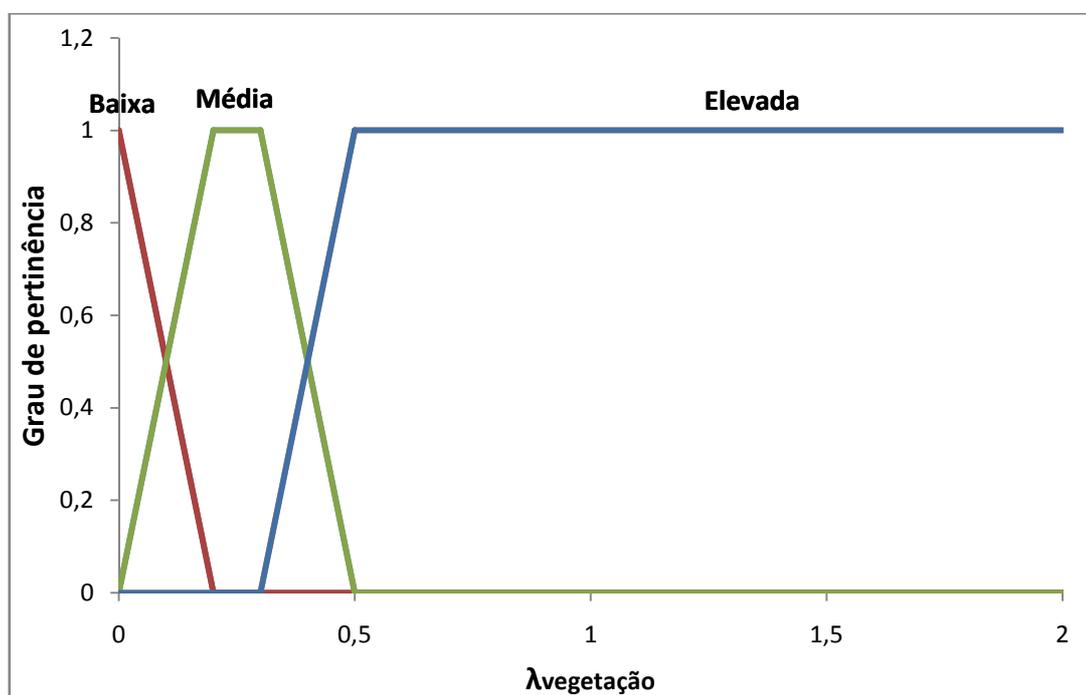


Figura 4.18 – Subconjuntos da variável de entrada *Taxa de falha devido à vegetação*.

4.4.3.4 Percentual de Ocorrências em Clima Adverso

A quarta e última variável de entrada que compõe o controlador *Influência do Meio* é denominada *Percentual de Ocorrências em Clima Adverso*. Essa variável corresponde ao percentual de falhas na rede ocorridas em condições climáticas adversas. A variável é obtida a partir da equação (4.11):

$$Clima\ adverso = \frac{N_{ocorrências\ em\ clima\ adverso}}{N_{total\ ocorrências}}; \quad (4.11)$$

em que:

$N_{ocorrências\ em\ clima\ adverso}$ é a quantidade total anual de ocorrências em clima adverso;

$N_{total\ ocorrências}$ é a quantidade total anual de ocorrências;

$Clima\ adverso$ é a relação percentual de ocorrências geradas em clima adverso.

A partir do padrão de registro das ocorrências definido no PRODIST (ANEEL, 2012a), devem ser determinadas as condições climáticas no momento de ocorrência da falha na rede. São consideradas ocorrências em clima adverso, as ocorrências registradas sob chuva, granizo, neblina, temporal, vento, entre outros.

As condições climáticas influenciam bastante na confiabilidade das redes e estão entre as mais frequentes causas de interrupções (BROWN, R. E., 2002). Entre as sugestões realizadas na revisão metodológica apresentada pela ANEEL (ANEEL, 2010b), está o Índice Pluviométrico Anual, o qual mede a incidência média de chuvas. Todavia, ao considerar esse índice se perderia o detalhamento da informação, pois esse indicador é medido por unidade de federação. Logo, ao considerar essa relação percentual de ocorrências em clima adverso, garante-se a padronização dos dados e também a abrangência de todas as condições adversas de clima, as quais já foram citadas. Dessa forma, espera-se mensurar a suscetibilidade das redes de distribuição às condições climáticas da região as quais essas redes fornecem energia. Assim, pode-se inferir que quanto maior for o percentual de ocorrências em clima adverso, maior será a suscetibilidade das redes ao meio e, então, pior será a confiabilidade.

Para a variável *Percentual de Ocorrências em Clima Adverso* foram definidos três subconjuntos *fuzzy*: *Pouca Influência*, *Influência Mediana* e *Muita Influência*. Para essa variável, o universo de análise considerado é representado pelo conjunto $[0, 1]$, ou seja, pois a variável corresponde a uma relação percentual. A tabela 4.16 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.16 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável *Percentual de Ocorrências em Clima Adverso*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Pouca influência	Triangular	0	0	-	0,1
Influência mediana	Trapezoidal	0	0,1	0,2	0,3
Muita influência	Trapezoidal	0,2	0,3	1	1

A figura 4.19 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada *Percentual de Ocorrências em Clima Adverso*.

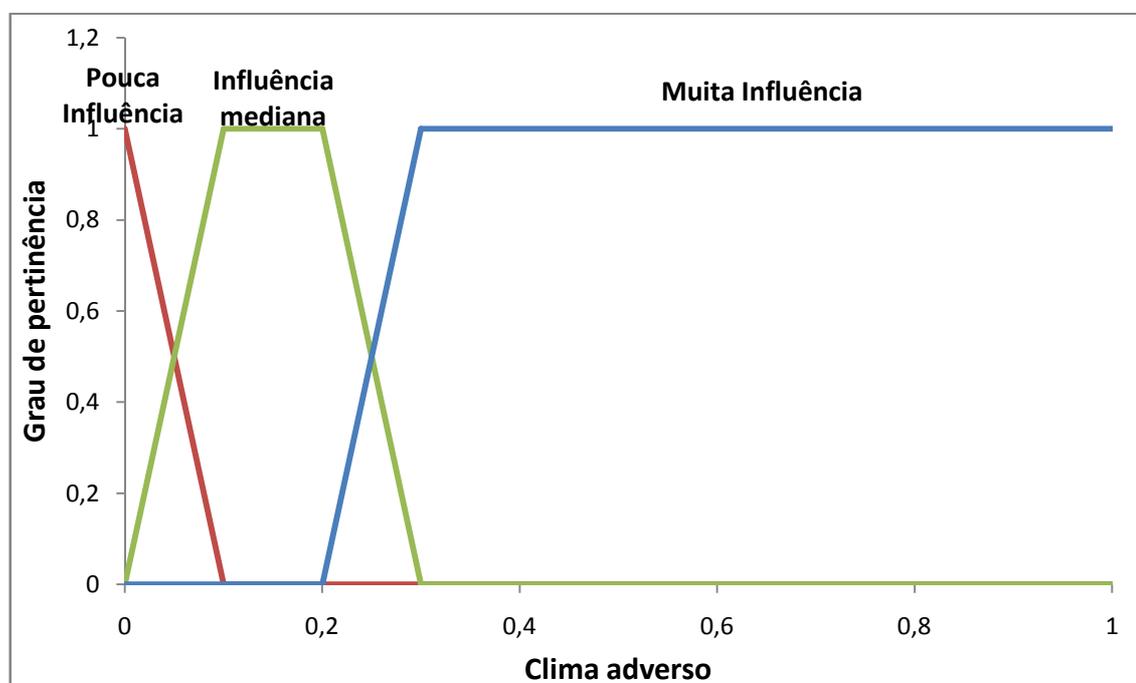


Figura 4.19 – Subconjuntos da variável de entrada *Percentual de Ocorrências em Clima Adverso*.

4.4.3.5 Suscetibilidade ao Meio

A saída do controlador *Influência do Meio* estabelece a suscetibilidade do sistema ao meio. O valor de saída é definido no intervalo entre 0 e 1 - caracterizando o universo de análise - o qual tem por objetivo indicar o quanto a confiabilidade do sistema é influenciada devido às características do ambiente. Assim, quanto maior for esse índice, mais suscetível ao meio é o sistema de distribuição, logo, pior será a confiabilidade. É importante destacar que essa saída é uma variável de entrada dos controladores principais, conforme é apresentado no item 4.5.

A saída do controlador é chamada *Suscetibilidade ao Meio* e é definida por quatro subconjuntos *fuzzy*: *Pouco suscetível*, *Moderadamente Suscetível*, *Suscetível* e *Muito Suscetível*. A tabela 4.17 apresenta os tipos de função utilizados, bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.17 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a saída do controlador *Influência do Meio*.

Subconjunto	Função	Parâmetros		
		a	m	b
Pouco Suscetível	Triangular	0	0	0,35
Moderadamente Suscetível	Triangular	0	0,35	0,65
Suscetível	Triangular	0,35	0,65	1
Muito Suscetível	Triangular	0,65	1	1

Como se pode observar na tabela 4.17, no caso dessa saída, assim como para a saída do controlador *Padrão de Rede*, foram utilizadas apenas funções triangulares, buscando maior equilíbrio nos pesos dos subconjuntos, evitando valores de saída muito altos ou muito baixos. Os subconjuntos *Pouco Suscetível* e *Muito Suscetível*, limitam o universo de análise, tendo o ponto *m* definido em 0 e em 1, respectivamente. Já o suporte dessas funções é abrangente, o qual é definido no intervalo: entre 0 e 0,35 para o subconjunto *Pouco Suscetível*; e entre 0,65 e 1 para o subconjunto *Muito Suscetível*. Os subconjuntos *Moderadamente Suscetível* e *Suscetível* são caracterizados por suportes abrangentes, variando entre 0 e 0,65 e entre 0,35 e 1, respectivamente. Isso garante uma avaliação mais equilibrada de

forma que não sejam atribuídas notas nem muito baixas, nem muito elevadas, uma vez que os dois subconjuntos cobrem todo o universo de análise. Os pontos de pertinência máxima são 0,35 para o subconjunto *Moderadamente Suscetível* e 0,65 para o subconjunto *Suscetível*. A figura 4.20 apresenta os respectivos subconjuntos fuzzy para a saída do controlador *Padrão de Rede*.

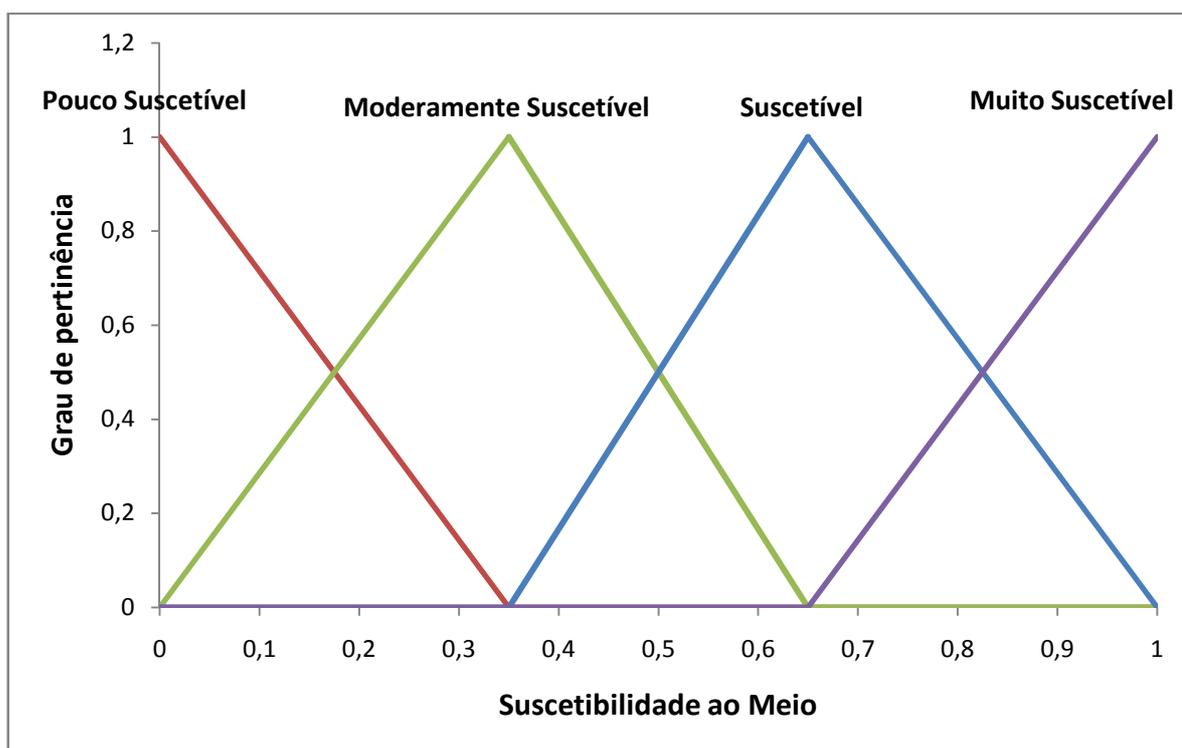


Figura 4.20 – Subconjuntos da saída do controlador *Influência do Meio*.

4.4.3.6 Base de regras para *Influência do Meio*

A base de regras do controlador *Influência do Meio* é composta de 81 regras, uma vez que cada uma das quatro variáveis de entrada é definida por três subconjuntos.

Para essa quantidade de regras, considera-se que não há necessidade de alguma simplificação. Assim, resumidamente, o estabelecimento das relações entre as variáveis tem como princípios norteadores:

- Para a variável *Tempo Médio de Deslocamento*, assume-se que quanto maior o tempo médio, maior é a influência do trânsito e de acessibilidade

aos locais de falha o conjunto de consumidores possui, logo é mais suscetível ao meio e assim, pior é a confiabilidade;

- Para a variável *Taxa de Falha devido a descargas atmosféricas*, considera-se que quanto maior é a taxa, maior é a suscetibilidade devido às descargas atmosféricas, logo, pior é a confiabilidade;
- Para a variável *Taxa de Falha devido a vegetação* a inferência é a mesma, ou seja, quanto mais elevada é a taxa, maior é a suscetibilidade ao meio e pior é a confiabilidade;
- Para a variável *Clima Adverso*, considera-se que quanto mais influência o sistema sofre devido às condições climáticas adversas, mais suscetível é o sistema e pior a confiabilidade.

4.5 Indicadores DEC e FEC - Nível principal do sistema de avaliação

O nível principal do sistema de avaliação de desempenho é composto por dois controladores *fuzzy*, sendo um deles responsável pela determinação de um limite de desempenho para o indicador DEC e o outro para o indicador FEC. A seguir é apresentada, detalhadamente a parametrização de cada um desses controladores.

4.5.1 Limite de DEC

O controlador *Limite de DEC* tem como objetivo determinar um limite de desempenho relativo à duração das interrupções de fornecimento de energia a partir da avaliação de desempenho realizada no nível secundário do sistema de avaliação. Assim, as saídas: *Confiabilidade devido a características operacionais*, *Padrão de Rede* e *Suscetibilidade ao Meio Ambiente* tornam-se as variáveis de entrada desse controlador, as quais são avaliadas juntamente com a variável $DEC_{relativo}$. A partir das inferências definidas na base de regras, o controlador estabelece um limite de desempenho para cada conjunto de unidades consumidoras avaliado. A figura 4.21 apresenta a estrutura do controlador.

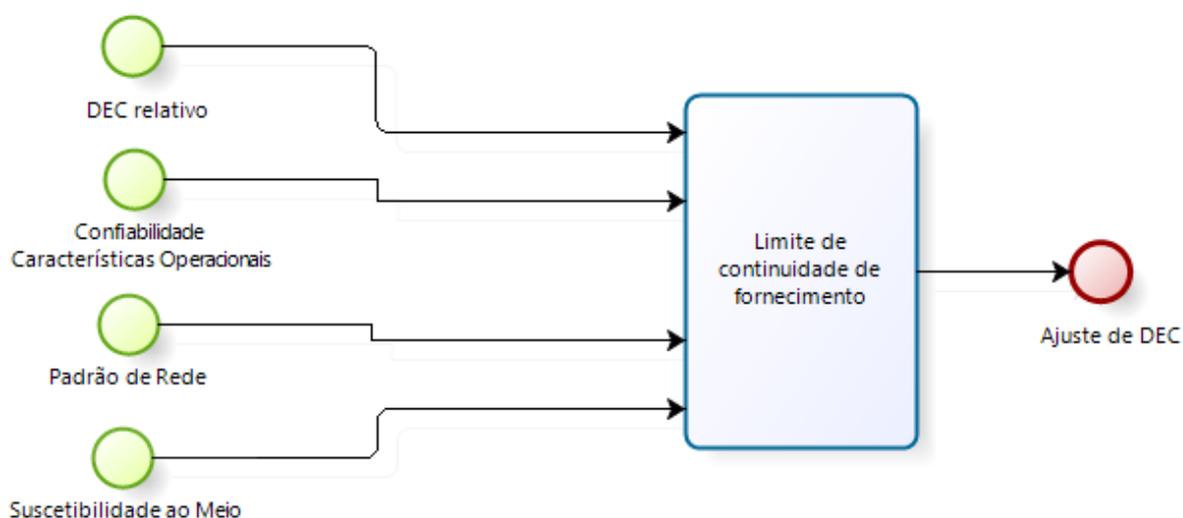


Figura 4.21 – Controlador *Limite de DEC*.

4.5.1.1 Variáveis caracterizadoras do *Limite de DEC*

Das quatro variáveis que definem *Limite de DEC*, três são referentes ao nível secundário do sistema de avaliação. Isso significa que essas variáveis já são oriundas de um processo de *fuzzificação* e *defuzzificação*, ao inseri-las novamente em um sistema *fuzzy*, os parâmetros estabelecidos nos processos anteriores devem ser respeitados de forma a garantir que a informação não perca a caracterização estabelecida a partir das variáveis de entrada do nível secundário. Logo, tanto os subconjuntos quanto as fronteiras que definem as saídas dos controladores do nível secundário devem ser os mesmos para as entradas do nível principal. Ou seja, a variável de entrada *Confiabilidade devido a características operacionais* é definida conforme os parâmetros estabelecidos no item 4.4.1.6, a variável de entrada *Padrão de Rede* é definida conforme os parâmetros estabelecidos no item 4.4.2.4 e a variável de entrada *Suscetibilidade ao Meio* é definida de acordo com os parâmetros estabelecidos no item 4.4.3.4.

A quarta variável que compõe o controlador *Limite de DEC* é denominada $DEC_{relativo}$ e é obtida através da equação (4.12):

$$DEC_{relativo} = \frac{DEC_{realizado}}{DEC_{limite}}; \quad (4.12)$$

em que:

$DEC_{realizado}$ é desempenho registrado para o indicador DEC pelo conjunto de consumidores no ano anterior ao da análise, expresso em horas;

DEC_{limite} é o limite de desempenho registrado para o indicador DEC atribuído ao conjunto de unidades consumidoras, expresso em horas.

O valor obtido na equação (4.12) expressa a relação entre o desempenho registrado e o limite de continuidade atribuído ao conjunto de consumidores, indicando o quão abaixo ou acima do limite ficou o desempenho do conjunto, garantindo que o sistema de avaliação de desempenho estabeleça um limite coerente com o histórico de desempenho do conjunto. Assim, se a relação determinada pela equação (4.12) for menor do que 1, isso indica que o desempenho registrado para o conjunto está abaixo do limite estabelecido, sendo o oposto também válido, ou seja, se a relação for maior do que 1, isso indica que o desempenho do conjunto está acima do limite. Caso a relação resulte no valor 1, indica que o desempenho foi igual ao limite estabelecido para o conjunto. A partir dessas informações, pode-se inferir que, de forma geral, quanto maior for o $DEC_{relativo}$ maior é a probabilidade de o limite definido para o conjunto estar em desacordo com as características do conjunto. Entretanto, a correta inferência depende das demais variáveis de entrada.

