JOAQUIM JORGE MARTINS GALO

MÉTODO PARA IMPLANTAÇÃO DAS REDES INTELIGENTES ATRAVÉS DA CRIAÇÃO DE UM ÍNDICE DE PRIORIDADE APLICANDO TÉCNICA DELPHI, MÉTODO ESTATÍSTICO E UM SISTEMA FUZZY

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial a Universidade Federal da Bahia para a obtenção do titulo de Doutor em Engenharia Industrial.

Salvador
Julho/2014

MÉTODO PARA IMPLANTAÇÃO DAS REDES INTELIGENTES ATRAVÉS DA CRIAÇÃO DE UM ÍNDICE DE PRIORIDADE APLICANDO TÉCNICA DELPHI, MÉTODO ESTATÍSTICO E SISTEMA FUZZY

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor, especialidade em Engenharia Industrial e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Industrial da Universidade Federal da Bahia

_____

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Luz Almeida (UFABC)

_____

Orientador: Prof. Dr. Antonio Cezar Castro Lima (UFBA)

_____

Examinador: Prof. Dr. André Luiz de Carvalho Valente (UFBA)

_____

Examinador: Prof. Dr. Caiuby Alves da Costa (UFBA)

_____

Examinador: Prof. Dr. Marcos Roberto Gouvêa(USP)

_____

Examinador: Prof. Dr. Carlos Frederico Meschini Almeida (USP)

_____

Examinador: Prof. Dr. Kleber Freire da Silva (UNIFACS)

AUTORIZO A REPRODUÇÃO EDIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

FICHA CATALOGRAFICA

G178 Galo, Joaquim Jorge Martins.

Método para implantação das redes inteligentes através da criação de um índice de prioridade aplicando técnica Delphi, método estatístico e um sistema Fuzzy / Joaquim Jorge Martins Galo. – Salvador, 2014.

100 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Luz Almeida.

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Cezar Castro Lima.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Redes inteligentes. 3. Lógica Fuzzy. Almeida, Luiz Alberto Luz. II. Lima, Antonio Cezar Castro. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 621.3

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde, força nos momentos difíceis e inspiração para elaboração da tese.

Aos meus orientadores Luiz Alberto Luz Almeida e Antonio Cezar Castro Lima pelas suas sugestões e orientação durante o desenvolvimento desta tese.

Aos professores Caiuby Alves e André Valente pelos incentivos e sugestões no processo de elaboração deste trabalho.

Ao Coordenador Cristiano Fontes, aos professores e funcionários do PEI pela paciência, apoio, dedicação e oportunidade de compartilhar o conhecimento.

A minha esposa Maria pela paciência, dedicação, companheirismo e parceria neste trabalho e na vida.

Aos meus irmãos Consuelo, Isabel e Marcelino pela paciência e incentivo desde o início de meus estudos.

Aos professores e funcionários do PEI pela paciência, apoio, dedicação e oportunidade de compartilhar o conhecimento.

Aos meus pais Marcelino e Maria de Lourdes cedo pelos ensinamentos, incentivo, dedicação e amor desde o meu primeiro dia de vida.

RESUMO

A implantação de redes inteligentes tem o objetivo de melhorar a qualidade, confiabilidade, segurança e eficiência dos sistemas elétricos. O problema é que o período para implantação completa destas redes pode chegar a vários anos e envolve grandes investimentos financeiros. Além disso, o ritmo acelerado das mudanças tecnológicas sugere uma abordagem cuidadosa, com um planejamento para o processo de implantação passo-a-passo.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método para a implantação de redes inteligentes baseadas em recursos técnicos, humanos, ambientais e financeiros a serem aplicados na avaliação dos sistemas elétricos em suas condições operacionais atuais, o que irá ser feito através da criação de um índice com base em indicadores para classificar a ordem de prioridade para a implantação de redes inteligentes em um sistema elétrico. Neste trabalho foi aplicado o método estatístico e o método utilizando um Sistema Fuzzy para determinar um Índice de Prioridade de implantação, para a validação e comparação dos resultados dos métodos foram realizados vários testes e também avaliados seis sistemas elétricos diferentes.

PALAVRAS-CHAVE: - Redes Inteligentes, Índice, Método Delphi, Lógica Fuzzy

ABSTRACT

The deployment of Smart grids is intended to improve the quality, reliability, security and efficiency of electrical systems. The problem is that the period for full deployment of these networks can reach several years and involves large investments. In addition, the fast pace of technological change suggests a careful approach, with a planning for the deployment process step-by-step. The objective of this paper is to develop a method for deploying smart grids based on technical, financial and human resources to be applied in the evaluation of electrical systems in their current operating conditions; this will be accomplished through the creation of an index based on indicators to rank the priority order for the deployment of Smart grids in an electrical system. In this work, we applied the statistical method and the method using a fuzzy system to determine the Index Priority of Implementation, for the validation and comparison of the results of the methods were carried out several tests and also evaluated six different electrical systems.

Keywords – Smart Grid, Index, Delphi method, Fuzzy Logic

ARTIGOS DESENVOLVIDOS A PARTIR DESTA PESQUISA

Artigos publicados:

1. **Criteria for smart grid deployment in Brazil by applying the Delphi method**
   Publicação: Energy - The International Journal, ISSN: 0360-5442
   Qualis: A1- Fator de Impacto 4.159.

2. **Demand side management using Artificial Neural Networks in a Smart Grid environment.**
   Publicação: Renewable & Sustainable Energy Reviews ISSN: 1364-0321
   Qualis: A1 - Fator de Impacto 5.510.

3. **Opportunities and Challenges of DSM in Smart Grid Environment.**
   Publicação: The Third International Conference on Smart Grids - ENERGY 2013 - Lisboa, Portugal.

4. **Oportunidades e Desafios do GLD no Ambiente Smart Grid.**
   Publicação: Conferencia Internacional REGSA 2014: Energia Renovável, Eficiência energética e Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis- SC

Artigos Submetidos:

1. Method for deployment of Smart grids through the creation of a priority index;
2. Analise das Implantações de Smart grid em Sistemas Elétricos Brasileiros;
3. Typification of load curves for DSM in Brazil in the Smart Grid environment;
4. Methodology for the calculation of the factor of priority for smart grid implantation using fuzzy logic.

SUMÁRIO

Capítulo I – Introdução

1.1 Motivação, Relevância e Objetivos.....18;

1.2 Objetivos e a Implantação do Smart Grid.....19;

1.3 Políticas para Implantação de Smart Grid 19;

1.3.1 A Implantação de Medidores Inteligentes.....20;
1.3.2 Dificuldades para Implantação de Smart Grid no Brasil.....21;
1.3.3 Planejamento da Implantação de Smart Grid no Brasil.....21;

1.4 Organização da Tese.....22;

Capítulo II – Características, Funcionalidades e os Principais Desafios da Implantação de Smart Grid

2.1 Introdução.....24;

2.2 Estrutura Básica de uma Rede Inteligente (Smart Grid).....24;

2.3 Experiências Internacionais na Implantação de Smart Grid 25;

2.3.1 Situação no Continente Europeu.....25;
2.3.2 Situação na América do Norte.....26;

2.4 Investimentos Comparativos Envolvido na Implantação de Smart grid.....26;

Capítulo III – Implantação do Smart Grid no Brasil

3.1 Introdução.....28;

3.2 Aspectos para a Implantação de Smart Grid no Brasil.....28;

3.3 Informações dos Principais Projetos Pilotos Brasileiros.....30;

Capítulo IV – Necessidades e Principais Variáveis que Interferem na implantação de Smart Grid

4.1 Introdução.....35;

4.2 Determinações das Variáveis Importantes para Implantação.....35;

4.3 Critérios para Seleção das Variáveis Relevantes e a Representação delas como Indicadores para Criação de um Índice 37;

4.3.1 Fundamentos sobre Indicador e Índice e as Etapas para Criar um Índice...38;
4.3.2 Seleções dos Indicadores e a Criação do Índice para Implantação de Smart Grid.....41;

4.3.2.1 Definições dos Indicadores, Peso, Fator de Compensação para Criação do Índice 41;

4.3.3 Construção e Cálculo do Índice para Implantação de Smart Grid.....45;

4.3.3.1 Construção do Índice pelo Método Estatístico - M. ponderada.....47;
4.3.3.2 Cálculo do Índice Usando a Tabela 4.1.....47;

Capítulo V – Método Delphi e as Etapas para Avaliação dos Sistemas Elétricos

5.1 Introdução.....49;

5.2 Aplicação do Método Delphi na Avaliação dos Sistemas Elétricos.....49;

5.3 Cálculo do Índice de Prioridade.....51;

5.4 Aplicação e Teste do Método Estatístico e Discussão dos Resultados.....52;

5.5 Conclusão.....54;

Capítulo VI – Cálculo do Índice de Prioridade com Aplicação de um Sistema Fuzzy

6.1 Introdução.....57;

6.2 Fundamentos Teóricos da Lógica de Fuzzy.....58;

6.3 Um Breve Histórico da Lógica Fuzzy.....58;

6.4 Sistemas Fuzzy e os seus Fundamentos.....59;

6.4.1 Resumo das Definições dos Componentes Básicos de um Sistema Fuzzy..59;
6.4.2 Arquitetura de um Sistema Fuzzy.....62;

6.4.2.1 Interface de Fuzzificação (Fuzzificação das Variáveis de Entrada).62;
6.4.2.2 Base de Conhecimento e Unidade de Inferência ou Decisão.....63;
6.4.2.3 Interface de Defuzzificação.....68;

6.5 Vantagens e Desvantagens dos Fundamentos Fuzzy.....71;

6.6 Principais Aplicações dos Fundamentos Fuzzy.....71;

6.7 Implementação de um sistema Fuzzy para Cálculo do Índice de Prioridade.....72;

6.7.1 Utilização do T*oolbox Fuzzy* do Matlab.....72;
6.7.2 Desenvolvimento do Sistema Fuzzy para o Cálculo do Índice.....73;

6.7.2.1 Etapas para o Desenvolvimento do Sistema Fuzzy para o Cálculo do Índice.....73;

6.8 Avaliações dos Sistemas Elétricos e Cálculo do Índice pelos dois Métodos.....78;

6.8.1 Cálculo do Índice de Prioridade aplicando um Sistema Fuzzy.....79;
6.8.2 Verificação da Consistência do Método do Sistema Fuzzy e a Comparação com o Método Estatístico.....80;

6.9 Avaliação e Melhoria do Sistema Fuzzy.....82;

6.10 Conclusão e Considerações Finais.....83;

Capítulo VII – Considerações Finais e Perspectivas Futuras

7.1 Considerações Finais.....84;
7.2 Perspectivas Futuras.....87;

Capítulo VIII - Referências .....89.

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 2.1 - Os sete domínios principais da arquitetura smart grid (baseado no NIST, 2010).....24
Figura 2.2 - Níveis Estrutura Básica de uma Rede Inteligente (ABNEE / CEMIG, 2010)..25
Figura 2.3 – Elementos de Investimento de Rede Inteligente.....27
Figura 3.1 - DEC do Sistema Elétrico do Brasil de 1996 a 2010 x Ano (fonte: ANEEL, 2013).....29
Figura 4.1 - Etapas para Avaliação dos sistemas para a implantação de smart grid.....38
Figura 4.2 - Etapas para a construção de um índice.....39
Figura 5.1 - Representação do Fluxograma do Método Delphi para Definição da Tabela 4.1.....51
Figura 5.2 - Gráfico dos Índices de Prioridades.....54
Figura 6.1 - Diagrama para cálculo do Índice de Prioridade pelo Sistema Fuzzy.....57
Figura 6.2 - Exemplo do Diagrama H-E dos Conjuntos Fuzzy “pequeno”, “médio” e “grande” para uma variável de risco.....60
Figura 6.3 - Diagrama esquemático da aplicação das regras na etapa de inferência.....62
Figura 6.4 - Digrama em blocos da Arquitetura de um sistema fuzzy básico.....62
Figura 6.5- Sistema *fuzzy* com graus de pertinência da variável de saída *z*, produzidos pela aplicação das regras *fuzzy* 1, 2 e 3.....64
Figura 6.6 - Conjunto *fuzzy* resultante do processo de agregação das regras *fuzzy* 1, 2 e 3..65
Figura 6.7 - Diagrama Típico de um Modelo de Inferência de Mamdani.....66
Figura 6.8 – Saída em um Sistema de Inferência do Modelo de Mamdani.....67
Figura 6.9- Saída em um Sistema de Inferência do Modelo TSK.....68
Figura 6.10 - Representação do Centróide.....69
Figura 6.11 - Representação da Média dos Máximos.....69
Figura 6.12 - Método de defuzzificação da Média dos Máximos (distintas formas com o mesmo MM).....70
Figura 6.13 - Oito variáveis de Entrada e uma variável de Saída - Modelo Mamdini.....75
Figura 6.14 - Domínio das variáveis de entrada e as funções de Pertinência Gaussiana.....75

Figura 6.15 - Uma variável de Saída, função de pertinência Gaussiana simples - Método Mamdini.....76
Figura 6.16 - Lista de Regras apresentadas no Matlab.....77
Figura 6.17 – Representa o cálculo do Índice de Prioridade com a agregação das regras no Matlab.....78

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 3.1 - DEC Brasil x Ano.....29
Tabela 3.2 - Principais Projetos Pilotos Brasileiros.....30
Tabela 4.1 - Matriz para Construção do Índice de Implantação.....46
Tabela 5.1 - Características de seis alimentadores (AL) do sistema elétrico da COELBA.52
Tabela 5.2 - Cálculo do Índice de Prioridade pelo Método Estatístico.....54
Tabela 6.1 - Funções de Pertinência e a equação correspondente.....61
Tabela 6.2 - Lista das variáveis de entradas do sistema Fuzzy (8 Indicadores).....74
Tabela 6.3 - Pesos das regras utilizadas no Sistema Fuzzy.....77
Tabela 6.4 - Avaliação de seis sistemas elétricos para 20 indicadores.....79
Tabela 6.5 - Avaliação de seis sistemas elétricos para 8 indicadores (Sistema Fuzzy).....79
Tabela 6.6 - Cálculo do Índice de Prioridade para os Seis (6) Sistemas pelo Método do Sistema Fuzzy.....79
Tabela 6.7 - Cálculo do Índice de Prioridade para os seis (6) Sistemas pelos dois métodos e a soma das avaliações dos oitos (8) indicadores mais relevantes.....80
Tabela 6.8 - Teste de consistência do Cálculo do Índice para os dois métodos e a soma das avaliações Sistema Fuzzy.....81

LISTA DE SIGLAS

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMI – *Advanced Metering Infrastructures*

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI - *American National Standards Institute*

CELPE - Companhia Elétrica do Estado de Pernambuco

CEMIG - Companhia Elétrica do Estado de Minas Gerais

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

COD - Centro de Operação da Distribuição

COM-EU - Parlamento Europeu e o Conselho (Europa)

COELBA – Companhia Elétrica do Estado da Bahia

COELCE - Companhia Elétrica do Estado do Ceará

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz

DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

DECC - *Department of Energy and Climate Change* (Reino Unido)

DIC - Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

DICRI - Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por Unidade Consumidora

DMIC - Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

DOE - *Department of Energy* (Estados Unidos)

DMS - *Distribution Management System*

DSM –*Demand Side Management*

EC - *European Comission* (Europa)

EDRP - *Energy Demand Research Project* (Reino Unido)

EE - Eficiência Energética

EMS - *Energy Management System*

ENA - *Energy Networks Association* (Reino Unido)

END - Energia Não Distribuída

Enel - *Enel Distibuzione S.p.A.* (Itália)

Eneri - *Sistemas de Gestión Energética*

EPA - *Environmental Protection Agency* (Estados Unidos)

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EPRI - *Electric Power Research Institute* (Estados Unidos)

ERGEG - *European Regulators' Group for Electricity and Gas* (Europa)

Erse - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (Portugal)

ESC - *Essential Services Commission* (Austrália)

Esmig - *European Smart Metering Industry Group* (Europa)

FEC - Freqüência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FIC - Freqüência de Interrupção individual por Unidade Consumidora

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

Fistel - Fundo de Fiscalização das Telecomunicações

FCM - Fuzzy c-means

GLD – Gerenciamento pelo lado da Demanda

GLO – Gerenciamento pelo lado da Oferta

GPRS - *General Packet Radio Service*

GSM - *Global System for Mobile Communications*

GWh – Gigawatt hora

HAN - *Home Area Network*

HV - *High* voltage

IEA - *International Energy Agency*

IED - *Inteligent Electronic Device*

IEE - *Institute for Electric Efficiency* (Estados Unidos)

IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

IHD - *In Home Display* ou *In House Display*

Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

Isgan - *International Smart Grid Action Network*

JRC - *Joint Research Centre - European Commission* (Europa)

KDD -*Knowledge Discovery in Databases*

Lactec - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MDM - *Meter Data Management*

MME - Ministério de Minas e Energia

NAN - *Neighborhood Area Network*

Naruc - *National Association of Regulatory Utility Commissioners* (Estados Unidos)

Nerc - *North American Electric Reliability Corporation* (Estados Unidos e Canadá)

OCDE - Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OEB - *Ontario Energy Board* (Canadá)

Ofgem - *Office of Gas and Electricity Markets* (Reino Unido)

OLAP - *On-Line Analytic Processing*

O&M - Operação e manutenção

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

OSI - *Open Systems Interconnection*

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PRODIST - Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

PDD - Plano de Desenvolvimento da Distribuição

PG&E - *Pacific Gas e Electric Company* (Estados Unidos)

PLC - *Power Line Communications*

PNNL - *Pacific Northwest National Laboratory* (Estados Unidos)

POST - *The Parliamentary Office of Science and Technology* (Reino Unido)

PPDEST - Preço Público pelo Direito de Exploração de Serviço de Telecomunicações

Proret - Procedimentos de Regulação Tarifária

REI - Redes Elétricas Inteligentes

RNA – Rede Neural Artificial

RF - Rádio Freqüência

RIA - *Regulatory Impact Analysis*

RSCAS - *Robert Schuman Centre For Advanced Studies* (Itália)

RTP - *Real-time pricing*

SAD - Sistema de Apoio a Decisão

SAIDI - *System Average Interruption Duration Index*

SAIFI - *System Average Interruption Frequency Index*

SCE - *Southern California Edison Company* (Estados Unidos)

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*

SCADA - Sistema de Controle e Aquisição de Dados

SDG&E - *San Diego Gas & Electric Company* (Estados Unidos)

SECOM - Secretaria de Comunicação Social da Presidência da República

SGIP - *Smart Grid Interoperability Panel*

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SIN - Sistema Interligado Nacional

SMC - Sistema de Medição Centralizada

SOM - *Self-Organizing Maps*

TI - Tecnologia da Informação

TIC - Tecnologia da Informação e Comunicação

TNMP - *Texas New Mexico Power* (Estados Unidos)

TOU - *Time of Use*

UC - Unidade Consumidora

WACC - *Weighted Average Cost of Capital*

WAN - *Wide Area Network*

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 Motivação, Relevância e Objetivos

O Brasil é um país em crescimento econômico contínuo e com expectativa de aumento do consumo e da demanda de energia elétrica, consequentemente terá a necessidade da expansão e modernização dos seus sistemas elétricos, De acordo com o plano de energia nacional brasileiro para 2008 - 2017, o governo estabeleceu uma meta de gerar 54 gigawatts (capacidade instalada) para atender ao aumento do consumo esperado em 60% (International Energy Outlook, 2010).

O setor elétrico tem passado por diversas mudanças no sentido de buscar melhorar, a confiabilidade, a segurança, a eficiência e a qualidade dos seus serviços. Essas transformações vêm acarretando um aumento de sua complexidade e da necessidade de novas relações técnico-comerciais entre supridores e consumidores.

A infraestrutura elétrica atual é insuficiente para atender as crescentes necessidades e expectativas dos consumidores. Os poucos investimentos em infraestrutura nas últimas décadas deixaram partes do sistema de energia elétrica vulneráveis a interrupções dos serviços e comprometendo a qualidade. Atualizações substanciais no sistema são necessárias para que os serviços tenham o nível de confiabilidade e qualidade exigido e esperado pelos consumidores.

Atualmente as informações fornecidas aos consumidores limitam-se ao seu consumo mensal, eles não têm informações detalhadas sobre o seu padrão e quantidade de seu consumo. Além disso, não têm informações sobre opções de compra em tarifas alternativas ou outros serviços, isto impossibilita que eles gerenciem e racionalize os seus custos com eletricidade.

Neste cenário surgem novas tecnologias como redes inteligentes (s*mart grid)* que têm o objetivo de contribuir para a gestão de energia e que esta gestão possa ser compartilhada do ponto de vista da concessionária e também dos consumidores.

A expressão redes inteligentes é a tradução do termo em inglês mundialmente conhecido como *smart grid*. Trata-se de uma nova realidade imposta aos serviços de eletricidade. De uma forma simples, o conceito refere-se à inserção em grande escala de novas tecnologias e de elementos digitais no setor elétrico.

Segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos - DOE, redes inteligentes são "*um sistema automatizado, caracterizado por um fluxo bidirecional de energia elétrica e de informações, capaz de monitorar tudo, desde usinas até as preferências dos consumidores. Esse sistema incorpora na rede os benefícios da computação distribuída e da comunicação para oferecer informações em tempo real e permitir o equilíbrio quase instantâneo de oferta e demanda*" (DOE, 2009a). Em outro documento, o DOE afirma que redes inteligentes são *"uma visão a ser completada, que devem ser construídas de acordo com as necessidades do mercado onde serão implantadas, considerando múltiplas perspectivas,*

entre elas, tecnológica, ambiental, socioeconômica e político-regulatória" (DOE, 2009a, 2009b e 2009c)**.**

Segundo um relatório norte americano (GELLINGS, 2009), "*rede inteligente é a utilização de sensores, comunicações, capacidade computacional e controle para aumentar as funcionalidades do sistema de fornecimento de energia elétrica. Um sistema convencional torna-se inteligente a partir do sensoriamento, comunicação, inteligência aplicada, exercendo controle por meio de feedback ajustado continuamente. Para um sistema de potência, isto implica em funções que permitem a otimização do uso de geração, transporte, armazenamento, fontes distribuídas e uso final do consumidor em direção a objetivos que garantam confiabilidade, uso mais racional de energia, mitigação de impacto ambiental, gestão de ativos e contenção de gastos*".

1.2 Objetivos e a Implantação de Smart Grid

O objetivo da implantação de smart grid será a modernização dos sistemas elétricos, buscando melhorar a qualidade e também aumentando quantidade de serviços ofertados ao consumidor, com mais informações confiáveis disponíveis será possível o gerenciamento com transparência das atividades tanto para os consumidores como para o controle dos reguladores. Haverá também a possibilidade do estimulo a otimização do consumo com a implantação de tarifas diferenciadas e dinâmicas. Porém será um longo caminho a percorrer.

Evidentemente, quanto mais complexos os sistemas elétricos, serão maiores os desafios impostos a todos os agentes do sistema para que seja bem sucedida a implantação de redes inteligentes no país, porém após a conclusão desta etapa espera-se que os benefícios a serem usufruídos pela sociedade com este novo paradigma tenham compensado todo o esforço requerido durante o processo.

1.3 Políticas para Implantação de Smart Grid

Em diferentes países a maioria das concessionárias iniciaram projetos de redes inteligentes com projetos-piloto ou a implantação em áreas específicas. Independente da estratégia de implantação é fundamental para validar as hipóteses de casos reais, antes de começar a implantação total, as amostras devem ser representativas, os benefícios precisam cobrir toda a empresa para alavancar maiores resultados, para potencializar os resultados deverão buscar a integração da geração, transmissão, distribuição e consumidores, também será fundamental considerar todos os aspectos regulamentares, considerar toda infraestrutura necessária para a implementação dos projetos e o envolvimento dos consumidores desde o início dos projetos será fundamental para o sucesso.

As redes inteligentes é um tema contemporâneo e estão na pauta das discussões do setor elétrico mundial. No Brasil, a implantação é objeto de análise tanto pelas distribuidoras quanto pela Agência Reguladora, pelo Congresso Nacional e por alguns ministérios.

No Congresso Nacional brasileiro, alguns projetos relacionados às redes inteligentes estão em discussão: Projeto de Lei nº 3.337/2012 e Projetos de Lei do Senado nº 608/2011 e nº 84/20121. Os projetos estão ainda em fase de avaliação prévia pelos parlamentares. Caso sejam realmente aprovados e convertidos em lei, haverá a implantação compulsória.

No governo (executivo) o Ministério de Minas e Energia - MME conduziu um grupo de trabalho multidisciplinar responsável pelo estudo e planejamento da implantação de uma rede inteligente no país. Os membros do grupo de trabalho, além do MME, foram representantes da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Centro de Pesquisa Energia Elétrica (CEPEL), a ANEEL e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).
O grupo procurou rever os estudos técnicos e preparar uma análise com recomendações sobre as medidas que devem ser adotadas, concentrando-se principalmente por:

(i) a consolidação de programas de smart grid no Brasil;
(ii) a adequação das normas e regulamentações para distribuidores de eletricidade;
(iii) a identificação dos recursos para financiamento e promover incentivos para a produção de equipamento no país; e
(iv) a regulamentação para os novos participantes no mercado, incluindo os consumidores e provedores de geração distribuída (MME, 2011).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vinculada ao MME, tem expedido nos últimos anos, diferentes regulamentos relacionados a redes inteligentes. Foram publicadas resoluções sobre:

1. A utilização das instalações de distribuição de energia elétrica como meio de transporte para a comunicação digital ou analógica de sinais (*Power Line Communications* - PLC);

2. A implantação de Sistema de Informações Geográficas - SIG;

3. A modalidade tarifária horária Tarifa Branca, aplicadas às unidades consumidoras - UCs do Grupo B;

4. As condições para o acesso de micro geração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição, com a criação do sistema de compensação de energia elétrica.

5. Os sistemas de medição inteligente.

1.3.1 A Implantação de Medidores Inteligentes

Em relação à medição inteligente, não há nenhuma recomendação da ANEEL para a instalação dos novos medidores em massa. A ANEEL deixou para as distribuidoras a função de planejar e instalar os sistemas, de forma que sejam priorizadas as decisões das empresas. O regulador delegou as distribuidoras à decisão de seleção dos planos mais adequados, por terem conhecimento profundo de sua área de atuação. O regulamento proposto (REN nº 502/2012) considerou o momento específico e a Agência deve monitorar a aplicação da regra que pode ser alterada no futuro. Apesar das iniciativas que visam à

introdução de um modelo de redes inteligentes, as discussões acerca do tema carecem ainda de informações dos custos e benefícios envolvidos em uma implantação em grande escala.

1.3.2 Dificuldades para Implantação de Smart Grid no Brasil

As implantações de redes inteligentes estão em diferentes níveis nos países, diversas são as tecnologias relacionadas ao contexto. No Brasil, por parte das distribuidoras, as iniciativas ainda se resumem a trabalhos de inovação decorrentes de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D ou a projetos de medição específicos que não aplicam conceitos mais amplos de redes inteligentes. Algumas das distribuidoras brasileiras estão conduzindo projetos de cidades inteligentes (projetos pilotos) para testar as tecnologias e verificar os custos envolvidos.

Atualmente os principais desafios brasileiros relacionados à implementação da arquitetura smart grid são: tamanho da matriz energética brasileira, as dimensões continentais do país com áreas distantes de zonas rurais, principalmente nas Regiões Norte, Centro Oeste e Nordeste e também falta de padrões de qualidade, problema de ligações clandestinas e a falta de regulamentação do setor.

As dificuldades para implantação de smart grid no Brasil, a maioria delas é a mesma que a de outros países. Elas são principalmente:

(i) incerteza de mercado e falta de condições na estrutura de mercado e regras;
(ii) baixa sensibilização e engajamento dos atores envolvidos;
(iii) interoperabilidade e garantia de escalabilidade;
(iv) incerteza receitas devido à falta de definições regulamentares. Além dessas barreiras, vale à pena mencionar outras questões particulares no Brasil:

(i) as redes de energia elétrica no Brasil são muito extensas e requerem uma enorme quantidade de investimentos;
(ii) mais de 70% da matriz energética brasileira é energia hidrelétrica e por esta razão, outro tipo de sistema renovável não é facilmente aceitável;
(iii) no Brasil existem zonas rurais e remotas de grandes e de baixa densidade e
(iv) a energia elétrica e as agências de telecomunicações não estão alinhadas em relação o roteiro para desenvolvimento de Smart Grid no Brasil (MME, 2011).

