



IMPACTO DE NOVAS TECNOLOGIAS E *SMART GRIDS* NA DEMANDA DE
LONGO PRAZO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Glaysson de Mello Muller

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Djalma Mosqueira Falcão

Rio de Janeiro

Março de 2016

IMPACTO DE NOVAS TECNOLOGIAS E *SMART GRIDS* NA DEMANDA DE
LONGO PRAZO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Glaysson de Mello Muller

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.

Prof. Glauco Neri Taranto, Ph.D

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

Prof. Reinaldo Castro Souza, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2016

Muller, Glaysson de Mello

Impacto de Novas Tecnologias e *Smart Grids* na Demanda de Longo Prazo do Sistema Elétrico Brasileiro/ Glaysson de Mello Muller. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XV, 207 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Djalma Mosqueira Falcão

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 187-197

1. *Smart Grid* 2. Previsão da Demanda 3. Lógica Fuzzy. I. Falcão, Djalma Mosqueira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde e força para que eu pudesse chegar até aqui. Sem isso, com certeza, nada seria feito.

Agradeço imensamente minha família, Pai, Mãe e Irmã, mais conhecidos como Mario Cesar, Maria Alice e Karolyne, por ter me ajudado neste longo caminho. Sem sua força, amor, compreensão, carinho, apoio e tudo de bom que possa existir, alcançar este objetivo nem seria sonhado por mim. Meu Pai e Mãe por terem plantado a semente dos estudos lá atrás e apostarem em mim, foram essenciais até aqui. Karolyne, por sempre estar ao meu lado nos estudos e me ajudar em várias situações. Minha noiva, Danielle, não estava em boa parte desse tempo de estudo, mas tenho certeza que sem seu sorriso, opiniões e amor, a chegada até aqui seria muito mais árdua e menos feliz.

Também agradeço a paciência de todos de me ouvir falar em “Smart Grid” e “Fuzzy” durante quase cinco anos sem reclamar...

Agradeço ao Professor Djalma por me propor este tema de trabalho e me ajudar com suas valiosas informações a solucionar e clarear problemas que pareciam de difícil solução.

Agradeço também a todos os bons professores que tive contato durante o curso, principalmente professora Carmen Borges e professor Roberto Schaeffer. Eles foram muito importantes no meu desenvolvimento acadêmico.

E um último agradecimento a Jeff Bezos, pela criação do Kindle. Sem ele, seria impossível ler todos esses artigos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

IMPACTO DE NOVAS TECNOLOGIAS E *SMART GRIDS* NA DEMANDA DE
LONGO PRAZO DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Glaysson de Mello Muller

Março/2016

Orientador: Djalma Mosqueira Falcão

Programa: Engenharia Elétrica

O objeto de estudo desta tese é mensurar os impactos das novas tecnologias envolvidas no âmbito da *smart grid* na demanda de longo prazo, englobando consumo de energia elétrica e demanda máxima, utilizando para isso a lógica *fuzzy*. Além disso, é realizado um estudo para verificar a importância da *smart grid* na diminuição da emissão de CO₂ pelo sistema elétrico brasileiro a partir dos cenários apresentados pela Latin American Modeling Project And Integrated Climate Modelling And Capacity Building In Latin America – LAMP–CLIMACAP até 2050 para o Brasil. Quatro áreas se mostram as mais fortes para se desenvolverem no futuro a partir da *smart grid*: resposta da demanda, geração distribuída, veículos elétricos e eficiência energética. Para cada uma dessas áreas foi realizado um estudo profundo para avaliar o impacto no sistema energético. Foram criados quatro cenários de introdução de cada uma dessas áreas com a finalidade de identificar caminhos que poderão ocorrer no horizonte de estudo, mensurando os impactos no sistema energético nacional.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

IMPACT OF NEW TECHNOLOGIES AND SMART GRIDS IN
LONG-TERM DEMAND OF THE BRAZILIAN ELECTRIC SYSTEM

Glaysson de Mello Muller

March/2016

Advisor: Djalma Mosqueira Falcão

Department: Electrical Engineering

The subject of this thesis is to measure the impact of new technologies involved within the smart grid in long-term demand, encompassing energy consumption and peak demand, making use of fuzzy logic. In addition, a study is conducted to verify the importance of smart grid in the reduction of CO₂ emissions by the Brazilian electricity system from the scenarios presented by the Latin American Modeling Project And Integrated Climate Modelling And Capacity Building In Latin America - LAMP-CLIMACAP until 2050 to Brazil. Four areas are shown the strongest to thrive in the future from the smart grid: demand response, distributed generation, electric vehicles and energy efficiency. For each of these areas was carried out in-depth study to assess the impact on the energy system. It was created four scenarios introduction of each of these areas in order to identify ways that may occur in the horizon of study, measuring the impact on the national energy system.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – MOTIVAÇÃO	1
1.2 – OBJETIVO	1
1.3 – ESTRUTURA DA TESE	2
1.4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
CAPÍTULO 2 - SMART GRID	7
2.1 - RESPOSTA DA DEMANDA.....	12
2.1.1 - TARIFAÇÃO DINÂMICA NO MUNDO.....	16
2.1.2 - IMPACTOS E BENEFÍCIOS	17
2.2 – PEQUENA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	18
2.3 - VEÍCULOS ELÉTRICOS	25
2.4 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	30
CAPÍTULO 3 – PREVISÃO DA DEMANDA E PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO	34
3.1 – INTRODUÇÃO.....	34
3.2 – PREVISÃO DA DEMANDA	34
3.2.1 – MODELOS DE PREVISÃO DA DEMANDA.....	35
3.3 – PLANEJAMENTO ENERGÉTICO NO BRASIL	37
3.4 – PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO	41
3.4.1 – RESPOSTA DA DEMANDA NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO.....	42
CAPÍTULO 4 - CONJUNTO, LÓGICA E SISTEMAS FUZZY	44
4.1 - INTRODUÇÃO	44
4.2 – CONJUNTOS FUZZY.....	44
4.2.1 – CONJUNTOS CONVENCIONAIS	46
4.2.2 – CONJUNTOS FUZZY.....	46
4.2.3 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	47
4.2.4 – VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS	47
4.2.5 – OPERAÇÕES COM CONJUNTOS FUZZY	48
4.2.6 – DEFINIÇÕES BÁSICAS DE CONJUNTOS FUZZY	50

4.3 – LÓGICA <i>FUZZY</i>	51
4.4 – SISTEMAS <i>FUZZY</i>	52
4.4.1– REGRAS <i>FUZZY</i>	52
4.4.2– ESTRUTURA DE SISTEMA DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i>	53
4.4.2.1 – ENTRADA	54
4.4.2.2 – BASE DE REGRAS	54
4.4.2.3 – FUZZYFICADOR	54
4.4.2.4 – INFERÊNCIA	54
4.4.2.5 – DEFUZZYFICADOR	55
4.4.2.6 – SAÍDA	56
4.4.3 – EXEMPLO DE SISTEMA DE INFERÊNCIA	56
CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA	60
5.1 – INTRODUÇÃO	60
5.2 - METODOLOGIA PROPOSTA	61
5.2.1 - VARIÁVEIS DE ENTRADA	63
5.2.2 - VARIÁVEIS DE SAÍDA	64
5.2.3 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	64
5.2.4 - REGRAS	66
5.2.5 - CONSTRUÇÃO DOS CENÁRIOS E SIMULAÇÃO	66
5.3 – RESPOSTA DA DEMANDA	67
5.3.1 – VARIÁVEIS DE ENTRADA – DIMENSÕES DE ANÁLISE	67
5.3.1.1 – SISTEMAS DE TARIFAÇÃO	68
5.3.1.1.1 – TIME OF USE – TOU	69
5.3.1.1.2 – CRITICAL PEAK PRICING – CPP	71
5.3.1.1.3 – PEAK TIME REBATE – PTR	72
5.3.1.1.4 - REAL TIME PRICING – RTP	73
5.3.1.2 – PROJETOS-PILOTO	75
5.3.1.3 – REGULAMENTAÇÃO	77
5.3.1.4 – TECNOLOGIAS & PADRÕES	79
5.3.2 – REGRAS	84
5.3.3 – VARIÁVEIS DE SAÍDA – IMPACTOS NOS SISTEMAS DE ENERGIA	84
5.4 – PEQUENA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	84
5.4.1 – VARIÁVEIS DE ENTRADA - DIMENSÕES DE ANÁLISE	86

5.4.1.1 – SISTEMA DE TARIFAÇÃO.....	86
5.4.1.2 - REGULAMENTAÇÃO & INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS ...	90
5.4.1.3 - TECNOLOGIA & ARMAZENAMENTO.....	94
5.4.2 – REGRAS	97
5.4.3 – VARIÁVEIS DE SAÍDA – IMPACTOS NOS SISTEMAS DE ENERGIA	97
5.5 - VEÍCULOS ELÉTRICOS	97
5.5.1 – INTRODUÇÃO.....	97
5.5.2 – VARIÁVEIS DE ENTRADA – DIMENSÕES DE ANÁLISE.....	98
5.5.2.1 – SISTEMAS DE TARIFAÇÃO.....	98
5.5.2.2 – INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS	105
5.5.2.3 – TECNOLOGIAS	109
5.5.2.4 – INFRAESTRUTURA & PADRONIZAÇÃO	112
5.5.3 – REGRAS	116
5.5.4 – VARIÁVEIS DE SAÍDA – IMPACTOS NOS SISTEMAS DE ENERGIA	117
5.6 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	117
5.6.1 – INTRODUÇÃO.....	117
5.6.2 – VARIÁVEIS DE ENTRADA – DIMENSÕES DE ANÁLISE.....	118
5.6.2.1 – SISTEMAS DE TARIFAÇÃO.....	118
5.6.2.2 – TECNOLOGIAS	122
5.6.2.3 – INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS.....	124
5.6.3 – REGRAS	126
5.6.4 – VARIÁVEIS DE SAÍDA – IMPACTOS NOS SISTEMAS DE ENERGIA	127
CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE CASO.....	128
6.1 – INTRODUÇÃO.....	128
6.2 – RESPOSTA DA DEMANDA	131
6.2.1 – IMPACTO NA ENERGIA.....	132
6.2.2 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA.....	134
6.3 – PEQUENA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	138
6.3.1 – IMPACTO NA ENERGIA.....	139
6.3.2 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA.....	143
6.4 – VEÍCULOS ELÉTRICOS	145