A variável de entrada $DEC_{relativo}$ é definida por três subconjuntos *fuzzy*: *Adequado*, *Limítrofe* e *Inadequado*. O universo de análise é definido no intervalo [0,5], ou seja, é considerado que pode haver desempenhos até cinco vezes maiores que o limite. A tabela 4.18 apresenta os tipos de funções utilizadas e os parâmetros que definem os subconjuntos.

Tabela 4.18 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável de entrada

$DEC_{relativo}$.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
	Triangular	0	0	-	1,5
	Triangular	0	1,5	-	3
	Trapezoidal	1,5	3	5	5

A figura 4.22 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada $DEC_{relativo}$.

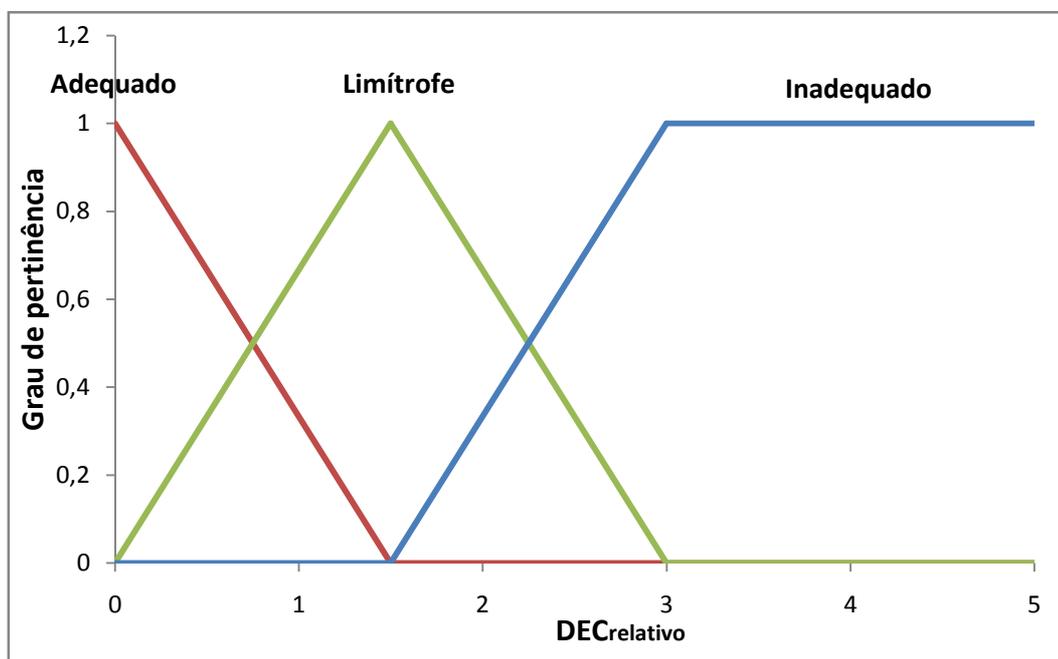


Figura 4.22 – Subconjuntos da variável de entrada $DEC_{relativo}$.

4.5.1.2 Ajuste de DEC

A saída do controlador *Limite de DEC* tem por objetivo determinar um limite de desempenho para o indicador DEC, ou seja, a partir das características consideradas, o controlador fuzzy deve estabelecer a quantidade máxima de horas que determinado conjunto de consumidores pode ficar sem fornecimento de energia. Todavia, essa não é uma tarefa trivial, pois é muito difícil traduzir o desempenho das redes de distribuição, o qual sofre influência de diversas variáveis, em um valor de DEC coerente com essas características. Dessa forma, propõe-se estabelecer um coeficiente de ajuste ao atual limite de desempenho, o qual tem por objetivo ponderar o atual limite, definido pelo agente regulador, a partir das características avaliadas. Dessa forma o limite de desempenho de DEC para o conjunto de consumidores é obtido pela equação (4.13):

$$DEC_{limite\ novo} = DEC_{limite} \cdot DEC_{ajuste}; \quad (4.13)$$

em que:

DEC_{limite} é o limite de desempenho de DEC atribuído ao conjunto de unidades consumidoras, expresso em horas;

DEC_{ajuste} é o ajuste estabelecido pelo sistema de avaliação de desempenho para o indicador DEC;

$DEC_{limite\ novo}$ é o novo limite de DEC proposto pelo sistema de avaliação de desempenho, expresso em horas.

Dessa forma, espera-se que sejam determinados limites de DEC compatíveis com as características de cada conjunto de consumidor, considerando todas as características avaliadas.

A saída do controlador é caracterizada por quatro subconjuntos *fuzzy*: *Ótimo*, *Aceitável*, *Inadequado* e *Deficiente*. O universo de análise é definido no intervalo [0,3]. Essa definição é muito importante, pois define a amplitude do fator do ajuste, ou seja, nesse caso, na pior das hipóteses, o sistema irá definir um limite três vezes maior que o atual limite do conjunto avaliado. Ela se deu considerando os históricos de desempenho das distribuidoras registrados no portal da ANEEL (ANEEL, 2012b), no qual se constatou que existiam desempenhos até 5 vezes maiores que o limite. Dessa forma, estabelecendo que a saída do sistema está definida no intervalo de valores menores ou iguais a 3, garante-se que, mesmo para os piores desempenhos, o sistema não definirá limites protecionistas, ou seja, limites que indiretamente não incentivem a melhoria na qualidade da prestação de serviço por parte da distribuidora. A tabela 4.19 apresenta os tipos de funções utilizados bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.19 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a saída do controlador *Limite de DEC*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Adequado	Triangular	0	0	-	1
Aceitável	Triangular	0	1	-	1,5
Inadequado	Triangular	1	1,5	-	2
Deficiente	Trapezoidal	1,5	2	3	3

É possível observar, na tabela 4.19, que três subconjuntos são caracterizados por funções triangulares. Isso contribui para dar mais equilíbrio nos pesos das regras e também dá maior granulação a análise, ou seja, a saída é mais detalhada, garantindo um ajuste fino para o indicador. O subconjunto *Ótimo* é caracterizado pelo ponto m em 0, ou seja, apenas nesse caso um conjunto considerado *Ótimo* com pertinência máxima. O suporte dessa função é definido no intervalo entre 0 e 1. O subconjunto *Aceitável* tem o ponto de pertinência máxima definido em 1 e o suporte definido no intervalo entre 0 e 1,5 e subconjunto *Inadequado* tem o ponto de pertinência máxima definido em 1,5 e o suporte definido no intervalo entre 1 e 2. Por fim, o subconjunto *Deficiente* é caracterizado por uma função trapezoidal, a qual tem suporte bem abrangente, definido no intervalo entre 1,5 e 3, estando o intervalo de pertinência máxima definido no intervalo entre 2 e 3. A Figura 4.23 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a saída do controlador *Limite de DEC*.

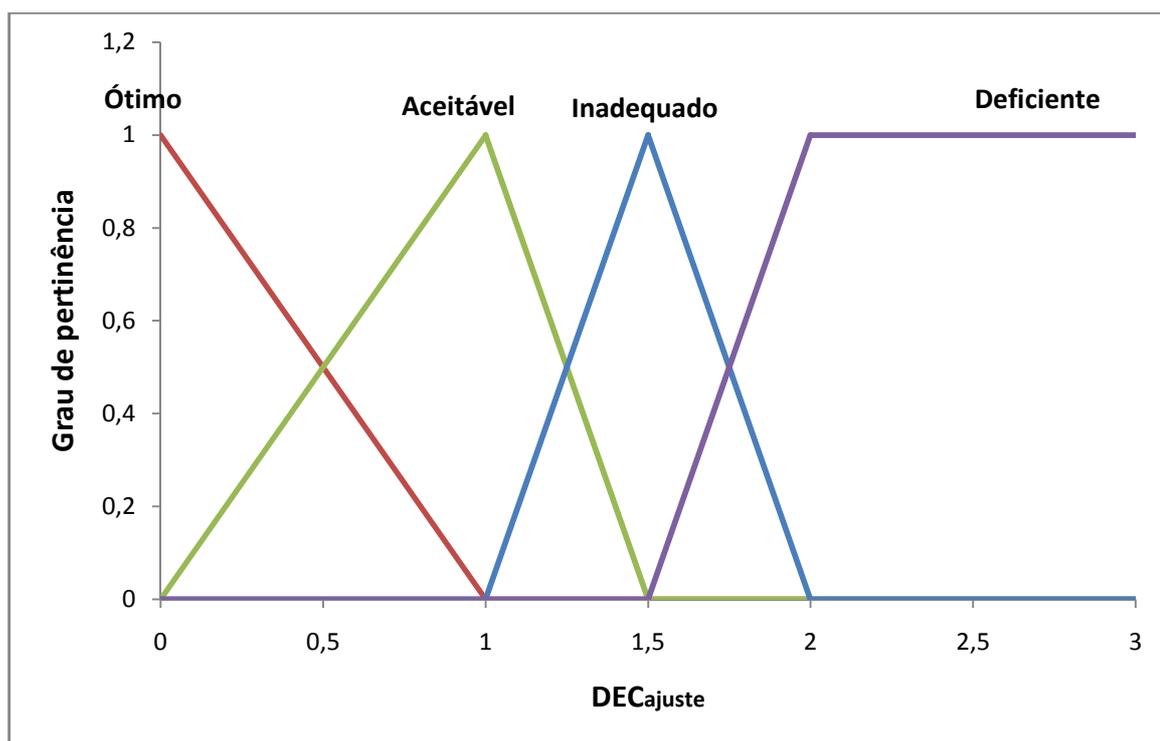


Figura 4.23 – Subconjuntos da saída do controlador *Limite de DEC*.

4.5.1.3 Base de regras para o Limite de DEC

A base de regras do controlador *Limite de DEC* é composta por 192 regras, pois esse é composto por quatro variáveis de entrada, das quais uma é definida por três subconjuntos e as demais são definidas por quatro subconjuntos *fuzzy*.

Por se tratar das regras que definirão os limites de continuidade para o indicador DEC, não é aconselhada a simplificação na base de regras, garantindo que a análise seja bem detalhada. Dessa forma, as 192 regras foram definidas de acordo com os princípios norteadores:

- Para a variável de entrada $DEC_{relativo}$, considera-se que, em geral, quanto mais inadequado estiver o desempenho histórico do conjunto, maior é a probabilidade de o limite estar inadequado, sendo o inverso também verdadeiro;
- Para a variável *Confiabilidade devido a características operacionais*, infere-se que, em geral, quanto pior a confiabilidade, maior deve ser o limite do conjunto, sendo o inverso também verdadeiro. Essa é a variável com maior peso nas regras, uma vez que se considera que as características operacionais estão diretamente relacionadas ao desempenho do indicador DEC;
- Para a variável *Padrão de Rede*, define-se que, em geral, quanto pior o padrão de rede, pior é o desempenho do indicador DEC;
- Para a variável *Suscetibilidade ao Meio*, infere-se que, em geral, quanto mais suscetível ao meio, pior é o desempenho do indicador DEC.

A inferência, no caso desse controlador, não é tão simples, pois o desempenho do indicador está intrinsecamente relacionado a cada uma das variáveis de entrada. Entretanto, considera-se que a variável que mais contribui na variação do desempenho do indicador DEC é a variável *Confiabilidade devido a características operacionais*. Esse fator é levado em consideração na definição das regras, o que exige que cada regra seja analisada de forma isolada.

4.5.2 Limite de FEC

Os limites para o indicador FEC são definidos a partir do controlador *Limite de FEC*, o qual possui estrutura muito semelhante ao controlador *Limite de DEC*. É também composto por quatro variáveis de entrada, das quais três são as mesmas do controlador *Limite de DEC*: *Confiabilidade devido a características operacionais*, *Padrão de Rede* e *Suscetibilidade ao Meio Ambiente*. Dessa forma são inseridas as informações referentes à avaliação de desempenho, as quais associadas a variável $FEC_{relativo}$ são responsáveis pela definição dos limites de desempenho para o indicador FEC de cada conjunto de unidades consumidoras avaliado, a partir das inferências definidas na base de regras. A figura 4.24 apresenta a estrutura do controlador *Limite de FEC*.

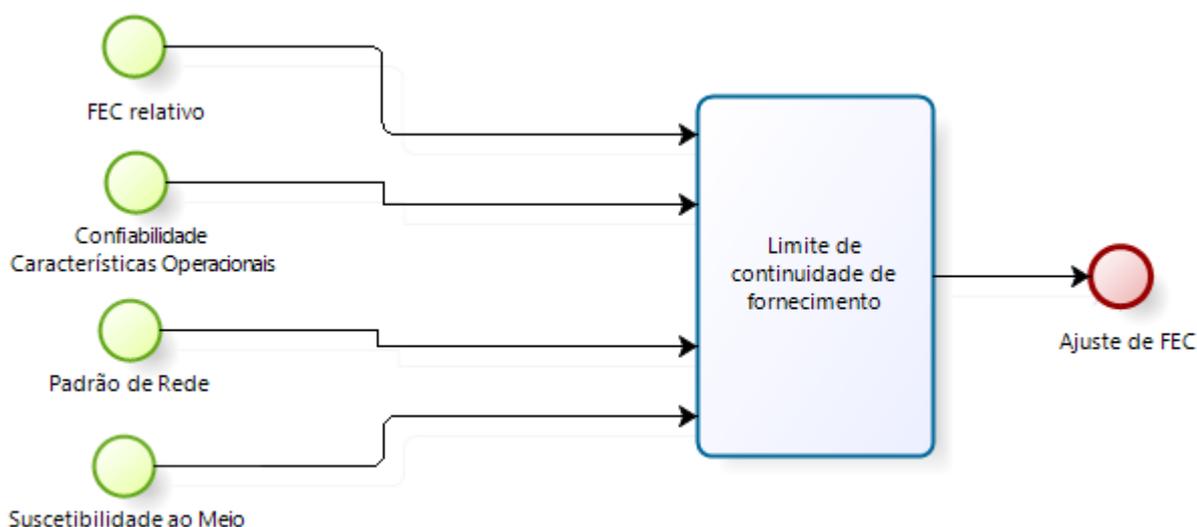


Figura 4.24 – Controlador *Limite de FEC*.

4.5.2.1 Variáveis caracterizadoras do *Limite de FEC*

Conforme já mencionado no item 4.4.1.1, as variáveis de entrada oriundas do nível secundário do sistema de avaliação devem ser caracterizadas da mesma forma. Assim, a variável de entrada *Confiabilidade devido a características operacionais* é definida conforme os parâmetros estabelecidos no item 4.4.1.6, a variável de entrada *Padrão de Rede* é definida conforme os parâmetros

estabelecidos no item 4.4.2.4 e a variável de entrada *Suscetibilidade ao Meio* é definida de acordo com os parâmetros estabelecidos no item 4.4.3.4.

A quarta variável que compõe o controlador *Limite de FEC* é denominada $FEC_{relativo}$ e é obtida através da equação (4.14):

$$FEC_{relativo} = \frac{FEC_{realizado}}{FEC_{limite}}; \quad (4.14)$$

em que:

$FEC_{realizado}$ é desempenho registrado para o indicador FEC pelo conjunto de consumidores no ano interior ao da análise, expresso em horas;

FEC_{limite} é o limite de desempenho para o indicador FEC atribuído ao conjunto de unidades consumidoras, expresso em horas.

Como se pode observar, o valor obtido na equação (4.14) tem a mesma caracterização do valor obtido na equação (4.12), ou seja, expressa a relação entre o desempenho registrado e o limite de continuidade atribuído ao conjunto de consumidores, indicando o quão abaixo ou acima do limite ficou o desempenho do conjunto, garantindo que o sistema de avaliação de desempenho estabeleça um limite coerente com o histórico de desempenho do conjunto, nesse caso para o indicador FEC. Assim, se a relação determinada pela equação (4.14) for menor do que 1, isso indica que o desempenho registrado de FEC para o conjunto está abaixo do limite estabelecido, sendo o oposto também válido, ou seja, se a relação for maior do que 1, isso indica que o desempenho de FEC do conjunto está acima do limite. Se a relação apresentar como resultado o valor 1, isso indica que o desempenho foi igual a limite estabelecido. A partir dessas informações, pode-se inferir que, de forma geral, quanto maior for o $FEC_{relativo}$ maior é a probabilidade de o limite definido para o conjunto estar em desacordo com as características do conjunto. Todavia, a correta inferência depende das demais variáveis de entrada.

A variável de entrada $FEC_{relativo}$ é definida por três subconjuntos *fuzzy*: *Adequado*, *Limítrofe* e *Inadequado*, assim como a variável $DEC_{relativo}$. O universo de análise é definido no intervalo [0,5], ou seja, é considerado que pode haver

desempenhos para o indicador FEC até cinco vezes maiores que o limite. A tabela 4.20 apresenta os tipos de funções utilizadas e os parâmetros que definem os subconjuntos.

Tabela 4.20 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a variável de entrada

$FEC_{relativo}$.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
	Triangular	0	0	-	1,5
	Triangular	0	1,5	-	3
	Trapezoidal	1,5	3	5	5

Como se pode observar na tabela 4.20, tanto os subconjuntos quanto as fronteiras são as mesmas definidas para o indicador $DEC_{relativo}$. Por se tratarem de valores relativos, ou seja, normalizados, é possível fazer essa generalização. A figura 4.25 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a variável de entrada $FEC_{relativo}$.

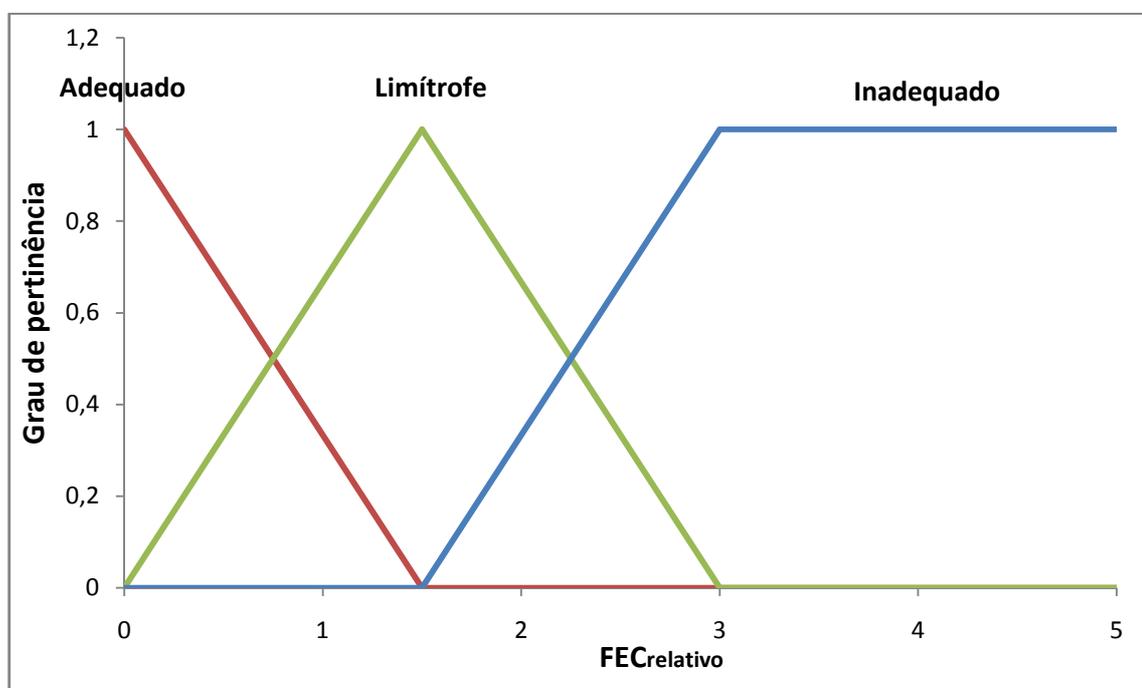


Figura 4.25 – Subconjuntos da variável de entrada $FEC_{relativo}$.