1.3.3 Planejamento da Implantação de Smart grid no Brasil

O planejamento da implantação de Smart grid no Brasil deverá ser feito em etapas bem elaboradas, devido aos elevados investimentos financeiros e também pela rápida evolução tecnológica, em áreas como eletricidade, eletrônica, tecnologia da informação e comunicação, poderá se ter um grande investimento tecnológico e este ficar obsoleto mesmo antes da conclusão de sua implantação (FALCÃO, 2009; DOE, 2009a, DOE, 2009b; NIST, 2010; NEMA, 2009).

Esta tese apresenta um método para a implantação de redes inteligentes com base em critérios: técnicos, financeiros, ambientais e recursos humanos para ser aplicado na avaliação de sistemas elétricos, em suas atuais condições de funcionamento, através da proposta de criação um índice baseado em indicadores (aplicando o Método Delphi, Método Estatístico e um Sistema Fuzzy) para estabelecer uma ordem de prioridade para implantação de redes inteligentes (smart grid).

1.4 Organização da Tese

Esta tese está organizada nos capítulos descritos a seguir:

Capítulo II - Características, Funcionalidades e os Principais Desafios da Implantação de smart grid

São apresentados aspectos gerais e as características associadas a smart grid, são discutidos os recursos, funcionalidades e os principais desafios da implantação de smart grid.

Capítulo III - Implantação de Smart Grid no Brasil

São apresentados os principais aspectos para implantação de smart grid, as características, as políticas necessárias e os desafios. É apresentado também o cenário atual do setor elétrico brasileiro e os principais projetos pilotos em andamento nos Estados brasileiros.

Capítulo IV - Principais Variáveis que Interferem na Implantação de Smart Grid

São discutidas e apresentadas às principais variáveis que interferem na Implantação de smart grid no que refere as características técnicas, econômicas, de localização da instalação, dos recursos humanos disponíveis, das condições ambientais, de possíveis parcerias, de condições socioeconômicas dos consumidores, são apresentadas as noções básicas sobre indicadores e índice e os passos para criar um índice e também é discutida a necessidade de se criar um modelo nacional que atenda ao perfil do consumidor brasileiro.

Capítulo V - Método Delphi e as Etapas para Avaliação dos Sistemas Elétricos pelo Método Estatístico

São apresentados os fundamentos do Método Delphi, as principais características da ferramenta e a aplicação do Método Delphi para a definição dos indicadores, pesos, fator de compensação utilizados no cálculo do Índice de Prioridade para a Avaliação dos Sistemas Elétricos e também é realizada a aplicação e teste do Método Estatístico e discussão dos resultados.

Capítulo VI - Cálculo do Índice de Prioridade com Aplicação de um Sistema Fuzzy

São apresentados e discutidos os fundamentos da lógica Fuzzy e desenvolvido um Sistema Fuzzy, utilizando o tolbox fuzzy do Matlab, para o cálculo do Índice de Prioridade para implantação de smart grid e também é realizado a aplicação e teste do Método do Sistema Fuzzy e discutidos os resultados.

Capítulo VII - Considerações Finais e as Perspectivas Futuras

São apresentadas as conclusões do trabalho e as sugestões para futuras pesquisas.

Capítulo VIII - Referências

São apresentadas as referências utilizadas no trabalho.

Capítulo II - Características, Funcionalidades e os Principais Desafios da Implantação de Smart Grid

2.1 Introdução

Como já mencionado no capítulo 1, a implantação de *smart grid* proporciona a integração entre a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia e compartilhamento de infraestrutura de comunicação digital e processamento de dados, funcionando como uma *Internet de dispositivos*, interligando os chamados dispositivos inteligentes - IEDs (*Intelligent Electronic Devices*), trocando informações e ações de controle entre os diversos segmentos da rede elétrica (PODMORE, 2010).

Um modelo conceitual para arquitetura smart grid é ilustrado na figura 2.1 a abaixo, (figura elaborada baseada no modelo do NIST, (NIST, 2010), consiste em sete principais domínios: geração, transmissão, distribuição, consumo, operação, mercado e provedor de serviços). A arquitetura da rede é dividida em três camadas: camada de energia, camada de comunicação e camada de tecnologia da informação. As duas últimas são as camadas que criam a infraestrutura para a camada de energia, tornando a rede "inteligente".

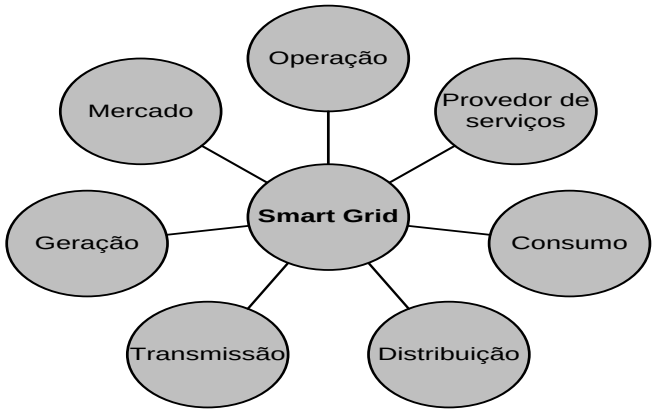

Figura 2.1–Os sete domínios principais da arquitetura smart grid, baseado (NIST, 2010).

2.2 Estruturas Básicas de uma Rede Inteligente (Smart Grid)

A Rede Inteligente é um conjunto integrado de funções, implementadas através do agrupamento de níveis, módulos, subsistemas, equipamentos e software com a finalidade de possibilitar, em tempo real ou on-line, a aquisição e o tratamento de informações, bem como comandos automáticos de equipamentos remotamente localizados.

A estrutura básica de smart grid pode ser vista com um conjunto de níveis (camadas) de um sistema de automação, na figura 2.2 (ABNEE / CEMIG, 2010) abaixo estão relacionados os cinco (5) níveis:

N1 - Sistema elétrico (Nível de processos físicos)

N2 – Medidores, Sensores, Controladores e Atuadores (nível de aquisição de informações, e controle do sistema elétrico);
N3 - Sistemas de Telecomunicações (nível das tecnologias de comunicações, e protocolos);
N4 - Sistemas Computacionais (nível das tecnologias de informações e armazenamento);
N5 - Redes Inteligentes (Nível central estratégico de gerenciamento da rede inteligência).

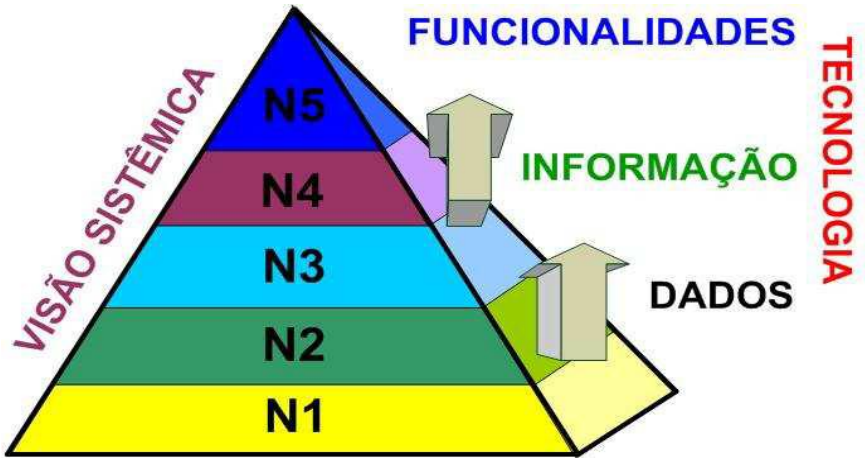

Figura 2.2 - Níveis da Estrutura Básica de uma Rede Inteligente

2.3 Experiências Internacionais na Implantação de Smart Grid

Nos diferentes países a implantação de redes inteligentes encontra-se em estágios diferentes e estes buscam atender as necessidades específicas de seus sistemas elétricos e as características regionais. A base inicial para a implantação de smart grid será a instalação de sistemas de medições inteligentes. Esta fase está bastante avançada em alguns países, principalmente na Europa e na América do Norte. Já a introdução de novas tecnologias e ferramentas para as redes inteligentes estão em evolução gradativa.

2.3.1 Situação no Continente Europeu

No âmbito da União Européia, a introdução de novas tecnologias no setor elétrico foi introduzida pela legislação supranacional de 2005. O Parlamento Europeu já emitiu diferentes diretivas que mencionam as novas tecnologias. A Diretiva EU-2005/89/CE, relativa à garantia da segurança do fornecimento de energia elétrica e do investimento em infraestrutura, faz referência à utilização de "*sistemas de medição avançada*" e "*tecnologias de gestão de demanda em tempo real*" (COM-EU, 2005). A Diretiva EU-2006/32/CE também trata de aspectos de redes inteligentes, embora não utilizasse o termo *smart grid* (COM-EU, 2006). Já a Diretiva EU-2009/72/EC menciona os necessários estudos de custos e benefícios e cita explicitamente o termo, estabelecendo que "*Os Estados-Membros deverão incentivar a modernização das redes de distribuição, por exemplo introduzindo redes inteligentes"* (COM-EU, 2009).

Um importante fato ocorreu em 2007 na União Europeia foi a abertura do mercado de energia elétrica (mercado livre) para consumidores em baixa tensão, incluindo residenciais. Na Europa, as redes inteligentes são mecanismos empregados também para atingir as metas que o Parlamento Europeu aprovou no Pacote Clima-Energia. Esse pacote, também conhecido como Plano 20-20-20 determina que a União Européia reduza em 20% as emissões de gases, com efeito, estufa, eleve para 20% a quota de fontes renováveis no consumo de energia e aumente em 20% a eficiência energética até 2020 (Parlamento Europeu, 2008).

Um acompanhamento amplo dos projetos de redes inteligentes na Europa pode ser feito por meio do portal *Smart Grids Projects in Europe*.

2.3.2 Situação na América do Norte

Nos Estados Unidos, as redes inteligentes são motivadas pela necessidade de modernização dos sistemas elétricos e introdução de novas fontes de energia. O desafio americano será interligar e automatizar o sistema de transmissão do país, a instalação de fontes renováveis, reduzirem as interrupções no fornecimento e renovar os ativos com o uso de novas tecnologias (GELLINGS, 2009).

No âmbito do plano The *American Recovery and Reinvestment Act of 2009* (*Recovery Act* ou ARRA), foram liberados mais de US$ 3,4 bilhões para o estímulo a tecnologias e a projetos de *smart grid* no país, além de US$ 615 milhões para desenvolvimento de técnicas de armazenamento de energia elétrica. Em outubro de 2009 em torno 100 planos de investimento em redes inteligentes foram viabilizados. Os financiamentos públicos foram condicionados a investimentos do mesmo valor por parte das empresas privadas, de modo que foram atingidos montantes de US$ 7 a US$ 8 bilhões em projetos de inovação em redes inteligentes (EPRI, 2011).

Nos Estados Unidos a legislação e a regulação dos serviços de energia elétrica são de competência estadual, diferentemente do Brasil, devido a este fato, alguns estados norte-americanos estão mais avançados que outros na implantação de redes inteligentes e não existe ainda um padrão definido.

2.4 Investimentos Comparativos Envolvido na Implantação de Smart grid

Os principais custos envolvidos na implantação Smart Grid são:

- Aquisição e instalação de medidores inteligentes;
- Aquisição de infraestrutura de telecomunicações;
- Aquisição de infraestrutura de automação;
- Aquisição de infraestrutura de TI;

- Gastos com logística do programa de implantação;
- Gastos com campanhas de comunicação;
- Gastos administrativos.
- *Aquisição e instalação de Display (IHDs - In Home Display ou In House Display), em alguns casos para sistemas de leitura centralizada.

O custo do medidor inteligente é um dos principais pontos desta análise. Primeiro, porque os gastos com compra e instalação desses equipamentos de medição constituem os maiores dispêndios para implantação de redes inteligentes. Segundo, porque o custo do medidor é a base para estimativa dos gastos com os demais componentes das redes inteligentes (os custos de aquisição, de instalação de equipamentos e de sistemas de telecomunicações, de automação e de TI são calculados a partir do valor do medidor).
Diante desse panorama, uma postura conservadora é indicada para a estimativa do valor do medidor inteligente. É importante que essa estimativa considere um valor coerente com as diversas referências e informações coletadas.

Na figura 2.3 o Electric Power Research Institute - EPRI, classifica os custos da implantação da rede inteligente tendo como base o medidor (Hardware de consumo): (EPRI, 2011)

- Hardware de consumo (medidor) 45% dos custos totais;
- Hardware de rede 20% dos custos totais;
- Instalação do sistema 15%;
- Gerenciamento do Projeto Smart Grid 11%;
- TI (Telecomunicações e Informática) 9%.

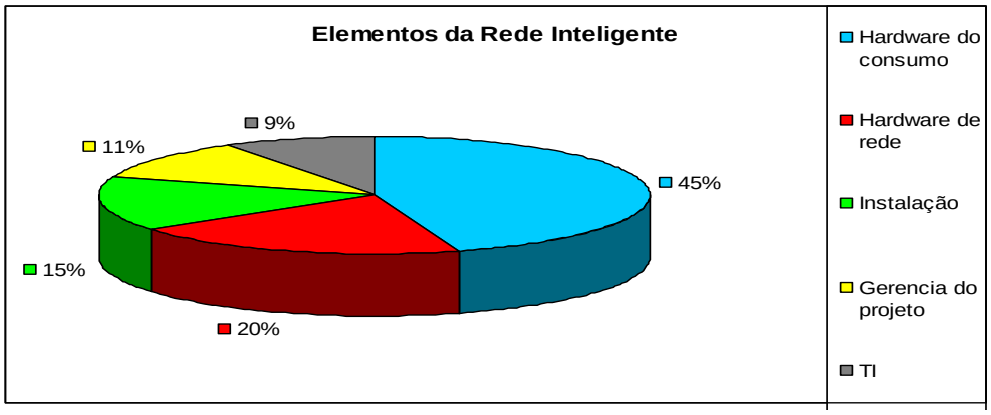

Figura 2.3 – Elementos de investimento de Redes Inteligentes (EPRI, 2011)

O medidor representa a maior parcela do investimento 45%, o EPRI argumenta que poderá reduzir para 33% do investimento total.

Capítulo III - Implantação de Smart Grid no Brasil

3.1 Introdução

A implementação dos conceitos de Smart grid é algo inevitável, a rede de energia elétrica necessita ser modernizada. A questão é quando e como isso vai acontecer. Os empresários e governantes locais precisam se posicionar de uma maneira mais objetiva quanto a questões mais abrangente relacionado à área. Uma definição importante seria relacionada à divisão de responsabilidades entre os diversos agentes deste mercado. Apesar de o smart grid ser uma tendência mundial, o seu processo de implantação é normalmente feito de forma lenta e em etapas bem definidas, pois envolve desafios como:

- Padronização de hardware, software e protocolo de comunicação dos dispositivos;
- Alto investimento para a substituição dos dispositivos convencionais por microprocessados e mudança na infraestrutura de captação de dados provenientes destes dispositivos em cada unidade da rede elétrica;
- Estudo para regulamentação e política de tarifas que possam comportar o novo sistema;
- Escolha das funcionalidades dos dispositivos da rede, ou seja, se poderão possibilitar o corte de carga remoto ou promover acesso a Web via rede elétrica.

Um dos fatores críticos para o sucesso na implantação de redes inteligentes é a participação ativa dos consumidores, que deverão usufruir dos diversos mecanismos tecnológicos de acesso às informações geradas pela rede para a devida tomada de decisão. Dessa forma, passam a se constituir em agentes da eficiência energética.

Será essencial que o consumidor esteja envolvido desde o início no projeto de redes inteligentes e estar convencido o suficiente para incorporar as novas tecnologias e algumas mudanças de procedimentos.

Algumas experiências demonstram a importância da participação do consumidor (U.S. Department of Energy, 2009; NIST, 2010; NEMA, 2009, Projetos Pilotos desenvolvidos pelas concessionárias brasileiras), expectativas e motivações de quem, de fato, deve incorporar mudanças de atitude no dia a dia. Os consumidores deverão ter, ao fim do processo, múltiplas opções de acesso aos serviços e aplicações, abrindo possibilidades para a concessionária de energia elétrica oferecer, cada vez mais, novos serviços e aplicações. Assim, a implantação das redes inteligentes será a catalisadora de mudanças significativas na relação entre concessionária e o consumidor.

3.2 Aspectos para a Implantação de Smart Grid no Brasil

O mercado de energia brasileiro é baseado, predominantemente, na geração centralizada, a gestão do setor de energia elétrica sempre foi efetuada basicamente a partir de ações e iniciativas das concessionárias de energia e de órgãos reguladores como a Agência Reguladora de Energia Elétrica - ANEEL e do Operador Nacional do Sistema -ONS.

Atualmente no setor elétrico do Brasil, os sistemas de geração e transmissão das concessionárias de energia elétrica já possuem sistemas de supervisão e automação que utilizam a tecnologia digital para monitorar os seus processos em praticamente todos os grandes centros. Estes sistemas apresentam diversas funcionalidades como a tele-supervisão, telecomando e telemedição que a partir do sistema SCADA (Sistema de Controle e Aquisição de Dados) implementados nestes centros indicam as condições de operação de todo sistema automatizado em tempo real e podem controlar grande volume de carga.

No caso do sistema de distribuição no Brasil (tensão menor que 34,5 kV) a realidade é muito diferente. Devido a sua complexidade e um elevado numero de consumidores, cerca de 68 milhões, a implantação da automação destes sistemas está apenas no inicio e a sua gestão ainda é realizada de forma convencional. Um exemplo disso é que as medições de energia são feitas manualmente em cerca 95% das unidades consumidoras, a partir de medidores eletromecânicos, o que contribui para a imprecisão de medidas e um precário acompanhamento das cargas.

Na Tabela 3.1 e no gráfico da figura 3.1, é mostrado o acompanhamento de um importante indicador de qualidade Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor anual - DEC do sistema elétrico do Brasil, de 1996 a 2011.

O acompanhamento deste indicador é bastante pertinente, pois mostra que em 2010 o tempo médio de interrupção foi de 18,35 horas, em 2011 e 2012 respectivamente 18,40 e 18,65 horas, mostra que o valor tem apresentado crescimento nos últimos anos, indicando a necessidade de maior controle no sistema elétrico e mais investimento.

Tabela 3.1 - DEC Brasil x Ano

Ano	DEC
1996	26,09
1997	27,19
1998	24,05
1999	19,85
2000	17,44
2001	16,57
2002	18,07
2003	16,66
2004	15,81
2005	16,82
2006	16,32
2007	16,08
2008	16,61
2009	18,82
2010	18,35
2011	18,40
2012	18,65

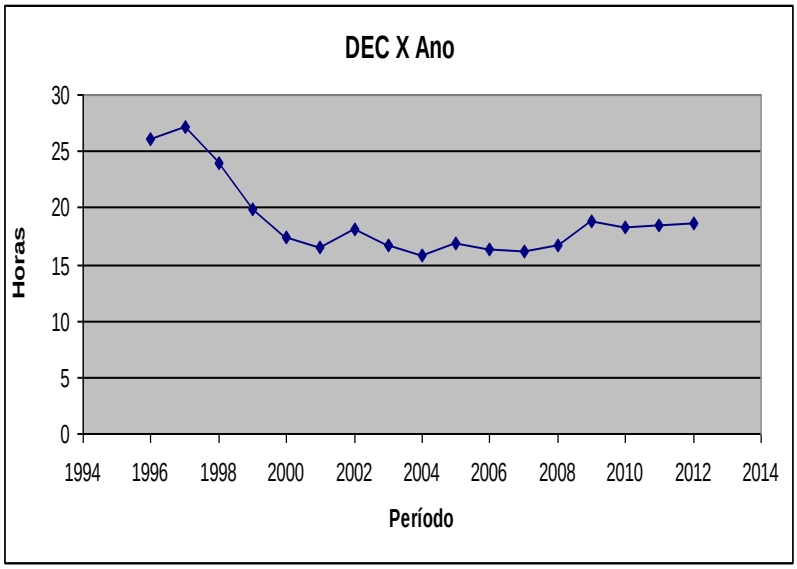

Figura 3.1 - DEC do Sistema Elétrico do Brasil de 1996 a 2010 x Ano (fonte: ANEEL, 2013)

O Cenário atual dos sistemas elétricos no Brasil apresenta o seguinte quadro:

- Obsolescência dos ativos dos Sistemas de Distribuição;
- Elevado índice de perdas técnicas e não técnicas;
- Sistemas de Geração e Transmissão dispõem de automação (SCADA);
- A Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor - DEC anual tem crescido nos últimos anos (de 1998 a 2001 houve um decrescimento após a automação da geração e transmissão, figura 3.1);
- Recomposição do sistema lento e precário;
- Processo lento de modernização das redes e de implantação de redes inteligentes.

3.3 Informações dos Principais Projetos Pilotos Brasileiros

A maioria dos projetos pilotos são enquadrados no âmbito de projetos de P&D e o objetivo da definição de arquitetura padrão para redes inteligentes brasileiras, com a constituição dos elementos que compõem os sistemas, incluindo novos dispositivos, softwares, serviços e processos. São realizados testes de interoperabilidade entre medidores e demais equipamentos, além de implantação de sistema de supervisão e reconfiguração de redes em tempo real e do desenvolvimento de metodologia e dispositivos para serviços interativos com os consumidores, A tabela 3.2 abaixo relaciona alguns exemplos destes principais projetos pilotos em cidades de alguns estados brasileiros, e em seguida são descritos resumidamente cada uma desses projetos.

Tabela 3.2
Principais Projetos Pilotos Brasileiros

Projetos	Estado	Cidades	Distribuidora
1	Amazonas	Parintins	Eletrobrás
2	Ceará	Aquiraz	COELCE
3	Minas Gerais	Sete Lagoas	CEMIG
4	Pernambuco	Fernando de Noronha	CELPE
5	Paraná	Fazenda Rio Grande	COPEL
6	Rio de Janeiro	Búzios	Ampla
7	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	Light
8	São Paulo	Aparecida	Bandeirante
9	São Paulo	Barueri	AES Eletropaulo
10	Santa Catarina	Blumenau e Florianópolis	CELESC

1 Cidade (Ilha) de Parintins (Amazonas): o grupo Eletrobrás está com o projeto Parintins em andamento onde foram instalados sensores em vários pontos da rede de distribuição, que permitem a intervenção imediata da fornecedora em caso de falhas no sistema. Também possibilitará o monitoramento dos dados fornecidos pelos medidores, tais como consumo por horário e custo do kWh em diferentes horários do dia. Dessa forma, a concessionária de energia poderá trabalhar com tarifas diferenciadas ao longo do dia,

estimulando o consumo fora dos horários de pico de demanda. O investimento da Eletrobrás é da ordem de R$ 21 milhões que serão aplicados na substituição de todos os medidores, na automação dos alimentadores, na medição e monitoramento de transformadores de distribuição e na implantação de um sistema que melhore o uso do parque gerador de 25 MW de Parintins. Todas as informações colhidas em campo serão enviadas para um centro de inteligência que terá condições de intervir em tempo real para corrigir defeitos e falhas do sistema e de ter uma relação de interação com o consumidor (ELETROBRAS (2011).

2 Cidade de Aquiraz (Ceará): a COELCE (Grupo Endesa) está implantando no município de Aquiraz um Sistema de Reposição Automática (SRA) e de um Sistema Inteligente para Mudança Automática de Ajuste do Sistema de Proteção (SIAP) na rede de média tensão. O principal objetivo é reduzir o desperdício e aumentar a eficiência no consumo de energia. Os diretores da companhia de energia, afirmaram que a escolha de Aquiraz foi por ser uma cidade histórica e pela proximidade com a capital, Fortaleza, além de características importantes e particulares, reunindo condições ideais para a implantação do projeto. Com um consumo de energia significativo, o projeto também estimula a participação direta da comunidade.

3 Cidade de Sete Lagoas (Minas Gerias): a concessionária CEMIG desde 2009 está executando o projeto cidades do futuro, o município foi escolhido pela proximidade com a capital do Estado (Belo Horizonte), este é um município com uma grande diversidade de atividades econômicas nos setores industriais, agricultura e serviço, com uma população de mais de 200.000 habitantes e mais de 80.000 consumidores.

O projeto chamado Cidade do Futuro, inclui ações que cobrem todos os processos de negócios com foco principalmente nas seguintes áreas: (i) automação de medição dos consumidores, (ii) automação de subestações, (iii) automação da rede de distribuição de energia, (iv) sistemas de telecomunicações, (v) sistemas operacionais de computador e (vi) gerenciamento e integração de geração distribuída.

O projeto analisa a capacidade e os benefícios da adoção da arquitetura smart grid a partir dos testes no sistema elétrico da cidade, o projeto permite verificar a viabilidade de expansão para toda a área de concessão da CEMIG, bem como validar os produtos, serviços e soluções inovadoras aplicadas à arquitetura smart grid, em uma escala apropriada e representativa para a empresa. Estão sendo instalados novos medidores e modernos sistemas de telecomunicação, com isso, a concessionária local tem como monitorar os níveis de consumo da população, bem como identificar, em tempo real, eventuais interrupções no fornecimento de energia.

O projeto cidade do futuro tem como resultado esperado: servir de modelo para a implementação das novas tarifas em tempo real e faturamento; reduzir os custos de energia e perdas; melhorar a eficiência da rede elétrica; otimizar a gestão e controle; melhorar a qualidade dos serviços e promover a pesquisa e a sustentabilidade ambiental e no mercado de energia. (CEMIG, 2012)

Para a CEMIG, a principal dificuldade na construção de arquitetura smart grid é que as regras de implementação não foram definidas claramente pela a ANEEL. Por esta razão, o processo de obtenção de recursos financeiros tem sido difícil. No entanto, as práticas adotadas para a implementação e os resultados esperados são estratégicos para todas as partes interessadas, com ênfase para a empresa e entidades governamentais.

4 Cidade (Arquipélago) de Fernando de Noronha (Pernambuco): a concessionária CELPE (Grupo Neoenergia) por meio de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), está implantando na ilha um sistema que vai reunir as principais tecnologias nas áreas de medição, telecomunicações, tecnologia da informação e automação em um único produto. Entre os benefícios da nova rede estão o controle remoto de praticamente todos os processos, como leitura e religação, além da identificação e correção mais rápida de *falhas* no sistema. No total serão investidos R$ 16,4 milhões durante os três anos de implantação do projeto.
Fernando de Noronha será o primeiro local no Estado a contar com Redes Elétricas Inteligentes (REIs) instaladas pela Celpe.

O Arquipélago conta também com o projeto de Eficiência Energética e Pesquisa e Desenvolvimento para ampliar o parque de energia renovável na ilha. O desenvolvimento e a implantação do sistema devem consumir recursos da ordem de R$ 11 milhões. O acordo de cooperação foi celebrado entre o Governo do Estado (Secretaria de Ciência e Tecnologia de Pernambuco - SECTEC), e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE).

5 **Cidade de Curitiba** (Paraná): a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), planeja investir mais de US $ 330 milhões em projetos que estão relacionados aos conceitos de redes inteligentes até 2014. O objetivo é transformar Curitiba em uma cidade digital. Os investimentos são direcionados para a infraestrutura, incluindo a instalação de redes elétricas e adaptação dos modernos sistemas de transferência de energia. Alguns projetos já estão sendo implementados, enquanto os outros permanecem na fase de preparação e estudo. A plataforma de tecnologia, baseada em conceitos da Smart Grid, foi testada na Fazenda Rio Grande, na região metropolitana de Curitiba, abrangendo um milhão de consumidores. O programa está sendo formulado em coordenação com outros serviços públicos, sob a coordenação da Secretaria de estado de desenvolvimento urbano.