6.4.1 – IMPACTO NA ENERGIA.....	146
6.4.2 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA.....	150
6.5– EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	152
6.5.1 – IMPACTO NA ENERGIA.....	153
6.5.2 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA.....	155
6.6 – CENÁRIOS AVALIADOS.....	157
6.6.1 – CENÁRIOS EM AMBIENTES <i>FUZZY</i>	160
6.6.2 – CENÁRIO 1.....	161
6.6.3 – CENÁRIO 2.....	163
6.6.4 – CENÁRIO 3.....	166
6.6.5 – CENÁRIO 4.....	169
6.7 – IMPACTO NA EMISSÃO DE CO ₂ NOS CENÁRIOS DE GERAÇÃO DO LAMP-CLIMACAP.....	172
6.7.1 – EMISSÃO DE CO ₂ NO BRASIL E NO MUNDO.....	172
6.7.2 – CENÁRIOS DE GERAÇÃO A PARTIR DO LAMP-CLIMACAP.....	174
6.7.3 – IMPACTO DA <i>SMART GRID</i> NA EMISSÃO DE CO ₂ NOS CENÁRIOS DE GERAÇÃO DO LAMP-CLIMACAP.....	174
6.7.3.1– RESULTADOS ENCONTRADOS.....	177
6.7.3.1.1 – CENÁRIO 1.....	177
6.7.3.1.2 – CENÁRIO 2.....	179
6.7.1.3.3 – CENÁRIO 3.....	181
6.7.1.3.4 – CENÁRIO 4.....	182
CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	184
7.1 – CONCLUSÃO.....	184
7.2 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	186
CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS.....	187
ANEXO A - REGRAS <i>FUZZY</i>.....	198
A.1 - REGRAS – RESPOSTA DA DEMANDA.....	198
A.2 - REGRAS – PEQUENA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	199
A.3 - REGRAS – VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	200
A.4 - REGRAS – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	202
ANEXO B – TABELA DE ESTUDOS – RESPOSTA DA DEMANDA.....	203
B.1 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA.....	203
B.2 – IMPACTO EM ENERGIA.....	206

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão futura – <i>Smart Grid</i> (The Electric Power Research Institute, Inc., 2009).....	10
Figura 2 – Curva de oferta de energia – Costa Leste – EUA (Sousa, 2013).....	14
Figura 3 – Variabilidade diária de geração solar e eólica (Chang, 2010).....	25
Figura 4 – Efeito da eficiência energética – Califórnia (Faruqui, 2013).....	31
Figura 5 – Processo de previsão da demanda de eletricidade (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2011).	39
Figura 6 – Representação gráfica da função de pertinência.	47
Figura 7 – Representação gráfica das funções de pertinência da variável tensão (Falcão, 2010).....	48
Figura 8 – Operação união em conjuntos <i>fuzzy</i> (Falcão, 2010).....	49
Figura 9 – Operação interseção em conjuntos <i>fuzzy</i> (Falcão, 2010).....	49
Figura 10 – Operação complemento em conjuntos <i>fuzzy</i> (Falcão, 2010).....	49
Figura 11 – Convexidade de conjuntos <i>fuzzy</i> (Falcão, 2010).....	51
Figura 12 – Sistema de Inferência <i>fuzzy</i>	53
Figura 13 – Funções de Pertinência.....	57
Figura 14 – Operação de fuzzyficação.....	57
Figura 15 – Etapa de Inferência.....	58
Figura 16 – Defuzzyficação.....	59
Figura 17 – Etapas do desenvolvimento da metodologia.....	62
Figura 18 – Funções de pertinência – Regulamentação – Resposta da Demanda.....	65
Figura 19 – Tarifa TOU (Faruqui & Sergici, 2009).....	70
Figura 20 – Tarifa CPP (Faruqui & Sergici, 2009).....	72
Figura 21 – Tarifa PTR (Faruqui & Sergici, 2009).....	73
Figura 22 – Tarifa RTP (Faruqui & Sergici, 2009).....	74
Figura 23 – Relação riscos e ganhos em tarifas dinâmicas (Faruqui & Palmer, 2011)..	74
Figura 24 – Funções de Pertinência – Sistemas de Tarifação.....	75
Figura 25 – Funções de Pertinência – Projetos-Piloto.....	77
Figura 26 – Funções de Pertinência – Regulamentação.....	79
Figura 27 – Redução da demanda máxima – Sistema de tarifação (Faruqui & Sergici, 2009).....	82
Figura 28 – Redução da demanda máxima - Sistema de tarifação e tecnologias facilitadoras (Faruqui & Sergici, 2009).....	82
Figura 29 – Funções de Pertinência – Tecnologias & Padronização.....	83
Figura 30 – Curvas de demanda residencial e geração solar (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2011).....	87
Figura 31 – Funções de Pertinência – Sistema de Tarifação.....	89
Figura 32 – Funções de Pertinência – Regulamentação & Incentivos.....	93
Figura 33 – Funções de Pertinência – Tecnologia & Armazenamento.....	96
Figura 34 – Medidor específico para veículos elétricos (Union of Concerned Scientists, 2012).....	100

Figura 35 – Elasticidade no carregamento de veículos elétricos (Faruqui, 2012).....	101
Figura 36 – Comportamento da demanda por carregador – Sem tarifação específica (Schey, et al., 2012)	102
Figura 37 – Comportamento da demanda por carregador – Com tarifação específica (Schey, et al., 2012)	103
Figura 38 – Modelagem <i>Fuzzy</i> – Variáveis de Entrada – Sistemas de Tarifação	104
Figura 39 – Alterações na cobrança do IPVA nos estados (Associação Brasileira de Veículos Elétricos - ABVE, 2014)	107
Figura 40 – Funções de Pertinência – Incentivos Governamentais.....	109
Figura 41 – Relação entre modelos ofertados e vendas de veículos elétricos (Clean Energy Ministerial, 2013).....	111
Figura 42 – Função de Pertinência – Tecnologia	112
Figura 43 – Pontos de recarga em países (Clean Energy Ministerial, 2013)	115
Figura 44 – Função de Pertinência – Infraestrutura e Padronização	116
Figura 45 – Comportamento básico da IBR (EPIC Energy Blog, 2013)	120
Figura 46 – Função de Pertinência – Sistema de Tarifação	121
Figura 47 – IHD típico para uso em <i>smart grid</i>	123
Figura 48 – Função de Pertinência – Tecnologia	124
Figura 49 – Função de Pertinência – Incentivos Governamentais	126
Figura 50 – Funções de Pertinência – Variáveis de saída	130
Figura 51 – Dimensões dos impactos por faixas de valores.....	133
Figura 52 – Variáveis de saída – Impacto em energia.....	134
Figura 53 – Curvas de níveis - Energia	134
Figura 54 – Comportamento das tarifas dinâmicas (Faruqui & Sergici, 2009).....	135
Figura 55 – Dimensões dos impactos por faixas de valores.....	137
Figura 56 – Variáveis de saída – Impacto em demanda máxima	138
Figura 57 – Curvas de níveis – Demanda máxima.....	138
Figura 58 – Potência instalada fotovoltaica acumulada. Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014).....	140
Figura 59 – Variáveis de saída – Impacto em energia.....	142
Figura 60 – Curvas de níveis – Energia.....	143
Figura 61 – Variáveis de saída – Impacto em demanda máxima	145
Figura 62 – Curvas de níveis – Demanda máxima.....	145
Figura 63 – Variáveis de saída – Impacto em energia.....	149
Figura 64 – Curvas de níveis – Energia.....	150
Figura 65 – Variáveis de saída – Impacto em demanda máxima	152
Figura 66 – Curvas de níveis – Demanda máxima.....	152
Figura 67 – Variáveis de saída – Impacto em energia.....	155
Figura 68 – Curvas de níveis – Energia.....	155
Figura 69 – Variáveis de saída – Impacto em demanda máxima	156
Figura 70 – Curvas de níveis – Demanda máxima.....	157
Figura 71 – Comparação Cenário 1 e Cenário de Referência – Energia.....	163
Figura 72 – Comparação Cenário 1 e Cenário de Referência – Demanda máxima	163
Figura 73 – Comparação Cenário 2 e Cenário de Referência – Energia.....	166