4.5.2.2 Ajuste de FEC

A saída do controlador *Limite de FEC* tem como objetivo estabelecer um limite de desempenho para o indicador FEC de cada conjunto de consumidores avaliado. Sua concepção é muito semelhante à da saída do controlador *Limite de DEC*, ou seja, a partir das características consideradas, o controlador fuzzy deve estabelecer, nesse caso, quantas vezes um determinado conjunto de consumidores pode ficar sem fornecimento de energia. Assim, as variáveis de entradas são avaliadas de forma a definir um coeficiente de ajuste para o atual limite de desempenho, o qual tem por objetivo ponderar o atual limite estabelecido pelo agente regulador. Dessa forma o limite de desempenho de FEC para o conjunto de consumidores é obtido pela equação (4.15):

$$FEC_{limite\ novo} = FEC_{limite} \cdot FEC_{ajuste}; \quad (4.15)$$

em que:

FEC_{limite} é o limite de desempenho de FEC atribuído ao conjunto de unidades consumidoras, expresso em horas;

FEC_{ajuste} é o ajuste estabelecido pelo sistema de avaliação de desempenho para o indicador FEC;

$FEC_{limite\ novo}$ é o novo limite proposto pelo sistema de avaliação de desempenho para o indicador FEC, expresso em horas.

Espera-se, assim, que sejam determinados limites de FEC compatíveis com as características de cada conjunto de consumidor, considerando todas as características avaliadas.

A saída do controlador *Limite de FEC* é idêntica à saída do controlador *Limite de DEC*, pois estamos definidos um ajuste ao indicador, o qual é definido a partir das variáveis de entrada. Logo, a saída é caracterizada por quatro subconjuntos *fuzzy*: *Ótimo*, *Aceitável*, *Inadequado* e *Deficiente* e o universo de análise é definido no intervalo [0,3]. Conforme já mencionado, esse intervalo é semelhante ao do indicador DEC, pois está se tratando de um ajuste ao indicador, o qual está

relacionado aos valores de entrada. A tabela 4.21 apresenta os tipos de funções utilizados bem como os parâmetros de cada subconjunto.

Tabela 4.21 – Funções e parâmetros dos subconjuntos *fuzzy* definidos para a saída do controlador *Limite de FEC*.

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Adequado	Triangular	0	0	-	1
Aceitável	Triangular	0	1	-	1,5
Inadequado	Triangular	1	1,5	-	2
Deficiente	Trapezoidal	1,5	2	3	3

A Figura 4.26 apresenta os respectivos subconjuntos *fuzzy* para a saída do controlador *Limite de FEC*.

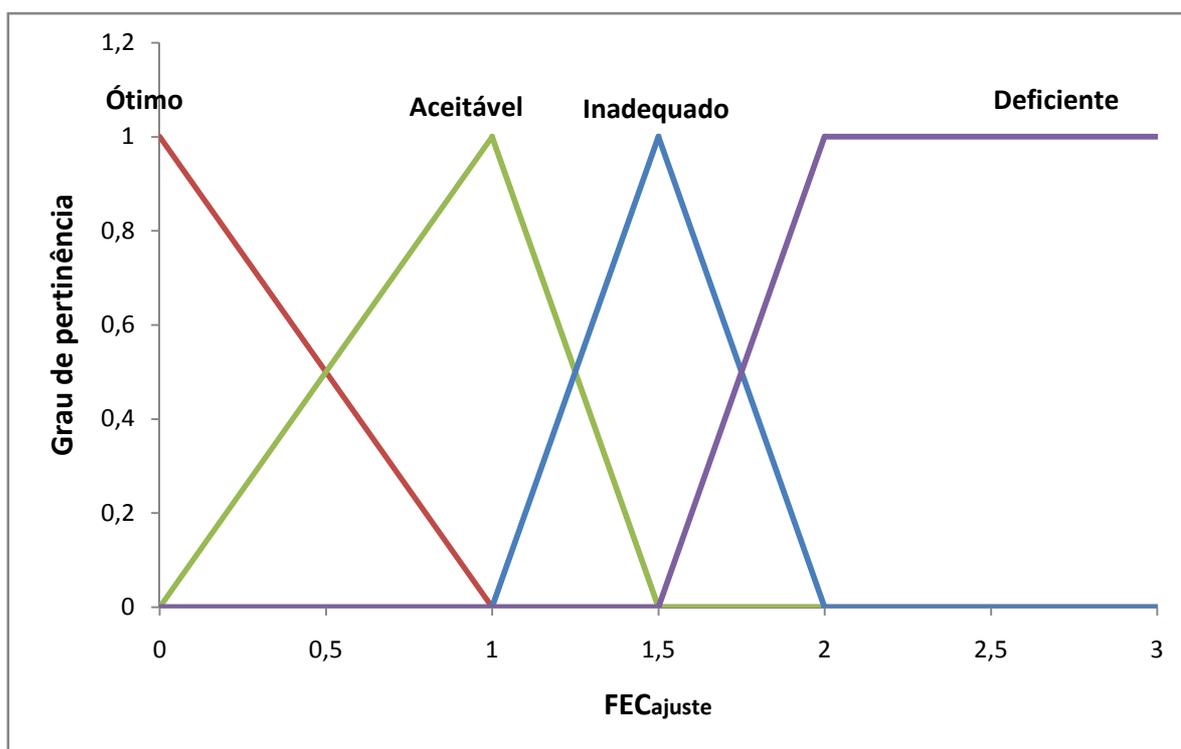


Figura 4.26 – Subconjuntos da saída do controlador *Limite de FEC*.

4.5.2.3 Base de regras para *Limite de FEC*

A base de regras do controlador *Limite de FEC* também é composta por 192 regras, pois o controlador possui quatro variáveis de entrada, das quais uma é definida por três subconjuntos e as demais são definidas por quatro subconjuntos *fuzzy*.

Por se tratar das regras que definirão os limites de continuidade para o indicador FEC, não é aconselhada a simplificação na base de regras, garantindo que a análise seja bem detalhada. Dessa forma, as 192 regras foram definidas de acordo com os princípios norteadores:

- Para a variável de entrada $FEC_{relativo}$, considera-se que, em geral, quanto mais inadequado estiver o desempenho histórico do conjunto, mais inadequado está o limite, sendo o inverso também verdadeiro;
- Para a variável *Confiabilidade devido a características operacionais*, infere-se que, em geral, quanto pior a confiabilidade, maior deve ser o limite do conjunto, sendo o inverso também verdadeiro;
- Para a variável *Padrão de Rede*, define-se que, em geral, quanto pior o padrão de rede, pior é o desempenho do indicador FEC. Essa é a variável com maior peso nas regras, uma vez que se considera que o padrão de rede está diretamente relacionado ao desempenho do indicador FEC;
- Para a variável *Suscetibilidade ao Meio*, infere-se que, em geral, quanto mais suscetível ao meio, pior é o desempenho do indicador FEC.

Como se pode observar, os princípios norteadores são um pouco diferentes do controlador *Limite de DEC*. Enquanto para DEC se considera que as características que mais influenciam no desempenho são as características operacionais, para o indicador FEC considera-se que as características que mais influenciam no indicador são as que definem o padrão de rede. Assim, ao definir a inferência na base de regras, no caso desse controlador, cada regra possível deve ser analisada de forma isolada, visando garantir que haja um discernimento entre o que mais influencia cada indicador. Considerando essas premissas, as 192 regras

para o controlador *Limite de FEC* foram definidas e são apresentadas no Apêndice F.

Definidos e caracterizados todos os controladores, o sistema foi implementado no software Matlab®, o qual possui um toolbox específico para o desenvolvimento de sistemas *fuzzy*. Os resultados e análises são apresentados no capítulo 5.

5 AVALIAÇÃO DO MODELO: ESTUDO DE CASO PARA A COMPANHIA ESTADUAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CEEE-D

5.1 Introdução

O modelo de avaliação de desempenho proposto no Capítulo 5 foi implementado no software Matlab®, através do Toolbox específico para desenvolvimento de sistemas *fuzzy*. Para análise do sistema desenvolvido, são utilizados dados do ano de 2010 da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D. A figura 5.1 apresenta o fluxograma do sistema de avaliação de desempenho desenvolvido.

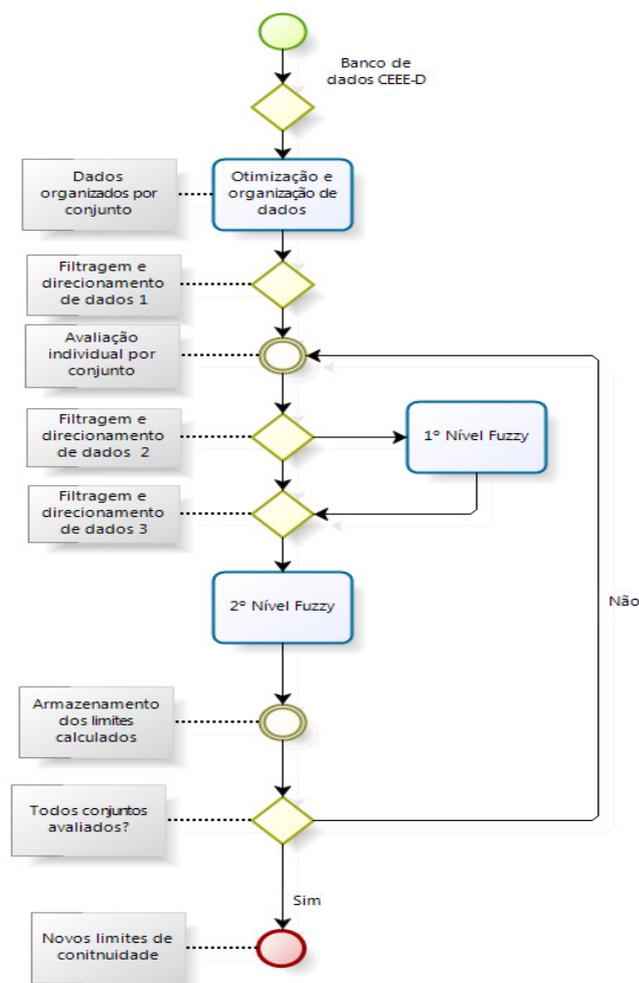


Figura 5.1 – Fluxograma do processo de avaliação de desempenho.

Inicialmente, o banco de dados é organizado de forma que as variáveis de entrada possam ser utilizadas no sistema de avaliação e definição de limites de desempenho. Esse processo consiste na obtenção das variáveis de entrada a partir do banco de dados e no processo de *data mining*, os quais foram realizados, em grande parte, no software IBM SPSS Modeler®. Após essa organização, as variáveis de entrada do nível secundário do sistema de avaliação passam pelo primeiro nível *fuzzy* o qual tem como resultado três indicadores: *Confiabilidade devido a características operacionais*, *Padrão de Rede* e *Influência do Meio*. Esses indicadores, associados às variáveis $DEC_{relativo}$ e $FEC_{relativo}$ são as variáveis de entrada do nível principal, o qual tem como função definir os limites de continuidade para os conjuntos de consumidores.

Assim, esse capítulo apresenta uma análise detalhada de todas as etapas do processo visando validar e analisar as contribuições da metodologia desenvolvida.

5.1.1 A CEEE-D

A Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica - CEEE-D é uma empresa do Grupo CEEE, sendo a concessionária dos serviços de distribuição de energia elétrica na região sul-sudeste do Estado do Rio Grande do Sul e tem desenvolvido uma série de projetos de pesquisa e desenvolvimento junto a Universidade Federal de Santa Maria, sendo esse trabalho parte de um deles.

A área de concessão da CEEE-D compreende a região Metropolitana, Sul, Litoral e Campanha gaúcha, a CEEE Distribuição atende a 72 municípios, abrangendo 73.627 km², o que corresponde aproximadamente a 32% do mercado consumidor do Rio Grande do Sul, através de seus 67.577 km de redes urbanas e rurais. A CEEE Distribuição atendeu, em 2010, um total de 1.471.101 unidades consumidoras, o que equivale a cerca de 4 milhões de pessoas ou um terço da população gaúcha, distribuindo diretamente 7.278 GWh (CEEE, 2012; ANEEL, 2012e). A figura 5.2 apresenta a área de concessão da CEEE-D, apresentando a subdivisão por regionais.

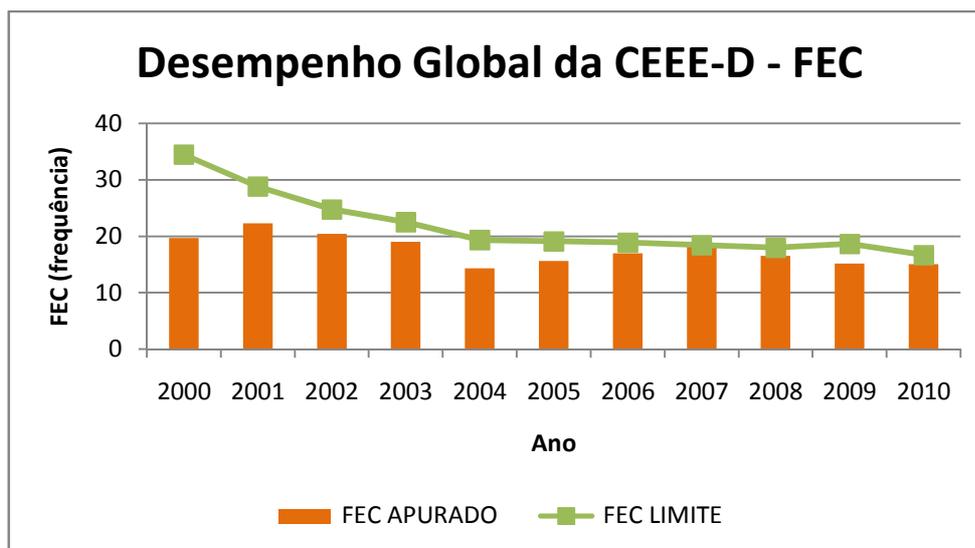


Figura 5.4 - Desempenho global da CEEE-D – indicador FEC.

Como é possível observar, em geral, as metas globais para a concessionária foram se tornando mais restritas, ou seja, os limites de continuidade foram reduzidos ao longo do tempo. Em 2000, os limites globais anuais para concessionária eram: 31,37 horas, para o indicador DEC; e 34,42 interrupções para o indicador FEC, enquanto em 2010 os limites globais eram: 16,59 horas para indicador DEC e 16,66 interrupções para o indicador FEC. Essa redução dos limites de continuidade é natural, pois se espera que a qualidade do fornecimento de energia seja constantemente melhorada de forma que isso se reflita em melhores índices de desempenho. Todavia, ao observar os índices de desempenho registrados, é possível notar que esses não seguiram a mesma tendência de redução, ou seja, com o decorrer do tempo o desempenho esteve cada vez mais próximo do limite estabelecido pela ANEEL, ou mesmo acima desse limite, principalmente no caso do indicador DEC.

Esse desempenho global é, na verdade, um reflexo do desempenho de todos os conjuntos de unidades consumidoras da CEEE-D. No ano de 2010, por exemplo, área de concessão estava dividida num total de 60 conjuntos de unidades consumidoras, dos quais, aproximadamente 70% deles apresentaram desempenho DEC acima do limite estabelecido pela ANEEL, enquanto 45% apresentaram desempenho acima do limite do indicador FEC. Esse desempenho resultou, em 2010, um total de R\$ 13.108.585,69 em compensações financeiras devido à transgressão dos limites individuais de continuidade.

A partir dessa breve análise, foram coletados os dados necessários para realização da avaliação de desempenho dos conjuntos de consumidores da CEEE-D através do sistema desenvolvido nesse trabalho.

5.2 Nível de avaliação secundário

A CEEE-D disponibilizou todas as informações necessárias para que as treze variáveis de entrada fossem obtidas. Todavia, devido a alguns problemas na base de dados, foram desconsideradas informações dos conjuntos *Basílio*, *Irapuazinho*, *Marmeleiro* e *Taim*. Assim, são considerados nessa análise os dados de 56 conjuntos de unidades consumidoras.

5.2.1 Confiabilidade devido a características operacionais

O nível secundário da avaliação compreende a avaliação de desempenho a partir dos três controladores: *Características Operacionais*, *Padrão de Rede* e *Influência do Meio*. Cada controlador *fuzzy* opera independentemente, de forma que a análise de cada controlador é apresentada separadamente. Assim, organizadas as variáveis de entrada, as simulações são realizadas. A figura 5.5 apresenta o histograma das saídas do controlador que estabelece o indicador *Características Operacionais*. O eixo das abcissas corresponde ao desempenho apresentado pelos conjuntos, o qual varia entre 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor. Já o eixo das ordenadas corresponde à quantidade de conjuntos que apresentaram resultado em cada faixa de valores.

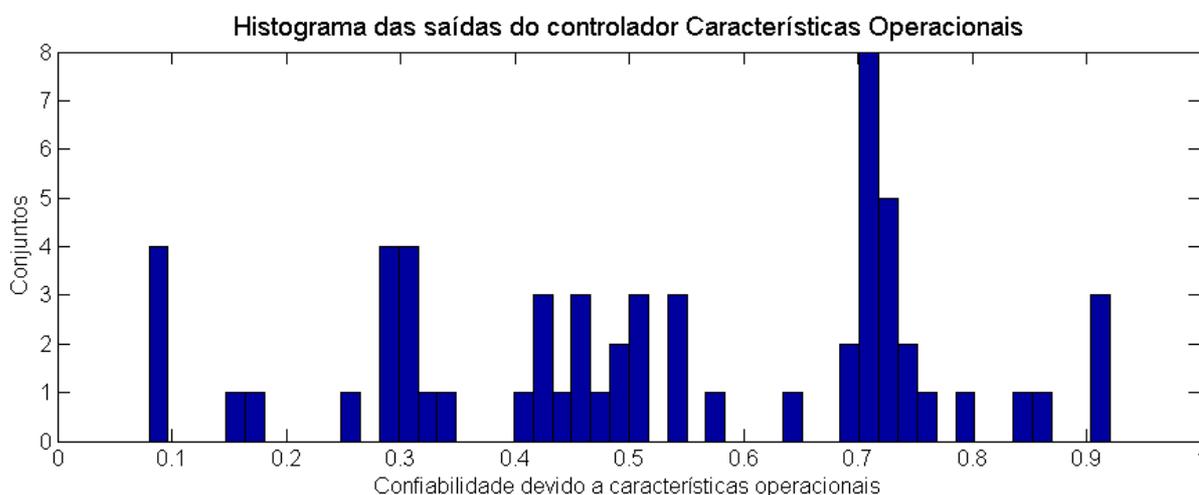


Figura 5.5 – Histograma das saídas do controlador Características Operacionais

Observa-se, inicialmente, que o sistema atribuiu índices que variam de aproximadamente 0,1 até aproximadamente 0,9. Isso mostra que, de modo geral, o sistema não é tendencioso nos julgamentos, pois não apresenta valores muito altos ou muito baixos de confiabilidade. A tabela 5.1 apresenta as variáveis de entrada e saída do controlador *Características Operacionais*.