Os Projetos pretendem espalhar a Smart Grid até 2020 para reduzir os índices de duração equivalente de interrupção por cliente (DEC) e frequência equivalente de interrupção por cliente (FEC). A prioridade é melhorar o abastecimento. Além disso, as perdas técnicas tendem a cair de 6,5% para 4% e o comercial 1,5% para 0,5%. (COPEL, 2012).
A idéia para novos projetos será incorporar a tecnologia de detecção, monitoramento, informação e telecomunicações para o melhor desempenho de rede.

6 **Cidade de Búzios** (Rio de Janeiro): a concessionária Ampla possui um projeto em andamento que tem como objetivo principal racionalizar o consumo e reduzir o desperdício com eletricidade em geral, transformando a cidade em sustentável, racional e eficiente. São diversos investimentos envolvidos para tornar essa realidade possível e fazer de Búzios uma cidade mais inteligente. O investimento total nas iniciativas foi calculado em média de R$ 40 milhões e deve finalizar em 2014. Foram feitos investimentos em linhas de

transmissão e distribuição de energia, instalação de medidores inteligentes e geração de eletricidade de fontes mais sustentáveis, como eólica e solar. Além disso, foram instaladas lâmpadas de LED de baixo consumo em diversos pontos diferentes da cidade.

7 **Cidade do Rio de Janeiro** (RJ): a concessionária Light desenvolve projetos em medição inteligente. Nesse contexto, destaca-se o Sistema de Medição Centralizada – SMC, que consiste em uma aplicação que utiliza módulos eletrônicos agregados destinados à medição, exercendo as funções de concentração, processamento e indicação das informações de consumo de forma centralizada (medição exteriorizada e blindada). Nesse sistema os medidores de energia ficam localizados no alto dos postes, interligados a uma prumada de comunicação que concentra as leituras das diversas unidades consumidoras. A implantação do sistema possibilita leitura remota e realização de corte e religação à distância.

8 Cidade de Aparecida (São Paulo): o Grupo EDP Bandeirante (Grupo EDP Energias de Portugal) possui em andamento o projeto piloto do INOVCITY (Inovação Social e Mobilidade Elétrica) que está dentro do investimento previsto de R$ 10 milhões e prevê o teste de viabilidade de um conjunto de tecnologias que permitirão uma maior eficiência e qualidade na prestação de serviços ao cliente, nomeadamente a medição inteligente, a iluminação pública eficiente, a microprodução com fontes renováveis de energia, a mobilidade elétrica, bem como um conjunto de ações de eficiência energética e de educação das comunidades locais (smartgridnews.com.br, 2012).

9 Cidade São Paulo (São Paulo): desde 2007 a concessionária AES Eletropaulo tem realizado iniciativas relacionadas com a compreensão e a disseminação dos conceitos de Smart Grid. Em 2010, a empresa investiu recursos de P&D em um projeto piloto para desenvolver um sistema de distribuição inteligente, integrando soluções de comunicações avançadas, equipamentos e sistemas de informação. Nesta fase, o projeto visa monitorar o sistema elétrico e automatizar o processo de distribuição de energia. (AES Eletropaulo, 2011). No bairro do Ipiranga um projeto piloto de Smart Grid está sendo implantado ao longo de um circuito que tem 4,4 quilômetros de cabos subterrâneos que compõem a rede de distribuição. Esta região tem consumo de 2.000 unidades de baixa e média tensão, com segmentos residenciais, comerciais e industriais. Nesta região, medidores eletrônicos foram instalados para monitorar o consumo de energia dos clientes, bem como monitorar a energia de equilíbrio de 39 circuitos primários e permitir a execução remota de vários serviços, tais como leitura remota, corte e reconexão.

A AES Eletropaulo começou a fazer experimentos que envolvem a comunicação entre medidores eletrônicos, subestações, interruptores e outros equipamentos, bem como a integração entre os sistemas da empresa. A empresa pretende analisar as informações, obtidas a partir da medição de sistema e integrá-lo com os sistemas de automação e operação da concessionária.

Para colocar o projeto em prática, várias características do conceito de redes inteligentes estão sendo testados a ferramenta "self-healing" (um sistema que reduz o tempo de recuperação de uma falha no sistema elétrico). No caso de falha de energia, um sensor de tensão detecta a interrupção e envia informações para o sistema de gestão de distribuição da empresa, que irá automaticamente identificar uma alternativa para restabelecer o

fornecimento de energia. Se não for viável, o sistema emitirá um alerta ao centro de operações específicas do distribuidor, que irá acionar uma equipe para atender diretamente no local identificado. A *AES Eletropaulo deve continuar a investir em iniciativas de P&D e organiza um Comitê multidisciplinar para coordenar e analisar as atividades.*
Na cidade de São Paulo também o grupo CPFL está investido na área de automação de rede e aplicação dos conceitos de rede inteligente.

10 Cidades de Florianópolis e Blumenau (Santa Catarina): a empresa CELESC iniciou em 2011 alguns projetos-piloto com recursos de P&D, com o objetivo de construir estruturas para acomodar a arquitetura smart grid. Estão sendo desenvolvidos projetos de resposta à demanda em Florianópolis, melhoramento do sistema de medição em Blumenau e modernização das redes geração e distribuição de energia do Estado, apoiados pela ANEEL.

O projeto de resposta à demanda em Florianópolis tem o objetivo de melhorar o fator de carga dos sistemas de distribuição, através da tecnologia utilizada para a resposta à demanda. O projeto irá instalar dispositivos de controle de carga em 10.000 unidades consumidoras e medidores inteligentes em 3.500 unidades consumidoras. A empresa espera diminuir a ocorrência de falhas e desligamentos, especialmente em momentos críticos durante o verão. A gestão de demanda e o uso mais eficiente do sistema de energia reduzirão os custos.

Em outros estados do país as concessionárias estão realizando substituição de medidores eletromecânicos para os digitais e estão desenvolvendo estudos para a implantação de alguns projetos pilotos.

Capítulo IV- Principais Variáveis que Interferem na Implantação de Smart Grid

4.1 Introdução

A implantação de smart grid deve ser realizada em locais que agregue valor para o sistema elétrico com ganho de produtividade, qualidade e melhoria da eficiência energética.

Um dos principais ganhos deve ser na área de eficiência operacional, melhorando o controle de vida dos ativos, facilitando a localização de falhas ou defeito, evitando os deslocamentos desnecessários de turmas, melhorando a distribuição de carga do sistema, dentre outros. Na área de eficiência energética, a redução das perdas técnicas e das perdas não técnicas, possibilitará uma distribuição mais eficaz de energia, desde a geração até o consumidor final.

As práticas adotadas para implantação da arquitetura smart grid e os resultados que serão alcançados são estratégicos e de interesse de diversas partes interessadas, às quais podemos incluir as concessionárias de energia elétrica, os reguladores, os consumidores, o poder público, os fornecedores, as instituições de pesquisa, os financiadores e os agentes de desenvolvimento.

No caso do Brasil não existem recursos para uma implantação completa, sobre tudo em curto prazo, ela deve ser feita em etapas detalhadamente planejadas com longa duração, os primeiros sistemas elétricos selecionados para iniciar o processo de implantação deverá ser avaliado criteriosamente buscando um menor investimento por benefício esperado, pois para a continuidade do processo será necessário à geração de novos recursos. Por exemplo, não seria produtiva a troca indiscriminada de todos os medidores, pois pela infraestrutura das atuais redes elétricas de distribuição brasileira com o precário sistema de telecomunicações e também com a obsolescência em boa parte dos seus ativos ter-se-ia um grande investimento e um pequeno retorno.

A ANEEL tem procurado criar um modelo nacional que atenda ao perfil do consumidor brasileiro e à infraestrutura existente com algumas atualizações ou substituição dos seus ativos, porém o sistema atual apresenta linhas de transmissão longas, ativos envelhecidos e altas taxas de perdas comercias. O caminho para a implantação de smart grid será longo e deve ser bem planejado envolvendo todos os atores do processo.

4.2 Determinações das Variáveis Importantes para Implantação

Para selecionar as variáveis envolvidas na implantação de smart grid, necessita-se realizar um levantamento das condições atuais dos sistemas elétricos no que refere as características técnicas, econômicas, de localização da instalação, dos recursos humanos disponíveis, das condições ambientais, de possíveis parcerias, de condições socioeconômicas dos consumidores, estas características serão relacionadas a seguir:

a) Técnicas

- Importância das cargas alimentadas pelo sistema;
- Fator de carga no sistema;

- Fator de potência do sistema;
- Nível do carregamento do sistema;
- Nível de perdas técnicas;
- Infraestrutura do sistema elétrico (automação, proteção e medição);
- Infraestrutura de telecomunicações;
- Taxa de falha ou defeito;
- Recursos técnicos para a operação;
- Recursos técnicos para a manutenção;
- Tempo de vida útil dos ativos (Grau de envelhecimento)
- Potencial para o desenvolvimento de programas de Eficiência Energética
- Potencial para inclusão de fontes de geração distribuída (eólica, biomassa e solar);
- Conexão crítica ou de fronteira (conexão importante)

b) Econômicas

- Faturamento do sistema elétrico;
- Custo de fornecimento (R$/kW);
- Custo da manutenção;
- Custo da operação.
- Nível de perdas não técnicas (comerciais);

c) Localização da Instalação

- Instalação subterrânea;
- Distância do centro de operação;
- Distância de centros de pesquisas;
- Fronteira com outras concessionárias;
- Região com políticas sociais governamentais;
- Região com cidades histórica;
- Região com cidades turística (litoral, belezas naturais, estações hidrominerais, etc.);
- Região com recursos naturais (Agrícola, hídricos, minerais);
- Região com interesses de grandes empresas;
- Região com condições climáticas adversas;
- Região com previsão de crescimento (demográfico, investimento financeiro);

d) Recursos humanos

- Disponibilidade de profissionais capacitados na área;
- Corpo técnico com potencial para treinamento na área.

e) Condições ambientais:

- Fontes de energia de combustíveis fósseis (emissão de gases de efeito estufa, emissão de carbono);
- Clima regional propício a desastres naturais para o sistema elétrico
- Programa de incentivos ambientais

f) Parcerias

- Instituição de Pesquisa (universidade, centro de pesquisa);

- Operadora de telecomunicações;
- Fabricantes de equipamentos da área ou afins;
- Empresas desenvolvedoras de softwares;
- Concessionárias de energia elétricas (nacionais ou internacionais com projetos desenvolvidos na área).

g) Condições socioeconômicas dos consumidores

- Poder aquisitivo da comunidade;
- IDH da comunidade;
- Histórico do envolvimento comunidade em projetos;
- Região com programas sociais em andamento;
- Comunidade aderente à incorporação de novos serviços.

h) Casos especiais

- Novas Instalações;
- Instalação existente em atualização (reforma).

4.3 - Critérios para Seleção das Variáveis Relevantes e a Representação delas como Indicadores para Criação de um Índice

Devido ao alto investimento necessário, o longo tempo e a rápida evolução tecnológica a implantação de smart grid deverá ser feita em etapas bem planejadas. Estudos e avaliações deverão ser realizados nos sistemas elétricos nas suas condições atuais de operação para selecionar a melhor sequência de implantação, a partir da verificação em quais sistemas elétricos nas condições atuais se terá o um menor investimento por benefício esperado.

A proposta deste trabalho para a seleção de sistemas elétricos a serem implantados com um menor custo por benefício esperado, poderá ser realizada através da criação de um índice que irá determinar a prioridade de cada sistema a ser analisado para implantação de smart grid. A figura 4.1 mostra as diversas etapas que devem ser seguidas no processo de avaliação dos sistemas para a implantação. A primeira etapa é a elaboração das diretrizes ou critérios a serem seguidas, pois o processo de implantação normalmente é longo e também deverá ser reavaliado constantemente, pois algumas atualizações se farão necessárias durante o processo de implantação.

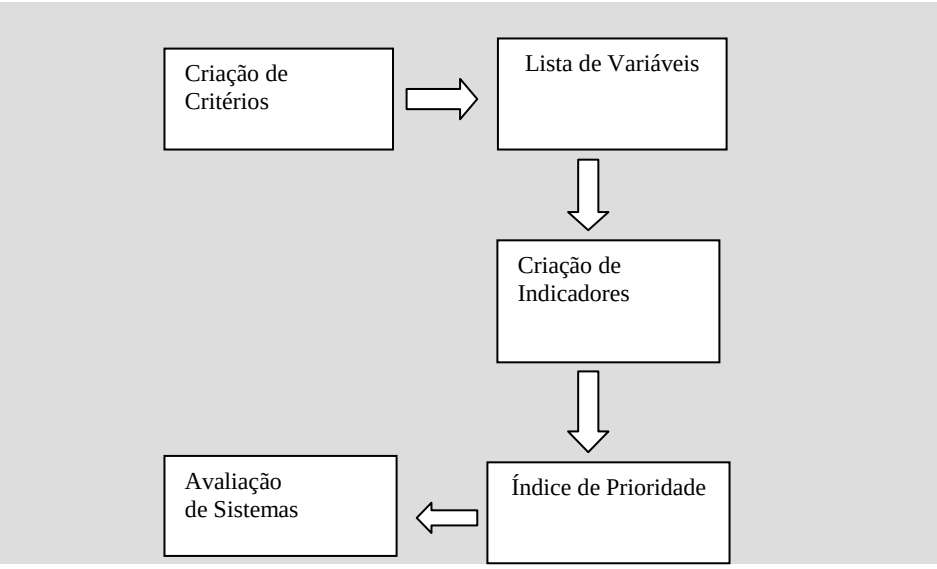

Figura 4.1 - Etapas para Avaliação dos sistemas para a implantação de smart grid

A seleção das variáveis mais relevantes deverá ser feita a partir das variáveis levantadas na seção 4.1 e realizar alguns procedimentos para a redução do número delas, selecionando as mais significativas para o processo de implantação e verificando a sua correlação com outras variáveis semelhantes.

O próximo passo será a representação das variáveis como indicadores (criação dos Indicadores), pois a partir destes indicadores poderão se estabelecer uma quantificação (atribuição de valores comparativos para uma seleção) e finalmente a criação de um índice (Índice de Prioridade de Implantação) para as avaliações dos sistemas elétricos a serem implantados, será descrito na próxima seção (Seção 4.3.1) os fundamentos de indicadores e Índice.

4.3.1 Fundamentos sobre Indicador e Índice e as Etapas para Criar um Índice

Os indicadores e índices são instrumentos de auxílio aos gestores, visando a servir de ferramenta para minimizar os riscos inerentes a atividades (GUINDANI, 1999).
Os indicadores e os índices constituem uma forma de simplificação e sintetização de fenômenos complexos através da sua quantificação. A seguir são apresentados os fundamentos dos indicadores e dos índices e também as etapas para a sua construção.

a) Indicador

O indicador é a informação significativa acerca de determinada área de interesse, que demonstra a representação de uma situação. Um indicador corresponde à variável selecionada para transmitir informações e tem como principal característica à possibilidade de sintetizar um conjunto complexo de informações, retendo apenas o significado essencial dos aspectos analisados (GUINDANI, 1999; MITCHELL, 1997). O indicador contribui para:

- Facilitar o processo de tomada de decisão;
- Tornar perceptível uma tendência que ainda não é detectável;
- Quantificar as informações rapidamente;
- Ajudar a identificar tendências e ações relevantes, bem como avaliar o progresso em direção a um objetivo (KLINE, 1994);
- Medir o progresso e detectar distúrbios e direcionar planejamento.

Os indicadores quanto à constituição ou composição podem ser simples ou compostos. Os indicadores compostos são obtidos pela combinação de dois ou mais indicadores simples.

O termo indicador é um parâmetro selecionado e considerado isoladamente ou em combinação com outros para refletir sobre as condições do sistema em análise. Normalmente um indicador é utilizado como um pré-tratamento aos dados originais.

b) Índice

O índice corresponde ao resultado da combinação de diversos indicadores (variáveis) em um só valor, de maneira geral, são elaborados para cumprir com as funções de simplificação, quantificação, análise, comunicação e acompanhamento de uma situação, permitindo entender fenômenos complexos, tornando-os quantificáveis e compreensíveis, de maneira tal que possam ser analisados em dado contexto. (GUINDANI, 1999).
O objetivo principal da medida de um referido índice é auxiliar a tomada de decisão no momento de avaliar os objetivos estabelecidos e fornecer bases para o planejamento de futuras ações. Para isto, os atores necessitam de ferramentas que conectem atividades passadas e presentes com as metas futuras, tornando, assim os indicadores elementos centrais destas ferramentas.
Existem basicamente cinco etapas para a construção de um índice, conforme mostrado na figura 4.2 abaixo:

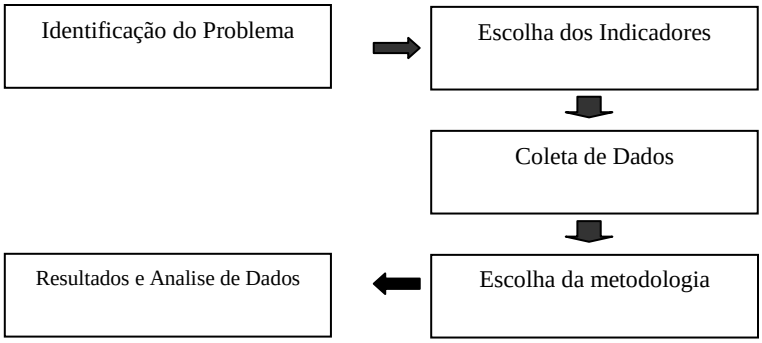

Figura 4.2 - Etapas para a construção de um índice

b1) A **identificação do problema** é fundamental para a elaboração do índice, pois é a etapa em que os diversos aspectos do problema são analisados, fazendo o levantamento de dados sobre o assunto, formulando o problema o mais abrangente possível, visando não perder nenhuma informação e não comprometer as outras fases na construção do índice em

questão. É recomendável a realização de um "Brainstorming - tempestade de idéias" com a equipe responsável.

b2) A **escolha de indicadores** exige normalmente um conhecimento de especialista da área, pois os indicadores escolhidos para compor um índice devem ser capazes de fotografar, com maior grau de fidelidade possível, a realidade do problema que se pretende desvendar e isto implica na escolha de indicadores que tenha um alto grau de relevância e ser determinante para compor a solução do problema. A confiabilidade de um indicador está relacionada à qualidade do levantamento dos dados usados para calculá-lo (JANNUZZI, 2004).

O processo de seleção dos indicadores deve envolver critérios para que determinadas propriedades desejadas sejam atingidas, tais como: validade; confiabilidade; sensibilidade; especificidade; comunicabilidade; facilidade para obtenção; periodicidade na atualização.

b3) A **Coleta de dados** pode ser feita de forma primária ou secundária (JANNUZZI, 2004):

- A primária consiste em coletar os dados em campo, como exemplo: quando é feita uma campanha de medidas por uma Concessionária, os pesquisadores vão ao campo fazer a coleta de dados diretamente;
- A secundária os dados são coletados por meio de uma fonte indireta, como exemplo: a recuperação de dados do banco de dados da própria empresa.

b4) A **escolha da metodologia** para o cálculo de um índice pode ser feita de diversas maneiras, buscando sempre uma forma de melhor relacionar os indicadores para exprimir o Índice do objeto do trabalho, podendo ser através de um método estatístico (a partir médias aritméticas, modas, medias ponderadas, etc.), ou até método mais complexos com aplicação de sistema especialistas utilizando técnicas de Inteligência artificial (redes neurais, algoritmos genéticos, lógica fuzzy, etc.). É importante ressaltar que não existe consenso na escolha do método mais adequado (JANNUZZI, 2004).

b5) A **análise dos resultados** contempla também a fase de acompanhamento da execução das ações, um acompanhamento eficiente permite detectar problemas e falhas na execução de atividades planejadas, além de indicar correções de rumos e alternativas para sanar possíveis erros.
A disponibilidade de um sistema amplo de indicadores válidos e confiáveis potencializa as chances de êxito do processo de formulação e implementação de políticas direcionadas na medida em que permite o monitoramento de ações e avaliação de resultados mais abrangentes e tecnicamente respaldados.

Contudo, não se devem superestimar os índices, pois são apenas tentativas de simplificar determinadas situações. Desse modo, os índices a todo instante precisam ser questionados e adaptados para as novas situações.

4.3.2 Seleções dos Indicadores e a Criação do Índice para Implantação de Smart Grid

Como já foi dito anteriormente, a implantação de redes inteligentes envolve um elevado volume de recursos técnicos e financeiros que devem ser utilizados de forma gradual, em etapas bem definidas.

As principais perguntas que surgem são: onde deve ser início o processo de implantação? Qual deve ser a ordem de implantação que vai trazer mais benefícios para o sistema? Quais as características dos sistemas examinados são relevantes para o sucesso da implantação? Existem várias respostas para estas perguntas.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método que oriente a implantação de redes inteligentes com base em critérios: técnicos, financeiros, ambientais e recursos humanos para ser aplicado na avaliação de sistemas elétricos, em suas atuais condições de funcionamento, através da escolha de indicadores e criação um índice, aplicando as técnicas Delphi, método estatístico ou lógica Fuzzy para classificar a ordem de prioridade para implementação de redes inteligentes em sistemas elétricos.

4.3.2.1 Definições dos Indicadores, Peso, Fator de Compensação para Criação do Índice

Para se obter os indicadores mais relevantes na construção de um índice é muito importante a participação dos especialistas das diversas áreas da concessionária de energia elétrica.

Os indicadores utilizados na avaliação de sistemas elétricos devem ser genéricos (ver item 4.3), buscando verificar as características boas e as ruins de cada sistema, a definição do número de indicadores deve ficar a critério dos especialistas, eles devem escolher um número suficiente para que o índice tenha a devida representatividade na avaliação dos sistemas elétricos.

Através de pesquisas realizadas em diversos artigos e trocando informações com especialistas da área de smart grid e correlatas, foram selecionados vinte (20) indicadores importantes para construção do índice, estes indicadores foram baseados principalmente nas seguintes referencias: (ANEEL / PRODIST, 2012; ALBRIGHT, 2004; MEENUAL, 2009; PEA, 2010; IEC, 2010; GORGETTE, 2007; NYS, 2010; Southern Califórnia Edison, 2010; IEA, 2011).

Os indicadores selecionados foram bastante diversificados procurando dar uma grande abrangência na avaliação dos sistemas elétricos, pois a implantação depende de pontos positivos (como infraestrutura do sistema elétrico) e também de pontos que terão a possibilidade de serem melhorados com a implantação do smart grid (nível de perdas).

Seguindo estes critérios foram selecionados vinte (20) indicadores e um Fator de prioridade (fator para compensação em projetos prioritários):

1 - Importância do Sistema (carga);
2 - Fator de carga no Sistema;
3 - Nível de perdas do sistema;
4 - Carregamento do sistema e/ou Baixo Fator de Potencia;
5 - Previsão de crescimento de carga;
6 - Infraestrutura do Sistema Elétrico;
7 - Infraestrutura de Telecomunicações;
8 - Taxa de falha ou defeito do sistema;
9 - Recursos para a operação e manutenção;
10 - Envelhecimento dos ativos do Sistema;
11 - Potencial de Eficiência Energética;
12 - Potencial de geração distribuída;
13 - Impactos ambientais de Fontes que alimentam o sistema;
14 - Climas adversos e propensos a desastres naturais;
15 - Disponibilidade de Recursos humanos na área;
16 - Participação da Comunidade no Desenvolvimento dos Projetos ou com alto IDH;
17 - Distancia do Centro de Operação e de Centros de Pesquisas;
18 - Parceria com Instituição de Pesquisa, Universidade, Operadora de Telecomunicações.
19 - Resultado de Projetos de Pesquisa & Desenvolvimento na área;
20 – * Caso especial

*** O indicador caso especial**

- Nova Instalação será implantada na medida do possível segundo as novas tecnologias, observando premissa fundamental de um menor investimento por benefícios projetados.
- Instalação existente em reforma (atualização) será analisada se a implantação será uma atualização completa dos ativos ou uma adaptação parcial.

Definição do fator de Compensação de Implantação (K_j)

Algumas variáveis de localização: instalação subterrânea, cidades históricas, turística, com recursos naturais, região de interesses de grandes empresas, com programas sociais governamentais e com perspectivas de crescimento de investimentos. Não serão representadas como indicadores e sim serão reunidas como um fator, denominado fator de prioridade (***K_j***) para compensação em projetos prioritários. O valor de ***K_j*** como sugestão deverá ter máximo valor 1.2, ou seja, 20%, para não diminuir o peso das outras variáveis envolvidas. Nas demais aplicações ***Kj*** = 1,0.

Na lista abaixo serão descritos os vinte (20) indicadores, o motivo de sua escolha e uma proposta para o seu peso (grau de importância), proposta pelos especialistas, que poderão influenciar na seleção de um determinado sistema elétrico (um alimentador, um bairro, uma vila ou mesmo uma cidade, etc.), para o processo de implantação das redes inteligentes.

Observação: a concessionária pode adaptar seus indicadores (adicionar, substituir ou remover), após uma discussão com seus especialistas.

1. **Importância do sistema (carga)** – Referente à importância das cargas que fazem parte do sistema a ser avaliado. São cargas prioritárias na avaliação da concessionária e que devam ter uma operação com alto grau de qualidade, eficiência e confiabilidade com a instalação de redes inteligentes. A proposta é que este indicador deverá ter o peso máximo na implantação das redes (ANEEL / PRODIST, 2012).

2. **Fator de carga do sistema elétrico envolvido** – O fator de carga (Demanda media / Demanda Máxima) indica o grau de eficiência de um sistema e se há necessidade de otimização na utilização dos recursos disponíveis. Sistemas com baixo fator de carga devem ser prioritários na instalação de redes inteligentes, pois a rede disponibiliza ferramentas importantes na gestão e controle da carga, que podem melhorar a eficiência deste sistema. A proposta é que este indicador deverá ter peso médio alto na implantação das redes (ANEEL / PRODIST, 2012).

3. **Nível de perdas no sistema** – Sistema com alto nível de perdas deve ter prioridade na instalação de redes inteligentes, pois a rede dispõe de ferramentas que podem auxiliar de forma significativa na diminuição de perdas do sistema, o que implica na diminuição de prejuízos financeiros por parte da concessionária. A proposta é que este indicador tenha peso máximo na implantação das redes (ANEEL / PRODIST, 2012).

4. C**arregamento do sistema e/ou baixo fator de potência do sistema** – Sistemas com alto carregamento e/ou baixo Fator de Potencia indicam a necessidade de aumento do investimento na oferta de energia ou no controle da demanda com ações conjunta com os consumidores e isto pode ser feito a partir da instalação das redes inteligentes que disponibilizam ferramentas para a geração distribuída e para o gerenciamento pelo lado da demanda (com ações para melhorar o fator de potencia dos consumidores) A proposta é que este indicador tenha peso médio alto na implantação das redes inteligentes (ANEEL / PRODIST, 2012).

5. **Previsão de crescimento de carga -** Quando os estudos da concessionária de energia indicam um crescimento de carga para um futuro próximo, deve ser observada a possibilidade de instalação dos medidores inteligentes nos novos consumidores e isto implica na possibilidade de ter maior controle sobre a carga e implementar políticas de conservação de energia. Em muitos casos estas ações podem postergar maiores investimentos no sistema. A proposta é que este indicador tenha peso médio na implantação das redes inteligentes (ANEEL / PRODIST, 2012).

6. **Infraestrutura do sistema elétrico** – este indicador avalia quanto de infraestrutura do sistema elétrico é necessário para a instalação de redes inteligentes já está disponível. Evidentemente que quanto melhor a infraestrutura menor será o investimento necessário e maior será a facilidade para implantação das redes. A proposta é que este indicador tenha peso alto na implantação das redes inteligentes.