Figura 74 – Comparação Cenário 2 e Cenário de Referência – Demanda máxima.....	166
Figura 75 – Comparação Cenário 3 e Cenário de Referência – Energia.....	168
Figura 76 – Comparação Cenário 3 e Cenário de Referência – Demanda máxima.....	169
Figura 77 – Comparação Cenário 4 e Cenário de Referência – Energia.....	171
Figura 78 – Comparação Cenário 4 e Cenário de Referência – Demanda máxima.....	172
Figura 79 – Diminuição na energia – 2050 – Cenário 1.....	178
Figura 80 – Diminuição na emissão de CO ₂ – 2050 – Cenário 1.....	179
Figura 81 – Diminuição na energia – 2050 – Cenário 2.....	180
Figura 82 – Diminuição na emissão de CO ₂ – 2050 – Cenário 2.....	180
Figura 83 – Diminuição na energia – 2050 – Cenário 3.....	181
Figura 84 – Diminuição na emissão de CO ₂ – 2050 – Cenário 3.....	182
Figura 85 – Diminuição na energia – 2050 – Cenário 4.....	183
Figura 86 – Diminuição na emissão de CO ₂ – 2050 – Cenário 4.....	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vendas de veículos elétricos – Brasil (Anfavea, 2015).....	28
Tabela 2 – Tabela-verdade de proposições lógicas	52
Tabela 3 – Características dos Pontos de Recarga (Castro & Ferreira, 2010).....	113
Tabela 4 – Métricas – Impactos em energia – Resposta da demanda	132
Tabela 5 – Métricas – Impactos em demanda máxima – Resposta da demanda.....	136
Tabela 6 – Impactos máximos em energia – Pequena Geração Distribuída	141
Tabela 7 – Pesos e Valor Final	142
Tabela 8 – Impactos máximos em demanda máxima – Pequena Geração Distribuída	144
Tabela 9 – Pesos e Valor Final	144
Tabela 10 – Consumo Anual – Veículo Elétrico	147
Tabela 11 – Veículos Elétricos – Energia solicitada	149
Tabela 12 – Dimensões de análise no ambiente <i>fuzzy</i>	160
Tabela 13 – Avaliações – Cenário 1	161
Tabela 14 – Resultado por Tecnologia – Cenário 1	162
Tabela 15 – Resultado Final – Cenário 1	162
Tabela 16 – Avaliações – Cenário 2.....	164
Tabela 17 – Resultado por Tecnologia – Cenário 2	164
Tabela 18 – Resultado Final – Cenário 2	165
Tabela 19 – Avaliações – Cenário 3.....	167
Tabela 20 – Resultado por Tecnologia – Cenário 3	167
Tabela 21 – Resultado Final – Cenário 3	168
Tabela 22 – Avaliações – Cenário 4.....	169
Tabela 23 – Resultado por Tecnologia – Cenário 4	170
Tabela 24 – Resultado Final – Cenário 4	170
Tabela 25 – Fatores de emissão de carbono	176
Tabela 26 – Fatores de eficiência energética.....	176
Tabela 27 – Emissões de CO ₂ em geração de energia.....	177

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – MOTIVAÇÃO

Os sistemas de energia elétrica, durante várias décadas, ficaram estagnados tecnologicamente em relação a outros sistemas que fazem parte do dia a dia da população, como por exemplo, de telecomunicações. Mas grandes transformações estão ocorrendo nos diversos segmentos deste sistema nas áreas de geração, transmissão e distribuição, proporcionando um ganho de desempenho primoroso para os consumidores de energia elétrica.

Estas transformações vão desde a utilização de novas fontes geradoras por parte de consumidores, com maior uso da geração distribuída em pequena escala, maior controle dos consumidores sobre o seu consumo, tornando-se um membro proativo do sistema, e maior preocupação com as mudanças climáticas, fazendo assim um maior balanceamento entre energia limpa e um seguro e confiável suprimento de energia. Esta nova concepção em energia elétrica está englobada na denominação geral *smart grid*, a qual tem sido traduzida para o português como Redes Elétricas Inteligentes - REI.

Como dito em Falcão (2011), *smart grid* deve ser entendida mais como um conceito do que tecnologia ou equipamento específico. Em termos gerais, *smart grid* é um sistema elétrico automatizado que irá permitir uma vasta penetração de novas tecnologias que as redes elétricas atuais não podem suportar. Estas novas tecnologias incluem desenvolvimentos em medição, monitoramento, transmissão, geração, distribuição e armazenamento de energia, bem como proporcionando flexibilidade para consumidores e produtores de eletricidade (Hledik, 2009).

1.2 – OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é mensurar os impactos da *smart grid* na demanda, em termos de energia consumida e demanda máxima, e também avaliar a contribuição da *smart grid* na diminuição da emissão de CO₂ no sistema elétrico brasileiro. A *smart grid* envolve diferentes tecnologias, desde o controle da demanda a utilização intensiva de telecomunicações no ambiente elétrico. Na literatura

especializada, em artigos lançados no Brasil e no exterior, quatro áreas se mostram as mais fortes para se desenvolverem no futuro a partir da *smart grid*: Resposta da Demanda, Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética. Para estas tecnologias e conceitos serão calculados os impactos na energia elétrica e demanda máxima.

Ou seja, na presente tese será apresentado o resultado global da introdução destas tecnologias em *smart grid* no horizonte de longo prazo, podendo ser avaliado conjuntamente todas as causalidades envolvidas no desenvolvimento das principais tecnologias em *smart grid* a partir do sistema *fuzzy* modelado, mostrando o desenvolvimento das tecnologias ao longo dos anos em quatro cenários construídos. Deste modo, não será dado um foco em apenas uma tecnologia ou área em *smart grid*, mas realizado um estudo em profundidade nas quatro principais áreas que terão grande impacto na demanda de energia no Brasil no longo prazo.

Para se chegar a este objetivo será utilizada a lógica *fuzzy* para mensurar o impacto da *smart grid* na energia elétrica e demanda máxima, técnica que se mostra muito eficaz para tratar informações de caráter impreciso, vago e de difícil mensuração, que é o caso do futuro desenvolvimento da *smart grid* no Brasil.

Para a previsão das emissões de CO₂ evitadas pela inserção de tecnologias *smart grid* foi realizado um ensaio a partir dos cenários apresentados pela Latin American Modeling Project And Integrated Climate Modelling And Capacity Building In Latin America – LAMP–CLIMACAP até 2050. Neste projeto, seis modelos geraram perfis de geração do sistema energético brasileiro até 2050 sob diferentes taxas de carbono e redução de emissões CO₂ advindas de combustíveis fósseis e processos industriais.

1.3 – ESTRUTURA DA TESE

No capítulo 2 será apresentada a conceituação teórica da *smart grid*, tendo como ponto focal as tecnologias que serão analisadas no trabalho.

No capítulo 3 será descrito o objetivo da previsão da demanda, descrevendo os principais modelos, e do planejamento energético integrado, possuindo como principal foco o Plano Nacional de Energia – PNE. Neste capítulo também será apresentado como

que algumas tecnologias aqui estudadas já são consideradas no planejamento energético de longo prazo.

No capítulo 4 é apresentada a lógica *fuzzy*, com sua teoria inicial, conceitos, utilização e a importância da técnica na tese.

No capítulo 5 será detalhada a metodologia utilizada no presente trabalho, com ênfase na lógica *fuzzy* e sua interação com as variáveis que compõem a *smart grid*. Neste capítulo é realizada uma imersão em cada tecnologia, com forte embasamento na literatura nacional e internacional que permite que a metodologia seja robusta o suficiente para obter resultados satisfatórios.

No capítulo 6 será apresentado o estudo de caso, que apresenta os resultados para o Brasil, para os anos de 2030, 2040 e 2050, em quatro cenários de inserção de tecnologias no âmbito da *smart grid*, tendo como base principal os dados informados nas notas técnicas emitidas para o PNE 2050. Neste capítulo também serão apresentados os resultados do estudo de emissão de CO₂ a partir dos dados do LAMP-CLIMACAP.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões da tese e sugestões para trabalhos futuros.

1.4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O tema “*smart grid*” apenas recentemente tomou maior importância no meio acadêmico. No início da pesquisa do presente trabalho, havia poucas referências sobre o tema na literatura especializada. Porém nos últimos cinco anos, um grande número de trabalhos acadêmicos foi elaborado, em várias áreas do conhecimento que envolve a *smart grid*.

Grande parte dos trabalhos publicados envolvem os impactos e mudanças na área elétrica da *smart grid*, porém há poucos trabalhos que realizam a análise aprofundada do tema na área energética. Boa parte dos trabalhos divulgados na área energética foi elaborada por órgãos governamentais, majoritariamente nos EUA. No Brasil não há trabalhos realizados que abranjam o tema *smart grid* na área energética, sendo o mais próximo disso o livro “Redes Elétricas Inteligentes no Brasil - Análise de

Custos e Benefícios de um Plano Nacional de Implantação”(Kagan, et al., 2013), lançado pela ANEEL.

De toda forma, nenhum trabalho envolve os impactos aqui analisados, englobando várias tecnologias que farão parte do futuro do sistema energético nacional. Portanto, na revisão bibliográfica a seguir serão apresentados trabalhos que serviram como embasamento teórico para o desenvolvimento do presente trabalho. Logo, nenhum deles será utilizado para comparação com resultados aqui encontrados.

O projeto Igrid, desenvolvido pela consultoria The Brattle Group (Faruqui, 2009) quantifica os benefícios que podem ser trazidos pela *smart grid*, nos EUA, em 2050. Neste trabalho a *smart grid* é dividida em cinco grupos: medição automatizada, resposta da demanda, eficiência energética, geração distribuída e veículos elétricos, com os benefícios sendo medidos em um total de sete métricas. Em cada um dos grupos são determinados os impactos e custos futuros na energia, demanda máxima e emissão de CO₂. O projeto destaca a importância da correta quantificação dos veículos elétricos, pois deverá ser um item crítico no sistema elétrico americano. Neste trabalho não é apresentado o desenvolvimento da *smart grid* até 2050 e nem são apresentados cenários de introdução de tecnologias em *smart grid*.

O livro “Redes Elétricas Inteligentes no Brasil - Análise de Custos e Benefícios de um Plano Nacional de Implantação” (Kagan, et al., 2013) é resultado do projeto de P&D capitaneado pela ABRADDEE. Pioneiro no Brasil, ele quantifica os impactos decorrentes da adoção da *smart grid* no Brasil até 2030 para algumas tecnologias, como veículos elétricos e geração distribuída. Além disso, há outras informações importantes sobre a *smart grid*, como medição, automação e telecomunicações, em que é avaliada a implementação no Brasil. Apesar de ser um trabalho abrangente, não é claro qual técnica é utilizada na quantificação dos impactos apresentados, nem é realizada a construção clara dos cenários apresentados.