Tabela 5.1 – Índice de confiabilidade devido a características operacionais

Conjunto	Variáveis de entrada				Saída	
	kVA/km de rede	TME	MWh/UC	AL rural	Equipes	Indicador Características Operacionais
'1'	278,30	56,87	0,07	0,05	7,00	0,71
'2'	49,69	168,11	0,17	0,40	7,00	0,54
'3'	242,16	50,46	0,10	0,18	4,00	0,72
'4'	36,33	200,10	0,28	0,67	0,00	0,09
'5'	586,48	36,21	0,07	0,00	13,00	0,72
'6'	270,96	64,44	0,08	0,06	0,00	0,43
'7'	73,65	48,59	0,10	0,00	12,00	0,73
'8'	27,16	96,03	0,13	0,74	2,00	0,43
'9'	40,28	222,03	0,10	0,61	20,00	0,31
'10'	150,78	191,84	1,74	0,14	0,00	0,30
'11'	12,70	208,11	0,07	0,86	0,00	0,08
'12'	278,34	37,84	0,12	0,00	1,00	0,53
'13'	43,31	206,89	1,11	0,72	2,00	0,29
'14'	174,90	45,60	0,11	0,25	0,00	0,50
'15'	365,55	61,14	0,35	0,18	3,00	0,71
'16'	49,26	231,31	1,11	0,50	2,00	0,29
'17'	40,23	80,61	0,29	0,48	9,00	0,71
'18'	315,05	75,64	0,30	0,23	0,00	0,35
'19'	22,98	258,55	0,22	0,48	6,00	0,31
'20'	131,49	88,03	0,10	0,45	18,00	0,92
'21'	66,63	92,92	0,25	0,69	8,00	0,76
'22'	47,54	62,41	0,44	0,59	15,00	0,72
'23'	119,16	49,59	0,21	0,62	17,00	0,91
'24'	94,36	53,37	1,30	0,70	9,00	0,86
'25'	30,80	201,43	0,43	0,63	4,00	0,31
'26'	291,36	58,45	0,06	0,11	9,00	0,71
'27'	786,03	34,71	0,05	0,00	47,00	0,71
'28'	52,66	92,99	0,24	0,86	4,00	0,41
'29'	45,54	106,69	0,57	0,96	2,00	0,29
'30'	213,49	51,97	0,03	0,26	18,00	0,72
'31'	1790,56	97,74	0,12	0,00	13,00	0,69

Conjunto	Variáveis de entrada				Saída	
	kVA/km de rede	TME	MWh/UC	AL rural	Equipes	Indicador Características Operacionais
'32'	1379,08	49,73	0,18	0,00	26,00	0,72
'33'	826,69	52,59	0,06	0,00	13,00	0,72
'34'	223,71	68,98	0,05	0,72	38,00	0,70
'35'	655,63	70,40	0,07	0,00	2,00	0,42
'36'	2414,83	55,45	1,16	0,00	0,00	0,46
'37'	2151,82	53,81	0,25	0,00	1,00	0,47
'38'	1068,67	49,38	0,11	0,00	3,00	0,50
'39'	1318,02	79,36	0,04	0,00	0,00	0,32
'40'	425,96	88,79	0,07	0,00	7,00	0,71
'41'	1207,13	63,89	0,09	0,00	0,00	0,45
'42'	72,32	50,53	0,26	1,00	0,00	0,26
'43'	434,93	37,64	0,07	0,33	17,00	0,74
'44'	1711,92	41,64	0,28	0,00	3,00	0,52
'45'	188,23	71,87	0,22	0,46	1,00	0,45
'46'	100,83	57,89	0,20	0,58	14,00	0,91
'47'	83,99	78,54	0,18	0,72	6,00	0,64
'48'	41,91	159,12	0,17	0,93	6,00	0,54
'49'	54,48	78,63	0,17	0,60	4,00	0,51
'50'	168,49	55,98	0,10	0,41	11,00	0,80
'51'	368,77	42,58	0,04	0,00	11,00	0,74
'52'	21,76	377,72	0,21	0,75	11,00	0,31
'53'	179,30	52,22	0,55	0,38	2,00	0,58
'54'	44,95	184,85	0,20	0,73	12,00	0,45
'55'	159,60	66,83	0,05	0,41	11,00	0,85
'56'	359,59	52,76	0,07	0,00	1,00	0,49

O que se pode observar a partir da tabela 5.1 é que há um grande número de conjuntos que não possui equipes de manutenção, fato que influenciou na definição de índices de confiabilidade mais baixos. A localização das equipes é definida por coordenadas geográficas, ou seja, por mais que estejam distribuídas dentro da área do conjunto e próximas a fronteiras entre conjuntos, elas nunca pertencerão aos dois. Nesse caso, o sistema de avaliação considera que a situação em que o conjunto não possui equipes de manutenção não é uma situação adequada, reduzindo a confiabilidade do conjunto. Apesar de esse não ser um julgamento totalmente apropriado, considera-se que o ideal fosse que cada conjunto possuísse ao menos uma equipe em sua área de atendimento. Nesse aspecto, é possível citar o conjunto 4, o qual não apresenta equipes disponíveis. Associado a essa

característica, está o fato de o conjunto ser caracterizado como *Misto*, ou seja, possui entre 40 e 60% dos alimentadores em áreas rurais, além de apresentar um *Tempo Médio de Execução de Serviço* de 200 minutos. Essas características contribuíram para que o indicador definido pelo sistema fosse de apenas 0,08.

Outra variável que influenciou bastante nos índices de confiabilidade foi a variável *Percentual de Alimentadores Rurais*. De forma geral, conjuntos que apresentam maior percentual de alimentadores em áreas rurais, tendem a apresentar mais problemas de continuidade de fornecimento, o que deve refletir em baixos índices de confiabilidade. Esse fato também é observado nos resultados apresentados na tabela 5.1.

Outras relações interessantes podem ser feitas. O conjunto 6, por exemplo, teve um índice de confiabilidade de 0,43, um valor relativamente baixo. Esse índice tem relação com as variáveis: *Potência instalada por quilômetro de rede* e *Consumo Médio Mensal*. Apesar de apresentar em torno 270 kVA/km de rede, o que caracteriza o conjunto como potência concentrada, o consumo médio é baixo. Essa caracterização se dá devido à sazonalidade de consumo, pois esse é um conjunto localizado na Região Litorânea. Durante grande parte do ano as redes tem fator de utilização muito baixo, gerando poucas falhas e conseqüentemente e menos manutenção. Já no verão há um aumento considerável no consumo das redes, o que aumenta consideravelmente o número de falhas. Já o conjunto 19, por exemplo, apresentou um índice de confiabilidade de 0,31, o qual também é baixo. Nesse caso, a variável que mais influencia é o *TME*. No caso desse conjunto, registrou-se uma média de 258,55 minutos na execução de serviços de reparo, ou seja, em geral os reparos nas redes são muito demorados, o que pode indicar problemas em relação ao treinamento das equipes de manutenção. Outros fatores que contribuíram para um baixo índice de confiabilidade foram a *Potência instalada por quilômetro de rede* e *Percentual de alimentadores rurais*. Com 48% de redes rurais, o conjunto é classificado como misto, porém apresenta potência instalada considerada dispersa. Nesse caso, provavelmente o conjunto é caracterizado por redes mais extensas, fato que influencia nos indicadores de continuidade.

Em geral, é possível perceber que o índice de confiabilidade obtido na saída do controlador reflete o desempenho em relação às variáveis de entrada. Esse

indicador tem importância significativa, não só dentro do sistema de avaliação de desempenho, mas também para a distribuidora de energia. Além de ser uma variável de entrada do nível principal do sistema de avaliação, é referência muito importante, pois pode servir como norteador para elaboração de estratégias da concessionária visando melhoria de desempenho. A figura 5.6 apresenta a relação entre o índice de confiabilidade e o desempenho do indicador DEC para o ano de 2010.

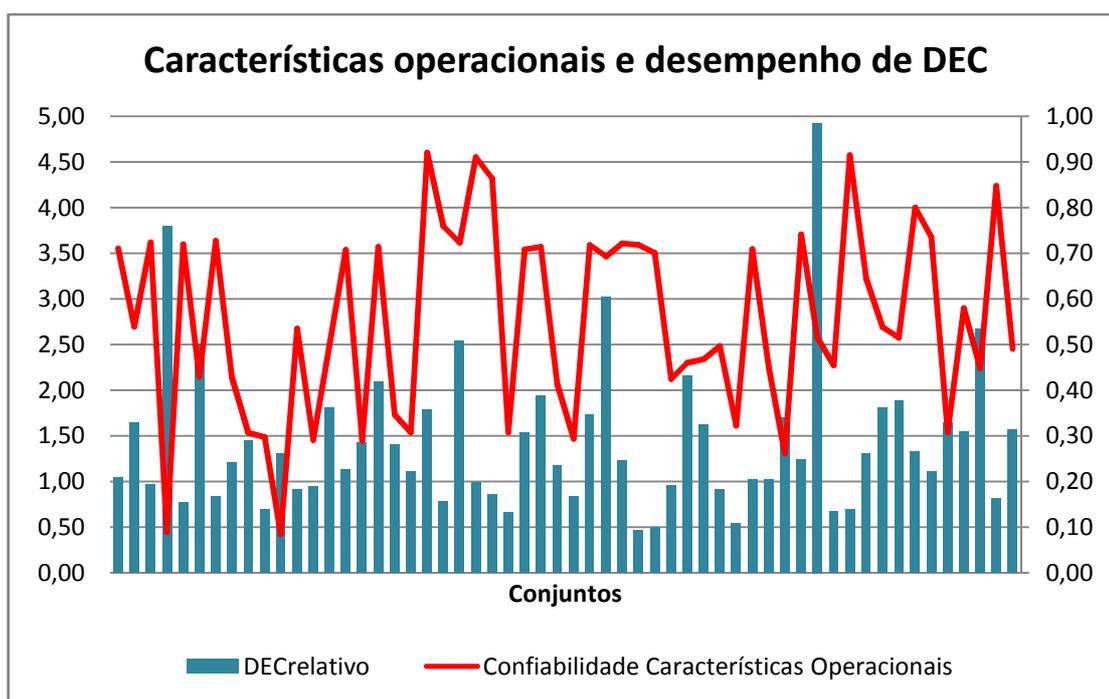


Figura 5.6 – Relação entre desempenho do indicador DEC e o índice de confiabilidade devido a características operacionais.

No gráfico da figura 5.6, a curva vermelha representa o índice de confiabilidade devido a características operacionais, enquanto as barras azuis representam o $DEC_{relativo}$ dos conjuntos de consumidores avaliados. É possível notar que existe uma relação estreita entre o índice de confiabilidade e o desempenho do indicador DEC. Em geral, os conjuntos que apresentaram índices de confiabilidade mais baixos, apresentaram desempenho acima do limite, ou seja, valores maiores que 1. Da mesma forma, conjuntos que apresentaram um índice de confiabilidade elevado, apresentaram um bom desempenho, ou seja, muito próximo do limite ou abaixo desse. Essa relação é importante, pois confirma a estratégia estabelecida na definição das regras dos controladores fuzzy no nível principal, em que a variável *Confiabilidade devido a características operacionais* tem um peso maior sobre as

demais variáveis para o controlador *Limite de DEC*. Todavia, essa relação não é direta. É necessário considerar que os índices gerados a partir dos controladores *Padrão de Rede* e *Influência do Meio* também influenciam no desempenho do indicador DEC, conforme é analisado no item 5.3.

5.2.2 Padrão de Rede

A simulação para o controlador *Padrão de Rede* seguiu os mesmos procedimentos aplicados ao controlador *Características Operacionais*. A figura 5.7 apresenta o histograma das saídas do controlador. O eixo das abcissas corresponde ao desempenho apresentado pelos conjuntos, o qual varia entre 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor. Já o eixo das ordenadas corresponde à quantidade de conjuntos que apresentaram resultado em cada faixa de valores.

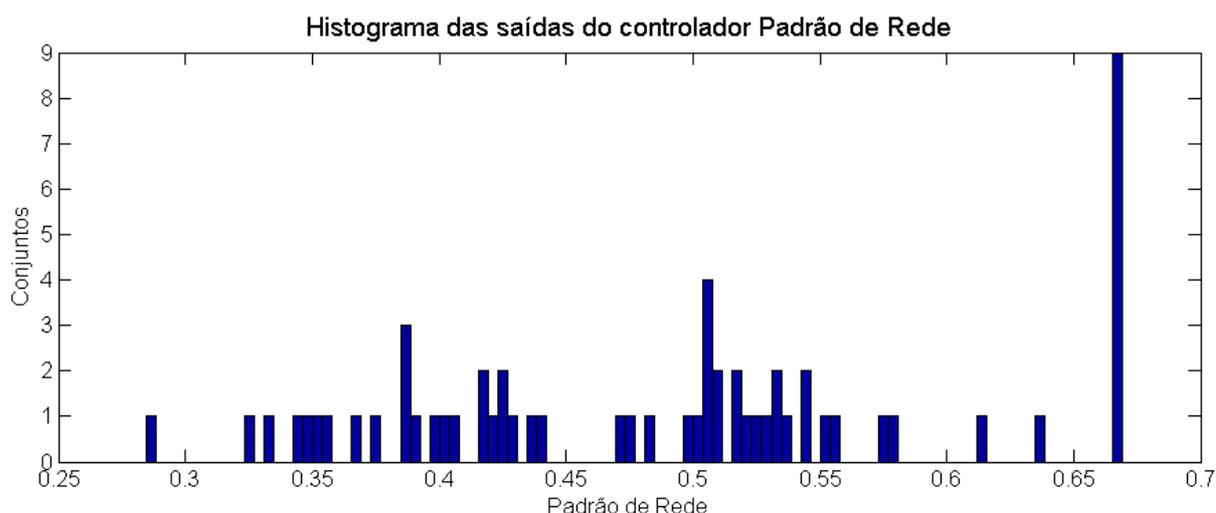


Figura 5.7 – Histograma das saídas do controlador Padrão de Rede

Como se pode observar, esse controlador também teve resultados variando entre 0,3 e 0,7, fato que indica que não há uma tendência a índices extremos – ou muito altos ou muito baixos. Há uma concentração de valores entre 0,5 e 0,7, indicando que, de forma geral, o padrão de rede dos conjuntos foi considerado bom. A tabela 5.2 apresenta as variáveis de entrada e a saída do controlador *Padrão de Rede*.

Tabela 5.2 – Indicador Padrão de Rede

Conjunto	Variáveis de Entrada			Saída
	Dispositivos/ km	ER/AL	λ componentes de rede	Padrão de rede
'1'	1,61	41,40	14,00	0,54
'2'	0,56	239,49	1,24	0,35
'3'	1,54	18,80	6,94	0,53
'4'	0,42	195,41	1,18	0,42
'5'	1,76	15,52	9,98	0,55
'6'	1,68	20,64	13,95	0,54
'7'	0,36	110,62	1,59	0,40
'8'	0,36	304,89	0,54	0,38
'9'	0,22	389,25	0,85	0,33
'10'	0,31	55,48	1,89	0,39
'11'	0,26	719,85	0,42	0,37
'12'	1,73	13,44	10,12	0,55
'13'	0,41	164,53	0,72	0,51
'14'	1,32	35,05	5,96	0,51
'15'	1,29	30,11	3,89	0,50
'16'	0,40	366,33	0,98	0,35
'17'	0,33	180,53	0,56	0,53
'18'	0,96	38,99	5,46	0,47
'19'	0,27	219,33	0,42	0,51
'20'	0,67	70,40	3,19	0,42
'21'	0,31	88,56	1,73	0,39
'22'	0,91	92,59	0,74	0,51
'23'	0,77	66,94	3,22	0,44
'24'	0,44	69,38	2,23	0,42
'25'	0,25	313,62	0,75	0,34
'26'	1,02	24,40	10,02	0,48
'27'	1,49	17,48	12,28	0,52
'28'	0,37	175,27	1,09	0,44
'29'	0,31	285,66	0,97	0,33
'30'	1,16	24,07	25,35	0,50
'31'	3,89	9,23	5,00	0,67
'32'	3,43	11,38	6,60	0,67
'33'	2,73	15,33	8,36	0,67
'34'	1,25	64,90	4,75	0,48
'35'	2,35	17,32	15,43	0,64
'36'	5,09	3,47	4,41	0,67
'37'	6,21	5,88	5,50	0,67
'38'	3,87	7,89	10,82	0,67
'39'	3,29	9,90	3,25	0,67
'40'	1,93	12,95	13,77	0,57
'41'	3,40	14,36	8,86	0,67

Conjunto	Variáveis de Entrada			Saída
	Dispositivos/ km	ER/AL	λ componentes de rede	Padrão de rede
'42'	1,33	102,05	2,09	0,51
'43'	1,97	16,08	12,25	0,58
'44'	3,37	8,04	9,33	0,67
'45'	1,06	78,54	0,76	0,53
'46'	0,47	77,65	2,93	0,41
'47'	0,57	177,19	1,71	0,42
'48'	0,27	270,00	1,24	0,28
'49'	0,57	139,52	2,25	0,42
'50'	0,72	64,70	3,06	0,43
'51'	1,47	21,60	16,28	0,52
'52'	0,36	423,77	0,39	0,39
'53'	1,43	37,52	4,88	0,52
'54'	0,26	288,73	0,62	0,36
'55'	0,80	86,83	6,30	0,39
'56'	1,43	24,90	20,33	0,52

De forma geral, é mais fácil de analisar as relações das variáveis de entrada com o valor de saída do controlador *Padrão de Rede* devido ao número de entradas. Conforme pode ser observado na tabela 5.2, existem padrões distintos de estrutura das redes, principalmente em relação à *Extensão Média de Alimentadores*. Há conjuntos que apresentam alimentadores curtos, como é o caso do conjunto 12, o qual apresenta uma média de 13,44 km de extensão, enquanto outros apresentam alimentadores muito longos, tais como o conjunto 11, que apresenta uma média de 719,85 km. Ao associar essa característica à variável *Dispositivos de Seccionamento por extensão de rede*, pode-se observar que, em geral, conjuntos que apresentam alimentadores mais extensos, apresentam menos dispositivos de manobra. Sob o ponto de vista da confiabilidade, esse padrão não é desejado, pois, além de serem extensas, essas redes não apresentam muitas possibilidades de manobras de carga. Assim, em caso de interrupção de fornecimento de energia, um número muito maior de consumidores ficará desabastecido. Essas características são apresentadas pelos conjuntos: 2e48, por exemplo. Para o conjunto 2 foi atribuído um índice de 0,35 para o padrão de rede, enquanto para o conjunto 48 foi atribuído um índice de 0,28, valor mais baixo atribuído.

Outra questão interessante que pode ser observada, diz respeito à *Taxa de Falha devido a componentes de rede*. Em muitos casos, as maiores taxas de falhas

apresentadas estão associadas a conjuntos que apresentam alimentadores mais curtos. Essa característica é observada nos conjuntos que atendem a região de Porto Alegre. Para esses conjuntos, a elevada taxa de falhas pode ser atribuída ao fato de que esses conjuntos caracterizam uma região de alta concentração de consumidores, ou seja, há um número muito maior de transformadores, isoladores e pontos de conexão com a rede, por exemplo. Para muitos desses conjuntos, a elevada taxa de falha não determinou um baixo padrão de rede, principalmente por esses conjuntos serem flexíveis. Em outras palavras, significa que apesar de ocorrer um maior número de falhas nesses conjuntos, a rede está preparada para que essas sejam isoladas e atinjam o menor número de consumidores possível.

De forma geral, os resultados apresentados para o padrão de rede refletem bem a caracterização apresentada pelas variáveis de entrada. Esse valor de saída é muito importante, pois além de ser variável de entrada do nível principal do sistema de avaliação, ele pode servir como um fator norteador nas ações de planejamento e operação da manutenção da rede, indicando não só regiões prioritárias, mas também o tipo de serviços que podem ser realizados visando à melhoria de desempenho dos conjuntos de consumidores.

A figura 5.8 apresenta a relação entre o padrão de rede e o desempenho do indicador FEC para o ano de 2010.

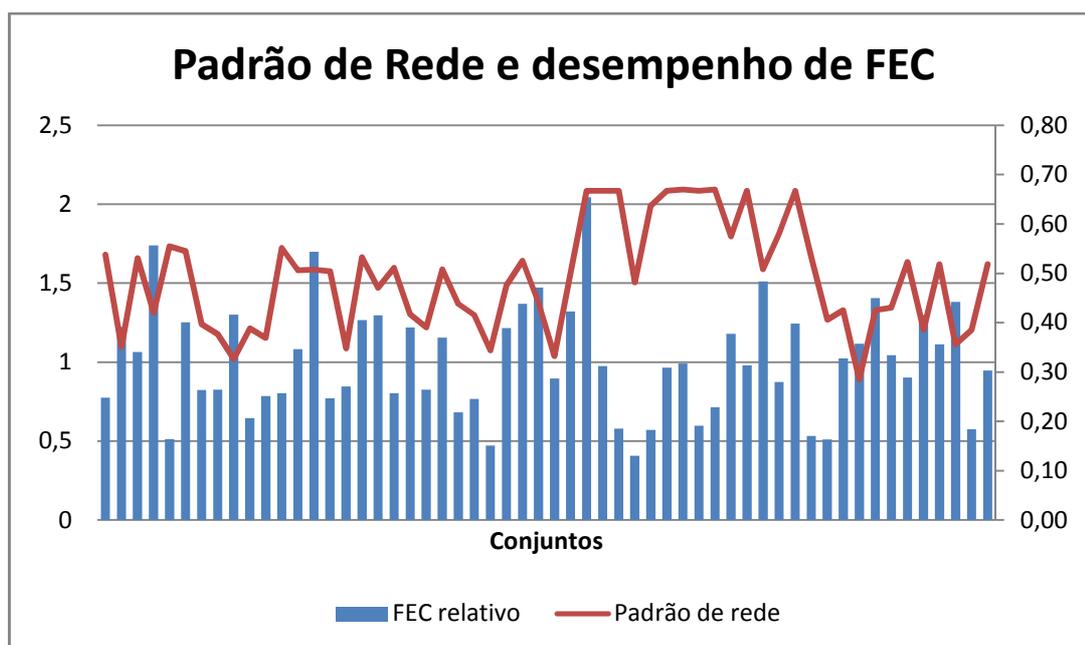


Figura 5.8 – Relação entre o desempenho do indicador FEC e o Padrão de Rede.