7. **Infraestrutura de telecomunicações** – As condições das telecomunicações são de grande relevância para a implementação das redes, pois é um dos itens que normalmente envolvem maior custo de investimento e é fundamental para o funcionamento e operação

da rede de energia. A proposta é que este indicador tenha peso alto na implantação das redes inteligentes.

8. **Taxa de falha ou defeito do sistema** – Sistemas que apresentam altas taxas de falhas devem ser monitorados com maior freqüência. Isso vai diretamente ao encontro das funcionalidades das redes inteligentes, que disponibilizam ferramentas de restabelecimento e controle de carga. A proposta é que este indicador tenha peso médio alto na implantação das redes inteligentes (ANEEL / PRODIST, 2012).

9. **Recursos de operação / manutenção** - O sistema com baixos recursos de operação e manutenção envolvem maiores custos de deslocamentos das equipes que prestam estes serviços e quanto mais cedo forem automatizados poderão economizar recursos financeiros diretos e indiretos por evitar atraso no restabelecimento do sistema elétrico. A proposta é que este indicador tenha peso médio alto na implantação das redes inteligentes.

10. **Envelhecimento do sistema** – Quando um sistema apresenta equipamentos e materiais próximos do término de sua vida útil ou seja, com um alto grau de envelhecimento, precisam de renovação e pode ser uma oportunidade para a implantação das redes. A proposta é que este indicador tenha peso alto na implantação das redes inteligentes.

11. **Potencial de eficiência energética** – As redes Inteligentes podem contribuir para a aplicação de políticas de eficiência energética no sistema avaliado. A proposta é que este indicador tenha peso alto na implantação das redes inteligentes (ANEEL / PRODIST, 2012).

12. **Potencial de geração distribuída** – As redes inteligentes têm como característica a capacidade de gerir de forma eficiente à participação de novas fontes de energia na rede elétrica. A proposta é que este indicador tenha peso alto na implantação das redes inteligentes.

13. Altos impactos ambientais nas fontes que alimentam o sistema – Alguns sistemas podem estar ligados a fontes de alimentação não renováveis ou de grandes impactos ambientais, neste caso a implantação das redes inteligentes possibilita o uso de geração distribuída com fontes renováveis. A proposta é que este indicador tenha peso médio alto na implantação das redes inteligentes.

14 - Climas adversos e propensos a desastres naturais - Alguns sistemas podem estar localizados em regiões com climas adversos e propensos a desastres naturais, neste caso com a implantação de redes inteligentes possibilitará um melhor controle deste sistema. A proposta é que este indicador tenha peso médio alto na implantação das redes inteligentes.

15. **Disponibilidade de recursos humanos na área** - A necessidade de recursos humanos para implantação e operação das redes inteligentes é normalmente alta, portanto a escassez deste recurso trará dificuldades para a operação das redes. A proposta é que este indicador tenha peso médio alto na implantação das redes inteligentes.

16. **Participação da comunidade no desenvolvimento dos projetos ou com alto IDH** - a implantação de redes inteligentes envolve um contato direto com o consumidor a partir da instalação dos medidores digitais e da possibilidade de tarifas diferenciadas e novos contratos. Estas ações exigem um maior envolvimento da comunidade local, que pode ser feito a partir de campanhas publicitárias e incentivos diversos para participação dos programas. Evidentemente que comunidades que conheçam mais as possibilidades das redes inteligentes podem aderir aos programas com maior facilidade. A proposta é que este indicador tenha peso máximo na implantação das redes inteligentes.

17. **Distancia do centro de operação e de centros de pesquisas** - A proximidade do Centro de Operação (Centro de decisões) e de centro de pesquisa ou universidade pode facilitar a implantação das redes Inteligentes. A proposta é que este indicador tenha peso médio na implantação das redes inteligentes.

18. **Parceria com instituições, universidades operadoras de telecomunicações e fabricantes de equipamentos**. A existência destas parcerias pode facilitar na implantação das redes inteligentes. A proposta é que este indicador tenha peso médio alto na implantação das redes inteligentes.

19. **Resultados de projetos de pesquisa e desenvolvimento** – O sistema envolvido pode já ter sido contemplado com projetos anteriores e já apresenta resultados na área com informações que podem auxiliar no conhecimento do sistema elétrico. A proposta é que este indicador tenha peso médio na implantação das redes inteligentes.

20. * **Caso especial**

- Nova Instalação será implantada na medida do possível segundo as novas tecnologias, observando premissa fundamental de um menor investimento por benefícios projetados.
- Instalação existente em reforma (atualização) será analisada se a implantação será uma atualização completa dos ativos ou uma adaptação parcial.

Após a seleção dos indicadores relevantes, a próxima etapa será a criação de um índice denominado índice de prioridade (IP).

4.3.3 Construção e o Cálculo do Índice para Implantação de Smart Grid

Os vinte indicadores, relacionados anteriormente (seção 4.3.2.1), foram reunidos em uma tabela (tabela 4.1) para construção do índice. A Tabela 4.1 será denominada de "Matriz para o cálculo do Índice de Prioridade" para implantação de uma rede inteligente em um sistema elétrico especifico, podendo ser: um alimentador, sistema de alimentação de um bairro, um povoado ou mesmo de uma cidade.

Observação: a concessionária poderá adequar os seus indicadores (acrescentar, substituir, ou retirar), após a discussão com a equipe responsável local e consulta a outros especialistas.

Tabela 4.1
Matriz para Construção do Índice de Implantação

	Matriz para Construção do Índice de Implantação						
	Nome do Sistema: AL SUBAE 1		**Código:** 01P1	**SE:** FEIRA1		**CRO:** CROF	
	Fator de Compensação: 1,0						
Item		Peso (p)	Relação		Pontuação		Total
	Indicadores / Variáveis (Xi)		Sim /Não	Baixo (0 a 1)	Médio (1,1 a 2)	Alto (2,1 a 3)	
1	Importância do Sistema (carga)	**5**					
2	Fator de carga no Sistema	**4**					
3	Nível de perdas do sistema	**5**					
4	Carregamento do sistema e/ou Baixo Fator de Potencia	**4**					
5	Previsão de crescimento de carga	**3**					
6	Infraestrutura do Sistema Elétrico	**5**					
7	Infraestrutura de Telecomunicações	**5**					
8	Taxa de falha ou defeito do sistema	**4**					
9	Recursos para a Operação e Manutenção	**4**					
10	Envelhecimento dos Ativos do Sistema	**5**					
11	Potencial de Eficiência Energética	**5**					
12	Potencial de Geração distribuída	**5**					
13	Impactos Ambientais de Fontes que Alimentam o Sistema	**4**					
14	Climas adversos e propensos a desastres naturais	**4**					
15	Disponibilidade de Recursos Humanos na área	**4**					
16	Participação da Comunidade no Desenvolvimento dos Projetos ou com alto IDH	**5**					
17	Distancia do Centro de Operação e de Centros de Pesquisas	**3**					
18	Parceria com Instituição de Pesquisa, Universidade, Operadora de Telecomunicações.	**4**					
19	Resultado de Projetos de Pesquisa & Desenvolvimento na área	**3**					
20	* Casos Especiais	**3**					
	Total						
	Índice de Prioridade						

4.3.3.1 – Construção do Índice pelo Método Estatístico – Média ponderada

O cálculo do Índice de prioridade será obtido pela equação 4.1: multiplicando o fator de compensação pela media ponderada dos valores dos indicadores, como será visto na seção 4.3.3.2 a utilização da tabela 4.1 (Matriz para Construção do Índice de Prioridade) facilitará a organização dos cálculos.

O índice será chamado índice de prioridade para implantação (IP) e será calculado pela equação 1 abaixo:

$$IP = \frac{K_j}{N} \sum_{i=1}^{N} W_i . I_i$$ (Equação 4.1- Cálculo do Índice de Prioridade)

Onde: I_i - indicadores envolvidos na avaliação;

W_i - Fator de Ponderação de cada indicador (peso) - valor utilizado para determinar o peso de um indicador na consolidação do índice, quantifica o grau de importância do indicador;

N - Número total de indicadores envolvidos na avaliação (20 indicadores neste trabalho);

K_j - Fator de Compensação para projetos prioritários.

*O valor de K_j como sugestão deverá ter máximo valor 1.2, ou seja, 20%, para não diminuir o peso das outras variáveis envolvidas. Nas demais aplicações Kj = 1,0.

A definição do fator de ponderação (W_i) ***e*** do Fator de compensação (K_j) deverá ser realizada a partir da aplicação do método Delphi com os especialistas da área na empresa, todo o processo da aplicação do método será descrito no próximo capítulo (Capítulo V).

4.3.3.2 Cálculo do Índice Usando a Tabela 4.1

O cálculo índice será feito através do preenchimento da Tabela 4.1 (aplicando o Método Delphi na determinação dos parâmetros) para cada sistema a ser avaliado, seguindo as os passos a, b e c abaixo, O sistema que obtiver o maior valor na totalização (multiplicado pelo fator de prioridade) será o escolhido (indicado) para iniciar a implantação de redes inteligentes:

a) atribuir um peso de 0 a 5 a cada indicador (grau de importância do indicador) valor inteiro sem decimal (Aplicação do Método Delphi - capítulo V);

b) atribuir valor (pontuar) de 0 a 3 a cada indicador do respectivo sistema elétrico avaliado, (Baixo: de 0 a 1; Médio: 1,1 a 2 e Alto de 2,1 a 3), utilizar somente uma casa decimal;

*Será atribuído valor zero (0), para qualquer indicador que não se aplica ao sistema que está sendo avaliado. A coluna "Relacionamento" na tabela 4.1 será preenchida com "não".

c) Totalizar os valores (método estatístico).

Durante o processo de seleção dos sistemas elétricos a serem implantado os profissionais envolvidos deverão interagir com o maior número possível de áreas dentro da empresa e também trocar informações com outras concessionárias, especialistas e Órgãos Reguladores, buscando o preenchimento adequado da Tabela 4.1 – Matriz para Construção do Índice de Prioridade.

Nas avaliações realizadas dos sistemas elétricos, o maior valor obtido para o índice significa que o sistema apresenta uma maior prioridade, pois reúne as melhores condições para se iniciar a implantação de smart grid considerando sempre o menor custo por benefícios esperados.

Em cada sistema avaliado será importante o detalhado das informações: o nome do sistema, a codificação, a subestação e o centro regional de operação a qual o sistema pertence (conforme preenchimento da Tabela 4.1).

Para a construção da tabela 4.1 com a definição dos vinte (20) indicadores e os dos seus respectivos pesos, uma técnica bastante aplicada com o objetivo de reunir as opiniões de um grupo de especialistas é o Método Delphi que será visto no próximo capítulo (capítulo V) a seguir.

Capítulo V - Método Delphi e as Etapas para Avaliação dos Sistemas Elétricos pelo Método Estatístico

5.1 Introdução

O Método Delphi é uma técnica para a busca de um consenso de opiniões de um grupo de especialistas a respeito de eventos futuros. A técnica foi usada no início dos anos 60, desenvolvida pelos trabalhos dos pesquisadores da Rand Corporation, Olaf Helmer e Norman Dalker. O Delphi é uma técnica muito útil principalmente quando se quer realizar uma análise qualitativa do mercado, pois permite que se projetem tendências futuras tais como descontinuidades tecnológicas, mudanças socioeconômicas ou ainda em planejamentos e eventos futuros. O procedimento é o seguinte: o gestor através do pressuposto que o consenso coletivo, bem definido e parametrizado, é mais eficiente e completo que as ideias individuais, aproveita toda a sinergia do grupo de discussão.

O Método Delphi é baseado no princípio de que as previsões por um grupo estruturado de especialistas são mais precisas se comparadas às provenientes de grupos não estruturados ou individuais. A técnica pode ser adaptada para uso em encontros presenciais, sendo então denominada de mini-Delphi ou Estimate-Talk-Estimate (ETE). O método Delphi tem sido largamente utilizado para previsões empresariais e tem certas vantagens sobre outras abordagens de previsões estruturadas em mercados preditivos, a Internet apresenta-se como uma grande aliada na aplicação da Metodologia Delphi para promover discussões em grupo e depois se chegar a um consenso. (GIOVINAZZO E FISCHMANN, 2001).

A aplicação do Método Delphi apresenta as seguintes vantagens e as desvantagens:

- Vantagens - Técnica é adequada para obter consenso entre especialistas, o processo pode ser feito virtualmente e pode focar em detalhes do trabalho ou como um todo.
- Desvantagens – é um processo demorado e requer habilidade para interpretar as opiniões.

5.2 Aplicação do Método Delphi na Avaliação dos Sistemas Elétricos

A aplicação do Método Delphi para a seleção da ordem de prioridade de implantação de smart grid na avaliação de sistemas elétricos pode ser descrito nas seguintes etapas:

Etapa1. Reunião inicial (presencial e ou virtual): Discussão do método, dos objetivos do trabalho, do contexto, etc. O resultado da etapa será o anteprojeto com os prazos e o calendário das reuniões necessárias.

Etapa2. Definição da equipe geral (de diversas áreas da empresa) que irão participar dos trabalhos (técnicos, peritos, especialistas), escolha de um gestor para coordenar o grupo de trabalho e também a definição de uma equipe específica responsável pela implantação de smart grid e um coordenador para esta equipe;

Etapa3. Elaboração de um projeto de trabalho (descrição do trabalho, recursos, cronograma, etc.) e também de um formulário contendo a relação de indicadores (com espaço para novas

sugestões), dos campos para as sugestões dos respectivos pesos (Fatores de ponderação) e do Fator de compensação.

As sugestões para a definição dos Indicadores, dos valores dos pesos e do de Fator compensação deverá ser feito obedecendo aos seguintes critérios:

Fator de ponderação (W_i): Deverá ser atribuído um valor inteiro de 1 a 5 (faixa ampla para classificação) de acordo com o grau de importância atribuída ao indicador na implantação de smart grid.
Fator de compensação de projetos prioritários (***K_j***), como definido na seção 4.3.3.1, o seu valor não deverá ser muito alto para não interferir de forma inadequada no processo de avaliação dos sistemas.

Etapa4. Enviar e receber os formulários, realizar a compilação dos dados recebidos e análise estatística (desprezar os valores extremos e aplicar média aritmética), posteriormente condensar as informações em um único formulário sem a identificação dos participantes.

Etapa5. Reenvio do formulário compilado para todos os especialistas solicitando uma revisão e se tem alguma nova sugestão.

Etapa6. Repetir a etapa 4 com os novos valores buscando chegar próximo de um consenso. Se necessário repete-se a etapa 5 e 6 alguma vezes.

Etapa7 - Elaboração de um relatório com todo o processo realizado e apresentar os resultados e as metas para a implementação. Em caso de existência de divergências novas rodadas deverão ser realizadas.

A Figura 5.1 apresenta a representação do fluxograma do Método de Delphi para definição do formulário (tabela 4.1), Esta tabela será utilizada na avaliação dos sistemas elétricos para implantação de smart grid.

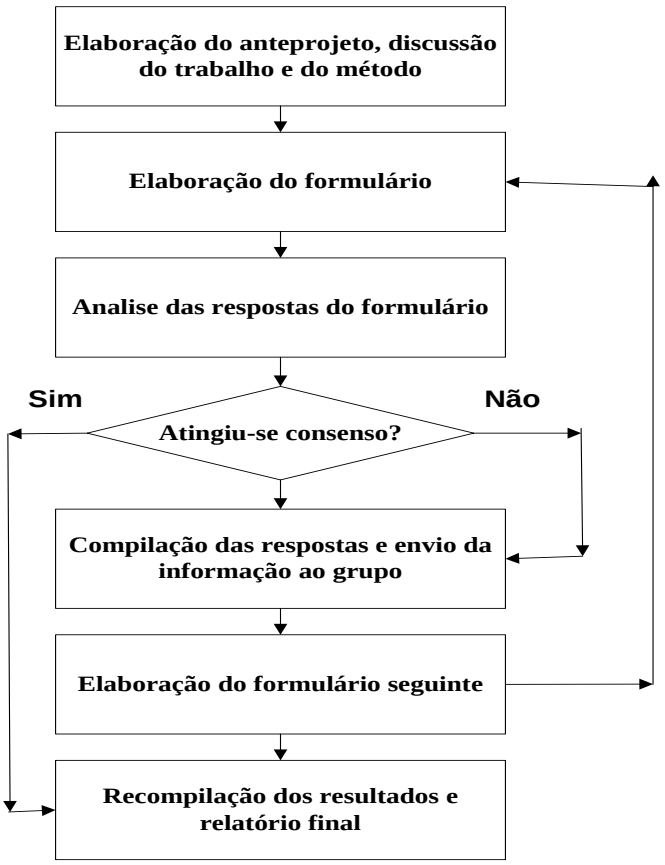

Figura 5.1 - Representação do Fluxograma do Método Delphi para Definição da Tabela 4.1

5.3 Cálculo do Índice de Prioridade

Conforme descrito na seção 4.3.3, a equipe de implantação de posse da tabela 4.1 (com a lista dos indicadores, os fatores de ponderação e o fator compensação) deverá preencher a tabela 4.1 com estas informações e na avaliação de cada sistema elétrico verificar a aplicação de cada indicador ao referido sistema. Pode ser que ele não seja adequado ao sistema em particular.

Após a verificação dos indicadores que se aplicam a um determinado sistema, ele será pontuado como baixo, médio ou alto, ou em caso contrario será zerado.

- Baixo: se o valor estiver entre 0 e 1;
- Médio: se o valor estiver entre 1,1 e 2;
- Médio: se o valor estiver entre 2,1 e 3;

Todos os valores escritos com uma casa decimal.

Com a tabela 4.1 preenchida, o Índice de Prioridade será calculado aplicando a equação 4.1 (seção 4.3.3.1).

5.4 Aplicação e Teste do Método Estatístico e Discussão dos Resultados

A aplicação do Método Estatístico proposto será realizada através da simulação de seis (6) sistemas elétricos da COELBA com característica distintas com o objetivo de classificar a da ordem prioritária de implantação de smart grid. O processo de avaliação será feito através do preenchimento da tabela 4.1, seguindo os passos apresentados na seção 4.3.3.2 (Cálculo do Índice Usando a Tabela 4.1). Os Indicadores (seção 4.3.2.1) apresentam as características gerais e as especificas dos sistemas elétricos que estão sendo avaliados em relação ao tamanho, importância, recursos que possuem para a operação, etc.

Na Tabela 5.1 são apresentados seis (6) Sistemas Elétricos (Alimentadores - AL) da COELBA, empresa do grupo Neoenergia do estado da Bahia, destacando suas características principais do alimentador, onde foram realizados os cálculos do Índice de Prioridade para teste do método proposto.

Observação: Os alimentadores selecionados foram de diferentes regiões da concessionária COELBA.

Tabela 5.1

Características de seis alimentadores (AL) do sistema elétrico da COELBA

AL	Porte e Resumo	Local	Características Principais
1	Pequeno, sistema novo, com boa infraestrutura e cargas equilibradas.	Zona urbana	Previsão crescimento de carga; alta infraestrutura do sistema elétrico; alta infraestrutura de telecomunicações; alto envolvimento e conhecimento da comunidade local dos projetos; disponibilidade de recursos Humanos na Área; proximidade de centros de pesquisas; menor distância do centro de operação; Parceria com institutos de pesquisa, universidade e operadoras de telecomunicações.
2	Pequeno, sistema envelhecido, desequilibrado, com potencial de eficiência energética e geração distribuída	Zona rural	Baixo fator de carga do sistema elétrico; alto índice de perdas do sistema; alto grau de carregamento do sistema; alta taxa de falha ou defeito do sistema; baixos recursos de operação e/ manutenção; alto grau de envelhecimento do sistema; alto potencial de eficiência energética e alto potencial de geração distribuída.
3	Médio, sistema com cargas equilibradas, com cargas prioritárias e com potencial	Zona urbana	Grau de importância do sistema (carga); alto grau de carregamento do sistema; previsão de crescimento de carga; alto envolvimento e conhecimento da comunidade local dos projetos; disponibilidade de recursos humanos

	de geração distribuída		na área; alto potencial de geração distribuída; proximidade de centros pesquisas; menor distância do centro de operação; parceria com instituições, universidades operadoras de telecomunicações e fabricantes de equipamentos.
4	Médio, sistema com cargas desequilibradas, com potencial de eficiência energética e geração distribuída	Zona suburbana	Baixo fator de carga do sistema; alto Índice de perdas do sistema; alto grau de carregamento do sistema; alta taxa de falha ou defeito do sistema; disponibilidade de recursos humanos na Área; alto potencial de eficiência energética e geração distribuída; proximidade de centros de pesquisas; menor distância do centro de operação; parceria com institutos de pesquisa; universidade e operadoras de telecomunicações.
5	Grande, sistema com alta infraestrutura elétrica e de telecomunicações, sistemas com cargas equilibradas e importantes, com potencial de eficiência energética e geração distribuída	Zona urbana	Alto grau de importância do sistema (carga); previsão crescimento de carga; alta infraestrutura do sistema elétrico; alta infraestrutura de telecomunicações; alto envolvimento e conhecimento da comunidade local nos projetos; disponibilidade de recursos humanos na área; alto potencial de eficiência energética; alto potencial de geração distribuída; resultado de projetos de pesquisa e desenvolvimento na área; proximidade de centros de pesquisas; menor distância do centro de operação; parceria com institutos de pesquisa, universidade e operadoras de telecomunicações.
6	Grande, sistemas com alta taxa de falha, cargas desequilibradas e de grande importância, com potencial de eficiência energética	Zona suburbana	Grau de importância do sistema (carga); baixo fator de carga no sistema; alto índice de perdas do sistema; alto grau de carregamento do sistema; previsão de crescimento de carga; alta taxa de falha ou defeito do sistema; alto envolvimento e conhecimento da comunidade local dos projetos; disponibilidade de recursos humanos na área; alto potencial de eficiência energética; proximidade de centros de pesquisas; menor distância do centro de operação; parceria com institutos de pesquisa, universidade e operadoras de telecomunicações.

A tabela 5.2 apresenta os resultados dos cálculos dos índices (usando a equação 4.1, com Kj = 1.0) referentes aos seis sistemas elétricos (alimentadores) listados acima. Na figura 5.2 é mostrado o gráfico destes índices.

O resultado da simulação indica a ordem de implantação dos sistemas (do índice maior para o menor) para iniciar o processo de implantação de smart grid.

O resultado do cálculo do maior índice (Sistema 6) indicou um sistema de grande porte, com cargas importantes, com boa infraestrutura, apresentando problemas na operação de suas cargas envolvidas e também com potenciais de eficiência energética. Ou seja, onde se tenha um menor investimento por benefício esperado.

Tabela 5.2
Cálculo do Índice de Prioridade pelo Método Estatístico

Tabela 4 - Cálculo do Índice de Prioridade (K_j= 1)

X	**Sistemas Elétricos**	**Índice**
1	Pequeno Porte Z. Urbana	4,4
2	Pequeno Porte Z. Rural	4,8
3	Médio Porte Z. Urbana	5,2
4	Médio Porte Z. Suburbana	5,6
5	Grande Porte Z. Urbana	6,8
6	Grande Porte Z. Suburbana	7,3
* (Z – Zona)		

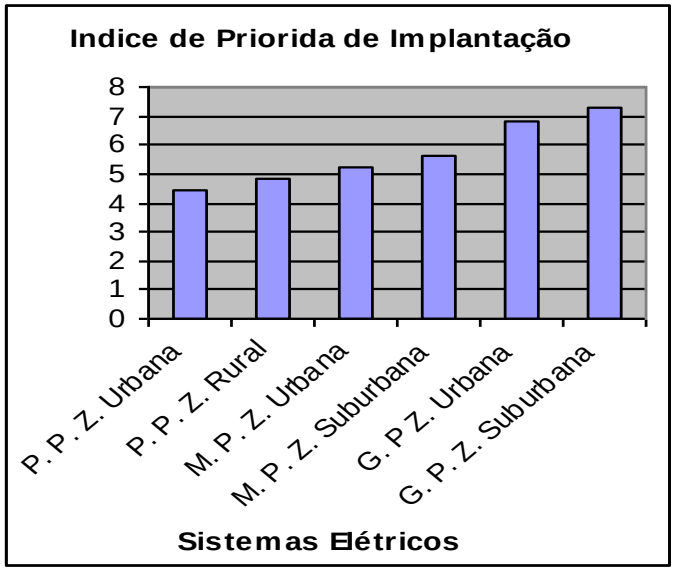

Figura 5.2 - Gráfico dos Índices de Prioridade

5.5 Conclusão

O Conceito da Gestão de Energia tem sido ampliado nos últimos anos devido às novas demandas do mercado mundial, que está atento aos indicadores de qualidade, eficiência e sustentabilidade do Sistema Elétrico.

Nesta etapa inicial de mudança do Setor Elétrico há o surgimento de um novo ambiente cheio de oportunidades no desenvolvimento de aplicações para Smart Grid, a partir de novos algoritmos, uso de técnicas Inteligência Artificial para apoio a decisão, ferramentas de controle de qualidade, etc. Estas novas tecnologias podem ser bastante úteis para que a gestão de energia possa atingir seu objetivo de eficiência, qualidade e sustentabilidade.

A smart grid é uma tendência mundial que apresenta exatamente estas características e funcionalidades, pois faz o sistema elétrico funcionar como uma grande rede interligada, onde há forte interação entre concessionária e consumidores, de forma bidirecional que possibilita uma gestão de energia com a participação efetiva dos consumidores.

O processo de implantação de smart grid implica em uma profunda transformação nas empresas de energia, envolvendo grandes desafios que devem ser enfrentados a partir do desenvolvimento de uma metodologia bem definida baseada em critérios que devem buscar a maior eficiência e menor custo por benefício.

No caso do Brasil não existem recursos para uma implantação completa e em curto prazo, ela deve ser feita em etapas detalhadamente planejadas com longa duração, o processo de implantação deverá ser avaliado criteriosamente e continuamente, buscando um menor investimento por benefício esperado, pois para a continuidade do processo será necessário à geração de novos recursos.

A escolha do Método Delphi traz a oportunidade de poder ter a partir das discussões e de novas experiências dos especialistas realizarem o aperfeiçoamento do método, eles poderão incorporar outras variáveis e revisarem os valores dos fatores de ponderação e prioridade durante o processo de implantação.

O método proposto neste trabalho deve servir de ferramenta para auxiliar os gestores das empresas de energia a tomada de decisões, utilizando critérios que possam selecionar sistemas que apresentem um menor investimento por benefício esperado.

No caso do Brasil um longo caminho deverá ser percorrido e existem muitas questões e obstáculos técnicos e econômicos a serem vencidos, mas parte de seus sistemas elétricos (Alta e Média Tensão) apresentam avanços consideráveis na automação de seus processos.

O objetivo esperado na construção de uma rede inteligente será uma rede robusta, segura, que contemple os padrões de interoperabilidade, escalonável, de baixo custo e preparada para suportar qualquer tipo de serviço ou aplicação, tal como uma "internet" voltada ao fornecimento de energia elétrica.

Esses requisitos devem ser observados em um roteiro para implantação de smart grid que passa por definição de objetivos e estratégias, estudos, projetos pilotos, definição de padrões e captação de recursos, para só então implantar a rede inteligente. "Também deve haver a participação de equipes multidisciplinares e multidepartamentares e a preocupação de antecipar futuras integrações para evitar problemas com pouco tempo de uso do smart grid".

Um aspecto fundamental para a implantação de smart grid é que deve ser modularizada pelo alto investimento financeiro e também pela rápida evolução tecnológica nas áreas de TI e comunicações. Podendo um grande investimento em tecnologia ficar absoleto mesmo antes de sua implantação. Por isso foi apresentado uma proposta para implantação gradual,

através da criação de um Índice que auxiliará a tomada de decisão pelo corpo gerencial da empresa.

O Método Estatístico apresentado para implantação das Redes Inteligentes a partir da criação de vinte (20) indicadores e um índice de prioridade atingiu aos objetivos propostos, pois aplicado os critérios na simulação de 06 sistemas elétricos reais com características distintas (Tabela 5.2 e Figura 5.2), foi indicado à ordem de implantação para um sistema elétrico com maior retorno técnico-econômico.