O artigo “Arcturus: International Evidence on Dynamic Pricing” (Faruqui & Sergici, 2009) apresenta os resultados de 34 projetos-piloto em *smart grid* nos EUA. Apresenta vários pontos importantes, como a influência da utilização de tecnologia em resposta da demanda e como os consumidores reagem a preços em vários tipos de tarifação. O enfoque principal do artigo é no impacto da demanda máxima do sistema, não sendo mensurados outros impactos no sistema energético.

O artigo “Demand-Side Behavior in the Smart Grid Environment” (Moshari, et al., 2010) descreve o comportamento da resposta da demanda em algumas questões do mercado de eletricidade, como carga de curto prazo e previsão de preços, expansão da geração e concorrência imperfeita. Apresenta boa teoria do comportamento da demanda nos preços e as diferenças básicas entre a atual rede e a *smart grid*.

O artigo “Dynamic Pricing and Its Discontents” (Faruqui & Palmer, 2011) trata de forma bem didática o comportamento da resposta da demanda de acordo com o resultado de 109 formas de tarifação advindas de projetos-piloto. De leitura obrigatória para o entendimento do comportamento dos consumidores de baixa tensão, explica vários “mitos” que existem neste tema.

O livro “Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil” (Velloso, 2010) é um importante apanhado de opiniões e análises sobre o desenvolvimento de veículos elétricos no Brasil. Relata vários impactos que podem ocorrer no sistema elétrico brasileiro ao longo dos anos na visão de vários agentes da sociedade, bem como o provável desenvolvimento que as tecnologias encontradas no veículo elétrico podem ter no futuro.

Na dissertação “Tomada de Decisão *Fuzzy* e Busca Tabu Aplicadas ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão” (Sousa, 2009) é proposta uma técnica de solução para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão através de decisão *fuzzy*. Neste trabalho a lógica *fuzzy* é usada para o desenvolvimento de algoritmo heurístico construtivo para inserção de novas linhas. Possui boa modelagem, e é um ótimo exemplo da utilização da lógica *fuzzy* em um problema de alta complexidade e com múltiplas soluções.

O artigo “How Green is the Smart Grid?” (Hledik, 2009) mostra os avanços que a rede elétrica dos EUA pode obter com a adoção de fontes renováveis e *smart grid*. Apresenta uma série de impactos no setor de energia e cenários para 2030, com grande ênfase na emissão de CO₂. É uma fonte de entendimento simples e de suma importância para o entendimento da interseção entre fontes renováveis e *smart grid*.

O relatório “Boosting energy efficiency through Smart Grids” (Davoli, et al., 2012) apresenta importantes considerações sobre a importância do desenvolvimento da

smart grid na mitigação de mudanças climáticas, além de trazer diferentes enfoques sobre a interligação de emissão de CO₂ e *smart grid*.

O artigo “Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy” (Lucena, et al., 2015) apresenta a análise realizada por seis institutos de pesquisa por meio do Latin American Modeling Project And Integrated Climate Modelling And Capacity Building In Latin America – LAMP–CLIMACAP, onde são traçados cenários de perfis de geração para o Brasil até 2050. A partir dos resultados apresentados pelos quatro principais cenários construídos pelo LAMP–CLIMACAP (baixo preço de CO₂, alto preço de CO₂, 20% de abatimento de emissões de combustíveis fósseis e indústria e 50% de abatimento de emissões de combustíveis fósseis e indústria), foi realizado um estudo mensurando o impacto da *smart grid* na emissão de CO₂, utilizando os resultados da metodologia apresentada nesta tese.

O artigo “Methodology for the calculation of the factor of priority for smart grid implantation using fuzzy logic” propõe uma metodologia que indica uma ordem de prioridade de entrada da *smart grid* baseada na característica do sistema elétrico utilizando lógica *fuzzy*. Apesar de não ter uma relação direta com a tese, é um importante artigo que liga a *smart grid* e a utilização de sistema *fuzzy*.

No Capítulo 3, a revisão bibliográfica será complementada com referências aos trabalhos dos quais foram extraídas as informações relevantes para o estudo de caso desenvolvido baseado na metodologia proposta nesta tese.

CAPÍTULO 2 - *SMART GRID*

A *smart grid* irá revolucionar o ambiente elétrico nas próximas décadas, fazendo com que os sistemas de energia passem por uma transformação nunca antes vista, mudando conceitos, formas de agir, planejar e, principalmente, a relação com o consumidor de energia.

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, a *smart grid* não é considerada uma tecnologia ou dispositivo, mas é apresentada como um conceito para um sistema distribuído, baseado em ambiente de internet. Assim, a nova rede seria uma rede mais confiável, segura, econômica e eficiente para o consumidor. A *smart grid* pode ser caracterizada como um agente “transacional” que permitirá uma participação mais ativa dos consumidores, possibilitando assim acomodar novas opções de geração e armazenamento; habilitar novos produtos e serviços na rede de energia; antecipar e responder a perturbações do sistema, se autorecuperando e operando de forma mais resiliente contra desastres naturais (Pratt, et al., 2010).

O National Renewable Energy Laboratory – NREL, um dos mais importantes centros de pesquisa e desenvolvimento de energias renováveis e eficiência energética dos Estados Unidos, relata que embora a atual rede elétrica seja considerada um dos grandes avanços da engenharia, é necessário evoluir para um novo tipo de rede elétrica, aquela que é construída de baixo para cima para lidar com uma nova onda de equipamentos e tecnologia digital e que pode gerenciar e automatizar a crescente complexidade de energia elétrica para o século 21.

Assim, para este instituto, o que fará a rede “inteligente” é a tecnologia digital que permitirá a comunicação em duas vias entre a concessionária e o consumidor. Utilizando a internet, a *smart grid* será composta de sensores, computadores e automação para responder digitalmente à evolução da demanda de energia elétrica (National Renewable Energy Laboratory - NREL, 2014).

Já para a International Energy Agency – IEA, a *smart grid* é uma rede de energia elétrica que utiliza tecnologias digitais para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade de todas as fontes de geração, atendendo diferentes demandas de eletricidade dos consumidores finais. As redes inteligentes irão coordenar as necessidades e capacidades de todos geradores, operadores de rede, usuários finais e

partes interessadas do mercado de energia elétrica para operar todas as partes do sistema de forma tão eficiente quanto possível, minimizando custos e impactos ambientais, maximizando a confiabilidade e estabilidade do sistema (International Energy Agency - IEA, 2011).

De acordo com o relatório “Boosting energy efficiency through Smart Grids” (Davoli, et al., 2012), documento publicado por um conjunto de pesquisadores da Itália – um dos países mais avançados nessa área – dá uma definição mais “verde” para a *smart grid*. Lá ela é definida como uma rede elétrica que permite a integração maciça de recursos renováveis intermitentes e distribuição de energia de forma muito eficiente. A *smart grid* é uma rede de eletricidade que usa fontes de energia de forma distribuída, com avançadas tecnologias de comunicação e controle para entregar energia aos consumidores de forma eficiente, com baixa intensidade de gases de efeito estufa.

Os principais impactos da *smart grid* na atual rede elétrica são listados abaixo (Hledik, 2009), (Falcão, 2011), (Jarventausta, et al., 2010) e (Moshari, et al., 2010):

- Mudanças na geração de eletricidade, especialmente atribuídas à geração distribuída, que poderá produzir fluxo de potência bidirecional;
- Facilidades de comunicação integrada, que não era possível anteriormente;
- Eficiência operacional das companhias de geração/distribuição, devido à disponibilidade de medição remota e capacidade de autorecuperação da rede elétrica;
- Minimização das perdas técnicas e não técnicas com a instalação de novas tecnologias, com a detecção de furtos e fraudes na rede;
- Gerenciamento da demanda e outros mecanismos de resposta da demanda;
- Introdução em larga escala de veículos elétricos;
- Acesso à geração distribuída localizada perto da carga, resultando em linhas de transmissão de menor porte e menores perdas nas mesmas;

- Conscientização dos consumidores a partir da informação em tempo real de preços de energia;
- Tornar os clientes das concessionárias de energia em “prosumidores”, com uma maior participação no mercado de energia;
- Maior proteção a ataques externos, com capacidade de mitigar e resistir a ataques físicos e hackers;
- Viabilizar e beneficiar-se de mercados competitivos de energia, favorecendo o mercado varejista e microgeração.

A proporção que a *smart grid* pode alcançar irá requerer mudanças no comportamento dos consumidores, processos, tecnologias, políticas e economia, resultando também em oportunidades para a redução de emissões de gases de efeito estufa advindos da geração de energia. De acordo com International Energy Agency – IEA, a *smart grid* será responsável por ajudar a reduzir as emissões em até 2,1 milhões de toneladas de CO₂ no mundo até 2050 (Campos, 2014). Seguindo na mesma linha, o Departamento de Energia dos Estados Unidos estima que a *smart grid* contribuirá mais com a diminuição das emissões de CO₂ que o potencial de sequestro do carbono emitido por fontes de energia baseadas no carvão (Campos, 2014).

Um exemplo da transformação que a *smart grid* irá proporcionar é mostrada na Figura 1, feita pela Electric Power Research Institute – EPRI (The Electric Power Research Institute, Inc., 2009) em que é apresentada a evolução das redes elétricas, chegando-se a um alto grau de complexidade no futuro próximo, com a inserção de veículos elétricos, gerenciamento de demanda, armazenamento de energia, novas fontes de geração, entre outros itens.