No gráfico da figura 5.8, a curva vermelha do representa o padrão de rede, enquanto as barras azuis representam o $FEC_{relativo}$ dos conjuntos de consumidores avaliados. É possível observar que, de forma geral, há uma relação entre o padrão e o desempenho, porém ela não é direta. Grande parte dos conjuntos que apresentaram um baixo padrão de rede apresentou desempenho acima do limite estabelecido pela ANEEL para o indicador FEC. Por outro lado, parte dos conjuntos que apresentaram um padrão de desempenho mais elevado também apresentaram desempenho acima do limite estabelecido pela ANEEL para o indicador FEC. Todavia, deve-se considerar que o indicador FEC é influenciado por características avaliadas nos outros controladores, conforme já mencionado.

5.2.3 Suscetibilidade ao meio

Seguindo o mesmo padrão das demais, os valores de entrada das variáveis do controlador *Influência do Meio* foram organizados para que a simulação fosse realizada. O histograma da figura 5.9 apresenta a distribuição dos valores de saída. O eixo das abcissas corresponde ao desempenho apresentado pelos conjuntos, o qual varia entre 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor. Já o eixo das ordenadas corresponde à quantidade de conjuntos que apresentaram resultado em cada faixa de valores.

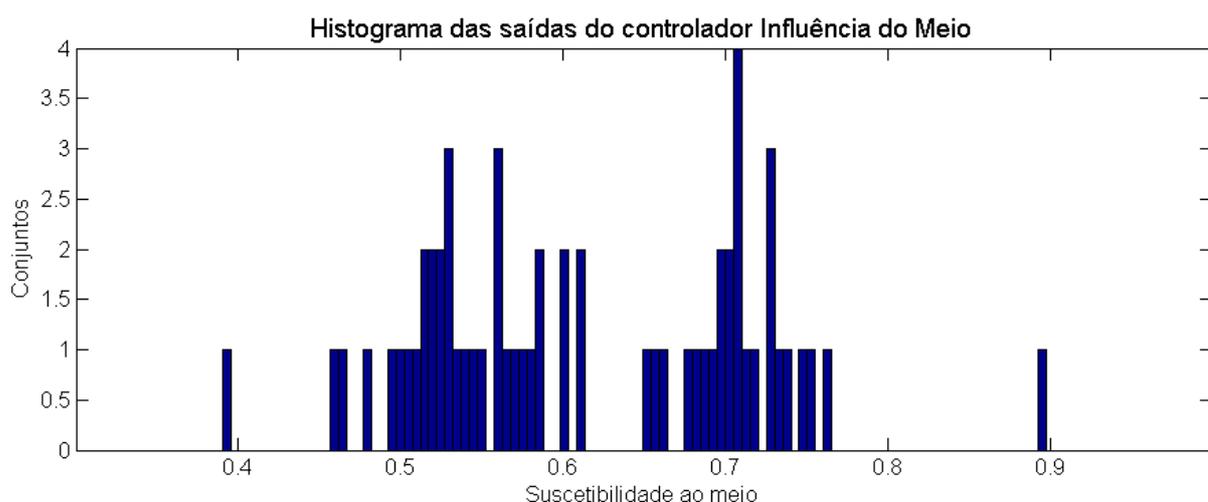


Figura 5.9 – Histograma da saída do controlador Influência do Meio.

As saídas do controlador *Influência do Meio* apresentaram resultados variando entre aproximadamente 0,4 até aproximadamente 0,9, não apresentando

tendência a valores extremos. Como se pode observar, há uma concentração maior dos resultados entre 0,5 e 0,75, indicando que, de modo geral, há conjuntos cuja influência do meio é considerável. A tabela 5.3 apresenta as variáveis de entrada e saída do controlador *Influência do Meio*.

Tabela 5.3 – Indicador Influência do Meio

Conjunto	Variáveis de entrada				Saída
	TMD	λ Descargas atmosféricas	λ Vegetação	Clima adverso	Indicador Influência do Meio
'1'	23,89	0,0403	0,8736	0,1255	0,58
'2'	115,12	0,1284	0,4374	0,1957	0,67
'3'	37,46	0,0798	0,2792	0,1470	0,47
'4'	77,27	0,1416	0,0401	0,2097	0,52
'5'	49,30	0,1104	0,4878	0,1887	0,63
'6'	72,46	0,1163	0,4942	0,2376	0,68
'7'	24,05	0,0226	0,1251	0,0803	0,38
'8'	112,40	0,1141	0,0459	0,0968	0,52
'9'	161,15	0,1248	0,4015	0,1929	0,67
'10'	126,35	0,1127	0,3650	0,1591	0,67
'11'	58,10	0,1169	0,0701	0,3014	0,52
'12'	52,84	0,1302	0,5766	0,1935	0,67
'13'	73,93	0,0871	0,1884	0,1398	0,49
'14'	25,81	0,1641	1,0342	0,1590	0,60
'15'	45,48	0,0864	0,5912	0,1845	0,67
'16'	93,02	0,0655	0,2730	0,2042	0,67
'17'	114,61	0,0720	0,0319	0,1746	0,46
'18'	35,54	0,0598	0,3847	0,1700	0,48
'19'	98,23	0,1425	0,2200	0,2121	0,67
'20'	41,10	0,0646	0,4868	0,1963	0,63
'21'	63,11	0,0489	0,0621	0,1940	0,43
'22'	125,33	0,0814	0,0898	0,1994	0,49
'23'	38,40	0,0747	0,5207	0,1584	0,67
'24'	57,17	0,0703	0,1513	0,1644	0,46
'25'	61,16	0,1993	0,0829	0,2726	0,55
'26'	20,38	0,0637	2,5041	0,1102	0,55
'27'	16,93	0,0660	1,5004	0,1157	0,52
'28'	40,89	0,2038	0,3790	0,1816	0,67
'29'	41,81	0,0866	0,2993	0,1518	0,48
'30'	55,82	0,0519	0,1921	0,2348	0,46
'31'	25,92	0,0197	0,8272	0,0615	0,53
'32'	25,17	0,0000	1,3963	0,0613	0,53
'33'	28,63	0,0186	1,1367	0,0750	0,57
'34'	27,16	0,0096	0,7608	0,0806	0,59
'35'	25,76	0,0722	1,0899	0,0952	0,60

Conjunto	Variáveis de entrada				Saída
	TMD	λ Descargas atmosféricas	λ Vegetação	Clima adverso	Indicador Influência do Meio
'36'	27,61	0,0000	1,0557	0,0395	0,47
'37'	28,25	0,0131	0,7196	0,0541	0,51
'38'	27,39	0,0528	1,7420	0,0589	0,52
'39'	26,65	0,0016	0,5048	0,0555	0,51
'40'	21,46	0,0309	1,0040	0,0687	0,55
'41'	25,88	0,0220	0,7662	0,0652	0,54
'42'	38,60	0,2058	0,3944	0,1942	0,67
'43'	19,58	0,1451	0,8187	0,1386	0,56
'44'	18,56	0,0710	0,6394	0,1376	0,53
'45'	45,29	0,0743	0,0870	0,1518	0,47
'46'	49,09	0,0665	0,1181	0,1240	0,46
'47'	67,12	0,0745	0,4052	0,1917	0,51
'48'	151,01	0,1215	0,1911	0,2892	0,71
'49'	69,99	0,0387	0,8959	0,1885	0,67
'50'	45,82	0,0232	0,4096	0,1462	0,51
'51'	75,17	0,0514	0,4423	0,2836	0,63
'52'	161,82	0,1548	0,0354	0,1031	0,58
'53'	48,00	0,0800	0,8796	0,1448	0,67
'54'	91,00	0,1489	0,5805	0,4069	0,88
'55'	31,91	0,0446	0,8955	0,1278	0,67
'56'	25,75	0,0402	1,8175	0,1485	0,60

A partir dos resultados apresentados na tabela 5.3 é possível afirmar que grande parte dos conjuntos está classificada como *Moderadamente Suscetível* ou *Suscetível* ao meio, se considerarmos os subconjuntos da variável de saída. De modo geral, observa-se que a variável *TMD* influencia nesses resultados, uma vez que o valor médio para essa variável é de 59,71 minutos – valor considerado elevado. Para essa variável as menores médias são apresentadas em conjuntos da região metropolitana, os quais são caracterizados como área urbana. Em relação a essa variável é possível citar o conjunto 9, cuja média de tempo de deslocamento de equipes é 161,15 minutos – segunda maior média. A esse conjunto foi atribuído um índice de suscetibilidade de 0,67, pois associado ao *TMD* está o fato de aproximadamente 20% das falhas ocorrerem em condições climáticas desfavoráveis, além de apresentar uma *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas* de 0,1248 – valor acima da média. O município de Camaquã figurou, em 2009, como a 19ª cidade gaúcha com maior índice de descargas atmosféricas (INPE, 2012), fato que

pode ser relacionado às variáveis: *Clima Adverso* e *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas*. O conjunto ao qual foi atribuído o menor índice de suscetibilidade ao meio foi o conjunto 7, com um índice de 0,38. O conjunto apresentou baixas taxas de falhas, tanto relacionadas a descargas atmosféricas quanto relacionadas à vegetação, bem como um percentual baixo de ocorrências em clima desfavorável. Ao comparar as características desse conjunto com as do conjunto 8, cujo índice obtido foi de 0,52, observa-se que a maior diferença é apresentada na variável *TMD*. O conjunto 8 apresenta um tempo médio de deslocamento muito maior que o conjunto 7. Essa característica está relacionada ao fato do conjunto 8 atender, predominantemente áreas rurais, as quais apresentam piores condições de acesso, tornando esse conjunto mais suscetível ao meio.

De forma geral, considera-se que o controlador *Influencia do Meio* apresentou valores de saída consistentes, traduzindo coerentemente as variáveis de entrada em um índice que indica a suscetibilidade das redes de cada conjunto ao meio ambiente. Esse índice também é muito importante, pois agrega ao sistema de avaliação as características não gerenciáveis, as quais influenciam no desempenho de ambos indicadores – DEC e FEC. A figura 5.10 apresenta a relação entre *Suscetibilidade ao Meio* e o desempenho dos indicadores DEC e FEC para o ano de 2010.

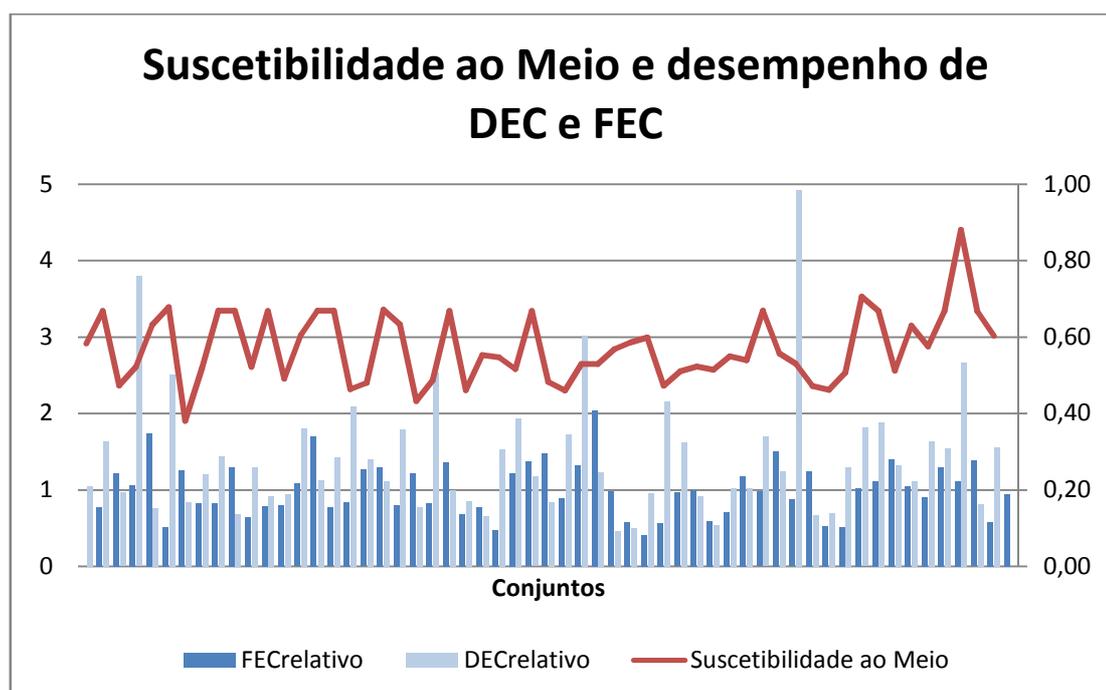


Figura 5.10 – Relação entre os desempenhos de DEC e FEC e a Suscetibilidade ao Meio.

No gráfico da figura 5.10, as barras de cor azul claro correspondem ao desempenho do indicador DEC, as barras de cor azul escuro correspondem ao desempenho do indicador FEC, enquanto a curva de cor vermelha corresponde ao índice de suscetibilidade ao meio. A relação entre o índice e o desempenho nos indicadores é notada principalmente para os conjuntos cujo índice de suscetibilidade foi elevado. Nesses casos, ao menos um dos indicadores teve o limite ultrapassado. Essa relação é importante, pois mostra que a suscetibilidade ao meio influencia na confiabilidade e deve ser considerada na definição dos limites de desempenho. Além disso, o índice pode servir como elemento norteador de atividades de planejamento, permitindo que sejam definidas estratégias que visem à melhoria da confiabilidade do sistema.

5.3 Nível de avaliação principal

A simulação no nível principal do sistema de avaliação ocorreu de forma semelhante ao nível secundário, pois os controladores *Limite de DEC* e *Limite de FEC* tem estrutura análoga aos controladores *Características Operacionais*, *Padrão de Rede* e *Influência do Meio*.

A figura 5.11 apresenta o histograma das saídas do controlador *Limite de DEC*.

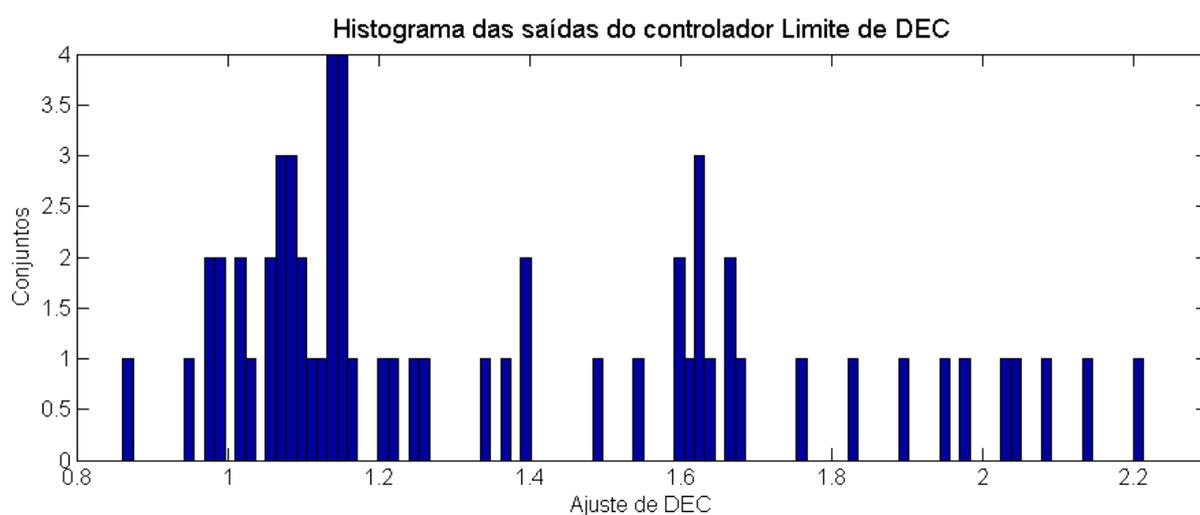


Figura 5.11 – Histograma das saídas do controlador *Limite de DEC*.

Cabe ressaltar que a saída do controlador *Limite de DEC* é, na verdade, um coeficiente de ajuste a ser aplicado ao limite de desempenho definido para cada conjunto. Esse coeficiente pode variar no intervalo de 0 a 3, conforme estabelecido no item 4.4.2.2. Dessa forma, ao analisar a saída do controlador, observa-se que os valores de saída variam entre aproximadamente 0,8 e 2,2. Analisando apenas a distribuição dos resultados, pode-se afirmar que, de modo geral, o controlador não apresenta tendências para resultados extremos, o que é desejado. Considerando os resultados, pode-se perceber que, para a maioria dos conjuntos avaliados, aproximadamente 89,3%, o controlador estabeleceu coeficientes de ajustes maiores do que 1. Isso significa que o sistema de avaliação definiu limites de desempenho para o indicador DEC maiores do que os limites definidos pela ANEEL, para grande parte dos conjuntos.

Antes de analisar os resultados de forma mais detalhada, é necessário fazer algumas ponderações. Ao analisar o desempenho da distribuidora a partir dos gráficos das figuras 5.3 e 5.4, foi observado que os desempenhos dos indicadores DEC e FEC não apresentaram melhoria significativa nos últimos anos, ao mesmo tempo em que os limites definidos pela ANEEL foram se tornando mais rígidos, ou seja, foram reduzidos.

Na metodologia de definição de limites de desempenho aplicada pela ANEEL, além de serem consideradas menos variáveis no processo de *clusterização*, é utilizado um processo de transformação logarítmica no processamento dos dados (SPERANDIO, 2004; ANEEL, 2010b). Esse processo tem o intuito de reduzir a dispersão das variáveis e facilitar o agrupamento dos conjuntos para posterior definição dos limites. Todavia, ao realizar esse processo, introduzem-se erros na classificação, os quais acabam refletindo em limites incoerentes atribuídos aos conjuntos. Nesse sentido, já era esperado que, ao avaliar cada conjunto isoladamente, seriam definidos limites de desempenho diferentes daqueles definidos pela ANEEL.

A tabela 5.4 apresenta as variáveis de entrada e a saída do controlador *Limite de DEC*.