Capítulo VI - Cálculo do Índice de Prioridade com Aplicação de um Sistema Fuzzy

6.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada uma nova alternativa para o cálculo do Índice de Prioridade de Implantação de smart grid, com utilização de um sistema fuzzy desenvolvido com este objetivo e também será feito uma comparação com Método Estatístico apresentado no item 5.4.
Os Sistemas fuzzy têm sido aplicados com sucesso em campos como controle automático, classificação de dados, tomada de decisão e sistemas especialistas. Pela sua natureza multidisciplinar, sistemas fuzzy são nomeados como sistemas fuzzy baseados em regras, sistemas especialistas fuzzy, sistema de modelagem fuzzy, sistemas de memória associativa fuzzy, controladores lógicos fuzzy.
Nos estudos das técnicas de Inteligência Artificial o Sistema Fuzzy foi um dos mais indicados à solução de problemas desta natureza deste trabalho, que envolveu classificação de sistemas, sistemas multiagentes, voltados para o apoio à tomada de decisão com a participação de especialistas.

Neste capítulo inicialmente serão abordados os conceitos e fundamentos teóricos da Lógica Fuzzy e posteriormente será desenvolvido um Sistema Fuzzy para o cálculo do Índice de prioridade utilizando o toolbox fuzzy *do* MATLAB versão MATLAB R2008a. *A figura 6.1 abaixo mostra o d*iagrama para cálculo do índice de prioridade a partir da seleção entre os vinte (20) indicadores (apresentados no capítulo 4) os 8 indicadores de maior relevância (pesos =5) para o cálculo do Índice de prioridade, ou seja, foram selecionados os oito indicadores que tinham o peso cinco (5). O objetivo principal foi tornar o sistema fuzzy mais simples e enxuto, contudo sem a perda de qualidade e representatividade no cálculo do índice. No final do capítulo é demonstrado que a utilização dos oito indicadores mais relevantes para implantação não altera significativamente o resultado do cálculo do índice.
Na figura 6.1 abaixo está representado o diagrama para cálculo do índice de prioridade pelo Sistema Fuzzy a partir dos oito (8) indicadores.

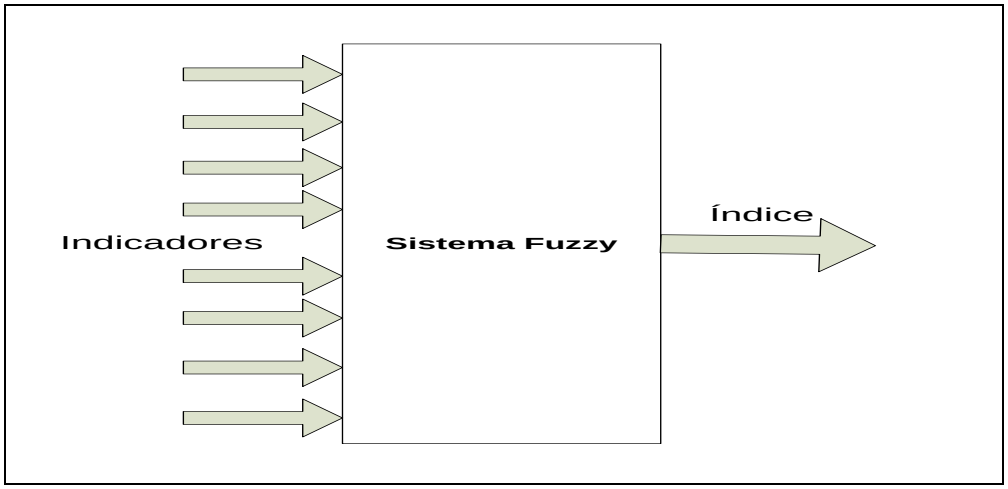

Figura 6.1 - Diagrama para cálculo do Índice de Prioridade pelo Sistema Fuzzy

6.2 Fundamentos Teóricos da Lógica de Fuzzy

A Lógica *Fuzzy* também chamada de lógica multivalorada foi primeiramente introduzida em 1930 pelo filósofo e lógico polonês Jan Lukasiewicz. Através do estudo de termos do tipo alto, baixo, novo, velho, quente, frio, etc., ele propôs a utilização de um intervalo de valores entre 0 e 1 [0,1] que indicaria a possibilidade que uma declaração fosse verdadeira ou falsa. Em 1937, o filósofo Max Black propôs a idéia de que continuidade descrevia graus. Ele definiu o primeiro conjunto *fuzzy* e descreveu algumas idéias básicas de operações com conjuntos *fuzzy*. Em 1965, Lofti Zadeh publicou o artigo *Fuzzy Sets*, que ficou conhecido como a origem da Lógica *Fuzzy*. Na realidade, Zadeh redescobriu a idéia de fuzzyficacão, identificou e explorou tal conceito e realizou vários estudos. Portanto, Zadeh ficou conhecido como o "mestre" da Lógica *Fuzzy*. (ZADEH, 1965; ZADEH, 1973; REZENDE, 2005; MAMDANI, 1974; TAKAGI, 1985; SUGENO, 1988).

A palavra *fuzzy na* língua inglesa pode ter vários significados, mas o conceito básico desta palavra refere-se a vago, indistinto, incerto. As traduções mais utilizadas para o português são: "nebuloso" e "difuso".

6.3 Um Breve Histórico da Lógica Fuzzy

As primeiras noções da lógica fuzzy dos conceitos "vagos" foi desenvolvida em 1920 por um lógico polonês Jan Lukasiewicz (1878-1956) ele introduziu os conjuntos com graus de pertinência sendo 0, ½ e 1 e, mais tarde, expandiu para um número infinito de valores entre 0 e 1.
A primeira publicação que recebeu a denominação lógica "fuzzy" foi em 1965. O autor foi Lotfi Asker Zadeh (ZAH-da), professor em Berkeley, Universidade da Califórnia. Foi ele criou à lógica "fuzzy" combinando os conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz, definindo graus de pertinência. (ZADEH, 1965; ZADEH, 1973).

As aplicações industriais da lógica "fuzzy" aconteceram com maior importância:

- Na Europa no período entre 1970 e 1980;
- No Japão iniciou após 1980, algumas das primeiras aplicações foram em um tratamento de água feito pela Fuji Electric em 1983 e pela Hitachi em um sistema de metrô inaugurado em 1987;
- Nos Estados Unidos por volta de 1990 a lógica "fuzzy" despertou um maior interesse em empresas americanas.

Devido ao desenvolvimento e as inúmeras possibilidades práticas dos sistemas fuzzy e o grande sucesso comercial de suas aplicações, a lógica "fuzzy" é considerada hoje uma técnica "standard" e tem uma ampla aceitação na área de controle de processos industriais. (MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S, 1975)

6.4 Sistemas Fuzzy e os seus Fundamentos

Um sistema fuzzy é uma função no campo dos números reais de R^n em R (múltiplas entradas e uma saída), o raciocínio com lógica Fuzzy consiste em implementar sua arquitetura nas sequências dos módulos que serão apresentados abaixo.

6.4.1 Resumo das Definições dos Componentes Básicos de um Sistema Fuzzy

a) Variáveis;
b) Funções de Pertinência;
c) Regras.

a) Variáveis

As variáveis fuzzy são variáveis linguísticas**,** a **v**ariável é um identificador que pode assumir um dentre vários valores. Neste caso estas variáveis têm seu valor expresso qualitativamente por um termo lingüístico, ou seja, que fornece conceito a uma variável, e quantitativamente por uma função de pertinência (Será descrito no item b a seguir).

Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável lingüística assumindo valores: baixa, média e alta.

De fato, uma variável lingüística pode ser caracterizada por n, T, X, m(t) onde n é o nome da variável (temperatura, pressão, febre, etc.), T é o conjunto de termos lingüísticos de n (elevado, baixo, pouco, extenso, etc.), X é o domínio (Universo) de valores de n sobre o qual o significado do termo lingüístico é determinado (a febre pode estar, por exemplo, entre 35 e 40° C) e m(t) é uma função semântica que assinala para cada termo linguístico T o seu significado, que é um conjunto fuzzy em X (ou seja, m: T X onde X é o espaço dos conjuntos fuzzy). (GOMIDE, 2002; GUPTA, 1990; REINGHANTZ, 2002).

Uma variável lingüística possui valores que não são números, mas sim palavras ou frases na linguagem natural, exemplo: Idade = idoso.
Um valor lingüístico é um conjunto fuzzy, todos os valores lingüísticos formam um conjunto de termos:

- T(idade) = {Jovem, velho, muito jovem};
- Maduro, não maduro;
- Velho, não velho, muito velho, mais ou menos velho;
- {Não muito jovem e não muito velho}.

Permitem que a linguagem da modelagem fuzzy expresse a semântica usada por especialistas.

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos.

Em essência, a utilização do tipo de descrição lingüística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

O primeiro passo na construção de um sistema especialista *fuzzy* é a especificação do problema em termos de engenharia de conhecimento, ou seja, definir as variáveis de entrada e de saída, assim como seus respectivos intervalos de valores.

b) Funções de Pertinência

As funções de pertinência representam o comportamento das variáveis fuzzy ao longo do seu domínio.

Um conjunto fuzzy é caracterizado por uma função de pertinência (Membership Function) que assume valores dentro do intervalo [0,1]. Enquanto na teoria de conjuntos clássica, a função de pertinência assume apenas os valores zero, indicando que o elemento não pertence (0) ao conjunto, ou um indicando que o elemento pertence (1) ao conjunto, já na teoria de conjuntos fuzzy, os elementos podem estar associados a graus de pertinência entre zero e um indicando que os mesmos podem pertencer parcialmente a um conjunto (COSTA, A., RODRÍGUEZ, A., SIMAS, E., 2005; AMENDOLA, M., SOUZA A. L., E., 2005)

O grau de pertinência é conhecido como a pertinência ou veracidade da função, pois estabelece uma correspondência entre cada elemento do domínio e um valor real, indicando o grau de pertinência deste no conjunto (IEEE, 2000).

A representação de conjuntos fuzzy depende basicamente da natureza e da dimensão do universo de discurso definido (REZENDE, 2005). A forma mais simples de representação é o gráfico de sua função de pertinência, chamado de diagrama de Hassi-Euler (H-E). Como exemplo está representando na figura 6.2 uma variável qualquer denominada r**isco** ao longo do seu domínio [0, 5], estão representados três conjuntos fuzzy denominados "pequeno" (P), "médio" (M) e "grande" (G) em um universo de discurso real: [0, 5].

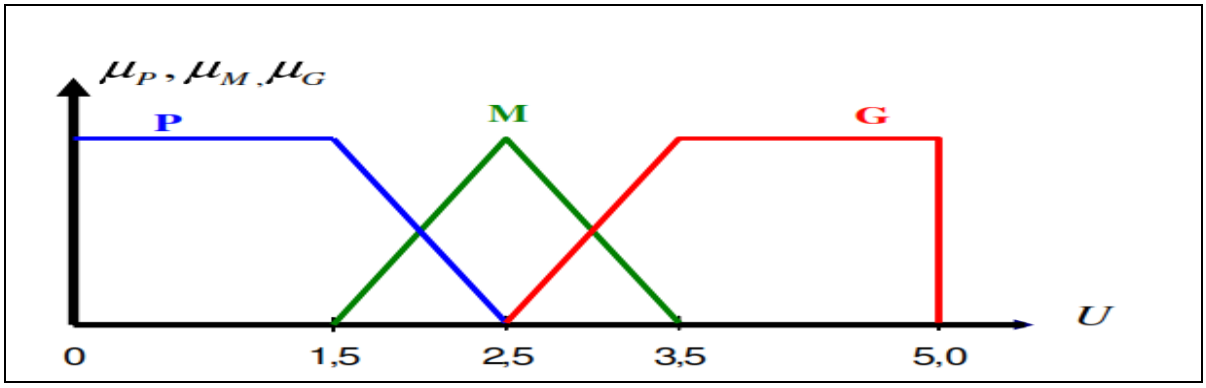

Figura 6.2 - Exemplo do Diagrama H-E dos Conjuntos Fuzzy "pequeno", "médio" e "grande" para uma variável de risco.

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas.
As funções mais usadas são a triangular, a trapezoidal, a gaussiana, sino generalizada, outras formas de funções representativas são nomeadas pela sua aparência como, a função S, a função PI, e a função Z.
Na tabela 6.1 estão relacionadas às principais funções de pertinência (triangular, trapezoidal, gaussiana e Sino Generalizada) e as equações.

Tabela 6.1
Funções de Pertinência e a equação correspondente.

Funções de Pertinência	Equação
Triangular	$trimf(x;a,b,c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$
Trapezoidal	$trapmf(x;a,b,c,d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$
Gaussiana	$gaussmf(x;a,b,c) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$
Sino Generalizada	$gbellmf(x;a,b,c) = \frac{1}{1+\left\|\frac{x-c}{b}\right\|^{2b}}$

c) Regras

São operações lógicas de implicação utilizando os conectivos lógicos E, OU e NOT. A regra é representada como: IF antecedente então consequente, na figura 6.3 apresenta o diagrama esquemático das regras em um sistema fuzzy.

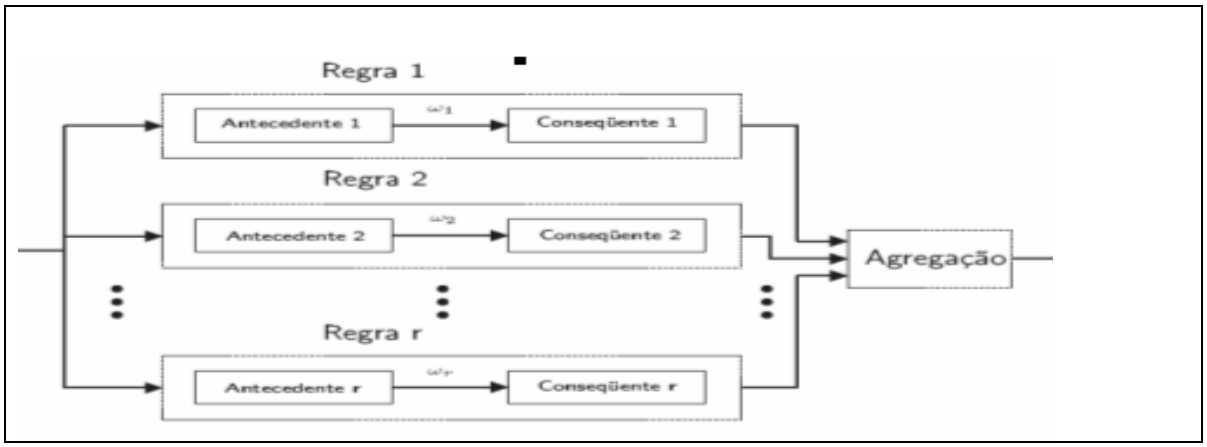

Figura 6.3 - Diagrama esquemático da aplicação das regras na etapa de inferência.

6.4.2 Arquitetura de um Sistema Fuzzy

Os módulos apresentados no diagrama em blocos da figura 6.4 indicam a metodologia para a construção de um sistema fuzzy básico. (MAMDANI, E. H., 1974; SUGENO, M., KANG, G. T., 1988; TANSCHEIT, 2008).

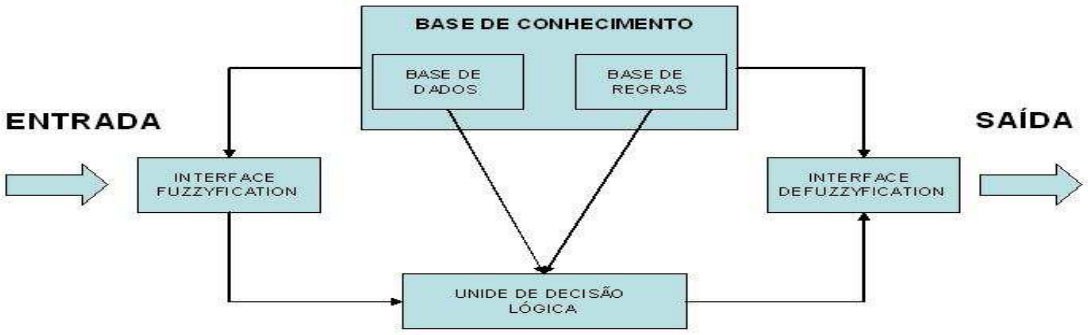

Figura 6.4 - Digrama em blocos da Arquitetura de um sistema fuzzy básico.

Onde destacamos três unidades básicas descritas abaixo:

1. Interface de Fuzzificação (Fuzzificação das Variáveis de Entrada);
2. Base de Conhecimento e Unidade de Inferência ou Decisão;
3. Interface de Defuzzificação.

6.4.2.1 Interface de Fuzzyficação (Fuzzificação das Variáveis de Entrada)

É a transformação das variáveis de entrada do problema em valores fuzzy, nesta etapa é o que modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos

f*uzzy*. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista no processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos lingüísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo lingüístico, deve ser associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência.

Nesta etapa são recebidos os valores reais de cada entrada e são definidas as funções de pertinência para cada variável (recebem os valores reais das entradas para determinar o grau de pertinência de cada premissa da regra).

6.4.2.2 Base de Conhecimento e Unidade de Inferência (Decisão)

a) Base de Conhecimento é composta de duas bases:

- Base de Dados é onde são definidos os conjuntos fuzzy e as funções de pertinência;

- **Base de regras:** constitui o núcleo do sistema, onde estão armazenadas as regras, variáveis e suas classificações linguísticas onde serão realizados a inferência do sistema.

b) Unidade de Inferência

Nesta unidade os valores das premissas de cada regra são computados e aplicados para gerar a conclusão de cada regra. Em seqüência um processo de composição de regras é empregado para gerar a entrada do defuzzificador.

No estágio de inferência ocorrem as operações com os conjuntos fuzzy: combinação dos antecedentes das regras, implicação e "modus ponens" generalizado. Os conjuntos fuzzy de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída referente ao consequente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente, gerados automaticamente a partir dos dados.

A figura 6.4 (apresentada anteriormente) ilustra o funcionamento da unidade de Inferência, o antecedente (premissa da regra) estima com que grau a regra se aplica, enquanto o conseqüente (conclusão da regra) associa uma função de pertinência para uma dada variável de saída. Um conjunto de regras num sistema fuzzy é conhecido como a *Base de Regras*.

Nesta unidade será onde se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *fuzzy* que modela a base de regras. É deste módulo que depende o sucesso do sistema *fuzzy* já que ele fornecerá a saída *fuzzy* a ser adotada a partir de cada entrada *fuzzy*, nesta etapa ocorre:

b.1) A Operação de Implicação e dos Conectivos Lógicos;

b.2) Agregação das Regras Fuzzy;

b.3) Escolha do Método.

b.1) A Operação de Implicação e dos Conectivos Lógicos

As regras são constituídas de:

- Conjunto de condições IF (usando os operadores (conectivos) *and*, *or* ou *not*);
- Uma conclusão THEN;
- Uma conclusão opcional ELSE.

b.2) Agregação das Regras Fuzzy.

Após a aplicação das regras estas serão agrupadas, nessa etapa são agregadas todas as funções membro dos conseqüentes (saída) de cada regra em um único conjunto *fuzzy*, a agregação calcula a importância de uma determinada regra para a situação corrente.

Como um exemplo tem-se na figura 6.5 abaixo: um sistema fuzzy com três (3) regras (1,2 e 3) da variável de saída z, com os seus respectivos graus de pertinência e funções de pertinência trapezoidais (C1, C2 e C3), será produzido pelo processo de agregação das regras *fuzzy* 1, 2 e 3 o conjunto fuzzy apresentado na figura 6.6.

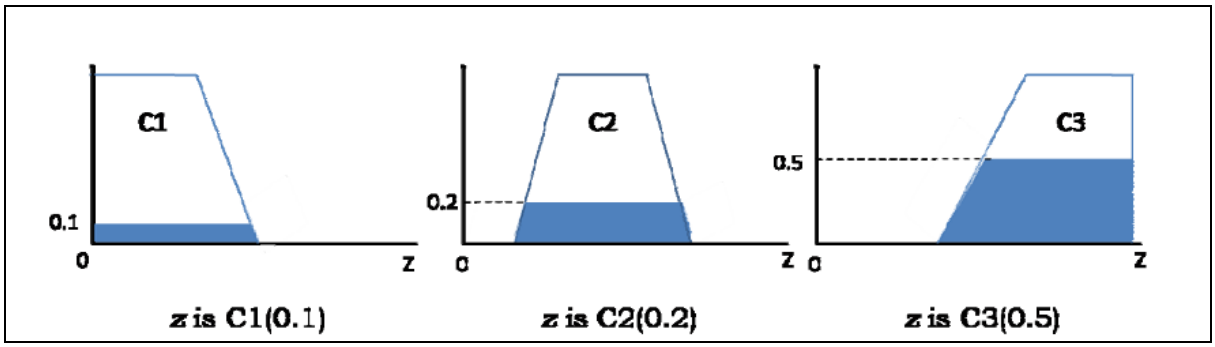

Figura 6.5 - Sistema *fuzzy* com graus de pertinência da variável de saída *z*, produzidos pela aplicação das regras *fuzzy* 1, 2 e 3

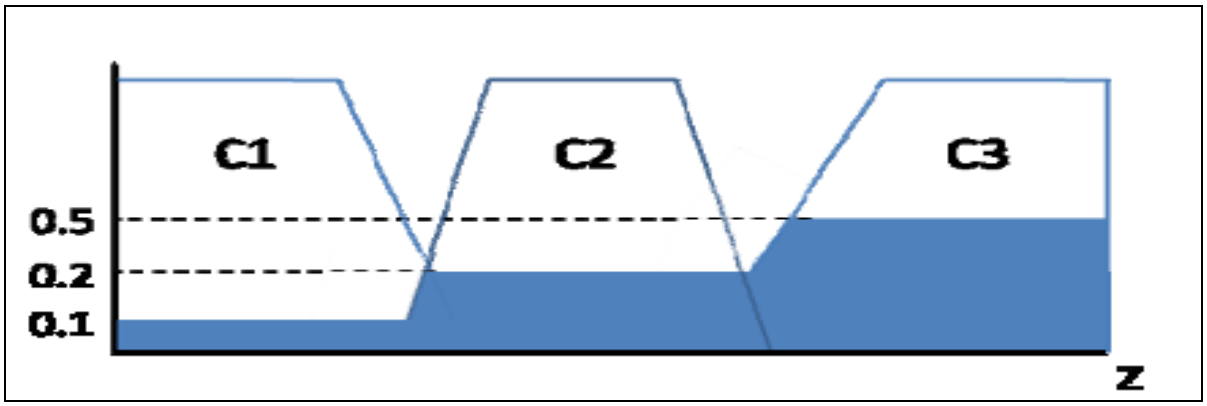

Figura 6.6 - Conjunto *fuzzy* resultante do processo de agregação das regras *fuzzy* 1, 2 e 3

Para a agregação quatro métodos se tornaram populares: Método clássico de Mamdani, Método clássico de Larsen, Método clássico de Tsukamoto e o Método clássico de Takagi-Sugeno.

b.3) Escolha do Método.

Os dois métodos mais empregados em aplicações práticas são os modelos de inferência fuzzy Mamdani (MAMDANI, 1974) e Takagi-Sugeno (TAKAGI, 1985, SUGENO, 1988). Os modelos são chamados pelos nomes de seus criadores.
As regras fuzzy formam a parte fundamental da estrutura de conhecimento em um sistema fuzzy de inferência. Existem dois formatos principais de regras fuzzy, cada um associado a um modelo de inferência.

A diferença básica dos modelos recai no tipo de conseqüente e no procedimento de defuzzificação. Para simplificar somente são exemplificados modelos de regras com duas entradas e uma saída. A seguir serão descritos os dois formatos:

b.3.1) Mamdani;
b.3.2) Takagi-Sugeno-Kang (TSK).

b.3.1) Modelo de Inferência Mamdani

O modelo Mamdani de inferência fuzzy é bastante utilizado para controle de sistemas industriais, baseado na teoria elaborada por Zadeh, Embrahim Mamdani que propôs o seu modelo de inferência com o propósito de controlar uma caldeira, através da simplificação de um conjunto de regras linguísticas, baseada na experiência de especialistas (operadores). No modelo as regras possuem relações fuzzy, tanto em seus antecedentes, como em seus conseqüentes.

O modelo elaborado por Mamdani inclui módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em conjuntos fuzzy e, a seguir as variáveis fuzzy são transformadas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para os sistemas de atuação.
A Figura 6.7 apresenta um diagrama de um sistema fuzzy utilizando o modelo de inferência de Mamdani (FERREIRA, 2008).

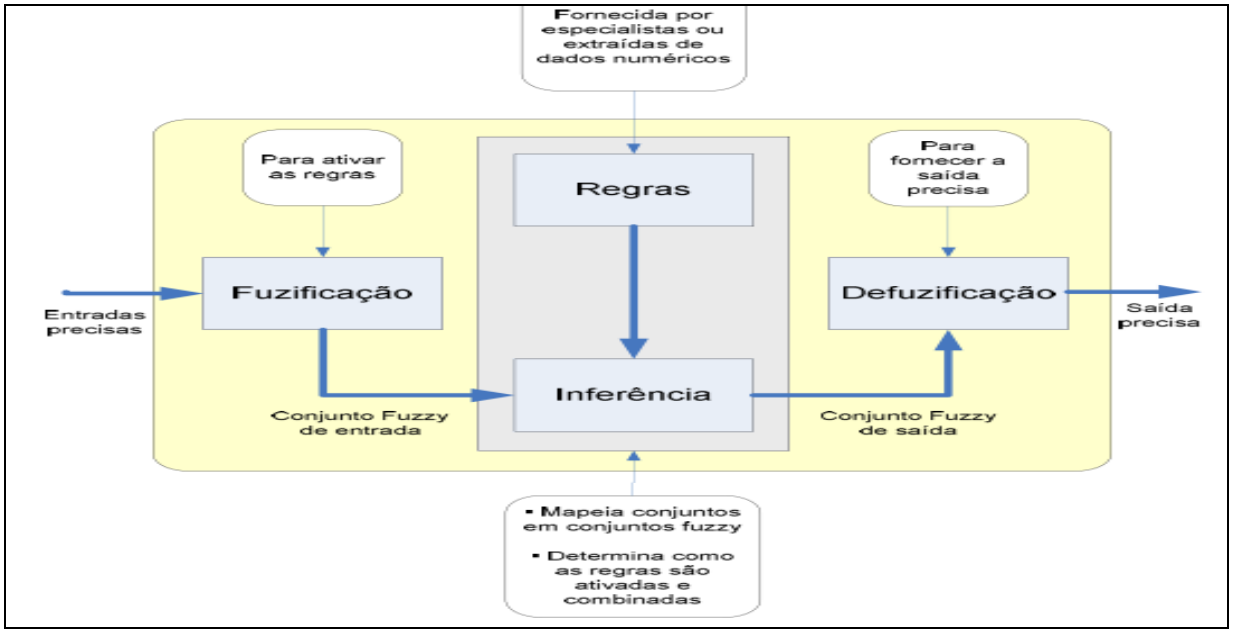

Figura 6.7 - Diagrama Típico de um Modelo de Inferência de Mamdani

O modelo *de Regra para o modelo* Mamdani é Se x é A e y é B então z é C

Este modelo foi proposto, inicialmente, como uma tentativa para controle de um conjunto turbina a vapor / boiler usando regras derivadas de um especialista humano (MAMDANI & ASSILIAN, 1975). A Figura 6.8 ilustra como a saída é derivada em um sistema de inferência do tipo de Mamdani.
A saída *z* é obtida pela defuzzificação (será descrita no item 6.4.3.2) do conjunto fuzzy de saída resultante da aplicação da operação de t-conorma (*máx*) sobre os conjuntos dos conseqüentes, que, por sua vez, foram modificados via t-norma, pelo grau de disparo fornecido pelos antecedentes.

O Modelo Mamdani utilizou a agregação das regras Máximo / Mínimo (será descrito item **6.4.2.3)**, (JANG, J. S. R., GULLEY, N., 1995).