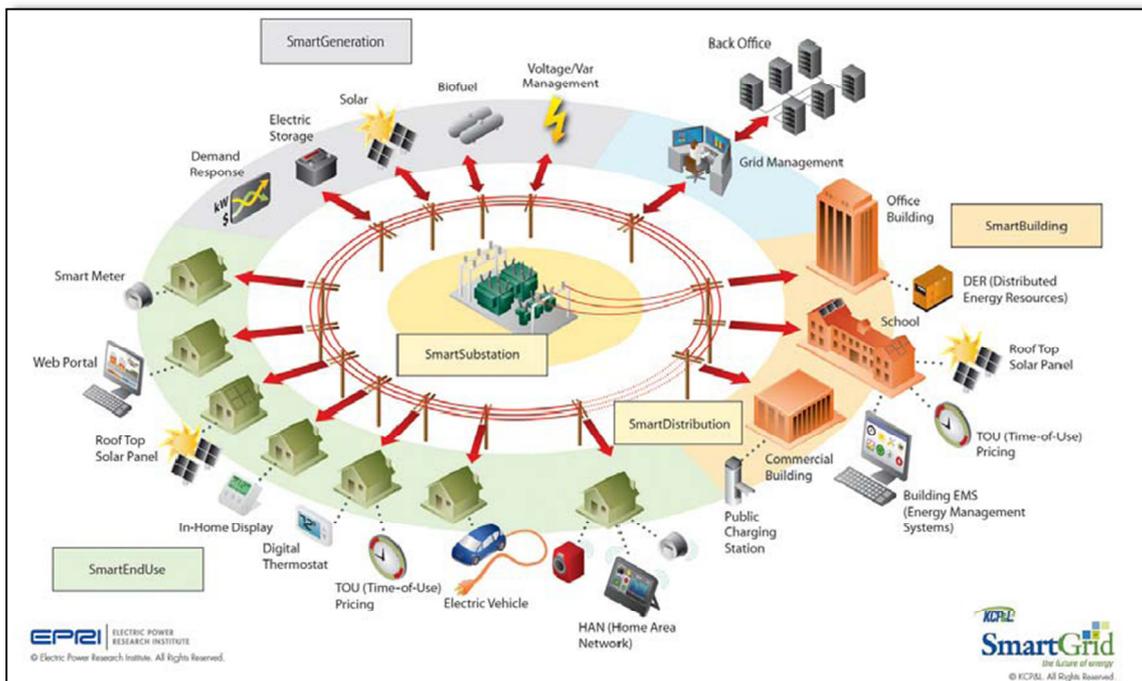


Figura 1 – Visão futura – *Smart Grid* (The Electric Power Research Institute, Inc., 2009)

No Brasil a *smart grid* ainda está em fase inicial de implantação, com poucos projetos-piloto em execução, sendo desenvolvidas tímidas ações por parte das concessionárias de distribuição de energia e do Governo Federal. De acordo com o site www.redesinteligentesbrasil.org.br, criado a partir do programa de Pesquisa & Desenvolvimento realizado pela Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – ABRADDEE há atualmente nove projetos-piloto sendo desenvolvidos no Brasil. São eles:

- Cidades do Futuro – Minas Gerais - CEMIG;
- Cidade Inteligente Búzios – Rio de Janeiro – Ampla/Endesa;
- Smart Grid Light – Rio de Janeiro – Light;
- Parintins – Amazônia – Amazonas Energia;
- Smart Grid – São Paulo – AES Eletropaulo;
- InovCity – São Paulo – EDP Bandeirantes;
- Cidade Inteligente Aquiraz – Ceará – Coelce/Endesa;
- Paraná Smart Grid – Paraná – Copel;
- Piratininga Smart Grid – São Paulo – CPFL Piratininga
- Arquipélago de Fernando de Noronha – Pernambuco – CELPE.

Do ponto de vista legal, já existem projetos de lei relacionados ao tema que estão no Congresso Nacional: Projeto de Lei nº 3.337/2012, que determina a substituição integral de medidores de energia elétrica eletromecânicos por medidores eletrônicos; e Projeto de Lei do Senado nº 84/2012, que estabelece diretrizes para a implantação de Redes Elétricas Inteligentes nos sistemas de distribuição de energia elétrica geridos por concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica. A legislação brasileira que versa sobre incentivos a microgeração distribuída e gerenciamento de demanda ainda está dando os primeiros passos. A Resolução Normativa nº 481, de 17 de Abril de 2012, informa desconto para o TUST e TUSD para o uso de geração solar nos primeiros anos de operação da usina (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2012). Esta norma pode ser importantíssima para viabilizar maiores usos da fonte solar, independentemente do tamanho da geração.

Já para o gerenciamento de demanda e *net metering*, a Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012 é um grande avanço. Ela estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica no sistema de compensação de energia elétrica, nome dado para o *net metering* na Norma (Agência Nacional de Energia Elétrica — ANEEL, 2012), que passou a vigorar em dezembro de 2012. Em novembro de 2015 esta resolução foi alterada pela Resolução Normativa nº 687, com melhorias que podem propiciar maior disseminação da geração distribuída.

A ANEEL aprovou no dia 22/11/2011, durante reunião pública da diretoria, a alteração da estrutura tarifária aplicada ao setor de distribuição de energia, com a criação da tarifa branca. O novo regulamento prevê a aplicação de tarifas diferenciadas por horário de consumo, oferecendo tarifas mais baratas nos períodos fora de ponta para consumidores de baixa tensão, sendo assim um primeiro passo para fortalecer o gerenciamento da demanda para essa classe de consumo.

Na literatura especializada, quatro áreas são relacionadas como as mais impactadas com o desenvolvimento da *smart grid*: resposta da demanda, geração distribuída, veículos elétricos e eficiência energética. Estas serão as áreas analisadas profundamente nesta tese, e nos próximos tópicos os conceitos destas tecnologias serão apresentados.

2.1 - RESPOSTA DA DEMANDA

A Federal Energy Regulatory Commission - FERC define a resposta da demanda como a mudança na utilização da eletricidade pelos consumidores do seu padrão normal de consumo em resposta às mudanças no preço da energia durante o dia ou incentivar pagamentos destinados a induzir a um menor uso da energia em momentos de preços mais altos ou quando a confiabilidade do sistema é prejudicada (National Energy Technology Laboratory, 2011).

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos, a resposta da demanda oferece uma oportunidade para que os consumidores desempenhem um papel significativo na operação do sistema elétrico, reduzindo ou mudando o uso de eletricidade nos períodos de demanda máxima, em resposta às tarifas baseadas no tempo ou outras formas de incentivos financeiros (Faruqi & Palmer, 2011).

Já para Gellings (2009), resposta da demanda refere-se aos mecanismos para gerenciar a demanda dos clientes em resposta às condições de oferta, como por exemplo, ter consumidores reduzindo seu consumo em momentos críticos ou em resposta a preços de mercado. O autor também relata que nos Estados Unidos houve um recente surto de interesse e atividade em relação a este tema, principalmente devido às condições de oferta limitada em certas regiões do país.

Como visto, a resposta da demanda trará aos consumidores de energia elétrica maior poder e conhecimento sobre o seu consumo de energia, deixando de ser um coadjuvante no mercado de energia elétrica e passando a possuir participação ativa no futuro do sistema energético. Por outro lado, permitirá às concessionárias de energia elétrica aperfeiçoar a expansão do sistema e operar o mesmo de forma mais eficiente e confiável.

Um ponto relevante para a execução da gestão da demanda é a introdução maciça dos *smart meters*, os medidores inteligentes. Medidor inteligente é um medidor elétrico que registra o consumo de energia elétrica em intervalos de uma hora ou menos e comunica a informação diária, ou até horária, de volta para a concessionária para efeitos de controle e faturação. Os medidores inteligentes permitem a comunicação bidirecional entre os medidores e o sistema central. Assim, ao contrário dos medidores

de energia residenciais atuais, os medidores inteligentes podem coletar dados para a comunicação remota. Além da medição de energia, os medidores inteligentes podem coletar uma série de outras informações relativas à qualidade da energia, assim como exibir informações enviadas pelas concessionárias, tais como o custo variável da energia.

A resposta da demanda está inclusa dentro do *portfolio* de programas de gerenciamento pelo lado da demanda (Demand-Side Management - DSM), sendo a mais notável mudança ocorrida nos últimos anos, pois anteriormente o gerenciamento era focado exclusivamente em programas voltados à eficiência energética e conservação de energia. Logo, há a clara diferença entre os dois conceitos: resposta da demanda é um termo usado para programas concebidos para induzir os consumidores a diminuir o consumo de energia elétrica por um curto período de tempo através de uma sinalização tarifária, majoritariamente em horário de demanda de ponta. Já o gerenciamento pelo lado da demanda engloba programas que encorajam os consumidores a serem mais eficientes ao longo do dia, como mudanças na iluminação, construções prediais, mudanças no sistema de refrigeração/calefação, entre outras ações (Energy Advantage, 2014). Um bom histórico do conceito de gerenciamento pelo lado da demanda pode ser encontrado na referência “Primer on Demand-Side Management” (Charles River Associates, 2005).

Os primeiros estudos de tarifação dinâmica começaram ainda na década de 70, com William Vickey, que introduziu o termo Real Time Pricing – RTP no seu artigo “Responsive Pricing of Public Utility Services”. No final da década de 70 e início da década de 80, uma série de estudos demonstrou que a utilização de tarifas dinâmicas baseadas no tempo para consumidores residenciais aplanaria a curva de demanda diária, com a diminuição da demanda em períodos de tarifa mais alta e o crescimento da demanda nos outros períodos (Electric Power Research Institute - EPRI, 2008).

Em 1981, Fred Scheweppe descreve a tecnologia que permitiria a introdução do Real Time Pricing em seu artigo “Homeostatic Control: The Utility Customer Marketplace for Electric Power”. E finalmente em 1996 a primeira concessionária do mundo inicializa um sistema de tarifação dinâmica: a Eletricité de France implantou o programa *Tempo* com os 365 dias do ano divididos em três grupos (Azul, Branco e Vermelho), sendo o grupo Azul com preços mais baixos e o grupo Vermelho com

preços mais restritivos. Já o grupo Branco representa tarifas em preços normais (Faruqui & Davis, 2013).