Tabela 5.4 – Limite de DEC

Conjunto	Variáveis de entrada			Saída	
	DEC _{relativo}	Indicador Características Operacionais	Indicador Padrão de rede	Indicador Influência do Meio	Ajuste
'1'	1,05	0,7107	0,5372	0,5827	1,15
'2'	1,64	0,5389	0,3509	0,6682	1,67
'3'	0,96	0,7239	0,5303	0,4739	1,02
'4'	3,79	0,0887	0,4198	0,5220	2,14
'5'	0,76	0,7194	0,5542	0,6324	1,06
'6'	2,50	0,4295	0,5449	0,6779	1,95
'7'	0,84	0,7275	0,3968	0,3812	1,08
'8'	1,21	0,4288	0,3765	0,5181	1,26
'9'	1,45	0,3067	0,3259	0,6694	1,63
'10'	0,69	0,2972	0,3884	0,6689	1,62
'11'	1,30	0,0847	0,3686	0,5218	2,03
'12'	0,92	0,5346	0,5509	0,6682	1,20
'13'	0,95	0,2909	0,5056	0,4909	1,10
'14'	1,81	0,5004	0,5071	0,6045	1,60
'15'	1,13	0,7080	0,5040	0,6688	1,16
'16'	1,42	0,2891	0,3471	0,6686	1,60
'17'	2,09	0,7137	0,5324	0,4635	1,01
'18'	1,41	0,3460	0,4701	0,4803	1,37
'19'	1,11	0,3074	0,5112	0,6711	1,64
'20'	1,79	0,9200	0,4165	0,6328	0,98
'21'	0,78	0,7594	0,3903	0,4330	1,07
'22'	2,54	0,7232	0,4034	0,4869	2,05
'23'	0,99	0,9106	0,4377	0,6684	0,95
'24'	0,85	0,8637	0,4157	0,4611	0,97
'25'	0,66	0,3076	0,3434	0,5529	1,55
'26'	1,54	0,7082	0,4758	0,5474	1,12
'27'	1,94	0,7142	0,5250	0,5165	1,08
'28'	1,17	0,4133	0,4394	0,6685	1,48
'29'	0,84	0,2934	0,3321	0,4828	1,62
'30'	1,73	0,7181	0,5000	0,4602	1,06
'31'	3,02	0,6931	0,6667	0,5299	1,40
'32'	1,23	0,7218	0,6667	0,5293	1,10
'33'	0,47	0,7184	0,6667	0,5679	0,98
'34'	0,50	0,7007	0,4814	0,5861	1,00
'35'	0,96	0,4243	0,6367	0,5988	1,24
'36'	2,16	0,4601	0,6667	0,4728	1,14
'37'	1,62	0,4679	0,6693	0,5106	1,11
'38'	0,91	0,4962	0,6667	0,5230	1,08
'39'	0,54	0,3222	0,6694	0,5141	1,08
'40'	1,02	0,7094	0,5743	0,5495	1,14
'41'	1,02	0,4503	0,6667	0,5399	1,14

Conjunto	Variáveis de entrada			Saída	
	$DEC_{relativo}$	Indicador Características Operacionais	Indicador Padrão de rede	Indicador Influência do Meio	Ajuste
'42'	1,70	0,2613	0,5080	0,6692	1,76
'43'	1,24	0,7416	0,5799	0,5569	1,16
'44'	4,93	0,5152	0,6667	0,5308	1,40
'45'	0,67	0,4541	0,5325	0,4720	1,03
'46'	0,69	0,9145	0,4058	0,4616	0,86
'47'	1,30	0,6439	0,4248	0,5067	1,16
'48'	1,81	0,5375	0,2847	0,7057	1,82
'49'	1,88	0,5147	0,4248	0,6680	1,89
'50'	1,32	0,7997	0,4304	0,5123	1,14
'51'	1,11	0,7355	0,5228	0,6302	1,16
'52'	1,64	0,3084	0,3858	0,5755	1,67
'53'	1,54	0,5796	0,5181	0,6686	1,62
'54'	2,67	0,4480	0,3556	0,8801	2,21
'55'	0,82	0,8473	0,3852	0,6674	1,07
'56'	1,56	0,4901	0,5181	0,6034	1,34

Considerando os resultados apresentados, é possível notar que os ajustes definidos pelo sistema de avaliação tem uma relação com o histórico de desempenho, o qual é caracterizado pela variável de entrada $DEC_{relativo}$. Essa relação era desejada, pois ela serve como referência para definição do limite adequado ao conjunto. Porém, deve-se destacar que essa referência não tem como objetivo induzir o sistema de avaliação na definição do limite de desempenho, fazendo com que esse seja semelhante ao próprio desempenho. Na verdade, espera-se que sempre sejam definidos limites menores que o próprio desempenho, de forma que haja uma indução a melhoria. Essa característica pode ser observada, principalmente no caso dos conjuntos que apresentam desempenhos muito acima dos limites. Exemplos que podem ser citados desse caso são: o conjunto 4, cujo desempenho foi 3,79 vezes acima do limite e para o qual o sistema definiu um ajuste de 2,14; o conjunto 36, cujo desempenho foi 2,16 vezes acima do limite e para o qual o sistema definiu um ajuste de 1,14; e o conjunto 17, cujo desempenho foi 2,09 vezes acima do limite e, apesar disso, o sistema definiu um índice de ajuste de 1,01. Esse último caso é interessante, pois o sistema considerou que o limite definido pela ANEEL para o conjunto 17 é adequado, pois o ajuste proposto foi de apenas 1%. A definição desse índice se deve as demais características avaliadas. O conjunto 17, apesar de apresentar um desempenho acima do limite, apresenta uma boa

Confiabilidade devido a características operacionais, um bom *Padrão de Rede* e uma moderada *Influência do Meio*.

Ainda sobre a influência da variável $DEC_{relativo}$, é possível citar os conjuntos 9 e 10, cujos $DEC_{relativo}$ são 1,45 e 0,65, respectivamente. Ambos apresentam características semelhantes para os indicadores *Características Operacionais* e *Influência do Meio*, enquanto o conjunto 9 apresenta o Indicador *Padrão de Rede* mais baixo. Nesse caso, para ambos os conjuntos o sistema determinou um ajuste maior do que 1 para o limite de DEC, mesmo considerando que o conjunto 10 tenha apresentado desempenho abaixo do limite estabelecido pela ANEEL.

O conjunto que apresentou o menor coeficiente de ajuste foi o conjunto 46, para o qual o sistema atribuiu um ajuste de 0,86. Nesse caso o limite definido pela ANEEL poderia ser reduzido. Essa definição é influenciada principalmente pelo elevado índice de confiabilidade devido a características operacionais (0,9145) e pelo próprio histórico de desempenho, o qual se apresentou abaixo do limite definido pela ANEEL.

Assim, de forma geral, considera-se que o sistema multivariável proposto obteve coerência nas avaliações, definindo ajustes de forma adequar os limites dos conjuntos, tornando-os mais coerentes a realidade de cada conjunto.

A tabela 5.5 apresenta desempenho de DEC dos conjuntos da CEEE-D para 2011, os limites definidos pela ANEEL para o ano de 2011 e os limites definidos pelo sistema de avaliação proposto para os conjuntos avaliados.

Tabela 5.5 – Desempenho de DEC para o ano de 2011.

CONJUNTO	Nº DE CONSUMIDORES	DEC	DEC Padrão	DEC Fuzzy
1	42488	28,19	18	22,98
2	15901	28,55	23	43,52
3	13598	11,37	14	11,23
5	33988	6,75	10	11,68
6	21007	12,33	9	21,46
7	24685	7,42	10	11,93
8	23769	13,62	18	25,16
9	31152	34,75	26	50,38
10	6166	24,02	26	50,33
12	11128	10,23	10	12,00
13	3988	21,58	21	34,02

CONJUNTO	Nº DE CONSUMIDORES	DEC	DEC Padrão	DEC Fuzzy
14	16614	19,55	11	25,65
15	11715	16,85	11	12,73
16	4004	24,46	16	33,58
17	14430	12,57	17	11,15
18	17157	28,4	24	27,47
19	8038	17,94	15	24,55
20	31904	32,06	20	20,66
21	11243	21,13	25	26,64
22	9085	42,21	30	37,80
23	18200	7,23	11	10,45
24	6151	25,76	23	5,84
25	7135	34,2	35	23,19
26	40897	40,38	30	28,06
27	69942	50,02	34	38,99
28	17473	10,51	11	16,33
29	13417	8,34	11	17,78
30	37834	19,28	15	32,79
32	30644	6,45	9	17,62
33	63678	13,81	10	10,75
34	54567	17,95	11	10,95
35	41414	13,2	11	13,69
36	4088	5,55	4	12,50
37	26505	4,97	7	12,24
38	41403	19,45	9	4,31
40	39103	10,03	15	11,41
42	11170	33,86	25	45,74
43	31176	11,16	13	17,34
44	19255	7,51	11	15,39
45	12459	36,38	35	47,60
46	15875	33,13	35	39,63
47	19365	18,57	18	23,15
48	16715	48,98	45	56,50
49	14669	23,6	21	39,73
50	24531	12,82	10	12,49
51	47877	14,65	11	12,80
52	10052	30,45	26	51,78
53	5757	9,16	10	16,19
54	16468	33,48	48	79,71
55	50421	35,55	41	43,74
56	28658	18,04	14	21,36

A tabela 5.5 apresenta dados de apenas 51 conjuntos, pois entre 2010 e 2011 a CEEE-D reconfigurou alguns conjuntos visando atender novos critérios

estabelecidos no PRODIST. Por isso, são considerados apenas os conjuntos cuja configuração permaneceu a mesma.

Considerando os limites estabelecidos pela ANEEL, a concessionária apresentou aproximadamente 63% dos conjuntos com limites transgredidos. Já considerando os limites do sistema de avaliação, ter-se-ia apenas aproximadamente 35% dos conjuntos com limites de desempenho transgredidos. Essa redução era esperada, pois, de forma geral, os limites estabelecidos pelo sistema de avaliação foram maiores que os limites estabelecidos pela ANEEL. Todavia, acredita-se que os limites estabelecidos pelo sistema de avaliação são mais coerentes, refletindo melhor as características específicas de cada conjunto.

O limite global de DEC da concessionária é calculado através da equação (5.1), (ANEEL, 2012a):

$$DEC_{anual} = \frac{\sum_{i=1}^M DEC_{anual_i} \cdot Cc_{med_anual_i}}{\sum_{i=1}^M Cc_{med_anual_i}}, \quad (5.1)$$

em que:

DEC_{anual_i} é o valor do DEC, anual do conjunto i , com 2 (duas) casas decimais;

$Cc_{med_anual_i}$ é a média aritmética do número de unidades consumidoras faturadas e atendidas em BT ou MT do conjunto i , com 2 (duas) casas decimais, para o período anual;

DEC_{anual} é o valor anual global do DEC, no ano de referência, com 2 (duas) casas decimais;

M é o número total de conjuntos considerados para o cálculo do indicador global.

Para o ano de 2011, a CEEE tinha como limite global de DEC um total de 16,04 horas. Considerando as metas definidas pelo sistema de avaliação proposto e a equação (5.2), chega-se a uma meta global de 23,13 horas. Considerando que o desempenho global para o indicador DEC da CEEE-D em 2011 foi de 19 horas, pode-se afirmar que os limites de DEC propostos pelo sistema de avaliação traduzem mais apropriadamente as características dos conjuntos da concessionária.

O controlador *Limite de FEC* é avaliado de forma análoga. A figura 5.12 apresenta o histograma das saídas do controlador. O eixo das abcissas corresponde ao desempenho apresentado pelos conjuntos, o qual varia entre 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor. Já o eixo das ordenadas corresponde à quantidade de conjuntos que apresentaram resultado em cada faixa de valores.

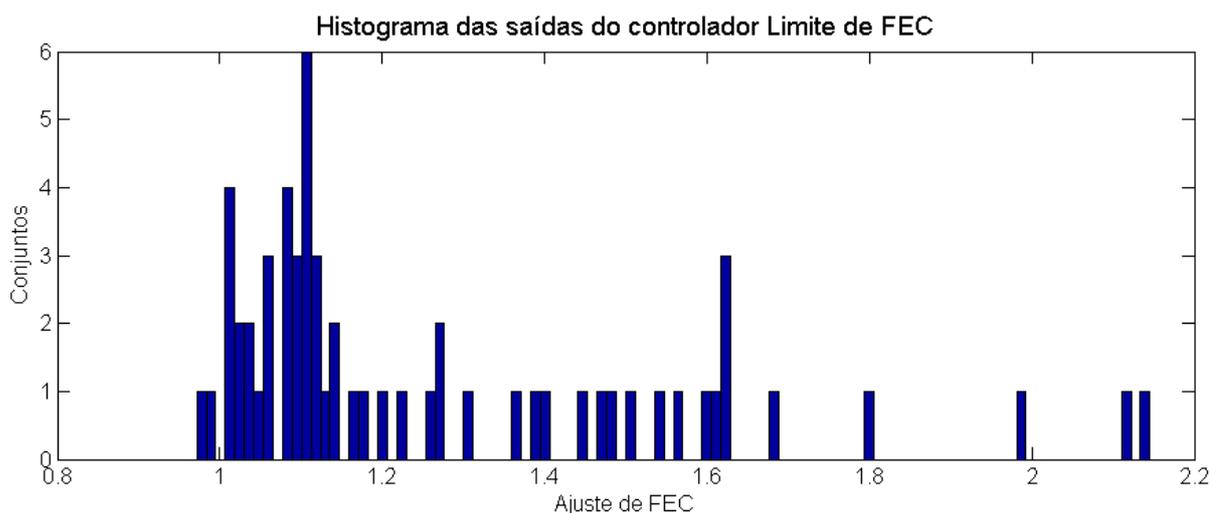


Figura 5.12 – Histograma das saídas do controlador *Limite de FEC*.

Analogamente ao controlador *Limite de DEC*, a saída do controlador *Limite de FEC* é um coeficiente de ajuste a ser aplicado ao limite de desempenho estabelecido pela ANEEL, o qual pode variar no intervalo entre 0 e 3, conforme estabelecido no item 4.4.2.2. Ao analisar a distribuição das saídas no intervalo, é possível notar que não há tendência a valores extremos -muito baixos ou muito altos. Com resultados variando entre aproximadamente 1 e aproximadamente 2,2, de forma geral, o controlador atribuiu ajustes maiores do que 1, ou seja, aumentou os limites definidos pela ANEEL. Todavia, é possível observar que há uma concentração de resultados próxima ao fator 1, mostrando que esses ajustes foram pequenos.

A tabela 5.6 apresenta as variáveis de entrada e a saída do controlador *Limite de FEC*.

Tabela 5.6 – Limite de FEC.

Conjunto	Entradas FUZZY			Saída	
	FEC _{relativo}	Indicador Características Operacionais	Indicador Padrão de rede	Indicador Influência ao Meio	Ajuste
'1'	0,77	0,7107	0,5372	0,5827	1,07
'2'	1,22	0,5389	0,3509	0,6682	1,60
'3'	1,06	0,7239	0,5303	0,4739	1,02
'4'	1,74	0,0887	0,4198	0,5220	2,12
'5'	0,51	0,7194	0,5542	0,6324	0,99
'6'	1,25	0,4295	0,5449	0,6779	1,40
'7'	0,82	0,7275	0,3968	0,3812	1,08
'8'	0,83	0,4288	0,3765	0,5181	1,26
'9'	1,30	0,3067	0,3259	0,6694	1,63
'10'	0,65	0,2972	0,3884	0,6689	1,39
'11'	0,78	0,0847	0,3686	0,5218	1,99
'12'	0,80	0,5346	0,5509	0,6682	1,16
'13'	1,08	0,2909	0,5056	0,4909	1,14
'14'	1,70	0,5004	0,5071	0,6045	1,50
'15'	0,77	0,7080	0,5040	0,6688	1,06
'16'	0,85	0,2891	0,3471	0,6686	1,62
'17'	1,27	0,7137	0,5324	0,4635	1,01
'18'	1,30	0,3460	0,4701	0,4803	1,27
'19'	0,80	0,3074	0,5112	0,6711	1,18
'20'	1,22	0,9200	0,4165	0,6328	1,20
'21'	0,82	0,7594	0,3903	0,4330	1,08
'22'	1,36	0,7232	0,4034	0,4869	1,22
'23'	0,68	0,9106	0,4377	0,6684	1,04
'24'	0,77	0,8637	0,4157	0,4611	1,03
'25'	0,47	0,3076	0,3434	0,5529	1,54
'26'	1,22	0,7082	0,4758	0,5474	1,12
'27'	1,37	0,7142	0,5250	0,5165	1,08
'28'	1,47	0,4133	0,4394	0,6685	1,57
'29'	0,90	0,2934	0,3321	0,4828	1,62
'30'	1,32	0,7181	0,5000	0,4602	1,06
'31'	2,04	0,6931	0,6667	0,5299	1,11
'32'	0,98	0,7218	0,6667	0,5293	1,10
'33'	0,58	0,7184	0,6667	0,5679	1,01
'34'	0,41	0,7007	0,4814	0,5861	1,09
'35'	0,57	0,4243	0,6367	0,5988	1,01
'36'	0,97	0,4601	0,6667	0,4728	1,12
'37'	0,99	0,4679	0,6693	0,5106	1,11
'38'	0,60	0,4962	0,6667	0,5230	1,02
'39'	0,71	0,3222	0,6694	0,5141	1,04
'40'	1,18	0,7094	0,5743	0,5495	1,14
'41'	0,98	0,4503	0,6667	0,5399	1,13

Conjunto	Entradas FUZZY			Saída	
	FEC _{relativo}	Indicador Características Operacionais	Indicador Padrão de rede	Indicador Influência ao Meio	Ajuste
'42'	1,51	0,2613	0,5080	0,6692	1,63
'43'	0,87	0,7416	0,5799	0,5569	1,10
'44'	1,24	0,5152	0,6667	0,5308	1,10
'45'	0,53	0,4541	0,5325	0,4720	1,01
'46'	0,51	0,9145	0,4058	0,4616	0,97
'47'	1,02	0,6439	0,4248	0,5067	1,12
'48'	1,12	0,5375	0,2847	0,7057	1,80
'49'	1,41	0,5147	0,4248	0,6680	1,49
'50'	1,04	0,7997	0,4304	0,5123	1,10
'51'	0,90	0,7355	0,5228	0,6302	1,10
'52'	1,30	0,3084	0,3858	0,5755	1,31
'53'	1,11	0,5796	0,5181	0,6686	1,27
'54'	1,38	0,4480	0,3556	0,8801	2,15
'55'	0,57	0,8473	0,3852	0,6674	1,11
'56'	0,95	0,4901	0,5181	0,6034	1,10

De modo geral, o controlador *Limite de FEC*, apresentou um comportamento muito semelhante ao controlador *Limite de DEC*, apresentando uma relação com o histórico de desempenho do indicador FEC, porém sem que esses ajustes induzissem a limites muito semelhantes ao próprio desempenho. Ao observar os resultados apresentados na tabela 5.6, corrobora-se a interpretação feita a partir do histograma: muitos ajustes propostos pelo sistema de avaliação se aproximam de 1, o que demonstra, que no caso do FEC, para grande maioria, os limites definidos pela ANEEL estão adequados às características dos conjuntos, ou necessitam pouco ajuste. Essa informação vai ao encontro do desempenho da distribuidora em relação ao indicador FEC, para o qual há um índice muito menor de conjuntos com limites transgredidos, conforme já mencionado.

Os conjuntos que apresentaram os maiores índices de ajustes foram: o conjunto 4e o conjunto 54, cujos ajustes foram 2,12 e 2,15, respectivamente. O conjunto 4, cujo desempenho foi de 1,74 vezes acima do limite definido pela ANEEL, é caracterizado por uma baixa *Confiabilidade devido a características operacionais* – índice de 0,0887 – e um Baixo *Padrão de Rede* – índice de 0,4198, sendo esses os maiores influenciadores do resultado. Já o conjunto 54, cujo desempenho foi de

1,38vezes acima do limite,apresenta um baixo *Padrão de Rede* – 0,3556– e um elevado indicador de suscetibilidade ao meio – índice de 0,8801.

O conjunto que apresentou o menor índice de ajuste foi o conjunto 7,com um índice de 0,97. Esse conjunto, além de apresentar um desempenho abaixo do limite, apresenta bons índices para as demais variáveis avaliadas.

A tabela 5.7 apresenta desempenho de FEC dos conjuntos da CEEE-D para 2011, os limites definidos pela ANEEL para o ano de 2011 e os limites definidos pelo sistema de avaliação proposto para os conjuntos avaliados.

Tabela 5.7 – Desempenho de FEC para o ano de 2011.

CONJUNTO	Nº DE CONSUMIDORES	FEC	FEC Padrão	FEC Fuzzy
1	42488	19,12	16	22
2	15901	17,77	11	25
3	13598	7,03	15	11
5	33988	5,75	11	11
6	21007	9,9	11	15
7	24685	6,36	11	11
8	23769	7,01	11	18
9	31152	15,42	21	34
10	6166	14,14	15	22
12	11128	8,94	11	12
13	3988	15,91	21	23
14	16614	13,77	11	16
15	11715	13,11	11	11
16	4004	14,55	16	32
17	14430	6,41	11	11
18	17157	19,8	17	19
19	8038	8,62	14	16
20	31904	23,28	16	24
21	11243	16,1	23	33
22	9085	40,99	31	42
23	18200	6,1	11	11
24	6151	19,9	21	7
25	7135	18,19	26	27
26	40897	10,09	11	17
27	69942	11,64	11	17
28	17473	27,32	21	29
29	13417	29,74	21	34
30	37834	15,2	14	22
32	30644	9,81	12	17
33	63678	10,69	16	11

CONJUNTO	Nº DE CONSUMIDORES	FEC	FEC Padrão	FEC Fuzzy
34	54567	14,89	20	13
35	41414	10,85	11	18
36	4088	4,34	6	22
37	26505	7,39	10	12
38	41403	17,11	11	6
40	39103	10,06	14	12
42	11170	21,64	17	27
43	31176	10,47	11	12
44	19255	7,19	11	12
45	12459	22,18	44	46
46	15875	24,1	44	44
47	19365	13,86	21	23
48	16715	18,45	21	37
49	14669	18,49	21	31
50	24531	9,55	11	12
51	47877	12,25	13	14
52	10052	11,42	21	27
53	5757	9,9	11	13
54	16468	17,64	31	66
55	50421	29,07	44	51
56	28658	12,23	21	23

Da mesma forma como na tabela 5.5, a tabela 5.7 apresenta apenas os dados dos conjuntos que não sofreram alterações em sua configuração entre os anos de 2010 e 2011. Os limites de FEC foram truncados, uma vez que não podem existir frações de interrupções.