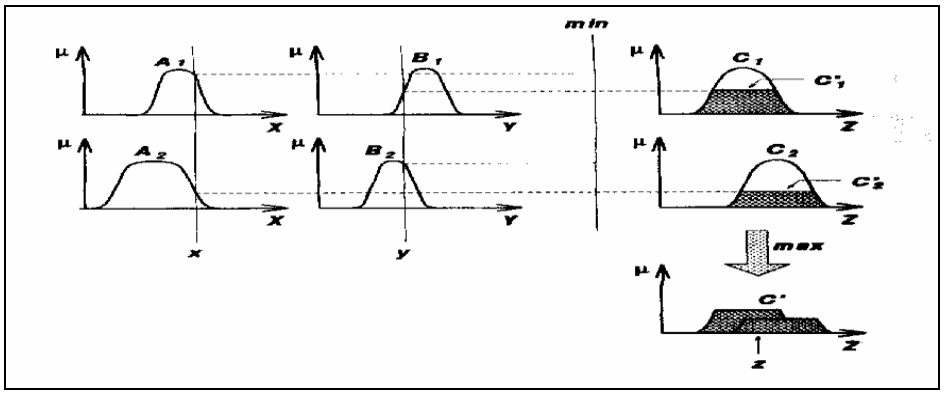

Figura 6.8 – Saída em um Sistema de Inferência do Modelo de Mamdani

b.3.2) Modelo de Inferência TSK/Sugeno

H. Takagi e M. Sugeno propuseram um modelo de inferência fuzzy paramétrico, denominado como TSK. Os autores demonstraram que este modelo é um bom aproximador para sistemas que possam ser satisfatoriamente representados apenas por meio de suas relações de entrada e saída (REZENDE, 2005).

Os modelos fuzzy TSK são também baseados na utilização de uma base de regras condicionais de inferência. Porém, no modelo TSK os conseqüentes das regras, em vez de serem formados por relações fuzzy, compõem-se de relações paramétricas relacionando as entradas e saídas do processo. Assim, este modelo difere do modelo de Mamdani na parte do conseqüente, como uma função linear das variáveis dos antecedentes da maneira mostrada pelo modelo:

O Modelo da Regra para o modelo TSK é Se x é A e y é B então z = f(x,y)

Neste caso, a saída de cada regra é uma função das variáveis de entrada. Geralmente, a função que faz o mapeamento de entrada e saída, para cada regra, é uma combinação linear das entradas, isto é $\boldsymbol{z = px1 + qx2 + r.}$ No caso em que $p = q = 0$, temos $z = r$ (*fuzzy singleton*). A saída do sistema é obtida pela média ponderada (procedimento de defuzzificação, item 6.3.3) das saídas de cada regra, usando-se o grau de disparo destas como pesos da ponderação (JANG, J. S. R., GULLEY, N., 1995). A Figura 6.9 ilustra a saída deste modelo.

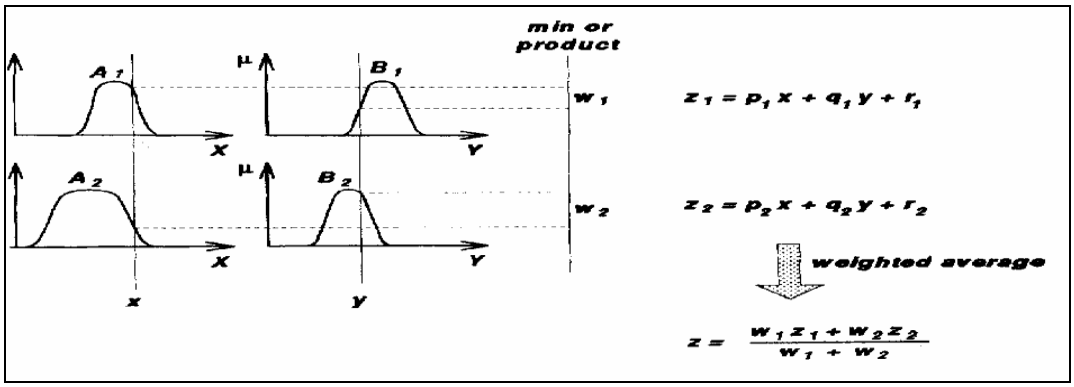

Figura 6.9 - Saída em um Sistema de Inferência do Modelo TSK

É comum a utilização de um modelo TSK em substituição a um modelo matemático convencional em um esquema de controle ou modelagem de sistemas reais. Por suas propriedades sintáticas, é bastante comum a utilização deste modelo para aproximação de funções não lineares. A existência de funções paramétricas nos conseqüentes de suas regras e a facilidade de se ajustarem a partir de um conjunto de dados de entrada e saída faz com que eles sejam intrinsecamente relacionados com a tarefa de aproximação de funções em geral, embora modelos de Mamdani também possam ser utilizados com este objetivo (REZENDE, 2005).

6.4.2.3 Interface de Defuzzificação

Nesta etapa é que traduz o estado da variável de saída *fuzzy* para um valor numérico. Uma vez concluída a inferência deve-se determinar o valor real da saída do sistema. Este processo é chamado de defuzzificação. Dentre os vários métodos existentes os mais usados são:
a) Centro de Gravidade (Centróide);
b) Média dos máximos;
c) Média ponderada.

a) Centróide (Centro de Gravidade - CG)

É o método mais aplicado, O cálculo do Centro de Gravidade (CG) é dado pela Equação 6.1: (saída gerada pelo cálculo do centro de gravidade do conjunto fuzzy conseqüente μ_c obtido pela composição das regras)

$$CG = \frac{\sum_{i=0}^{n} \mu_c(Z_i) * Z_i}{\sum_{i=0}^{n} \mu_c(z_i)}$$

Equação 6.1: Cálculo do Centro de Gravidade

Onde: **n** é o número de intervalos de quantização da saída;

$\mathbf{Z_i}$ é o valor da variável de saída para o intervalo de quantização ***i***; e

$\mu c(\mathbf{Z}i)$ seu grau de pertinência.

A figura 6.10 a seguir mostra a representação geométrica do Centro de Gravidade (Centróide).

b) Média dos Máximos (MM)

Neste defuzzificador o conjunto de saída é determinado pelos valores para os quais ele é máximo. Calcula-se então a média destes valores como valor de saída, a figura 6.11 abaixo ilustra a representação geométrica da Média dos Máximos. O cálculo da Média dos Máximos (MM) é dada pela equação 6.2.

$$MM = \sum_{i=1}^{n} \frac{Zi}{n}$$

Equação 6.2 - Cálculo da Média dos Máximos

Onde: **n** é o número de intervalos de quantização da saída;

$\mathbf{Z_i}$ é o valor da variável de saída para o intervalo de quantização ***i***;

A principal limitação do método de defuzzificação MM é que ele não considera a forma total do conjunto *Fuzzy* de saída. Sendo assim, duas distribuições de possibilidades que apresentem formas diferentes, porém o mesmo conjunto de valores com grau de pertinência máximo, quando defuzzificados com esta técnica fornecerá o mesmo valor clássico. A figura 12 a seguir mostra um exemplo onde este problema ocorre.

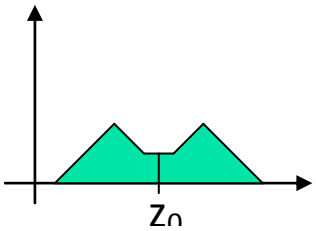

Figura 6.10- Representação do Centroide

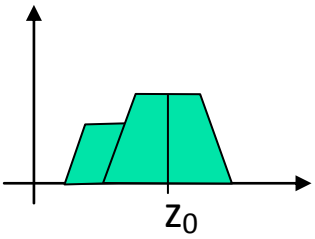

Figura 6.11- Representação da Média dos Máximos

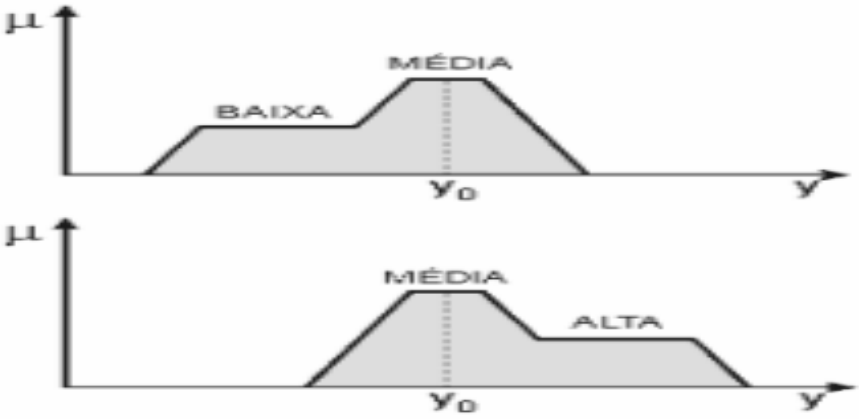

Figura 6.12- Método de defuzzificação da Média dos Máximos (distintas formas com o mesmo MM)

c) Defuzzificador Média Ponderada

Quando funções singletons são utilizadas como consequentes das regras fuzzy, o método é indicado, pois este combina os consequentes com o nível de disparo de cada uma das regras produzindo uma saída. O cálculo da Média Ponderada (MP) é dada pela equação 6.3 abaixo:

$$MP = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mu i * Z_i}{\sum_{i=1}^{n} \mu i}$$

Equação 6.3 - Cálculo da Média Ponderada

Onde: *n* é o número de regras fuzzy;
μ*i* é o nível de disparo da regra *i*;
Zi é o valor do singleton *i*.

Este método também é utilizado na defuzzificação dos modelos TSK de primeira ordem (saída é combinação linear das entradas).

6.5 Vantagens e Desvantagens dos Fundamentos Fuzzy

A importância dos fundamentos da lógica Fuzzy é a relevância relativa da imprecisão, e a eficiência das respostas imprecisas em alguns casos. A lógica fuzzy já está presente em muitos setores produtivos, como indústrias de aviação, eletrodomésticos, agricultura entre outros, tem-se as seguintes vantagens:

- Conceitualmente fácil de ser entendida;
- Flexibilidade;
- Tolerância à imprecisão de dados;
- Modelagem não linear de complexidade arbitrária;
- Construída baseado na experiência dos especialistas;
- Misturada a outras técnicas de controle;
- Baseada em linguagem natural.

Embora apresente muitas vantagens, a Lógica *Fuzzy* também apresenta algumas limitações relevantes (desvantagens), (MUNKATA, 2008):

- Estabilidade. Sistemas fuzzy são estáticos, não sendo capazes de se adaptar a contextos extremamente dinâmicos.

- Falta de capacidade de aprendizagem. Pelo fato de serem estáticos, sistemas fuzzy não conseguem "aprender".

- Definir boas funções de pertinência e regras fuzzy não são tarefas fáceis. Questões como o porquê de um determinado sistema especialista fuzzy precisa de tantas regras, ou quando um desenvolvedor pode parar de adicionar mais regras não são facilmente respondidas.

- A verificação e validação de um sistema especialista fuzzy geralmente requer testes extensivos. Muitos desenvolvedores não conseguem fazer isso ou mesmo as circunstâncias não permitem esses inúmeros testes.

6.6 Principais Aplicações dos Fundamentos Fuzzy

No contexto da Inteligência Artificial diversas são as aplicações da Lógica *Fuzzy*, segue uma lista de domínios abaixo:

- Sistemas especialistas;
- Sistemas multiagentes;
- Classificação e Reconhecimento de padrões;
- Robótica;
- Sistemas de controle inteligentes;
- Sistemas de apoio à tomada de decisão;

- Algoritmos genéticos;
- *Data mining*.

6.7 Implementação de um Sistema Fuzzy para Cálculo do Índice de Prioridade

Sistemas baseados em lógica fuzzy têm demonstrado sua capacidade de resolver diversos tipos de problemas em várias aplicações de engenharia. Um software muito utilizado para tal fim é o toolbox fuzzy do Matlab (Matlab R2008a), este software permite a inclusão de diversos modelos de inferências, bem como grande facilidade no manuseio de regras e representações gráficas da saída, além de possuir uma flexibilidade no que tange ao manuseio dos arquivos que servirão como sinais de entrada do sistema.

6.7.1 Utilização do T*oolbox Fuzzy* do Matlab

No software Matlab o *toolbox fuzzy* possui o programa **fuzzy.m** como editor básico de regras. Esse programa possui um módulo de entrada, o módulo de regras e o módulo final das saídas já defuzzificadas. No módulo de entrada o usuário escolhe para cada variável, qual a função de pertinência mais adequada e qual a interligação entre as lingüísticas baixa, alta, média, baixa-alta, etc. A curva padrão que o Matlab oferece é a triangular, mas todas as outras podem ser escolhidas e suas inclinações e localizações no eixo x podem ser alteradas. No módulo de regras é possível usar Mandami ou TSK ligando as regras e suas respectivas decisões de forma bastante simples e interativa com o usuário. Por fim, no módulo de saída, se escolhe quais as funções de pertinência da saída e suas relações com a entrada, respeitando o módulo das regras gera-se o resultado final numa operação denominada "*view"*. (AMENDOLA, M., SOUZA A. L., E., 2005; JANG, J. S. R., GULLEY, N., 1995)

No ambiente de programação, são necessários diversos passos e uma boa noção de programação para a utilização dos programas do Matlab do *toolbox fuzzy*. Primeiro é necessário à adição das variáveis do problema através do programa **addvar.m**, onde se define os nomes e valores possíveis de serem atingidos para tal variável.

Depois se deve criar o domínio de entrada através da função ***addmf.m***, programa que cria as funções de pertinência, bem como os valores dessas funções no problema e as variáveis lingüísticas. Depois cria-se as funções de pertinência usando os dois programas anteriores, apenas identificando nos mesmo que são funções de saída (*output*) e não de entrada (*input*).

O terceiro passo é a criação das regras numa matriz, cuja ordem deve respeitar o número de variáveis e o número de entradas e saídas do programa. Deve-se então adicionar as regras através do programa **addrule.m**.

Por fim, os resultados são gerados através do programa **evalfis.m** fornecendo ao mesmo, as entradas e regras já geradas anteriormente. Como as respostas são números de pertinência, é possível fazer *loops* iterativos para a geração de cenários e simulação de históricos de tomadas de decisão. Todos os programas devem estar juntos num mesmo programa maior e

respeitando as regras de programação de algoritmo comum a qualquer linguagem de programação, adequada é claro, ao formato do Matlab. Detalhando os passos para criação de um programa (sistema fuzzy) tem-se:

Passo1: Criar um programa usando ***newfis.m****;*
Passo2: Criar as variáveis lingüísticas de entrada e saída usando ***addvar.m****;*
Passo3: Escolher as funções de pertinência e determinar os domínios de entrada e saída usando ***addmf.m****;*
Passo4: Criar as regras *fuzzy* para as funções de pertinência usando uma matriz de entradas e saídas conforme definição do Matlab e usar o programa ***addrule.m*** para inserir as regras no programa;
Passo5: Avaliar a resposta *fuzzy* através do programa ***evalfis.m***.

6.7.2 Desenvolvimento do Sistema Fuzzy para o Cálculo do Índice

O primeiro passo na construção de um sistema especialista *fuzzy* é a especificação do problema em termos de engenharia de conhecimento, ou seja, definir as variáveis de entrada e de saída, com os seus domínios e os seus respectivos intervalos de valores. Nesse problema, existem oito (8) variáveis lingüísticas de entrada (indicadores) e uma variável de saída (índice de prioridade).

Para construir as regras *fuzzy* relacionadas ao problema, é preciso adquirir o conhecimento envolvido, isso é realizado através de pesquisas em artigos, livros e em conversas e entrevistas com especialistas da área, no intuito de descrever o problema e como pode ser resolvido.

6.7.2.1 Etapas para o Desenvolvimento do Sistema Fuzzy para o Cálculo do Índice (IP)

Uma das formas para a reunião dos conhecimentos e a definição das variáveis de estudo é a aplicação do Método Delphi com os especialistas da área, neste trabalho será utilizado o preenchimento da Tabela 4.1 - Matriz para Construção do Índice de Prioridade, seguido os passos descritos na seção 5.3 do capítulo 5, onde tem-se:

- As definições do grau de importância (peso) de cada um dos indicadores na implantação de smart grid (pontuados de 0 a 5), valor inteiro sem decimal;

- Atribuir valor (pontuar) de 0 a 3 a cada indicador do respectivo sistema elétrico avaliado, utilizar somente uma casa decimal.

Para a criação de um sistema Fuzzy para o cálculo do Índice de Prioridade de Implantação de smart grid, usando o *toolbox fuzzy do Matlab,* as seguintes etapas serão realizadas:

a) Definição das variáveis de entrada, domínios, faixa de variação e as funções de pertinência;

b) Definição da variável de saída, domínios, faixa de variação e as funções de pertinência;
c) Elaborações das regras com os respectivos pesos;
d) Escolha dos Métodos de agregação e defuzzyficação.
e) Cálculo do Índice de Prioridade Utilizando o Sistema Fuzzy;
f) Avaliação do Sistema Fuzzy para melhoria.

a) Definição das Variáveis de Entrada, Domínios, Faixa de Variação e as Funções de Pertinência

O Modelo utilizando foi Mamdini, pois nos testes para escolha do Sistema Fuzzy os valores dos cálculos do índice foram mais consistentes (O modelo Sugeno não apresentou os valores adequados para o estudo).

As variáveis selecionadas foram os oito (8) indicadores de maior relevância, com os pesos iguais a cinco (5), estes estão listados na tabela 6.2 a seguir:

Tabela 6.2
Lista das variáveis de entradas do sistema Fuzzy (8 indicadores)

	Indicadores	**Sigla no Sistema Fuzzy**	**Peso**
1	Importância do Sistema (carga)	**IpC**	5
2	Nível de perdas do sistema	**NiP**	5
3	Infraestrutura do Sistema Elétrico	**IfE**	5
4	Infraestrutura de Telecomunicações	**IfT**	5
5	Envelhecimento dos Ativos do Sistema	**EnA**	5
6	Potencial de Eficiência Energética	**PEf**	5
7	Potencial de Geração distribuída	**PGd**	5
8	Participação da Comunidade no Desenvolvimento dos Projetos ou com alto IDH	**PCo**	5

A escolha da função de pertinência foi à gaussiana, pois foi a que mais se aproximou nos testes realizados para o sistema e também pela massa de dados coletadas para o estudo, pois apresentou sua distribuição em torno do centro (media).

1 – As variáveis de entrada com domínio de 0 a 3, podendo assumir as seguintes atribuições:

- Baixo – função gaussiana simples, parâmetros [0, 34, 1]
- Médio – função gaussiana simples, parâmetros [0,29, 2]
- Alto – função gaussiana simples, parâmetros [0,3, 3].

A figura 6.13 representa as oito variáveis de entrada e uma variável de saída (IP8), A figura 6.14 apresenta as funções de pertinência e o domínio (faixa de variação) destas variáveis.

Observação: as variáveis de entrada são semelhantes para os Modelos Sugeno e Mamdani.

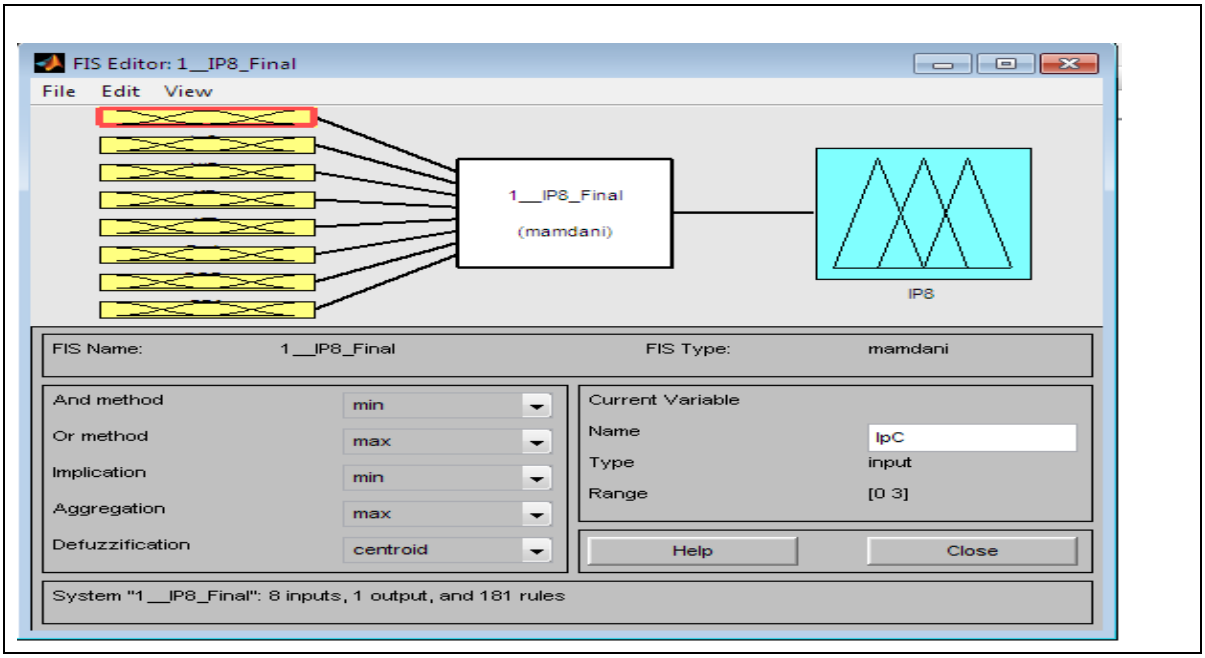

Figura 6.13 - Oito variáveis de Entrada e uma variável de Saída - Modelo Mamdini

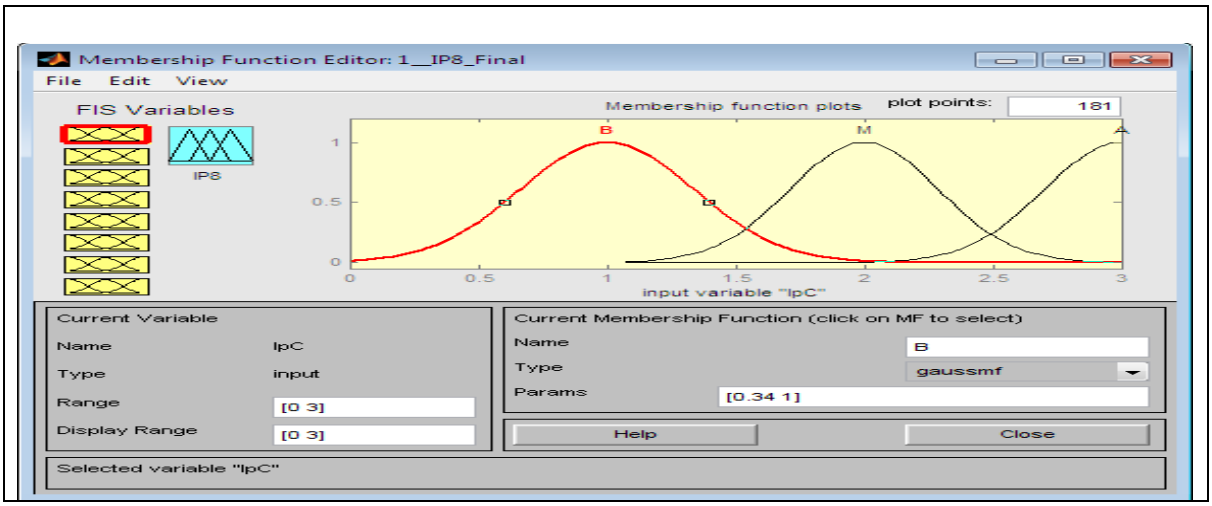

Figura 6.14 - Domínio das variáveis de entrada e as funções de Pertinência Gaussiana

b) Definição da Variável de Saída, Domínios, Faixa de Variação e as Funções de Pertinência

A escolha da função de pertinência foi a gaussiana, pois foi a que se mais aproximou nos testes realizados no sistema e também a massa de dados coletadas para o estudo apresentou sua distribuição em torno do centro (media).

A variável de saída tem o seu domínio de 0 a 24, uma vez que o valor máximo da avaliação de cada indicador igual a 3 e são oito (8) indicadores (variáveis de entrada).

A variável de saída será o Índice de Prioridade (IP8), com um domínio de 0 a 24, podendo assumir as seguintes atribuições:

- Muito Baixo (MB) – função gaussiana simples, parâmetros: [1,5, 4];
- Baixo (B) – função gaussiana simples, parâmetros: [1,5, 8];
- Médio (Me) – função gaussiana, parâmetros: [1,5 12];
- Médio Alto (MeA) – função gaussiana simples, parâmetros: [1,5, 16];
- Alto (A) - função gaussiana simples, parâmetros: [1,5, 20];
- Muito Alto (MA) – função gaussiana simples, parâmetros: [1,5, 24].

A figura 6.15 abaixo ilustra a representação da variável de saída, seu domínio, faixas de variação e as funções de pertinência.

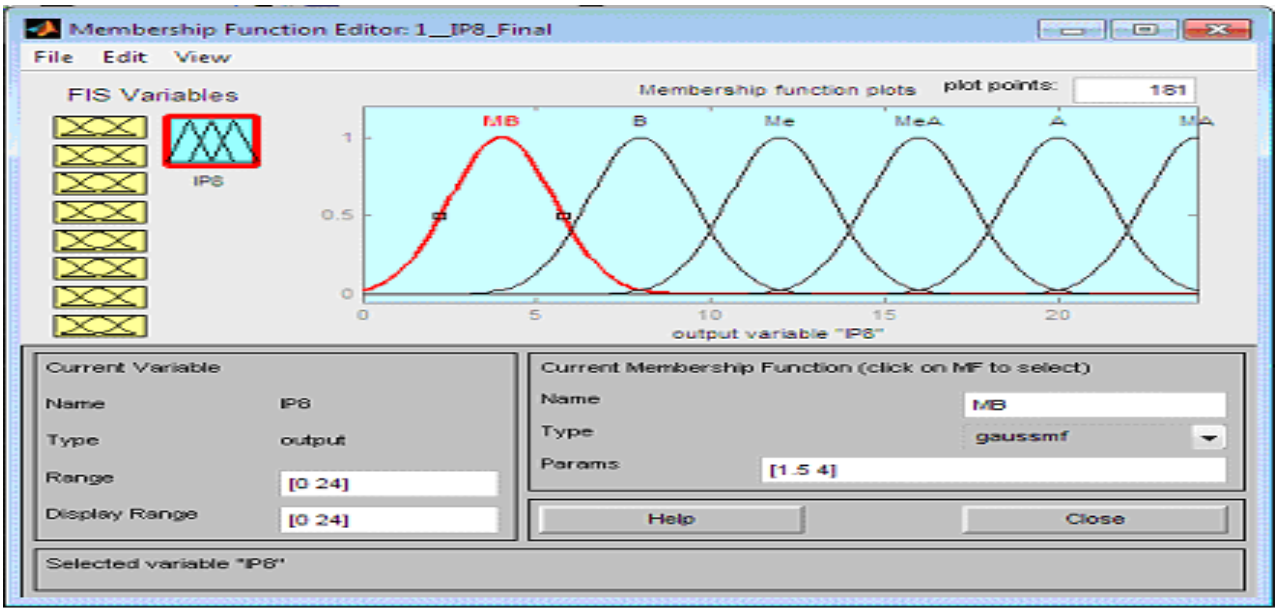

Figura 6.15 - Uma variável de Saída, função de pertinência Gaussiana simples - Método Mamdini

c) Elaborações das Regras com as Oito Variáveis de Entrada e uma de Saída

Define-se o peso de cada regra pelo grau de importância de cada uma, foram definidos os seguintes pesos variando de 0,125 a 1, baseado no número de avaliações altas. A tabela 6.3 indica os valores do peso das regras.