No atendimento da demanda, considerando-se que as usinas que compõem o sistema elétrico são despachadas em ordem crescente do seu custo marginal da operação, reduzir o consumo por meio de programas de resposta da demanda corresponde a gerar energia por um custo médio inferior (Faruqui & Sergici, 2010). Esta diminuição pode ser mais evidente quando o custo da operação é alto (normalmente em horários de demanda máxima), onde pequenas reduções na demanda acarretam em fortes reduções no custo de geração, como pode ser visto na Figura 2, que apresenta os custos de operação de diversas fontes de energia para uma operadora da costa leste dos EUA. Nota-se que um pequeno acréscimo de geração após 140 GW, faz com que o preço desta geração cresça em grande escala com a entrada de usinas a óleo.

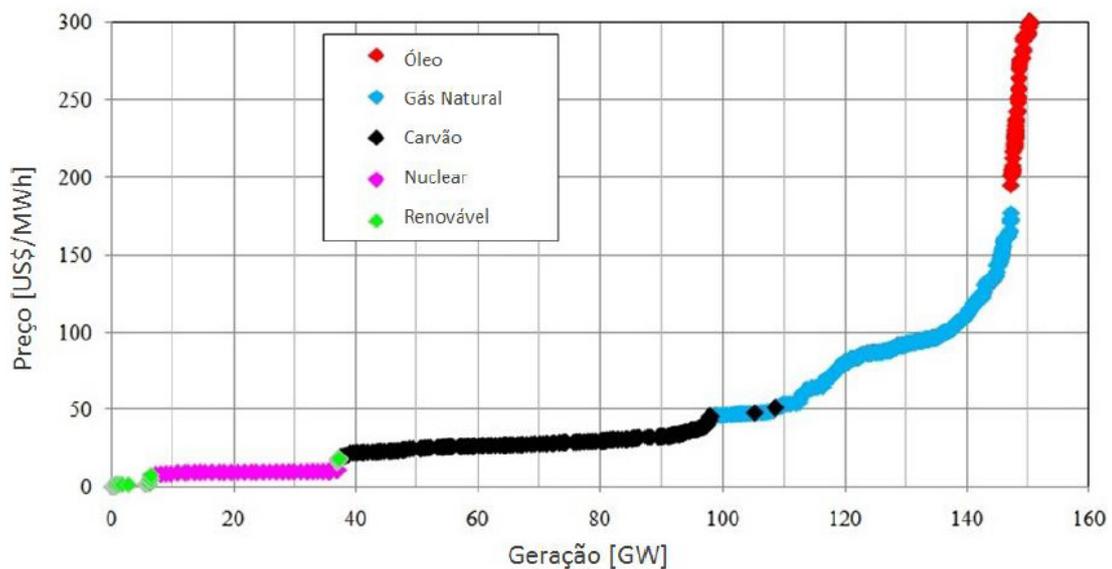


Figura 2 – Curva de oferta de energia – Costa Leste – EUA (Sousa, 2013)

Há dois tipos de programas de resposta da demanda que podem ser implementados (Siebert, 2014):

- **Resposta à Demanda com Base em Incentivos:** Arranjos contratuais desenvolvidos por concessionárias de energia elétrica e/ou operador da rede para que clientes contribuam com reduções necessárias em momentos críticos. Este programa é dividido em dois subtipos:

- **Clássico** - Clientes participantes recebem incentivos financeiros, usualmente na forma de créditos de energia ou descontos na fatura por sua participação nos programas. Exemplos: Controle direto de carga e programas de corte/redução da carga;
 - **Relacionado ao Mercado** - Participantes são geralmente compensados diretamente com dinheiro por sua performance, dependendo da quantidade e do momento da redução, como por exemplo, leilões de demanda realizados pela concessionária *PG&E* dos EUA (Sousa, 2013).
- **Resposta à Demanda com Base em Tarifas:** Possibilidade de clientes que utilizam tarifas com postos tarifários reduzirem seus gastos com energia elétrica caso ajustem o momento e montante do consumo da energia para obter vantagem em períodos com preço reduzido e evitar períodos onde os preços são mais altos. Como exemplo temos as tarifas do tipo Time of Use – TOU e Real Time Pricing - RTP.

A utilização de precificação dinâmica em serviços e produtos está presente no dia a dia e não causará estranhamento na população. Exemplos clássicos estão no preço de tarifas de passagens aéreas (mais caras em horários de grande demanda), hotéis (hospedagens reajustadas em eventos especiais) e aluguel de carros (com alto custo em momentos de maior demanda). A precificação dinâmica está sendo introduzida mesmo em eventos esportivos, mais notadamente no futebol, onde os clubes colocam preços mais baratos ou caros dependendo do adversário e da importância do jogo. Para confirmar a boa adaptação de consumidores à precificação dinâmica, de acordo com (Faruqi, 2014), 60% dos projetos-piloto avaliados tiveram redução de 10% ou mais na demanda máxima. Em uma pesquisa feita pelo projeto-piloto da Connecticut Light and Power's, 92% dos consumidores participariam novamente, com índice de satisfação de 5,1, no máximo de 6 (Faruqi, 2014).

Exemplificando a boa aceitação e facilidade de introdução da precificação dinâmica da energia, atualmente 20% dos clientes da Oklahoma Gas and Electric Company, nos EUA, estão sob a Variable Peak Pricing - VPP, uma forma avançada de dar preços em momentos críticos de demanda (Chang, 2010).

2.1.1 - TARIFAÇÃO DINÂMICA NO MUNDO

Vários países já utilizam com sucesso mecanismos de resposta da demanda, alcançando resultados expressivos tanto na diminuição da demanda máxima quanto na diminuição na energia consumida ao longo do dia. A seguir são apresentados brevemente alguns programas já realizados no mundo (Kagan, et al., 2013) e (Faruqi, 2013):

- **Itália** – Possui o maior programa de *smart meters* no mundo, com quase toda a população possuindo o aparelho em suas residências. Após a aplicação de tarifas diferenciadas ao longo do dia, mais da metade dos consumidores mudou sua forma de utilização de energia. Há vários projetos-piloto sendo efetuados com veículos elétricos e sistemas de armazenamento;
- **EUA** – Vários estados americanos possuem seu próprio programa, desde a simples instalação de *smart meters* até a utilização de complexas tarifas de energia. O estado que mais se destaca é a Califórnia, com mais de 4 milhões de residências já utilizando tarifas dinâmicas;
- **Austrália** – Começou em 2010 um importante projeto chamado “*Smart Grid, Smart City*” para testar as diversas tecnologias de *smart grid*, com duração de 4 anos em um total de 30 mil residências. Outro projeto, no distrito de Victoria, está realizando importantes testes para estudar o comportamento de consumidores com veículos elétricos;
- **Canadá** – A província de Ontario está realizando um projeto de instalação de *smart meters* em 4,5 milhões de residências. Os primeiros resultados foram apresentados em 2013 e novos estudos serão realizados para analisar o comportamento dos consumidores ao longo dos anos;
- **Grã-Bretanha** – Possui um programa de instalação de *smart meters* em todas as residências até 2020, com um benefício final estimado em 6,7 bilhões de libras. Além disso, propõe que até este ano 100% da energia elétrica do país esteja descarbonizada, prevendo a instalação maciça de geração renovável;

- **França** – O decreto 2010-1022 prevê a instalação até 2014 de *smart meters* em pelo menos 50% dos clientes de baixa tensão, com este número crescendo até 95% em 2016 para as distribuidoras com mais de 100 mil clientes;
- **Brasil** – O país ainda inicia sua entrada no “mundo” *smart grid*. Atualmente existem apenas 9 projetos-piloto, implantados pelas distribuidoras de energia e em pequena escala, não possuindo qualquer apoio governamental que possibilite, no curto prazo, uma maior inserção de todas as novas tecnologias. Um alento é a Resolução Normativa 502, de 7 de Agosto de 2012, que regulamenta sistema de medição de energia de unidades consumidoras do grupo B e cria a tarifação branca.

2.1.2 - IMPACTOS E BENEFÍCIOS

A elaboração de mecanismos de resposta da demanda, principalmente com a implantação em larga escala da Infraestrutura de Medição Automatizada (da sigla em inglês Advanced Metering Infrastructure – AMI) por meio de *smart meters* trará as seguintes mudanças no sistema elétrico (Oklahoma Gas and Electric Company, 2013) e (Faruqi, 2009):

- **Comunicação em duas vias** – Com a instalação de *smart meters* será possível realizar o fluxo de dados em duas vias. Ou seja, nos dias atuais o fluxo de informação flui dos consumidores para as concessionárias e o fluxo de energia flui das concessionárias para os consumidores. Com a implantação desta tecnologia os tipos de fluxo (informação e energia) poderão fluir nos dois sentidos;
- **Diminuição dos custos de medição** – Com os sistemas automatizados, não será necessária uma equipe para a realização de medição em residências;
- **Tempo de conexão/reconexão** – A concessionária saberá em tempo real quais unidades consumidoras estão sofrendo problema, não necessitando que os usuários façam contato com a empresa para avisar a ocorrência de problemas, diminuindo assim o tempo de religamento da unidade;

- **Postergar/evitar construção de novas usinas** – Com a diminuição da demanda de ponta e energia por meio da resposta da demanda, a construção de usinas poderá ser postergada ou até mesmo evitada;
- **Diminuição dos custos de geração** – Seguindo o item anterior, com a diminuição da demanda de ponta o custo de geração neste horário ficará menor. Em horários de grande demanda são despachadas também as usinas com custo de geração mais alto, geralmente termelétricas, fazendo com que o custo de geração aumente. Diminuindo o consumo na ponta, menos termelétricas caras serão despachadas, fazendo com que o custo de geração do sistema caia;
- **Custo de transmissão e distribuição** – Em horários de grande demanda de energia, pode ocorrer saturação de linhas de transmissão de alta tensão devido à transferência de energia de um subsistema a outro para atender a demanda máxima. Com a implantação da resposta da demanda, a construção de novos troncos de transmissão pode ser postergada. A mesma análise ocorre nos sistemas de distribuição, onde transformadores ficam sobrecarregados em instantes de alta demanda;
- **Diminuição de emissão de CO₂** – Para atender a demanda do sistema são despachadas as usinas mais caras, que em sua maioria possuem uma maior relação CO₂/kWh. Com a diminuição da demanda no horário de ponta, a emissão global de CO₂ do sistema elétrico cairá.