Considerando os limites estabelecidos pela ANEEL, a concessionária apresentou aproximadamente 25% dos conjuntos com limites de desempenho transgredidos. Já considerando os limites do sistema de avaliação, ter-se-ia apenas aproximadamente 5% dos conjuntos com desempenho acima do limite. Mesmo que os ajustes propostos pelo sistema de avaliação não terem sido elevados, a diferença não é considerável. Dessa forma, mesmo considerando que a concessionária tenha apresentado um bom desempenho em relação ao indicador FEC, acredita-se que os limites estabelecidos pelo sistema de avaliação são mais coerentes, refletindo melhor as características específicas de cada conjunto.

O limite global do indicador FEC da concessionária é calculado através da equação (5.2), (ANEEL, 2012a):

$$FEC_{anual} = \frac{\sum_{i=1}^M FEC_{anual_i} \cdot Cc_{med_anual_i}}{\sum_{i=1}^M Cc_{med_anual_i}}; \quad (5.2)$$

em que:

FEC_{anual_i} é o valor do FEC, anual do conjunto i , com 2 (duas) casas decimais;

$Cc_{med_anual_i}$ é a média aritmética do número de unidades consumidoras faturadas e atendidas em BT ou MT do conjunto i , com 2 (duas) casas decimais, para o período anual;

DEC_{anual} é o valor anual global do FEC, no ano de referência, com 2 (duas) casas decimais;

M é o número total de conjuntos considerados para o cálculo do indicador global.

Para o ano de 2011, a CEEE tinha como limite global de FEC um total de 16,68 interrupções. Considerando as metas definidas pelo sistema de avaliação proposto e a equação (5.2), chega-se a uma meta global de 20,34 interrupções. Considerando que o desempenho global da CEEE-D em 2011 foi de 14,12 horas, pode-se afirmar que os limites de FEC propostos pelo sistema de avaliação são menos rígidos se comparados aos limites definidos pela concessionária. Todavia, em ambos os casos, a concessionária apresentou desempenho abaixo dos limites.

5.4 Impacto sobre penalidades

Com o intuito de considerar o impacto sobre as penalidades devido à transgressão dos limites individuais de continuidade, foram redefinidos os limites individuais para todos os clientes da concessionária a partir dos limites definidos pelo sistema de avaliação e, então, foram recalculadas as penalidades, considerando os procedimentos estabelecidos no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2012c). Devido à indisponibilidade de dados, foram recalculadas apenas as penalidades do ano de 2010, considerando os procedimentos de cálculo estabelecidos no PRODIST. Conforme já mencionado, a CEEE-D pagou um montante de R\$ 13.108.585,69 em compensações financeiras.

Levando em consideração que alguns conjuntos não foram avaliados na análise realizada neste trabalho, também foram recalculadas as compensações financeiras realizadas considerando os limites definidos pela ANEEL, visando garantir uma comparação coerente. Assim, considerando os limites definidos pela ANEEL, foi obtido um montante de R\$ 12.055.287,17 para os conjuntos analisados. Já considerando os novos limites definidos pelo sistema de avaliação, o montante seria de R\$ 10.607.989,43, totalizando uma diferença de R\$ 1.477.297,74.

5.5 Ferramenta computacional

O sistema proposto nesse trabalho foi desenvolvido através de uma parceria com a CEEE-D, via o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL. Isso possibilitou que o sistema fosse implementado em uma ferramenta computacional.

O sistema desenvolvido incorpora todas as etapas do trabalho, ou seja, a partir da base de dados da distribuidora, são realizadas as operações necessárias para obtenção das variáveis de entrada e as análises estatísticas visando eliminar dados inconsistentes para que, então, sejam realizadas as simulações dentro do sistema de avaliação de desempenho.

A figura 5.13 apresenta a tela inicial do software, o qual é chamado META.

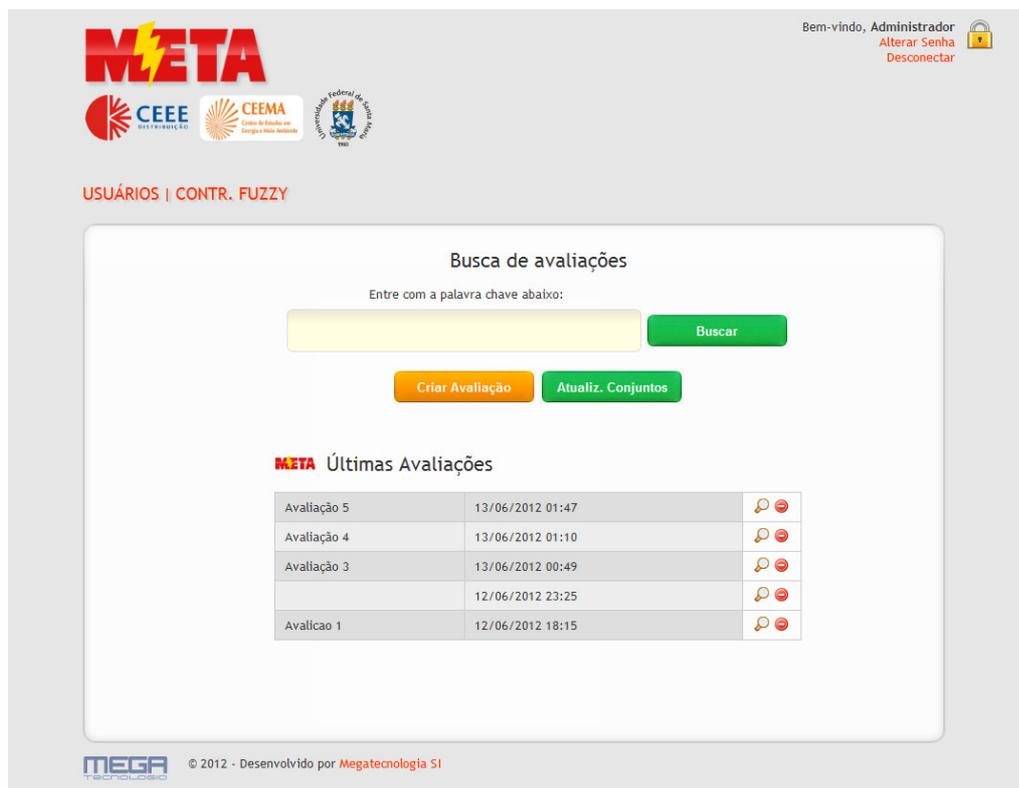


Figura 5.13 – Tela inicial do software META.

A tela inicial do software META apresenta as funções básicas do programa: adicionar usuários, buscar e visualizar últimas avaliações e criar nova avaliação. Além disso, é possível atualizar as informações dos conjuntos de unidade consumidoras – localização geográfica, tamanho e quantidade de conjuntos.

Ao clicar em *Criar Avaliação* o software direciona para uma nova página, na qual é possível atualizar toda a base de dados necessária para realizar uma nova simulação. Após carregar todos os dados, o sistema processa todas as informações e apresenta os resultados.

Inicialmente, o sistema apresenta os resultados de forma gráfica em quatro mapas. Para cada indicador são mostrados dois mapas: um deles mostra a situação atual da área de concessão, apresentando todos os conjuntos, cujas áreas são coloridas de acordo com o desempenho apresentado, enquanto o outro apresenta todos os conjuntos e seus respectivos desempenhos, aplicando os limites estabelecidos pelo sistema. A figura 5.14 apresenta a tela principal após a simulação.

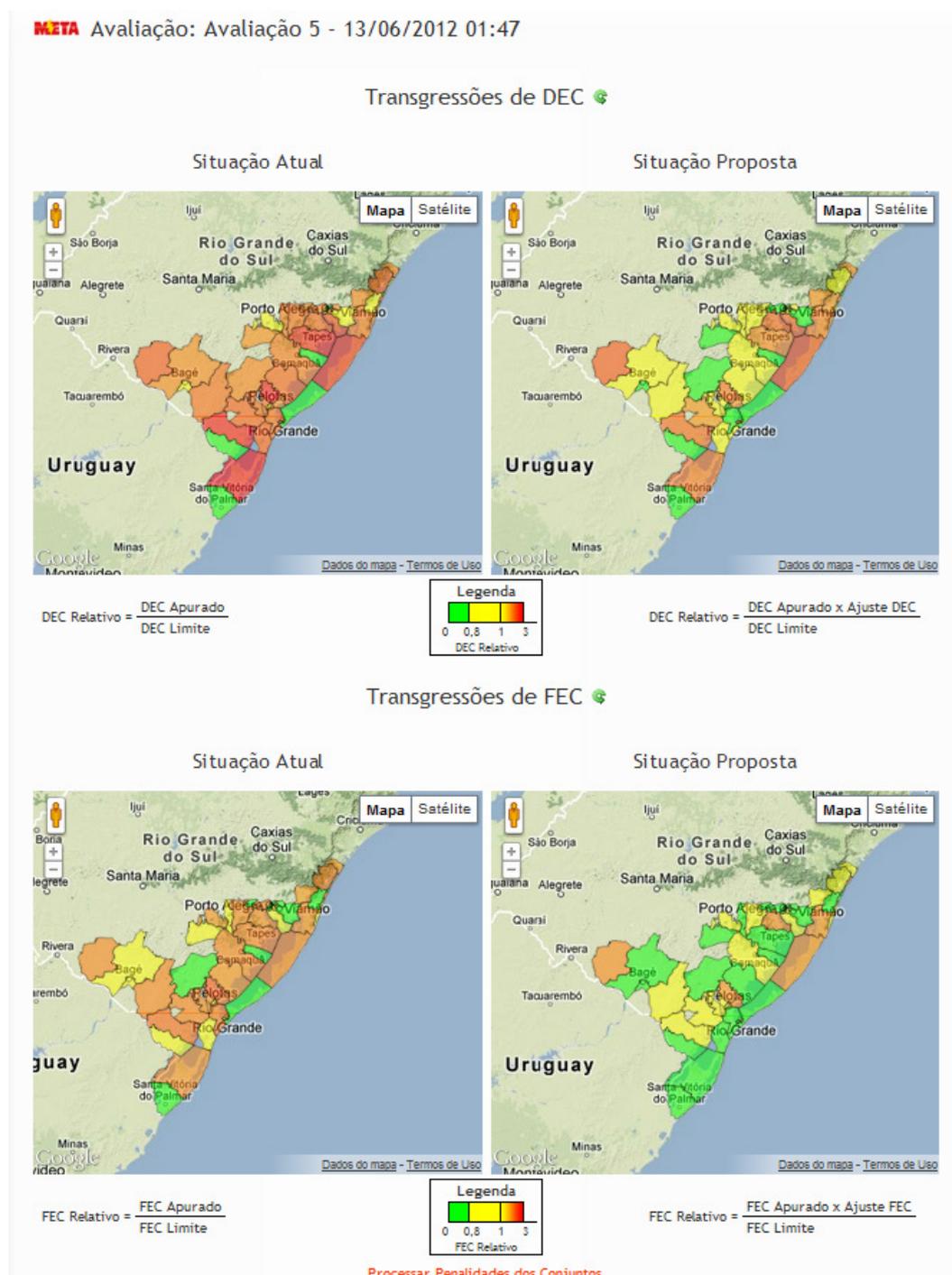


Figura 5.14 – Tela principal dos resultados.

A simulação apresentada na figura 5.14 mostra os resultados para a base de dados da CEEE-D. Através dos mapas intitulados “Situação atual”, é possível visualizar o despenho da distribuidora para o ano de 2010. Conforme já discutido nesse capítulo, observa-se que os maiores problemas quanto aos limites dos indicadores estão relacionados ao DEC. Grande parte dos conjuntos apresentou

desempenho acima do limite. Isso pode ser identificado através da coloração da área de concessão, a qual está predominantemente avermelhada.

Ao clicar sobre a área de um conjunto são mostradas as informações básicas sobre o conjunto, tais como: Código e nome do conjunto, Limite da ANEEL e $DEC/FEC_{relativo}$. É possível ainda, visualizar o processo de avaliação de forma detalhada. Ao clicar em “Mais”, é apresentada uma tabela com todas as variáveis avaliadas, os indicadores intermediários do sistema e o ajuste final que o sistema propõe para o respectivo indicador.

A figura 5.16 exemplifica esse processo.

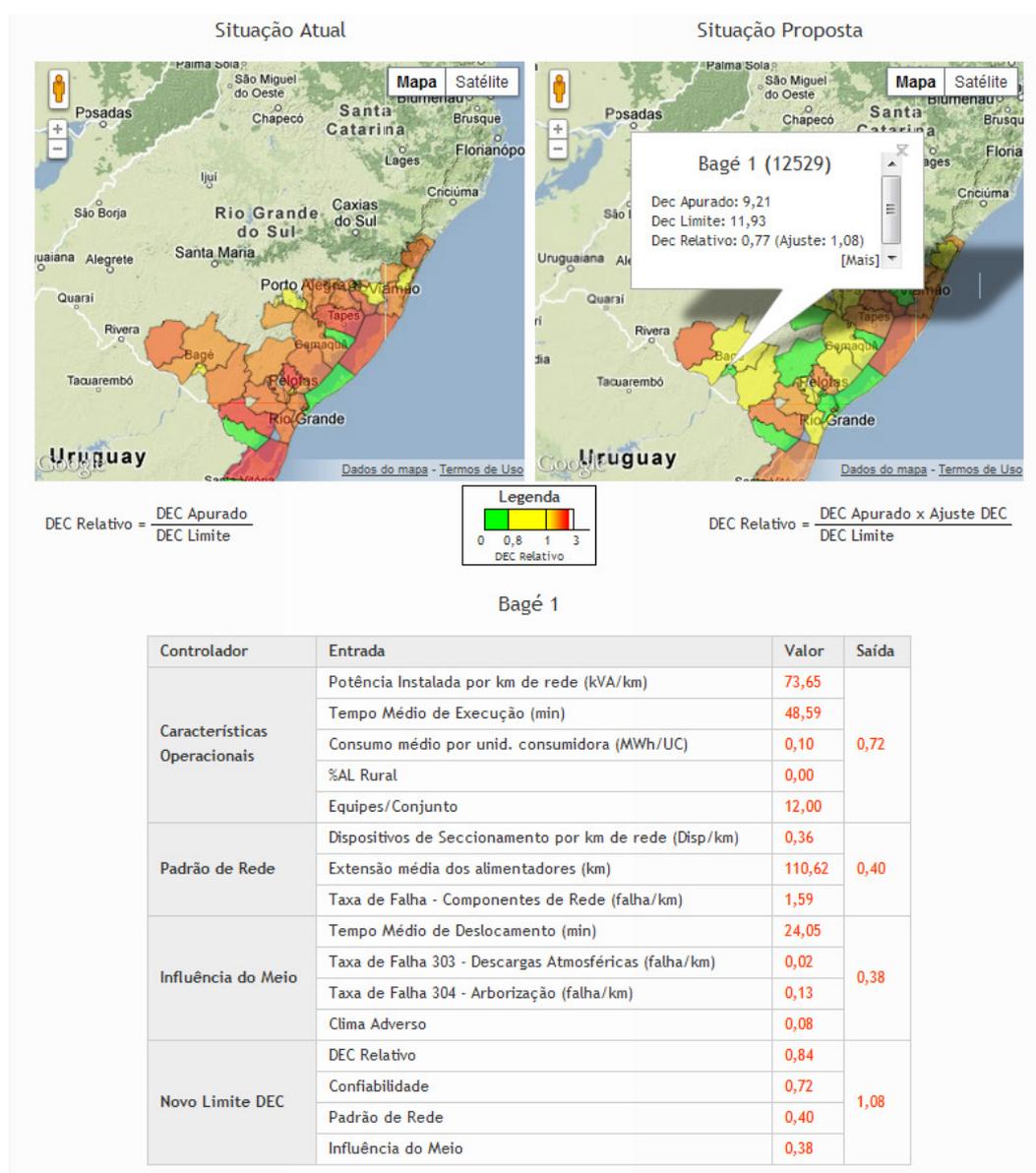


Figura 5.16 – Detalhamento dos resultados

A figura 5.16 mostra os resultados obtidos para o indicador DEC do conjunto 7. Como se pode observar, ao selecionar o detalhamento dos resultados, é mostrada uma tabela abaixo do mapa com os valores de cada variável e a saída de cada controlador do sistema de avaliação de desempenho.

O sistema ainda apresenta mais detalhes sobre a avaliação. Ao clicar sobre os valores das variáveis de entrada, o sistema detalha a classificação da variável em termos linguísticos e o grau de pertinência atribuído à variável. O mesmo ocorre com o valor de saída. Ao clicar sobre o valor, o sistema mostra o processo de classificação e *defuzzificação* da respectiva saída. A figura 5.15 mostra os dois processos.



Figura 5.15 – Detalhamento de uma variável de entrada e de uma saída.

A figura 5.15 detalha a variável *TME* e a saída *Confiabilidade devido a características operacionais* para o conjunto7. No caso da variável *TME* é possível observar que o valor da entrada sobrepõe dois: *Rápido* e *Médio*. Já para a saída, é possível observar que, na avaliação final, a *Confiabilidade devido a características operacionais* do conjunto também foi classificada em dois conjuntos: *Bom* e *Muito Bom*, com a pertinência indicada pela área sombreada desses conjuntos. O valor de saída é obtido a partir do centro de gravidade da área sombreada, conforme é apresentado no Apêndice A.

O software ainda recalcula os valores das penalidades para os limites definidos pelo próprio sistema. Dessa forma, é possível constatar o impacto gerado pelos novos limites sobre as compensações financeiras.

A ferramenta desenvolvida para a CEEE-D, tem como propósito, disponibilizar informações para que a concessionária possa justificar a solicitação de ajustes aos limites definidos pela ANEEL de uma forma coerente, visando corrigir as incoerências apresentadas. Além disso, ela viabiliza a identificação de conjuntos prioritários para ações de melhoria nas redes através dos indicadores intermediários, identificando também quais os tipos de ações devem ser tomadas visando à melhoria do desempenho em relação aos indicadores de continuidade. Dessa forma as estratégias de melhoria são otimizadas, fazendo com que um melhor desempenho seja alcançado mais rapidamente e, conseqüentemente, uma energia com mais qualidade seja fornecida aos consumidores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

6.1.1 Sobre as variáveis avaliadas

A escolha das variáveis que caracterizam um problema é uma etapa fundamental, independentemente da metodologia utilizada em um sistema de avaliação de desempenho. No caso deste trabalho, a aplicação da Lógica *Fuzzy* em um sistema multinível possibilitou que fosse considerado um número maior de variáveis, de forma que o problema da qualidade de energia fosse abordado de forma mais completa.

O estudo para determinação das variáveis que influenciam no desempenho de uma distribuidora de energia em relação aos indicadores de continuidade foi bem abrangente e detalhado. Na pesquisa realizada foram consideradas as sugestões realizadas pelas próprias distribuidoras, os atributos utilizados pela ANEEL para definição dos limites de desempenho, bem como sugestões encontradas na literatura. Em um primeiro momento não foi considerada a origem das variáveis de forma que se garantisse a melhor caracterização possível para o problema. Após esse processo, cada variável foi estudada caso a caso, buscando encontrar a melhor forma de caracterizá-la dentro do sistema, considerando o nível de informação, processo de obtenção e padronização do dado. A partir desse processo foram escolhidas as variáveis utilizadas nesse trabalho.