Tabela 6.3
Pesos das regras utilizadas no Sistema Fuzzy

Pontuação do Indicador	Peso Regra
8 com pontuação Alta	**8/8 = 1**
7 com pontuação Alta	**7/8 = 0,875**
6 com pontuação Alta	**6/8 = 0,750**
5 com pontuação Alta	**5/8 = 0,625**
4 com pontuação Alta	**4/8 = 0,500**
3 com pontuação Alta	**3/8 = 0,375**
2 com pontuação Alta	**2/8 = 0,250**
1 com pontuação Alta	**1/8 = 0,125**
0 com pontuação Alta	**1**

Na figura 6.16 está à representação das regras (Toolbox Matlab) elaboradas, na construção do Sistema Fuzzy foram elaboradas 181 regras, aplicadas com os seus respectivos pesos.

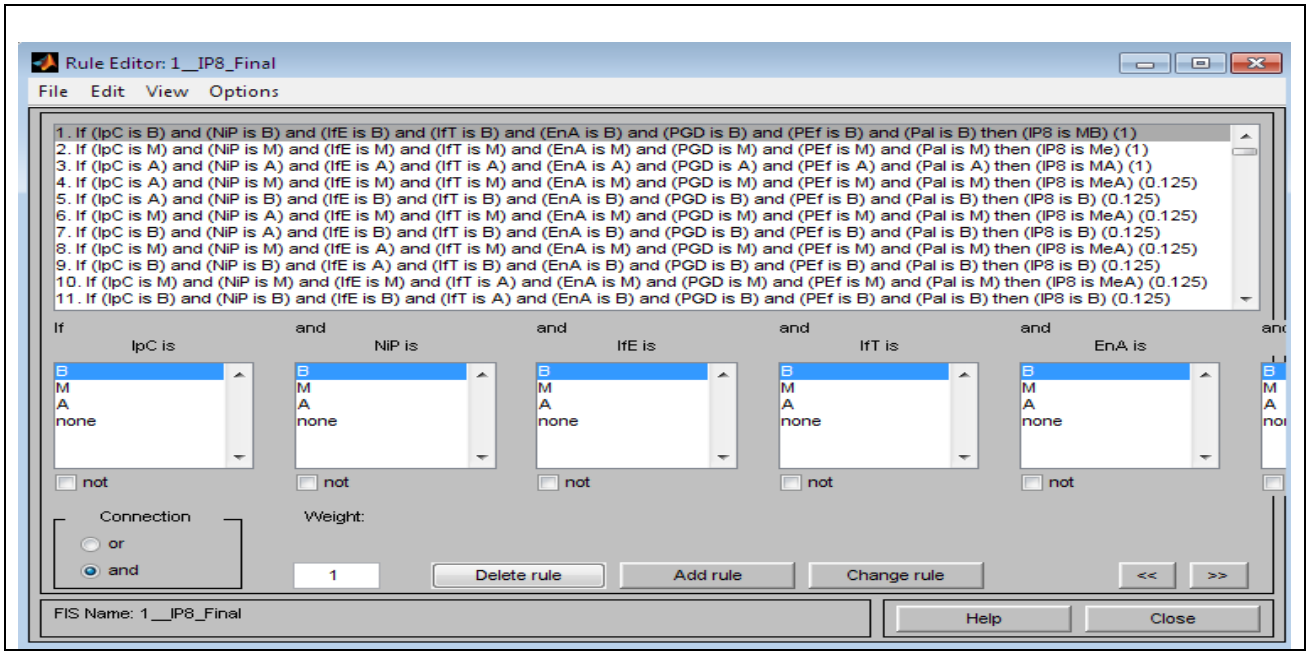

Figura 6.16: Lista de Regras apresentadas no Matlab

d) Cálculo do Índice de Prioridade dos Sistemas Elétricos Utilizando o Sistema Fuzzy

Utilizado a tabela 4.1 de cada sistema elétrico avaliado, com as pontuações atribuídas pelos especialistas a cada um dos indicadores, relaciona os oitos (8) indicadores mais relevantes, será elaborada uma matriz (1x8) com os valores pontuados. Na matriz a pontuação de cada indicador será registrada com um espaço entre cada valor, conforme o exemplo seguinte:

Um sistema fuzzy com variáveis de entrada com todos os valores iguais a 1,5, matriz (1x8):

Entrada sistema fuzzy = [1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5].

A partir da matriz de entrada (input) o sistema calcula o Índice de Prioridade IP.
A Figura 6.17 representa o cálculo do Índice de prioridade (IP) a partir da escolha da configuração realizada no toolbox fuzzy do Matlab (Matlab R2008a):

- And method: min;
- Or method: Max;
- Implication: mín;
- Aggregation: Max;
- Defuzzyfication: centroid.

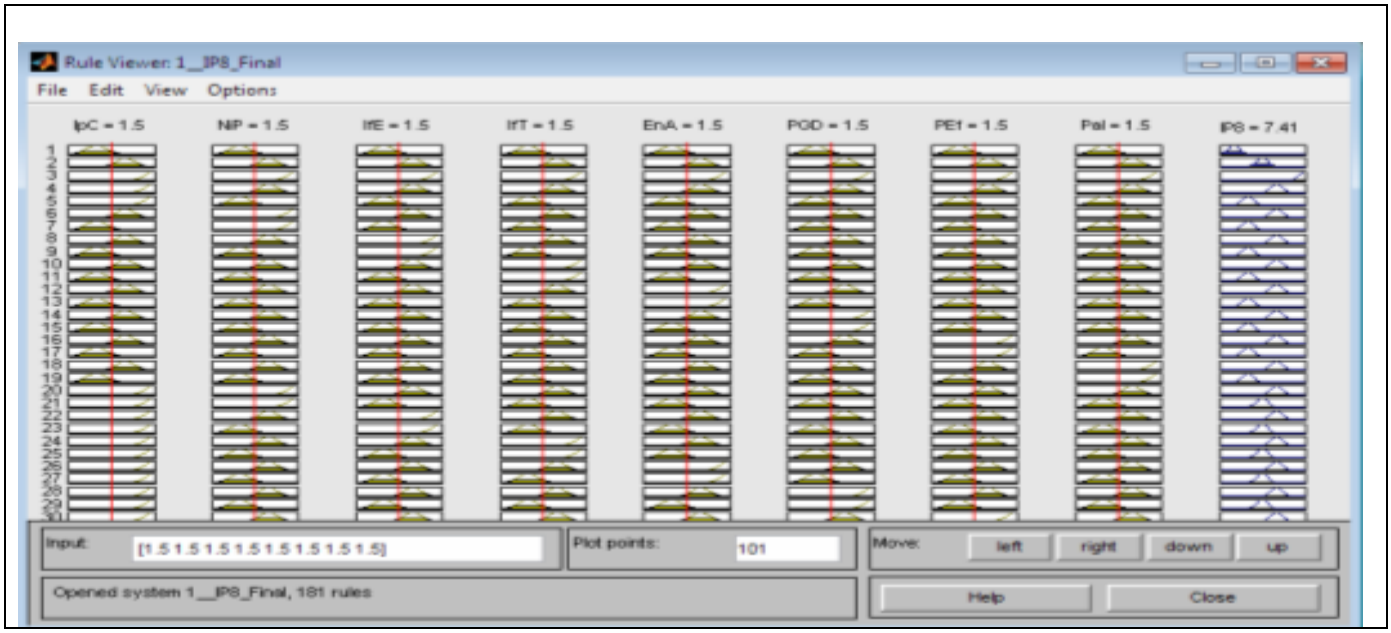

Figura 6.17 – Cálculo do Índice de Prioridade com a agregação das regras no Matlab

6.8 Avaliações dos Sistemas Elétricos e Cálculo do Índice pelos dois Métodos

Na Tabela 6.4 apresenta a avaliação de seis sistemas elétricos (ver tabela 4.1) foram transformados em uma matriz (1x20), a partir desta tabela 6.4 foi elaborada a Tabela 6.5

com as matrizes (1x8), selecionando os 8 indicadores mais relevantes para o cálculo do Índice de Prioridade pelo Sistema Fuzzy (Método Mamdani).

Tabela 6.4
Avaliação de seis sistemas elétricos para 20 indicadores (ver tabela 4.1)

	Seis Sistemas Elétricos (COELBA)	Avaliações dos Sistemas com 20 indicadores
1	Pequeno Porte Zona Urbana (*equilibrado)	[1 0.5 0.5 1.5 1.5 1.5 1.5 0.5 2.5 0.5 0.5 0.5 0 0 3 0 2 1.8 1.5 0]
2	Pequeno Porte Zona Rural (*desequilibrado)	[0.5 2 2 2 1 0.4 0.5 1.5 1.5 2 0.5 2 1 1 1 3 0.5 0.5 0 0]
3	Médio Porte Zona Urbana (*equilibrado)	[2 0.5 0.5 2 2 2 1 1 2.5 0.5 1 1 0 0 2.5 0 2 2.4 1.5 0]
4	Médio Porte Zona Suburbana (*desequilibrado)	[2 1 1.5 2.5 2 1 1 1 2 1.5 2 1 1 1 2 1 1.5 2 1 0]
5	Grande Porte Zona Urbana (*equilibrado)	[3 1 0.5 2 2.5 2.5 2 1 3 1 1 1.5 0 0 3 0 3 2.5 2 0]
6	Grande Porte Zona Suburbana (*desequilibrado)	[2.5 2 2 3 3 1.5 1.5 1.5 2.5 2 2 2 0.6 0 3 1 2 2.5 2 0]

Tabela 6.5
Avaliação de seis sistemas elétricos para 8 indicadores (Sistema Fuzzy)

	Sistemas Elétricos	Avaliações dos Sistemas com 8 indicadores
1	Pequeno Porte Zona Urbana (Carga equilibrada)	[1 0.5 1.5 1.5 0.5 0.5 0.5 2]
2	Pequeno Porte Zona Rural (Carga desequilibrada)	[0.5 2 0.4 0.5 2 0.5 2 0.5]
3	Médio Porte Zona Urbana (Carga equilibrada)	[2 0.5 2 1 0.5 1 1 2]
4	Médio Porte Zona Suburbana (Carga desequilibrada)	[2 1.5 1 1 1.5 2 1 1.5]
5	Grande Porte Zona Urbana (Carga equilibrada)	[3 0.5 2,5 2 1 1 1,5 3]
6	Grande Porte Zona Suburbana (Carga desequilibrada)	[2.5 2 1.5 1.5 2 2 2 2]

6.8.1 Cálculo do Índice de Prioridade Aplicando um Sistema Fuzzy

Na tabela 6.6 abaixo apresenta os cálculos dos Índices de Prioridade para os seis (6) Sistemas pelo Sistema Fuzzy método Mamdini e também foi criada uma coluna com a soma das avaliações dos oitos (8) indicadores mais relevantes (Peso =5).

Observação: os cálculos do Índice foram realizados tomando o Fator de Compensação para Implantação igual a um (K_j=1) na seção 4.3.3.1.

Tabela 6.6
Cálculo do Índice de Prioridade para os Seis (6) Sistemas pelo Método do Sistema Fuzzy.

	Sistemas Elétricos	Método Mamdani	Soma das avaliações dos 8 Indicadores
1	Pequeno Porte Zona Urbana (c. equilibrada)	**4,52**	**8**
2	Pequeno Porte Zona Rural (c. desequilibrada)	**4,97**	**8,4**
3	Médio Porte Zona Urbana (c. equilibrada)	**4,98**	**10**
4	Médio Porte Zona Suburbana (c. desequilibrada)	**6,03**	**11,5**
5	Grande Porte Zona Urbana (c. equilibrada)	**12,1**	**14,5**
6	Grande Porte Zona Suburbana (c. desequilibrada)	**12,5**	**15,5**

6.8.2 Verificação da Consistência do Método do Sistema Fuzzy e a Comparação com o Método Estatístico

Para verificar a consistência do Método Fuzzy e compará-lo com o do Método Estatístico apresentado no capítulo V, foram elaboradas as Tabela 6.7 e 6.8 a seguir:

a) Tabela 6.7: Apresentando os cálculos dos Índices de Prioridade para os seis (6) Sistemas pelos dois métodos (Método Estatístico e Sistema Fuzzy) e também foi criada uma coluna com a soma das avaliações dos oitos (8) indicadores;

b) Tabela 6.8: Apresentando valores atribuídos de avaliações selecionadas (onze (11) matrizes para testar e validar os valores obtidos no cálculo do índice) e também foi criada uma coluna com a soma das avaliações dos oitos (8) indicadores.

Tabela 6.7

Cálculo do Índice de Prioridade para os seis (6) Sistemas pelos dois métodos e a soma das avaliações dos oitos (8) indicadores

	Sistemas Elétricos	**Método da Media Ponderada**	**Método Sistema Fuzzy**	**Soma das avaliações dos 8 Indicadores**
1	Pequeno Porte Zona Urbana (carga equilibrada)	**4,4**	**4,52**	**8**
2	Pequeno Porte Zona Rural (carga desequilibrada)	**4,8**	**4,97**	**8,4**
3	Médio Porte Zona Urbana (carga equilibrada)	**5,2**	**4,98**	**10**
4	Médio Porte Zona Suburbana (carga desequilibrada)	**5,6**	**6,03**	**11,5**
5	Grande Porte Zona Urbana (carga equilibrada)	**6,8**	**12,1**	**14,5**
6	Grande Porte Zona Suburbana (carga desequilibrada)	**7,3**	**12,5**	**15,5**

Tabela 6.8

Teste de consistência do Cálculo do Índice para os dois métodos e a soma das avaliações Sistema Fuzzy

	Matriz de valores para teste (1x20)	Matriz para o Sistema Fuzzy (1x8)	Cálculo S. Fuzzy	Cálculo Média Ponderada	Soma das avaliações dos 8 Indicadores
1	[0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]	[0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5 0.5]	4,03	2,10	4
2	[0.5 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1]	[0.5 1 0.5 1 0.5 1 0.5 1]	4,03	3,13	6
3	[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]	[1 1 1 1 1 1 1 1]	4,07	4,20	8
4	[1 1.5 1 1.5 1 1.5 1 1.5 1 1.5 1 1.5 1 1.5 1 1.5 1 1.5 1 1.5]	[1 1.5 1 1.5 1 1.5 1 1.5]	4,12	5,23	10
5	[1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5]	[1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5]	7,41	6,30	12
6	[1.5 2 1.5 2 1.5 2 1.5 2 1.5 2 1.5 2 1.5 2 1.5 2 1.5 2 1.5 2]	[1.5 2 1.5 2 1.5 2 1.5 2]	11,50	7,33	14
7	[2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2]	[2 2 2 2 2 2 2 2]	11,80	8,40	16
8	[2 2.5 2 2.5 2 2.5 2 2.5 2 2.5 2 2.5 2 2.5 2 2.5 2 2.5 2 2.5]	[2 2.5 2 2.5 2 2.5 2 2.5]	12,90	9,43	18
9	[2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5]	[2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5]	16,2	10,50	20
10	[2.5 3 2.5 3 2.5 3 2.5 3 2.5 3 2.5 3 2.5 3 2.5 3 2.5 3 2.5 3]	[2.5 3 2.5 3 2.5 3 2.5 3]	22,00	11,53	22
11	[3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3]	[3 3 3 3 3 3 3 3]	22,70	12,60	24

Verificou-se pelas tabelas 6.7 e 6.8 que os valores obtidos no cálculo do índice pelos dois métodos foram consistente e praticamente equivalentes.

No sistema fuzzy em algum caso quando o cálculo do índice apresentar valores próximos, nestes casos será utilizado como critério de desempate o sistema que tenha a maior soma das avaliações dos oito indicadores.

Na Tabela 6.7, o cálculo do maior índice (Sistema 6) resultou em um sistema de grande porte, com cargas importantes, com boa infraestrutura, apresentando problemas na operação de suas cargas envolvidas e também com potenciais de eficiência energética, ou seja, onde se tenha um menor investimento por benefício esperado.

6.9 Avaliação e Melhoria do Sistema Fuzzy

Esta é a etapa mais trabalhosa, consiste em verificar se o sistema atende aos requisitos especificados inicialmente no projeto, avaliando-se o mesmo e definindo-se possíveis melhorias que porventura sejam pertinentes de serem feitas. Nesta fase, as opiniões dos especialistas são bastante importantes, pois eles podem estarem ou não satisfeitos com o sistema.

Embora efetuar melhorias no sistema demanda mais tempo e esforço que determinar os conjuntos *fuzzy* e construir as regras *fuzzy*, as melhorias que podem ser feitas no intuito de aumentar o desempenho de um sistema especialista *fuzzy* pode envolver um conjunto de ações:

1. Rever o modelo das variáveis de entrada e de saída e se é necessário redefinir seus intervalos;

2. Rever os conjuntos *fuzzy* e se é necessário definir conjuntos adicionais com relação ao domínio (universo do discurso); nesse ponto, é importante ressaltar que um número maior de conjuntos *fuzzy* torna o funcionamento do sistema mais preciso;

3. Fornecer sobreposição suficiente entre conjuntos *fuzzy* adjacentes (recomendado: 25% a 50% nas bases);

4. Rever as regras *fuzzy* e se é necessário adicionar novas regras à base de regras;

5. Verificar se a inclusão de modificadores nos conjuntos *fuzzy* pode melhorar o desempenho do sistema;

6. Ajustar o peso de execução das regras (a maioria das ferramentas para Lógica *Fuzzy* permite o controle da importância das regras);

7. Rever a forma dos conjuntos *fuzzy*, se é necessário alterá-la no intuito de prover uma maior precisão.

O Sistema Fuzzy Mamdani deste trabalho poderá ser melhorado e repensado, apesar de já ter sido verificado o conjunto de ações recomendadas anteriormente, sobretudo com a adição de um numero maior de regras para avaliação sistemas elétricos de menor porte.

6.10 Conclusão e Considerações Finais

A principal vantagem de se utilizar a Lógica *Fuzzy* deve-se a sua capacidade de lidar com incertezas, raciocínio aproximado, termos vagos e ambíguos, o que não é possível de se fazer com as lógicas clássicas. O raciocínio humano envolve todos esses elementos tratados pela Lógica *Fuzzy*; por isso ela é de suma importância no contexto da Inteligência Artificial, que procura representar o raciocínio, conhecimento humano da forma mais realística possível (MUNKATA, 2008**)**, para problemas difíceis, métodos não-*fuzzy* convencionais normalmente são caros e depende de aproximações matemáticas (como, por exemplo: a linearização de problemas não lineares), o que pode comprometer o desempenho dessas soluções.

O Sistema Fuzzy Mamdani desenvolvido neste trabalho apresentou uma solução satisfatória para determinação do Índice de Prioridade de implantação de smart grid, contudo este sistema poderá ser melhorado e repensado, apesar de já ter sido verificado as principais ações recomendadas para melhoria (descritas no item 6.9), sobretudo com a adição de um numero maior numero de regras para avaliação sistemas elétricos de menor porte e /ou com baixa pontuação de avaliação.

Apesar dos sistemas *Fuzzy serem* uma importante ferramenta para auxiliar a concepção de sistemas complexos, de difícil modelagem, apresenta problemas principalmente no tocante à estabilidade e a falta de capacidade de aprendizagem pode. Para superar alguns desses problemas, as atuais pesquisas envolvendo a Lógica *Fuzzy* e a sua aplicação em sistemas inteligentes consiste na combinação (hibridização) de sistemas *fuzzy* com outras técnicas a fim de prover adaptabilidade, técnicas essas como as redes neurais [artificiais] (*neuro-fuzzy systems*, em inglês) e os algoritmos genéticos (Coppin, 2004). Esses sistemas híbridos que integram esse aspecto adaptativo aprendem a lidar com situações que não tinham sido previstas anteriormente nas fases de projeto do sistema, e, em casos extremos, eles também aprendem a sobreviver quando o ambiente no qual eles operam sofre mudanças.

Capítulo VII - Considerações Finais e as Perspectivas Futuras

7.1 Considerações Finais

O Conceito da gestão de energia tem sido ampliado nos últimos anos devido às novas demandas do mercado mundial, que está atento aos indicadores de qualidade, eficiência e sustentabilidade do sistema elétrico. A preocupação com o gerenciamento de energia elétrica, como forma de garantir o suprimento contínuo, com alta qualidade, apresentando menor custo e máxima segurança, é a principal motivação para os estudos de novas tecnologias economicamente viáveis.

Nesta etapa inicial de mudança do setor elétrico há o surgimento de um novo ambiente cheio de oportunidades no desenvolvimento de aplicações para smart grid, a partir de novos algoritmos, uso de técnicas inteligência artificial para apoio a decisão, ferramentas de controle de qualidade, etc. Estas novas tecnologias podem ser bastante úteis para que a gestão de energia possa atingir seu objetivo de eficiência, qualidade e sustentabilidade.

A smart grid é uma tendência mundial que apresenta exatamente estas características e funcionalidades, pois faz o sistema elétrico funcionar como uma grande rede interligada, onde há forte interação entre concessionária e consumidores, de forma bidirecional que possibilita uma gestão de energia com a participação efetiva dos consumidores.

No caso do Brasil um longo caminho deverá ser percorrido e existem muitas questões e obstáculos técnicos e econômicos a serem vencidos, mas parte do sistema elétrico (Alta e Média Tensão) apresenta avanços consideráveis na automação de seus processos.

O objetivo esperado na construção de uma rede inteligente será uma rede robusta, segura, que contemple os padrões de interoperabilidade, escalonável, de baixo custo e preparada para suportar qualquer tipo de serviço ou aplicação, tal como uma “internet” voltada ao fornecimento de energia elétrica.

Esses requisitos devem ser observados em um roteiro para implantação de smart grid que passa por definição de objetivos e estratégias, estudos, projetos pilotos, definição de padrões e captação de recursos, para só então implantar a rede inteligente. “Também deve haver a participação de equipes multidisciplinares e multidepartamentares e a preocupação de antecipar futuras integrações para evitar problemas com pouco tempo de uso do smart grid”.

Um aspecto importante a ser considerado nestes projetos iniciais é a necessidade destes programas serem monitorados, de modo a se conhecer sua verdadeira eficácia, seja no alcance e penetração das medidas implementadas, seja também na sua perenidade, sendo,

inclusive, necessários incentivos que viabilizem ou favoreçam a sua implementação em larga escala, superando certas barreiras existentes.

O processo de implantação de smart grid implica em uma profunda transformação nas empresas de energia, envolvendo grandes desafios que devem ser enfrentados a partir do desenvolvimento de uma metodologia bem definida baseada em critérios que devem buscar a maior eficiência e menor custo por benefício.

O engajamento dos órgãos governamentais e todo setor elétrico é indispensável para que tais programas alcancem os objetivos desejados, de modo a eliminar as principais barreiras, proporcionando significativos benefícios ao meio ambiente, às concessionárias, aos consumidores e à sociedade.

Outro aspecto fundamental para a implantação de Smart grid é que deve ser modularizada pelo alto investimento financeiro e também pela rápida evolução tecnológica nas áreas de TI e comunicações. Podendo um grande investimento em tecnologia ficar absoleto mesmo antes de sua implantação. Por isso procuramos a apresentar uma proposta para implantação gradual, através da criação de um Índice que auxiliará a tomada de decisão pelo corpo gerencial da empresa.

A determinação pela implantação em grande escala de redes inteligentes no Brasil deve ser acompanhada de outras políticas de apoio à indústria nacional que incentivem a nacionalização de equipamentos e geração de tecnologia e riqueza no país. Uma desoneração parcial dos itens envolvidos na infraestrutura de redes inteligentes e fontes de financiamento específicas e facilitadas também devem ser tratadas.

Do ponto de vista regulatório, alguns mecanismos de incentivo à implantação podem ser colocados em prática. Uma taxa de remuneração pode ser estabelecida especificamente para ativos de redes inteligentes, de modo que as distribuidoras sejam estimuladas a implantar as redes inteligentes.

Do ponto de vista das distribuidoras, o conteúdo e as referências apresentadas neste trabalho constituem um guia para análise de implantação de redes inteligentes em cada empresa, existindo ou não decisão política/regulatória. Com isso, mesmo que não exista ato compulsório que as obrigue a implantar os conceitos de redes inteligentes, os pressupostos e a própria análise custo-benefício são diretrizes. Nesses casos, devem ser avaliadas particularidades regionais e situações específicas de cada área de concessão, tais como diferenças de mercado e de condições econômico-financeiras das distribuidoras, o que pode mudar alguns dos itens da análise, tais como tempo de análise, ciclo de implantação e algumas das estimativas. Por parte dos benefícios, cada distribuidora apresenta um foco mais peculiar, o que pode impulsionar a implantação em alguns casos.

Destaca-se ainda que, caso realmente exista uma implantação em massa de redes inteligentes no Brasil, devem existir mecanismos relacionados a acompanhamento da decisão. Os efeitos causados pela implantação podem implicar em revisões nas regras, com redução de obrigações, mudanças na abrangência ou ações de incentivo ou correção. A partir dos resultados verificados

na prática, novas análises custo-benefício podem ser realizadas. Essa etapa de acompanhamento deve ser alvo de uma nova analise de impacto, utilizando-se as informações e conclusões apresentadas nesta tese.

No caso do Brasil não existem recursos para uma implantação completa e em curto prazo, ela deve ser feita em etapas detalhadamente planejadas com longa duração, o processo de implantação deverá ser avaliado criteriosamente e continuamente, pois para a continuidade do processo será necessário à geração de novos recursos.

Atualmente acreditamos que os programas de smart grid devam acelerar nestes próximos anos, como já se verifica pelas campanhas de conscientização feitas pelos meios de comunicação, distribuição de materiais didáticos, criação de cursos de pós-graduação e treinamentos diversos, etc. A ANEEL está incentivando diversos programas, estimulando a capacitação e o desenvolvimento tecnológico neste campo, e procurando garantir o financiamento dos projetos os quais deverão ser implementados.

O método apresentado para implantação das Redes Inteligentes a partir da criação de vinte (20) indicadores e um índice de prioridade atingiu aos objetivos propostos, pois aplicado os critérios na simulação de 06 sistemas elétricos com características distintas (Tabela 6.7 e 6.8), foi indicado à ordem de implantação para um sistema elétrico com maior retorno técnico-econômico, o resultados dos sistemas avaliados apresentou o maior Índice para: um sistema de grande porte, com cargas importantes, com boa infraestrutura, apresentando problemas na operação de suas cargas envolvidas e também com potenciais de eficiência energética.

O método proposto neste trabalho deve servir de ferramenta para auxiliar os gestores das empresas de energia a tomada de decisões, utilizando critérios que possam selecionar sistemas que apresentem um menor investimento por benefício esperado. Os valores obtidos nos calculados dos Índices de Prioridade pelos dois métodos (Estatístico e Sistema Fuzzy), tabela 6.7 e 6.8 poderão ser utilizados, pois apresentaram os resultados consistentes e praticamente equivalentes.

A aplicação do Método Delphi traz a oportunidade de poder ter a partir das discussões e de novas experiências dos especialistas realizarem o aperfeiçoamento do método. Eles poderão incorporar outras variáveis e revisarem os valores dos fatores de ponderação e prioridade durante o processo de implantação.

7.2 Perspectivas Futuras

Em termos de trabalhos futuros, as perspectivas de integração dos equipamentos e sistemas através de um protocolo padrão, aliado ao avanço da tecnologia digital, já está em estágio bastante avançado nos Estados Unidos, Europa e Japão, vislumbrando um campo para promissoras pesquisas na área tecnológica e também na comercial, com ampliações de novos serviços a serem prestados pelas concessionárias.

Na área tecnológica podemos destacar:

- **Pesquisas na área de redes elétricas de distribuição inteligentes e seguras**

Com o objetivo de se obter maior segurança e eficiência no gerenciamento de cargas e funcionamento das redes elétricas, existe uma forte tendência de se desenvolver estudos sobre novas técnicas de processamento de informações inteligente e distribuídas para redes, sobre a comunicação bidirecional, sobre processamento e sobre memória de massa. Todas estas linhas de pesquisa deverão ter um papel importante em um futuro próximo.