2.2 – PEQUENA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Nos anos recentes, o aumento da preocupação com as mudanças climáticas e aquecimento global tem atraído o interesse da opinião pública em direção aos temas de proteção ao meio ambiente e a introdução de fontes mais limpas, como pode ser visto na reunião da Conferência de Paris, a COP-21. Atividades energeticamente intensivas, como a geração de energia elétrica, logo caíram sob a atenção das autoridades de regulação e as fontes renováveis ou "verdes" foram apontadas como alternativas para substituir o

uso de combustíveis fósseis. Entretanto, muitas das tecnologias vindas das fontes renováveis – como solar, eólica e biomassa – não são suficientemente maduras, possuem alto custo e um longo período de retorno de investimentos. Por esta razão, uma variedade de sistemas de incentivo tem sido proposta e estão em uso em diferentes países para promover a exploração de fontes de energia renováveis. Impostos e pagamentos de taxas de carbono são os caminhos para desencorajar o uso de fontes fósseis, forçando o uso de fontes mais limpas.

De acordo com a International Renewable Energy Agency – IRENA (International Renewable Energy Agency - IRENA, 2015), o desenvolvimento das fontes renováveis tem sido impressionante nos últimos anos. Dentre todas as fontes, a energia solar e eólica são aquelas com crescimento mais constante. Por exemplo, em 2000, em todo o mundo, a capacidade instalada dessas duas fontes de energia era de 18.558 MW, sendo a energia solar responsável por apenas 1.225 MW. Em 2014, 550.000 MW já tinham sido instalados em todo mundo de fontes solar e eólica, com um crescimento total de 2.900%.

Em relação às fontes renováveis, um dos países com maiores avanços tem sido a China. De 2000 a 2014 foram acrescentados 28.000 MW de potência no parque gerador chinês de fontes solares e 115.000 MW de eólicas. O crescimento de bioenergia também é constante nos últimos anos na China, com a instalação de 8.400 MW nos últimos 14 anos (International Renewable Energy Agency - IRENA, 2015).

Mesmo em países com menor extensão territorial, o desenvolvimento de fontes renováveis é abundante. Um exemplo é a Alemanha, o país com maior desenvolvimento de fontes renováveis no mundo. Nesse país, há 97.413 MW de fontes renováveis, sendo 40% de fontes eólicas e 39% de solar. A energia solar bate seguidamente recordes de geração. Por exemplo, em 9 de junho de 2014, 50,6% da demanda de energia do país foi atendida por essa fonte (Hypescience, 2015), com 90% dos painéis solares em telhados. O crescimento é bem expressivo nos últimos anos na Alemanha, com a instalação desde 2010 de quase 35.000 MW de fontes eólica, solar e bioenergia.

A América do Sul também teve um bom crescimento dessas fontes ao longo dos anos, já possuindo quase 8.000 MW de eólicas instaladas e 582 MW de fontes solares. Apesar de numericamente ser um valor expressivo, a América do Sul ainda está

iniciando a sua entrada nas “novas” fontes renováveis, excluindo a fonte hidroelétrica (International Renewable Energy Agency - IRENA, 2015).

O Brasil possui grande potencial para o desenvolvimento de micro e minigeração distribuída, notadamente geração solar e eólica. De acordo com o Atlas de Potencial Eólico Brasileiro, desenvolvido pelo Cepel, a região Nordeste e Sul são aquelas com maior potencial de geração eólica, chegando a algumas localidades a um fluxo de potência de cerca de 600W/m^2 (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica - CRESESB, 2001). Este atlas, lançado em 2001, está desatualizado devido às novas tecnologias de medição. Como exemplo, o estado da Bahia lançou em novembro de 2013 um atlas que estimou o potencial eólico em 195 GW no estado. Este atlas foi criado tendo como base a utilização de altura compatível com a tecnologia atual, com torres de 80 a 120 metros, bem como a tecnologia futura de 150 metros (Coelba, 2013). Para efeito de comparação, o atlas do Cepel indica um potencial de 75 GW para a região Nordeste.

A capacidade instalada de painéis fotovoltaicos no mundo foi de cerca de 1 GW em 2000 para 180 GW em 2014, um crescimento muito acima da média de todas as outras fontes renováveis. O Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical, possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano. A utilização da energia solar traz benefícios a longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento, regulando a oferta de energia em períodos de estiagem, diminuindo a dependência do mercado de petróleo e reduzindo as emissões de gases poluentes à atmosfera. Existe um grande leque de possibilidades a médio e longo prazo para aproveitamento dessa abundante forma de energia renovável, que vai desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até as grandes centrais que empregam energia solar concentrada, ou a sistemas de produção de hidrogênio para utilização em pilhas a combustível com emissão zero de CO_2 .

As fontes solares concorreram pela primeira vez nos leilões de energia promovidos pela EPE, com expectativa de crescimento da participação dessa fonte na capacidade instalada do SIN. Nos leilões promovidos ao longo de 2014 foram comercializados 891 MW de potência instalada e 202,3 MW médios de garantia física

desta modalidade de geração a um preço médio de R\$ 215,12 /MWh. Deste total, 521 MW estão localizados na região NE e, o restante, na região SE/CO. Em 2015 foram comercializados 2.158 MW de energia solar nos leilões promovidos pela EPE (Ministério de Minas e Energia - MME, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014).

As centrais geradoras heliotérmicas ainda não estão contempladas no horizonte do PDE, porém devem-se ressaltar as vantagens dessa tecnologia quando associadas ao armazenamento térmico de energia. Elas podem servir como complemento às fontes renováveis intermitentes, como eólica e fotovoltaica, além da capacidade de atendimento às demandas máximas requeridas pelo SIN (Ministério de Minas e Energia - MME, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014).

A perspectiva de geração solar no Brasil é elevada. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, os valores médios de irradiação solar no Brasil estão na faixa de 1.550 a 2.370 kWh/m² (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica - CRESESB, 2001), bem superior aos valores médios da Europa, região com maior geração solar no mundo, que é de 1.200 kWh/m².

No Brasil, a geração distribuída é definida de forma oficial pelo Decreto 5163, de 30 de Julho de 2004 como “a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei no 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador” (Presidência da República, 2004).

Há inúmeras definições sobre o conceito de geração distribuída. A Associação da Indústria de Cogeração – Cogen conceitua que geração distribuída é “denominação genérica de um tipo de geração de energia elétrica que se diferencia da realizada pela geração centralizada por ocorrer em locais em que não seria instalada uma usina geradora convencional, contribuindo assim para aumentar a distribuição geográfica da geração de energia elétrica em determinada região” (Brasil, 2012).

O CIGRÉ define geração distribuída como uma geração com capacidade máxima entre 50 e 100 MW, conectada à rede de distribuição, não planejada nem despachada de maneira centralizada (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014).

Para a EPE, na Nota Técnica de Demanda de Energia para o PNE 2050, determina que a geração distribuída de energia terá função importante no médio e longo

prazos, pois a perda de capacidade de investimento do Estado, das grandes quantidades de recursos necessários para os grandes projetos centralizados, da introdução do gerenciamento da demanda, da maior concentração populacional em grandes centros urbanos, das fontes renováveis em menores escalas e a integração cada vez maior dos sistemas de energia, aumenta a perspectiva de uma maior participação da oferta descentralizada de energia no atendimento da demanda, sendo de muita importância para o atendimento domiciliar e comercial, devendo ser a principal alternativa para o consumidor gerar sua própria energia (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014).

Um importante instrumento legal criado para promover a maior difusão da pequena geração distribuída no Brasil foi a Resolução Normativa 482/2012 que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica: o sistema de compensação de energia elétrica. Este sistema é um arranjo no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica dessa unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2013).

Nesta Resolução, que foi alterada pela Resolução Normativa 687/2015, é definido microgeração distribuída como central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; já minigeração distribuída é a central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW para fontes com base em energia solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, e 3 MW para energia hidrelétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. O presente trabalho ficará restrito ao desenvolvimento destes tipos de geração distribuída até a potência de 5 MW.

Além das regulamentações citadas, os seguintes instrumentos legais são importantes para a geração distribuída: Resoluções ANEEL 414/2010, 517/2012 e Lei 10.848/2004.

A maior difusão pelos consumidores do uso dos instrumentos legais preconizados pela Resolução Normativa 482/2012 é intimamente ligada com o bom desenvolvimento da *smart grid*, pois sem mudanças no sistema de medição do consumidor, com a inclusão de *smart meter*, o sistema de compensação de energia é inviável. Com este equipamento, é possível realizar o fluxo bidirecional de energia na rede de distribuição, e de acordo com (Lima, 2014), é ponto principal para que os recursos energéticos distribuídos tenham atuação preponderante no sistema energético nacional no médio prazo. O departamento de Energia da Coreia do Sul indica que não possuir tecnologias no âmbito da *smart grid* irá limitar o total da integração de fontes renováveis na economia, estimando que com a *smart grid* a penetração de fontes renováveis na Coreia do Sul irá aumentar em 5% (Asia-Pacific Economic Cooperation - APEC, 2011).