O emprego de variáveis que tem relação com fatores não gerenciáveis à rede, tais como: descargas atmosféricas, influência da arborização e aspectos climáticos é considerada um ponto positivo desse trabalho, pois torna o sistema de avaliação mais realista, ao agregar variáveis até então não consideradas na definição de limites de desempenho devido a não uniformidade de dados para todas as distribuidoras de energia. Nesse aspecto, pode-se citar a variável *Taxa de falha devido a descargas atmosféricas*, a qual faz inferência ao nível cerâmico da região de atendimento de cada conjunto e pode ser obtida a partir dos registros de ocorrências de cada concessionária.

Grande parte das variáveis utilizadas foi obtida a partir dos registros de ocorrências de interrupções, cujo processo de registro e armazenamento é padronizado e totalmente passível de auditoria. Isso se torna outro ponto positivo, pois garante maior precisão ao sistema de avaliação e possibilita que esse seja aplicado a qualquer distribuidora de energia, uma vez que a base de dados utilizada é padronizada.

Como sugestão, seria interessante utilizar uma média de desempenhos, no caso do histórico de desempenho de DEC e FEC, de forma a evitar que sejam considerados desempenhos atípicos e que poderiam influenciar nos resultados. Utilizando a média, evita-se a consideração de valores extremos.

A utilização da base de dados da distribuidora CEEE-D permitiu que a parametrização das variáveis de entrada do sistema *fuzzy* fosse validada e também que a relação entre essas variáveis e o desempenho dos indicadores DEC e FEC fossem mais bem entendida, garantindo o bom alinhamento do sistema desenvolvido.

O processo de organização do banco de dados da distribuidora para obtenção das variáveis de entrada do sistema tomou certo tempo, devido ao grande volume de informações e a necessidade de relacionar dados originados de diferentes bases. Nesse aspecto a utilização do software IBM SPSS Modeler® garantiu mais agilidade ao processo, bem como permitiu que análises estatísticas fossem realizadas, visando à eliminação de dados inconsistentes. Pode-se citar como exemplo, a variável *TMD*, para qual foi identificada inconsistência nos dados em dois meses do ano de 2010. Antes de exclusão das informações incoerentes, a concessionária foi consultada. Por fim, acabou se confirmando que havia erros na base de dados e as informações não foram utilizadas.

6.1.2 Sobre a Lógica *Fuzzy* a estrutura do sistema de avaliação

A escolha pela Lógica *Fuzzy* como ferramenta para avaliação de desempenho das distribuidoras de energia deu-se, fundamentalmente, devido a sua ampla e bem sucedida aplicação nas mais diversas áreas de conhecimento. Estudos preliminares

realizados no início do trabalho mostram que a lógica se adaptaria bem ao problema, o que de fato se comprovou ao decorrer do desenvolvimento da metodologia.

A possibilidade de trabalhar com variáveis de diversas grandezas em um mesmo nível e a utilização de termos linguísticos para descrever as variáveis simplificou muito a análise do problema, permitindo estabelecer relações entre variáveis, que até então eram de difícil definição. A aplicação bem sucedida do sistema multinível proposto apenas corroborou a versatilidade e robustez da lógica *fuzzy*, permitindo padronizar o sistema e, ao mesmo tempo, individualizar a avaliação de desempenho.

A padronização do sistema permite que ele seja aplicado a qualquer unidade, seja uma distribuidora, seja um conjunto de consumidores ou um trecho de rede. Isso significa que, desde que as variáveis possam ser mensuradas para uma unidade consumidora, por exemplo, seria possível estabelecer o limite de desempenho individual para os indicadores DIC, FIC e DMIC, por exemplo. Além disso, essa padronização garante que todos os conjuntos sejam avaliados da mesma forma. Todavia, a avaliação é individualizada, ou seja, não é influenciada pelo desempenho de outro conjunto. Dessa forma, ao considerar uma quantidade maior de variáveis de entrada, foi possível avaliar a influência de características específicas de cada conjunto, o que se torna inviável em processo de análise comparativa de desempenho.

Todavia, a utilização de todas as variáveis em apenas um controlador *fuzzy* – no total são 14 – tornaria o desenvolvimento do sistema muito difícil, devido ao grande número de regras e, conseqüentemente, à grande complexidade das relações a serem definidas. Dessa forma, a partir de experiências encontradas na literatura, propôs-se um sistema em dois níveis, o que acabou simplificando o desenvolvimento do sistema de avaliação de desempenho.

Ao classificar as variáveis de entrada em três controladores *fuzzy* independentes, possibilitou-se, além da simplificação da análise, a obtenção de índices intermediários, os quais descrevem a confiabilidade das redes de distribuição de forma mais específica, através de caracterizações distintas, tais como: características da operacionalidade e do padrão físico das redes e a influência do meio ambiente nos indicadores. Esses índices tem um significado muito importante

dentro da análise da confiabilidade, pois permitem uma análise mais detalhada do sistema. Dessa forma, o sistema de avaliação de desempenho proposto possibilita o estabelecimento dos limites de desempenho para os indicadores DEC e FEC e também a determinação dos níveis de confiabilidade das redes avaliadas. Assim, tendo como base os indicadores intermediários, é possível direcionar e otimizar as estratégias de planejamento e operação, visando à melhoria da continuidade de fornecimento de energia. Além disso, esses indicadores intermediários tornaram a definição dos limites de desempenho muito mais simples, ao trabalhar apenas com quatro variáveis de entrada em cada controlador do nível principal.

6.1.3 Sobre os resultados obtidos

A possibilidade de trabalhar com dados reais da CEEE-D permitiu que todos os resultados obtidos fossem analisados, podendo avaliar a coerência dos limites de continuidade definidos pelo sistema, bem como analisar a relação dos índices definidos no nível secundário do sistema com os indicadores DEC e FEC. De modo geral, os resultados obtidos são considerados satisfatórios, atingindo os objetivos propostos no início desse trabalho.

Apesar de o objetivo principal ter sido a definição dos limites de continuidade do fornecimento de energia, a possibilidade de determinar índices capazes de direcionar estratégias de melhoria da confiabilidade do sistema é considerada a maior contribuição do trabalho. Essa característica garante uma análise mais completa do sistema, definindo os limites de DEC e FEC e caracterizando a confiabilidade da rede. Os resultados obtidos no estudo de caso foram muito satisfatórios, pois permitiram associar o desempenho de cada conjunto às suas características. Nesse aspecto foi possível constatar, no caso da CEEE-D que houve maior alteração nos limites do indicador DEC. Em grande parte, os maiores ajustes foram necessários devido aos baixos índices de *Confiabilidade devido a características operacionais*, associados em alguns casos, a uma elevada *Suscetibilidade ao meio*. A partir desses resultados, tem-se um limite adequado as características dos conjuntos, porém são mostrados os meios pelos quais é possível melhorar o desempenho do conjunto. Acredita-se que dessa forma serão obtidos

resultados mais consistentes, em longo prazo, em se tratando de melhoria da continuidade de fornecimento de energia.

Um fato que deixou de ser abordado foi a definição de uma proposta para implementação desses limites, de forma que fossem corrigidas as incoerências relacionadas aos limites definidos pelo agente regulador. Uma ideia interessante foi discutida durante o desenvolvimento do trabalho, todavia não foi implementada. A proposta envolve o estabelecimento de um coeficiente de melhoria. Esse coeficiente definiria, a partir das características do conjunto, um grau de melhoria de desempenho para cada conjunto de consumidores.

Outra questão não abordada diz respeito aos limites individuais de continuidade. Atualmente, após a definição dos limites coletivos a partir das análises comparativas de desempenho, os limites individuais para cada consumidor são definidos a partir de tabelas do PRODIST. Essas tabelas consideram a faixa de variação dos indicadores coletivos, os níveis de tensão de atendimento dos consumidores, bem como se esses se encontram em áreas urbanas ou rurais para definir os limites mensais, trimestrais e anuais dos indicadores DIC, FIC e DMIC. Todavia, o fato de não se conhecer a metodologia de definição desses limites e o fato de haver uma faixa de variação dos limites coletivos, para a qual são definidos os mesmos limites individuais, acaba eliminando toda a riqueza de informação contida nos limites de DEC e FEC definidos. Esse fator certamente influenciou no valor das penalidades, pois apesar de ter ocorrido um grande impacto nos limites de desempenho, ao se calcular as penalidades, o impacto não foi tão grande.

Conforme mencionado, à medida que as variáveis possam ser mensuradas para cada consumidor, o sistema de avaliação de desempenho proposto seria capaz de determinar os limites de desempenho para os indicadores individuais. Com o advento das redes inteligentes, as bases de dados serão cada vez mais detalhadas e confiáveis, de forma que, em um futuro próximo, essa metodologia poderá ser aplicada individualmente, garantindo limites de continuidade coerentes com a realidade de cada consumidor.

6.2 Trabalhos futuros

Há uma série de aspectos que podem ser estudados e implementados visando melhorar e complementar o sistema desenvolvido nesse trabalho. Uma primeira questão seria tornar esse sistema, atualmente estático, em um sistema dinâmico. Nesse sentido, a aplicação de metodologias como a Lógica *Neurofuzzy* permitiria que o sistema agregasse a robustez da lógica *fuzzy* na interpretação de variáveis com a capacidade de aprendizado das redes neurais, o que tornaria o sistema adaptável. Dessa forma a base de regras seria constantemente adequada, levando em consideração o histórico de todas as variáveis envolvidas.

A ideia, já citada, do estabelecimento de um coeficiente de melhoria dos indicadores é um trabalho promissor. Atualmente a definição da evolução dos limites de desempenho é definida através de uma curva exponencial que considera o período de revisão tarifária da concessionária. Essa curva não é capaz de traduzir a capacidade da concessionária de evoluir em relação à qualidade do fornecimento de energia, fato que pode estar influenciando os elevados índices de transgressão de limites, conforme já abordado. Nesse aspecto, a determinação de um coeficiente de melhoria que leve em consideração as características de cada distribuidora, garantiria uma evolução contínua e sustentável da confiabilidade das redes.

Outra sugestão é o desenvolvimento de um sistema análogo de forma a avaliar a qualidade do produto, ou seja, avaliar questões relacionadas aos indicadores de conformidade do produto (DRP - Duração Relativa de Transgressão de Tensão Precária individual da unidade consumidora - e DRC - Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica Individual da Unidade Consumidora). A partir dessa avaliação, seria possível associar as duas metodologias de avaliação às penalidades regulatórias e custos modulares de obras na rede, de forma a facilitar a tomada de decisão do planejamento de obras apontando uma prioridade, tanto nas redes de média como na baixa tensão, visando à melhoria da confiabilidade das redes e, conseqüentemente, melhorando o desempenho dos indicadores e reduzindo as multas aplicadas pelo agente regulador.

6.3 Trabalhos publicados

Ao longo do desenvolvimento da dissertação foram aprovados quatro artigos científicos, os quais foram apresentados em eventos nacionais e internacionais. Os trabalhos publicados foram:

- POWERENG'11 - III International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives

Título do trabalho: *“A Proposal for Redefinition of Reliability Indexes for Power Utilities by Fuzzy Logic”*

- EEM'11 - 8th International Conference on European Energy Market

Título do trabalho: *“Financial impact of the penalties applied to Brazilian energy distribution companies by exceeded of the limits of performance of power supply continuity”*

- CBQEE 2011 - IX Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica

Título do trabalho: *“Análise do Perfil de Comportamento dos Conjuntos da CEEE-D e Sugestão de Novos Atributos Para Definição de Metas de Confiabilidade”*

- CBEE 2011 - 4º Congresso Brasileiro de Eficiência Energética

Título do trabalho: *‘Análise da eficiência energética sob o foco da continuidade no fornecimento de energia elétrica’.*

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Anexo da Nota Técnica nº28**, de 30 de junho de 2010b. Brasília, 2010. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica%2028_2010%20-%20SRD%20-%20Anexo.pdf. Acesso em: 12 de jun. 2012.

_____. **Desempenho Global**. Brasília, 2012 d. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/resultado.cfm. Acesso em: 04 jun. 2012.

_____. **Indicadores Brasileiros**. Brasília, 2012b. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/pesquisaGeral.cfm. Acesso em: 12 jun. 2012.

_____. **Número de unidades consumidoras**. Brasília, 2012e. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/resultado.cfm. Acesso em: 11 jun. 2012.

_____. **Nota Técnica nº 25**, de 23 de maio de 2006. Brasília, 2006. 8 p. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/NT_Investimentos_X_Qualidade.pdf. Acesso em: 11 jun. 2012.

_____. **Nota Técnica nº 49**, de 20 de setembro de 2011. Brasília, 2011. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/064/documento/nota_tecnica_0049.pdf.

_____. **Procedimentos de Distribuição – PRODIST – Módulo 1: Introdução**. Brasília, 2012a. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo1_Revisao_4.pdf. Acesso em: 12 jun. 2012.

_____. **Procedimentos de Distribuição –PRODIST- Módulo 8: Qualidade de Energia**. Brasília, 2012c. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_4.pdf. Acesso em: 11 jun. 2012.

_____. **Relatório ANEEL 10 Anos**. Brasília, 2008. 129 p. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Aneel_10_Anos.pdf. Acesso em: 11 jun. 2012.

_____. **Resolução Normativa nº24**, de 20 de janeiro de 2000. Brasília, 2000. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000024.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2012.

_____. **Resolução Normativa nº 505**, de 26 de novembro de 2001. Brasília, 2001. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2001504.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2012.

_____. **Resolução Normativa nº 363**, de 22 de abril de 2009. Brasília, 2009b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009363.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2012.

_____. **Resolução Normativa nº 395**, de 15 de dezembro de 2009. Brasília, 2009a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009394.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2012.

_____. **Resolução Normativa nº 414**, de 9 de setembro de 2010. Brasília, 2010a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2012.

AGÜERO, J. R., et al. **Distribution System Reliability Improvement Using Predictive Models**. PES '09 - IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009. p. 1 – 7.

APPELT, P.J; GOODFELLOW, J.W. **Research on How Trees Cause Interruptions- Applications to Vegetation Management**. Rural Electric Power Conference, 2004.C6 - 1-10 p.

BENNER, C. L., et al. **Feeder Interruptions Caused by Recurring Faults on Distribution Feeders: 61st Annual Conference for Faults You Don't Know About**. Protective Relay Engineers, 2008.p.584 – 590.

BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. - IEEE Press Series of Engineering, 2000. 543 p.

BRANCALIONI, A. R. **Proposta de Classificação da Gravidade do Desvio Fonológico por Meio da Modelagem Fuzzy Segundo o Modelo Implicacional de Complexidade de Traços**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2010.

BROWN, R. E. **Electric Power Distribution Reliability**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2002. 365 p.

CHOWDHURY, A.A.;BERTLING, L.**Distribution Systemin-Depth Causal Reliability Assessment**.9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems**, 1999.

COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **A CEEE Distribuição**. Disponível em: <http://www.cee.com.br/pportal/cee/Component/Controller.aspx?CC=1755>. Acesso em: 12 jun. 2012.

EL-HAWARY, M. E. **Electric Power Applications of Fuzzy Systems**.Piscataway: IEEE Press, 1998. 341 p.

EL-SAYED, M. A. H., et al. **Fuzzy Sets for Reliability Assessment of Electric Power Distribution Systems**.Proceedings of the 37th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 1994.p. 1491 - 1494 vol.2.

EMJEDI, M. R. et. al. **Reliability Evaluation of Distribution Networks Using Fuzzy Logic**. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010. p. 1 – 8.

FARAHAT, M.A.; AL-SHAMMARI, B.M.**Power system reliability evaluation and quality assessment by fuzzy logic technique**.UPEC 2004 - 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004.p. 478 - 483 Vol. 1.

FOTUHI, M.; GHAFOURI, A.**Uncertainty Consideration in Power System Reliability Indices Assessment Using Fuzzy Logic Method**.2007 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 2007. p. 305 – 309.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.**IEC 61000: Electromagnetic compatibility (EMC)**.2000.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.**IEEE 519: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**.1992.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL. **Ranking de incidência de descargas por município no Brasil.** Disponível em: <http://www.inpe.br/ranking/>. Acesso em: 12 jun. 2012.

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H.P. **Estimação de indicadores de qualidade de energia elétrica.**São Paulo: Editora Blucher, 2009. 230 p.

KURUTACH, W.; TUPPADUNG, Y. **Feeder-Switch Relocation Based upon Risk Analysis of trees-Caused Interruption and Value-Based Distribution Reliability Assessment.**TENCON 2004 - IEEE Region 10 Conference, 2004.p. 577 - 580 Vol. 3.

LANG, B. P.; PAHWA, A. **Power Distribution System Reliability Planning Using a Fuzzy Knowledge-Based Approach.**IEEE Transactions on Power Delivery, 2000. p. 279 – 284.

LEE, C. C. **Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part 1.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990.vol 20, n. 2. p. 404 – 414.

LI, Z.; KAPUR, K. C. **System Reliability Measures Using Fuzzy Sets.**2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2011. p. 216 – 221.

MAGNAGO, K. F. **Abordagem Fuzzy em Modelos Populacionais Discretos: Metapopulação de Moscas Varejeiras.** Tese de Doutorado. Campinas, 2004.

MARTINHO, E. **Distúrbios da Energia Elétrica.** São Paulo: Érica, 2009. 140 p.

MATHWORKS. **User's Guide: MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.** 1997.

MELIOPOULOS, A.; COKKINIDES, F.**Power Quality Assessment via Physically Based Modeling and Statistical Methods.**2002 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2002.p. 378 - 384 vol.1.

MYAMOTO, S.**Fuzzy Sets in Information Retrieval and Cluster Analysis.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. 259 p.

MOON, J. et al. **Reliability evaluation of distribution system through the analysis of time-varying failure rate.** 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004. p. 668 - 673 Vol.1.

MORISHITA, C. **Impacto do regulamento para eficiência energética em edificações no consumo de energia elétrica do setor residencial brasileiro.** Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2011.

ORTEGA, N.R.S. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina.** Tese de Doutorado. São Paulo, 2001.

_____. **Lógica Fuzzy.** In: MASSAD, E., et al. **Métodos Quantitativos em Medicina.** São Paulo: Manole, Cap. 25, p. 469-492, 2004.

PARVIAMEN, M. et al. **Short Interruptions Caused by Lightning in Overhead Line Medium Voltage Networks.** PQ 2008 - Power Quality and Supply Reliability Conference, 2008. p. 145 – 150.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing.** Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. - IEEE Press Series of Engineering, 2007. 526 p.

PYLVÄNÄINEN, J., et. al. **Advanced Failure Rate And Distribution Network Reliability Modeling As Part Of Network Planning Software.** 18th CIRED - International Conference on Electricity Distribution. 2004.

POSSELT, E. L. **INFUZZY – Ferramenta para Desenvolvimento de Aplicações de Sistemas Difusos.** Dissertação de Mestrado. Santa Cruz do Sul, 2011.

SANDRI, S.; CORREA, C. **Lógica Nebulosa.** V Escola de Redes Neurais. São José dos Campos, 1999. p. 73 – 90.

SIMÕES, M. G; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy.** São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999. 165 p.

SILVERIO, A. S.; WINCK, C.A. **A infraestrutura no setor elétrico como variante importante na economia de um país.** II Seminário de Ciências Sociais Aplicadas. Cascavel: UNIOESTE, 2003. 4p.

SPERANDIO, M. **Classificação de Conjuntos Consumidores de Energia Elétrica via Mapas Auto-Organizáveis e Estatística Multivariada.** Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2004.

TANURE, José E.P.S. **Análise comparativa de empresas de distribuição para o estabelecimento de metas de desempenho para indicadores de continuidade do serviço de distribuição.** Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2000.

TANURE, José E.P.S. **Proposta de Procedimentos e metodologia para estabelecimento de metas de qualidade (DEC e FEC) para concessionárias de distribuição de energia elétrica através de análise comparativa.** Tese de Doutorado. São Paulo, 2004.

WANG, J. et al. **Research on an Integrated Methodology of the Dynamic Performance and Reliability Evaluation.** IEEE9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2011.P. 122 – 128.