- **Pesquisas na área de automação residencial – Domótica**

Os mesmos serviços oferecidos às instalações complexas estão progressivamente sendo disponibilizadas para aplicações mais modestas. A automação passou da área industrial para os grandes edifícios e, finalmente, está chegando aos condomínios e residências.
Nas edificações e residências poderão ser controladas funções de segurança, como de acesso restrito, supervisão por circuito fechado de televisão, sonorização ambiente, detecção e apoio ao combate a incêndio, e também o gerenciamento de utilidades de energia, de gás, de água, e de condicionamento ambiental.

- **Pesquisa na área de tecnologias avançadas de conservação de energia**

A energia utilizada poderá ser distribuída por novos guias de ondas ópticas, que também oferecem capacidade de comunicação, reduzindo assim os cabeamentos antes necessários. equipamentos inteligentes de gerenciamento de carga e comunicação devem permitir diagnósticos remotos, downloading de novos softwares de controle, etc. Tudo isso porque as informações sobre o uso de energia de cada consumidor deverão ser bastante importantes no futuro (perfis de carga, comportamento do consumidor, modelos genéricos de carga de diferentes processos, etc..), sendo considerados relevantes na elaboração de novos contratos.

- **Pesquisas na área de procedimentos de manutenção e operação**

Existe uma forte tendência da manutenção de redes elétricas serem realizada através do uso intensivo de poderosos bancos de dados, sistemas compactos de comunicação móvel e digital, e tecnologias de reconhecimento de imagem, podendo-se utilizar algoritmos de redes neurais artificiais ou lógicas difusa. A maioria dos novos componentes poderá dispor de funções de autoteste e diagnóstico, e a inspeção poderá ser realizada com base no estado real dos equipamentos, e não em horários predeterminados.

Estudos já estão sendo realizado para avaliar a atuação de redes de Média e Baixa tensão como canal de informação.

- **Pesquisas na escolha de nova topologia dos sistemas de distribuição**

Em função dos novos aparelhos para armazenamento de energia, a rede elétrica poderá ter uma nova topologia, sendo que os equipamentos poderão oferecer energia por períodos longos ou curtos. Os novos dispositivos SMES (dispositivos de armazenamento magnético supercondutor de alta temperatura), e os sistemas avançados de bateria, permitirão uma operação mais regular, com fatores de carga próximo a 1. Hoje, muitas concessionárias já estudam o uso de baterias avançadas para equalização da carga.
Outra sugestão para trabalhos futuros é tratar dos impactos relacionados à microgeração e à minigeração distribuída. Nesse contexto, sugere-se estudar e estimar custos (implantação de unidades geradoras, proteção e monitoramento da rede, etc.) e benefícios (redução de geração centralizada, de perdas técnicas e de emissão de CO2, etc.).

Como Sugestão também recomenda-se a realização de estudos mais detalhados para quantificar os benefícios relacionados ao desenvolvimento da atividade econômica no Brasil em decorrência da implantação de redes inteligentes. Os ganhos relacionados a receitas fiscais e os impactos positivos na cadeia industrial, no aumento do mercado e na geração de empregos foram motivadores importantes em outros países.

Capítulo VIII - Referências

1. ABINEE / CEMIG, Mesa Redonda Smart Grid - Feira Internacional da Indústria Elétrica e Eletrônica, Minas Gerais 2010.

2. ABRADEE - Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (2011a). Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente: Sumário Executivo - P1.01 – Preliminar. Projeto Estratégico de P&D - Chamada nº 011, Brasília, Brasil.2010.

3. ABRADEE. Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente: TI e Telecom - Relatório da Fase III – Projeções de Investimento - Versão Final. Coordenação Fundação CPqD. Projeto Estratégico de P&D - Chamada nº 011/2010. Brasília, Brasil, 2011.

4. ABRADEE, Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente: Workshop Final - Apresentação SMART-TC-5 - TI e Telecom e Interoperabilidade: Resultado da Fase III. Coordenação Fundação CPqD. Projeto Estratégico de P&D - Chamada nº 011/2010. Brasília, Brasil, 2011.

5. ALBRIGHT, R. E., "A UnifYing Architecture for Roadmaps Frames a Value Scorecard", Albright Strategy Group, New Jersey, US A, 2004.

6. AMENDOLA, M., SOUZA A. L., BARROS L. C., Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5. FEAGRI & IMECC/ UNICAMP, maio, 2005.

7. AMARAL, J.F.M, "Sintese de Sistemas Fuzzy por Computação Evolucionaria", Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Fevereiro, 2003.

8. ANEEL, Nota Técnica n° 073/2011-SRD-CGA-ASS-SPG-SGE-SPESMA/Aneel: Registro das atividades do Grupo de Trabalho sobre Análise de Impacto Regulatório – AIR e recomendações para implementação da metodologia na Aneel (Anexo III - Projeto Piloto - Implantação de Medição Eletrônica em unidades consumidoras do Grupo B). Processo nº 48500.005666/2011-19. Brasília, Brasil, 2011.

9. ANEEL, Nota Técnica n° 098/2012-SRD/Aneel: Proposta de resolução normativa com base na avaliação do processo de Audiência Pública nº 43/2012, instaurada com o objetivo de coletar subsidos acerca da implantação de medidores eletrônicos em unidades consumidoras do Grupo B. Processo: 48500.005714/2009-46. Brasília, Brasil, 2012

10. ANEEL-PRODIST, – Procedimentos de Distribuição, site: ww.aneel.gov.br. 2012.

11. ANEEL, Base de dados Setor Elétrico, site: www.aneel.gov.br. 2012

12. AES Eletropaulo. <http://www.aeseletropaulo.com.br>. March, 2011.

13. ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Prodist. Documentos disponíveis na página eletrônica da Agência, por meio do seguinte caminho: www.aneel.gov.br >> Página Inicial >> Informações Técnicas >> Distribuição de Energia Elétrica >> Procedimentos de Distribuição. Ou diretamente pelo seguinte endereço: http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82&idPerfil=2 (acesso em 8/5/2013). Brasília, Brasil.

14. AYRES, R. U. Limits and Possibilities of Large-Scale Long-Range Societal Models. Technological Forecasting and Social Change, v.25, p.297-308, 1984.

15. BANDEIRANTE, Implementando um projeto de redes inteligentes na EDP Brasil - *InovCity* Aparecida - Projeto de P&D. Detalhamento do Projeto de P&D apresentado à Aneel (não publicado). Brasília, Brasil. BEENSTOCK, Michael; GOLDIN, Ephraim; HAITOVSKY, Yoel (1998). *Response bias in a conjoint* analysis of power outages. Energy Economics, vol. 20, issue 2, pages 135156. 2012

16. BOSE A., "Smart Transmission Grid Applications and their Supporting Infrastructure", disponível em http://certs.lbl.gov/pdf/smart-transmis sion-grid.pdf.

17. Brazilian Electricity Regulatory Agency. Law Nº 12.212. http://www.aneel.gov.br/ /area.cfm?idArea=546&idPerfil=6>. March, 2011.

18. Brazilian Electricity Regulatory Agency. <http://www.aneel.gov.br/areaPerfil.cfm?idPerfil=13>. March, 2011.

19. CASTILLO, Oscar; MELIN, Patricia, *Type-2 Fuzzy Logic*: Theory and applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

20. CEC - *California Energy Commission The Value of Distribution Automation. Research Project*. CEC-500-2007-103. Califórnia, Estados Unidos, 2009.

21. CELESC - *Centrais Elétricas de Santa Catarina*. <http://www.celesc.com.br/>. March, 2011.

22. CELPA - Centrais Elétricas do Pará S.A. Medição Eletrônica Centralizada: Uma solução social. Painel Setorial Inmetro - Medição Inteligente de Energia Elétrica no Brasil: desafios e oportunidades. Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

23. CEMIG, Cidades do Futuro - analítico e aquisição - Projeto de P&D. Detalhamento do Projeto de P&D apresentado à Aneel (não publicado). Brasília, Brasil, 2012.

24. CEMIG - *Companhia Energética de Minas Gerais.* <http://www.cemig.com.br/sites/ /en/Pages/default.aspx>. March, 2011.

25. CHOWDHURY, S.P., Crossley, P. and Chowdhury, S., *Microgrids and Active Distribution Networks*, IET, London, 2009.

26. COATES, J. F.; MAHAFFIE, J. B.; HINES, A. Technological Forecasting: 1970-1993. Technological Forecasting and Social Change, v.47, p.23-33, 1994.

27. COM-EU - Parlamento Europeu e o Conselho, *Directive 2005/89/EC of the European Parliament and of the Council: Concerning measures to safeguard security of electricity supply and infrastructure investment*. Diretiva da União Europeia. Bruxelas, Bélgica, 2005.

28. COM-EU, *Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council: On energy end-use efficiency and energy services and repealing Council Directive 93/76/EEC*. Diretiva da União Europeia. Bruxelas, Bélgica, 2006.

29. COM-EU, *Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council - Concerning common rules for the internal market in electricity and repealing*. *Diretiva da União Europeia. Bruxelas, Bélgica, 2009.*

30. COPEL - Companhia Paranaense de Energia () < http://www.copel.com/hpcopel/english/>. March, 2011.

31. COPEL, A Experiência da Copel na Automação de Redes de Distribuição. Superintendência de Engenharia de Distribuição. 1º Seminário de Tecnologia e Desenvolvimento para Smart Grid. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Lactec. Curitiba, Brasil, 2012.

32. COPPIN, Ben, *Artificial Intelligence illuminated*. Jones and Bartlett Publishers, 2004.

33. COSTA, A., RODRÍGUEZ, A., SIMAS, E., Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Centro de ciências Exatas e Tecnológicas – Exatec, 2005.

34. COX, E., The Fuzzy Systems Handbook, Massachusetts, Academic Press, Inc. 2009.

35. DEC and FEC. <http://www.aneel.gov.br/cedoc/prt1978046.pdf>. March, 2011.

36. DECC - *Department of Energy and Climate Change*. *Smart meter roll-out for the domestic sector*. *Impact Assessment - IA* nº: DECC0009. *Consultation Response*. Londres, Inglaterra, 2012.

37. DE SOUZA, Rodrigo. T. L.; SOUZA, Lucas. M. (2012). Desenvolvimento de sistema que opere diversas tecnologias e de interoperabilidade para telemedição BT.

XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI. Rio de Janeiro, Brasil.

38. DOE - Department of Energy. The smart grid: An introduction, Disponível em: http://www.doe.energy.gov/1165.htm Acesso: Dezembro, (2009a).

39. DOE - U.S. *Department of Energy*. *The Smart Grid: an introduction*. *Prepared for the Department of Energy by Litos Strategic Communication under contract No*. DEAC26-04NT41817, *Subtask* 560.01.04. Washington, Estados Unidos. (2009b)

40. DOE, *A vision for the Smart Grid*. *Office of Electricity Delivery and Energy Reliability - National Energy Technology Laboratory*. Washington, Estados Unidos. (2009c).

41. DOE - *Economic impact of Recovery Act Investments in the Smart Grid – Analysis of Vendor Payments through the Smart Grid Investment Grant and Smart Grid Demonstration Projects as of March 2012*. *Office of Electricity Delivery and Energy Reliability*. Washington, Estados Unidos, 2013

42. EC & DOE - *European Commission & US Department of Energy*, *Assessing Smart Grid Benefits and Impacts: EU and U.S. Initiative*s. JRC 73070. EUR 25522 EM. *Joint Report EC JRC – US DOE*, 2012.

43. ECOEE Energia Eficiente. Smart grid: moving from theory to practice and in the fast lane in Brazil & Latin America. Report of the III Smart Grid Latin American Forum. Sept. 2010.

44. EDRIS, A., "FACTS Technology Development: An Update", IEEE Power Engineering Review, Mar., pp. 4-9, 2000.

45. EL-HAWARY, M. E., Electric Power Applications of Fuzzy Systems, New York, IEEE Press Series on Power Engineering, Series Editor. 1998.

46. ELETROBRAS. Projeto Parintins, Detalhamento do Projeto de P&D apresentado à Aneel (não publicado). Brasília, Brasil, 2011.

47. ENEL, Enel Group Roadmap to Smart Grids Deployment. *Metering Latin America*. São Paulo, Brasil, 2012.

48. ENEL, Resultados da experiência da distribuidora italiana, disponivel http://www.enel.com/en-GB/innovation/smart_grids/ (acesso em 8/5/2013).

49. EPRI - *Electric Power Research Institute,* Methodological *Approach for Estimating the Benefits and Costs of Smart Grid Demonstration Projects*. EPRI 1020342 - *Final Report*. Palo Alto, Estados Unidos, 2010.

50. EPRI. *Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid - A Preliminary Estimate of the Investment Requirements and the Resultant Benefits of a Fully Functioning Smart Grid*. EPRI 1022519 - *Final Report*. Palo Alto, Estados Unidos, (2011).

51. Estes, G. M.; Kuespert, D. Delphi in industrial forecasting. Chemical and Engineering News, p.40-7, Aug. 1976.

52. EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2008, Estudos para Licitação da Expansão da Transmissão - Consolidação das Análises e Pareceres Técnicos - Programa de Expansão da Transmissão – PET ciclo 2009-2013 N° EPE-DEE-RE-139/2008-r0,

53. EPE. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: 10 de maio de 2010.

54. European Commission, European technology platform smart grids. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future; 2006. <http:// ec.europa.eu/ research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf>, acesso em 16 de Janeiro 2011.

55. FALCÃO, D.M., 2009 "Smart Grid e Microrredes: O Futuro já é Presente", "Anais do VIII SIMPASE, Rio de Janeiro RJ, 9-14".

56. FARUQUI, A; Hiledik, R. Piloting the Smart Grid.The Electricity Journal, , Vol. 22, Issue 7, Aug./Sept. 2009 Disponível em:
http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/Piloting_the_smart_grid__05- 29-09_.pdf Acesso: Dezembro 2009.

57. FERREIRA, L. C. A., Análise a longo-termo da estabilidade de tensão utilizando métodos estáticos e um sistema especialista fuzzy para representação de ações de controle. Tese D.Sc., Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil, 2008.

58. GAD, A., FAROOQ, M., "An Overview of Fuzzy Logic in Power and Control Systems", In: Proceedings of the 46th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems – MWSCAS '03, Vol. 3, pp. 1047-1050, December, 2003.

59. GELLINGS Clark W.,The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response, Publisher by The Fairmont Press, Inc.California, USA, 2009.

60. GIOVINAZZO, R. A. FISCHMANN, A. A. Delphi Eletrônico – Uma Experiência de Utilização da Metodologia de Pesquisa e seu Potencial de Abrangência Regional. Trabalho apresentado no XIV Congresso Latino americano de Estratégia. 17, 18 e 19. Buenos Aires, Argentina, maio de 2001.

61. GOMIDE, F. A. C., GUDWIN, R. R., TANSCHEIT, R., Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial – DCA, 2002,

62. GORGETTE, F., Devaux, O., Fraisse. JL., CIRED 2007. “Possible Roadmaps for New Requirements for French Distribution Control and Automation”.

63. GUINDANI, S., Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas: Uma Análise. Dissertação Mestrado – UFSC, Florianópolis – SC, 1999

64. GUPTA, M., QI, J., “Theory of T-Norms and Fuzzy Inference Method”, Fuzzy Sets and Systems, N°. 40, 1990.

65. HEIDT G.T. et al., "Professional Resources to Implement the Smart Grid," Proceedings of the 2009 North American Power Symposium (NAPS), Starkville, Mississippi, USA, October 4-6, 2009.

66. *HYDRO ONE NETWORKS*. *Time-of-Use Pilot Project Results*. *Report* EB-20070086. Ontário, Canadá, 2008.

67. *HYDRO ONE NETWORKS*. *Smart Grid*. *Regulatory Affairs Documents. Report* EB-2012-0136/Exhibit C. Ontário, Canadá, 2012.

68. IEA (International Energy Agency), Technology Roadmap: Smart Grid, OECD/IEA, Paris, 2011.

69. *IEC, Smart Grid Strategic Group (SG3), Edition 1.0. “Smart Grid Standardization* Roadmap”, 2010.

70. IEC, Publicly Available Specification (PAS). “Intelligrid Methodology for Developing Requirements for Energy Systems”, 2007.

71. IEEE, “Tutorial on Fuzzy Logic Applications in Power Systems”, IEEE-PES Winter Meeting, Singapore, 23-27 January, 2000.

72. IEO-International Energy Outlook, http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/electricity.html>, March, 2011.

73. JANG, J. S. R.; GULLEY, N., *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. The Math Works Inc, 1995.

74. JANNUZZI, P. de M., Indicadores Sociais no Brasil. 3º ed. Campinas, 2004.

75. JRC - *Joint Research Centre* (2011). *Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments*. JRC 65215 - EUR 24856 EM. *Publications Office of the European Union. Reference Report by the Joint Research Centre of the European Commission. Institute for Energy*. União Européia.

76. JUNGES, M. F. D., Lógica Fuzzy em Controle de Tensão e Potência Reativa em Sistema de Potência, Dissertação M.Sc., Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2000.

77. *KANDEL, A., Fuzzy Mathematical Techiques with Applications, Massachusetts, Addison-Wesley, Reading, 1986.*

78. *KAGAN, N., Palestra integrante do III Seminário Internacional de Smart Grid, CPqD "Automação da Distribuição Avançada", Campinas-SP, 2011.*

79. *KEMA The U.S. Smart Grid Revolution: KEMA's Perspectives for Job Creation. Prepared for the GridWise Alliance. Estados Unidos, 2008.*

80. *KEMA, Estudo sobre contadores inteligentes de eletricidade e de gás natural - Relatório 3E/G: Análise Custo-Benefício para os sectores da eletricidade e do gás natural. Documento preparado pela Kema para a Erse. Lisboa, Portugal, 2012.*

81. *KLINE, E., 1994. Sustainnable Community Indicators. Disponível on-line em http: //tdg.uoguleph.ca/www/FSR/collection/indicator/ comm.indicators.txt, acesso em 25 de abril 2011.*

82. *KLIR, G. and FOLGER, T. A., Fuzzy Sets, Uncertainty and Information, New Jersey, Prentice Hall, 1988*

83. KUPFER & TIGRE, Technical Prospection [5] ZHAI, D.; BREIPOHL, A.M.; LEE, F.N.; ADAPA, "The effect of load uncertainty on unit commitment risk", R. Power Systems, IEEE Transactions on Volume 9, Issue 1, Feb 1994 Page(s):510 – 517. 2004:

84. LIN, C. T., LEE, C. S. G., Neural Fuzzy Systems, New Jersey, Prentice Hall, 1996.

85. LIGHT Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes - *Smart Grid Handbook*. Programa Smart Grid Light - Energia Inteligente. Coordenação geral Fábio Toledo. Editora Brasport. Rio de Janeiro, Brasil. 2012.

86. MACKENZIE, D. R. et aI., "Methods in Science Roadmapping: How to Plan Research Priorities",2002,

87. MALIK, O. P., NIEBUR, D. HIYAMA, T., "Applications Control – Chapter 3 – Tutorial on Fuzzy Logic Applications in Power Systems", IEEE-PES Winter Meeting, Singapore, 23-27 January, 2000.

88. MAMDANI, E. H., "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," Proceedings of the IEE (Control and Science), Vol. 121, pp. 298-316, 1974.

89. MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S. An Experiment in Lingüistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. International Journal of Man-Machine Studies, 7(1): 1-13, 1975.

90. MARTINO, J. P. Technological forecasting for decision making. 3.ed. New York: Mc Graw-Hill Inc., 1993.

91. MATHWORKS, Fuzzy Logic Toolbox for Use with MATLAB – User's Guide, Version 2, EUA, The Math Works, Inc, 2008.

92. MATHWORKS, MATLAB Getting Started Guide, Version 15, EUA, The Math Works, Inc, 2010.

93. MCNEILL, F. Martin; Thro, Ellen, *Fuzzy Logic*: A practical approach. AP professional/Academic Press, 1994.

94. MEDSKER, L. R., Hybrid Intelligent Systems, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1995.

95. MENDEL, J. M., "Fuzzy Logic Systems for Engineering: a Tutorial". Proceedings IEEE, Vol. 83, pp. 345–377, 1995.

96. MEENUAL, T., CIGRE, "The PEA Smart Grids Development Framework". Canada Conference on Power Systems, Toronto, Canada, 2009.

97. MITCHELL, G., 1997. Problems and Fundamentals of Sustainable Development Indicators. Disponível on-line em http: /www.lec.leeds.ac.uk/peope/Gordon.html, acesso em 25 de abril 2011.

98. MME - Ministério de Minas e Energia (2011). Relatório - Smart Grid - Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes. Relatório resultante do Grupo de Trabalho instaurado pela Portaria MME nº 440/2010. Brasília, Brasil,

99. MUNAKATA, Toshinori, Fundamentals of the new Artificial Intelligence: neural, evolutionary, fuzzy and more – 2nd ed. Springer-Verlag London, 2008.

100. NEMA, *Smart Grid Standards Publication SG-AMI 1-2009 – Requirements for Smart Meter Upgradeability*, Available at http://www.nema.org/stds/sg-ami1.cfm. 2009.

101. NIST (National Institute for Standards and Technology), 2010. Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0, *NIST Special Publication 1108*, January 2010. Available at:
http://www.nist.gov/public_affairs/releases/smartgrid_interoperability_final.pdf.

102. *NORTHEAST GROUP Brazil Smart Grid: Market Forecast (2012 – 2022). Report -VolumeII.* Sumário disponível em http://www.northeastgroup.com/reports/Brazil_Smart_Grid_Market_Forecast_2012-2022_Northeast_Group.pdf (acesso em 8/5/2013). Washington. Estados Unidos.

103. NYS, Smart Grid Consortion, Smart Grid Roadmap for the State of New York, 2010

104. PEA Smart Grids Team, "Framework and Directions of PEA Smart Grids Development", Internal document of PEA (in Thai), 2010.

105. OMORI, Julio S. Redes Inteligentes - A Experiência da Copel na Automação das Redes de Distribuição de Média Tensão. XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI. Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

106. ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2008, Procedimentos Sistêmicos para a Operação da SE Campos, ONS - Procedimentos de Rede, Módulo 10, Submódulo 10.11, revisão 04. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 02 de maio de 2010.

107. ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2010, Apuração Mensal das Parcelas Variáveis Referentes à Disponibilidade de Instalações da Rede Básica, ONS - Procedimentos de Rede, Módulo 15, Submódulo 15.12, revisão 1.1. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 09 de outubro de 2010.

108. PG&E - *Pacific Gas and Electric Company* (2012). *Smart Grid Annual Report* 2012. *Appendix A - Smart Grid Technologies*. *San Francisco*, Estados Unidos, 2012

109. PEDRYCZ W. and Gomide F.; "Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing"; Wiley/IEEE Press, 2007, (ISBN 978-0-471-78857-7).

110. PODMORE, R. Robinson, M R IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 2, "The Role of Simulators for Smart Grid Development", 2010.

111. Redeinteligente.com, http:www.redeinteligente.com/2012/06/30/smart-grid-evolução-do-mercado-no-brasil/, junho/2012.

112 Redeinteligente.com, http://www.redeinteligente.com/2013/01/12/buzios-a-primeira-cidade-inteligente-da-américa-latina, janeiro/2013.

113. REINGHANTZ, P., "Lógica fuzzy e variáveis linguísticas aplicadas na avaliação de desempenho de edifícios de escritório", Revista on-line Ambiente Construído – Avaliação Pós-Ocupação (APO) da ANTAC , Vol. 2, N° 3, pp. 41-56, 2002.

113. REZENDE, S. O., Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações, Barueri, Ed. Manole, 2005.

114. ROSS, T. J., Fuzzy Logic with Engineering Applications, New York, McGrawHill, 1995.

115. ROSS, Timothy J. *Fuzzy Logic with Engineering applications* – 2nd ed. John Wiley & Sons, 2004

116. RUSSEL, S., NORVIG, P., Inteligência Artificial, Rio de Janeiro, Ed. Elsevier, 2004.

117. Sapiens Parque in Santa Catarina. <http://www.sapiensparque.com.br>. March, 2011.

118. SDG&E - *San Diego Gas & Electric Company* (2012). Smart Grid Deployment Plan. 2012 *Annual Report*. San Diego, Estado Unidos.

119. SIVANANDAM, S. N.; Sumathi, S.; Deepa, S. N. *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

120. SILVA, M. A. S., CECCOPIERI, A. M. G., SANTANA, C. C. C., et al, "Simulação de um Controlador Nebuloso (Fuzzy) no Controle de Qualidade da Fabricação das Garrafas PET", METROLOGIA – Metrologia para a Vida, Recife, PE, Brasil, 01-05 Setembro, 2003.

121. Smartgridnews.com.br, 2012. http://smartgridnews.com.br/inovcity-lancamento-de-projetos-de-inovacao-social-e-mobilidade-eletrica/.

122. Smart Grid Spotlight: Brazil. <http://www.itsyoursmartgrid.com/blog/2009_ _12_4_brazil.jsp>. March, 2011.

123. SOUZA, F. J. Modelos Neuro-fuzzy Hierárquicos. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Abril 1999.

124. S.P.Chowdhury, P.Crossley, and S. Chowdhury, Microgrids and Active Distribution Networks, IET, London, 2009.

125. Southern California Edison, General Rate Case Smart Grid Strategy & Roadmap, www.sce.com/smartgrid, 2010.

126. SUGENO, M., KANG, G. T., "Structure Identification of a Fuzzy Model", Fuzzy and Sets and Systems, Vol. 28, N°.1, pp. 15-33, 1988.

127. SUGENO, M., An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences 36, p. 59-83, 1985.*

128. TANAKA, K., An Introduction to Fuzzy Logic for Practical Applications, Springer, 1996.

129. TAKAGI, T. and SUGENO, M., " Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control", IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics, Vol. 15, pp. 116-132, 1985.

130. TANSCHEIT, R., Sistemas Fuzzy – Tutorial, Instituto de Computação Aplicada – PUC/RJ. Disponível em: <http://www.ica.ele.puc-rio.br/novo/disciplines>. Acesso em: Junho 2008.

131. TERANO, T., Asai, K., Sugeno, M. - Fuzzy Systems Theory and its Applications

- Editora Academic Press, 1992, (ISBN: 0126852456)

132. THE PSC, 2005. Kentucky's Electric Infrastructure: Present and Future, The Kentucky Public Service Commission. [Online]. Available: http://psc.ky.gov/agencies/psc/industry//electric/ElectricRpt_082205/Mai /Rpt/electric1_CompleteRpt.pdf .

133. TNMP - *Texas New Mexico Po*wer (2010) *Texas-New Mexico Power company's request for approval of an advance metering system (AMS) deployment and AMS surcharge. Petition and application - submitted to Public Utility Commission of Texas*. Disponível em http://www.smartgrid.gov/sites/default/files/doc/files/TexasNew_Mexico_Power_Com pany_R equest_For_Approval_Advance_201005.pdf (acesso em 8/5/2013). Irving, Estado Unidos.

134. TOMSOVIC, K., Chapter IV - Fuzzy Systems Applications to Power Systems Fundamentals, School of Electrical Engineering and Computer Science, 2000.

135. TSOUKALAS, L. H., UHRIG, R. E., Fuzzy and Neural Approaches in Engineering. New York, John Wiley & Sons, 1997.

136. TUROFF, Murray; Linstone, Harold A. The Delphi method. New York: Addison Wesley Publishing Company Inc., 1975.

137. UTILITY OF THE FUTURE: Directions for Enhancing Sustainability, Reliability and Profitability, Volume 1, co-authored by three KEMA executives, Ralph Masiello, Hugo van Nispen, Robert Wilhite, September 2008 (ISBN 978-0-6152-7035-7).

138. U.S. Department of Energy, 2009. “Smart Grid System Report”, disponível em http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/SGSRMain_090707_lowres.pdf, julho, 2009.

139. ZADEH, L. A., “Fuzzy Sets”, Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.

140. ZADEH, L. A., “Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes”, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-1, pp. 28-44, 1973.

141. ZADEH, L. A. “ The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – 1,” Information Science, vol. 8, n. 3, pp. 199-249, 1975.

142. ZIMMERMANN, H. J., Fuzzy Set Theory and Its Applications, 3rd ed., Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1996.