A maior inserção de pequena geração distribuída irá trazer ao sistema elétrico brasileiro uma série de melhorias. Abaixo são listadas as principais melhorias (Dias, et al., 2012), (Faruqui, 2009), (Chang, 2012), (Faruqui, 2012), (Faruqui & Davis, 2013), (Brasil, 2012), (Gellings, 2009) e (Asia-Pacific Economic Cooperation - APEC, 2011):

- **Postergação de Investimentos** – Os sistemas de transmissão e distribuição são projetados para atender aos picos de demanda, assim a utilização de geração distribuída para a redução da demanda máxima permitirá a postergação de investimentos em geração e, em alguns casos extremos, evitar investimentos no sistema de geração, que passa grande dificuldade de licenciamento ambiental para usinas de grande porte;
- **Redução de Perdas** – Com o sistema de geração localizado próximo ao local de consumo, as perdas nos sistemas de transmissão e distribuição são minimizadas;
- **Confiabilidade** – Traz melhorias na qualidade da energia entregue em áreas localizadas no final da linha e pode atuar no caso de interrupções devido a intempéries naturais;
- **Nível de Tensão** – Circuitos longos apresentam queda de tensão significativa. Com geração mais próxima ao local de consumo esta queda será minimizada;

- **Emissão de CO₂** – Sendo a geração distribuída majoritariamente feita por fontes renováveis, haverá diminuição de emissão de CO₂, principalmente nos horários de ponta, quando a geração térmica é maior, com usinas mais caras e que possuem combustível mais poluidor, como óleo combustível e diesel. No último ano o sistema elétrico brasileiro tem gerado uma maior proporção de geração térmica, fazendo que o sistema, antes denominado “limpo”, tenha se tornado mais poluidor;
- **Novos Mercados** – Com a maior dinamização e abrangência da área de geração distribuída, haverá um incremento no desenvolvimento de áreas correlatas, como armazenamento de tecnologias, montagem de estruturas, equipamentos de medição e faturamento, etc.

A maior participação da pequena geração distribuída enfrenta dificuldades no Brasil. A seguir são listados os principais entraves para sua maior disseminação:

- **Incentivos Governamentais** – Os módulos de micro/minigeração solar e eólico ainda são caros e alcançam paridade tarifária apenas em alguns estados em relação à geração solar (ECLAREON, 2013). Incentivos governamentais são imprescindíveis para aumentar a participação da geração distribuída no mercado energético brasileiro;
- **Intermitência** – As fontes solar e eólica são fontes altamente intermitentes, como pode ser visto na Figura 3, dificultando sua previsão de geração. Logo, usinas de geração em stand-by podem ser necessárias para garantir a confiabilidade do sistema. Assim, um novo conceito de planejamento e operação do sistema elétrico do SIN tem que ser colocado em prática;

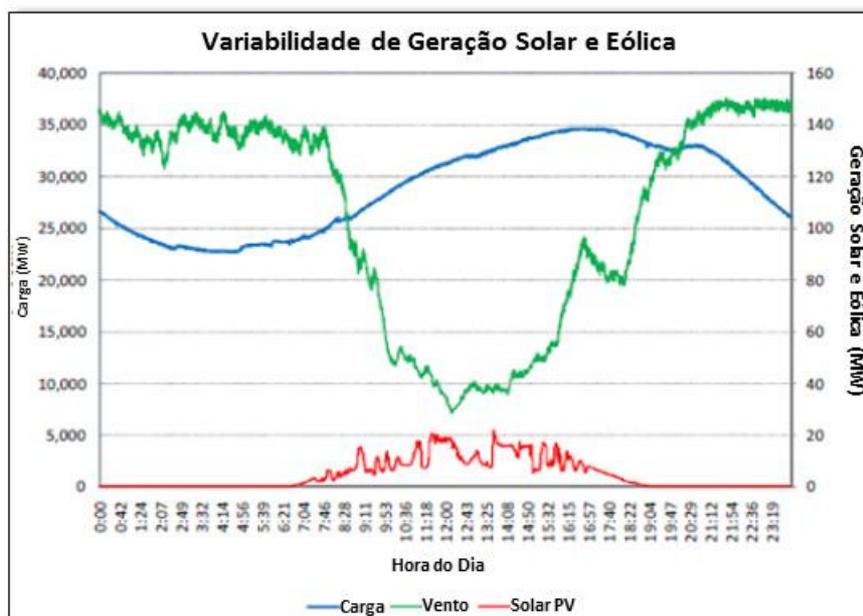


Figura 3 – Variabilidade diária de geração solar e eólica (Chang, 2010)

- **Gerenciamento da Demanda** – O desenvolvimento do gerenciamento da demanda, principalmente com o conceito de *net metering*, irá ser um ponto fundamental para o desenvolvimento da geração distribuída. O primeiro passo foi dado com a Resolução Normativa 482/2012, mas um longo caminho tem que ser percorrido para sua maior utilização.

2.3 - VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os primeiros carros elétricos foram criados ainda no século XIX, pelo engenheiro mecânico Ferdinand Porsche (Barassa, 2015), sendo que no ano de 1900 foram produzidos 1.575 veículos elétricos contra 936 veículos movidos a gasolina. O sucesso era tão grande que a conceituada revista *Scientific American*, no ano de 1899, dizia que “a eletricidade é ideal para veículos, pois ela elimina os dispositivos complicados associados aos motores movidos a gasolina, vapor e ar comprimido, evitando o ruído, vibração e calor associados” (Goldemberg, 2005). É relatado que entre a década de 1880 e 1900 foi a chamada “Era do Ouro” das tecnologias em veículos elétricos, com a criação de vários eletropostos nos Estados Unidos (Barassa, 2015).

Há registro da produção, em 1903, de um automóvel que apresentava as características de um híbrido em série: equipado com um pequeno motor de combustão

interna acoplado a um gerador elétrico e uma bateria, que alimentava dois pequenos motores elétricos acoplados junto às rodas dianteiras. Outro modelo, produzido entre 1901 e 1906, podia ser caracterizado como um veículo elétrico híbrido em paralelo: o motor de combustão interna era utilizado tanto para fornecer tração quanto para carregar uma bateria; e o motor elétrico fornecia potência extra ao motor de combustão, e também funcionava sozinho quando o veículo enfrentava trânsito lento (Miranda, 2013).

O ponto de inflexão no desenvolvimento dos veículos elétricos nos EUA e conseqüentemente no mundo tiveram os seguintes motivos (Goldemberg, 2005), (Miranda, 2013) e (Barassa, 2015):

- As descobertas dos grandes campos de petróleo no estado do Texas em 1901, fazendo com que os custos dos veículos de combustão interna caíssem drasticamente;
- Baixa evolução tecnológica das baterias;
- Aumento do sistema rodoviário nos Estados Unidos, fazendo com que veículos com maior autonomia, como os de combustão interna, tivessem maior apelo popular;
- Supressão das empresas que trabalhavam e desenvolviam tecnologias dos automóveis elétricos pelas empresas ligadas ao petróleo e aos motores de combustão interna, fazendo com que patentes desenvolvidas por estas empresas fossem arquivadas;
- Foi criado, em 1912, um dispositivo que eliminou a manivela, até então utilizada para dar a partida nos veículos a gasolina;
- O sistema de produção em série de automóveis, desenvolvido por Henry Ford, permitiu que o preço final dos carros a gasolina ficasse entre 500 e 1000 dólares, a metade do preço dos veículos elétricos naquela época.

Atualmente os veículos elétricos se dividem nos seguintes tipos (Hollanda, 2011) e (Miranda, 2013):

- **Carro Elétrico a Bateria** - Usa apenas energia de baterias carregadas na rede elétrica;
- **Carro Elétrico Híbrido** - Utiliza motor elétrico movido pela energia armazenada em baterias, além do motor de combustão interna convencional. A bateria pode ser recarregada pelo motor de combustão ou pela frenagem regenerativa. A alta eficiência energética vem da combinação do motor de combustão interna e o motor elétrico;
- **Carro Elétrico Híbrido *Plug-in*** - Utiliza uma bateria, um motor de combustão interna e um motor elétrico, com a bateria também podendo ser recarregada quando conectada ao sistema de distribuição de energia, além do carregamento pelo motor de combustão e frenagem regenerativa .

Nas últimas décadas os carros elétricos voltaram à tona. A preocupação em reduzir os impactos ambientais pelas substâncias emitidas na circulação de veículos comuns torna os movidos à eletricidade uma opção interessante. De acordo com o BEN – Boletim Energético Nacional de 2015 (Ministério de Minas e Energia – MME e Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2015), o setor de transporte é responsável pela emissão de 221,9 MtCO₂, correspondendo a cerca de 45,7% do total de emissão antrópicas associadas à matéria energética brasileira. Levando-se em consideração os veículos puramente elétricos, as emissões dos gases de efeito estufa estão associadas apenas ao processo de geração elétrica, sendo desconsideradas as emissões do processo de fabricação, entre outras. Assim, a faixa de emissões de um veículo elétrico no Brasil estará entre 25 a 100 gCO₂/km, contra uma emissão típica de veículo leve a gasolina de 100 a 200 gCO₂/km (Schaeffer & Soares, 2010).

Atualmente no Brasil a frota de veículos é sustentada pelo etanol e é difícil afirmar hoje se a produção de etanol vai acompanhar a evolução do parque automotivo nacional. Se isso não ocorrer, a gasolina iria substituir o etanol, acarretando em menor participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira e maior dependência de importação de gasolina. Assim, a difusão de veículos elétricos pode ser uma boa opção para este problema, sendo sustentável do ponto de vista ambiental.

Além disso, os veículos elétricos possuem uma elevada eficiência energética se comparados aos veículos tradicionais, já que conforme demonstrado em Itaipu Binacional (2010) e Andrade et al. (2014) a energia útil de um carro elétrico chega a 23% e em um carro a diesel a energia útil é de cerca de 13%. Estes são valores médios, podendo variar de acordo com a eficiência da planta de geração de energia, hora de carregamento do veículo na rede elétrica, perdas nos sistema de geração, processo de refino da gasolina, entre outras variáveis.

Outro ponto importante nos veículos elétricos é a possibilidade de economia no longo prazo. Tomando-se com exemplo um veículo híbrido *plug-in* e um veículo comum a gasolina, em pesquisa realizada em meados de 2015, o preço médio da gasolina girava em torno de 3,20 R\$/l e o preço da energia para consumidores de baixa tensão da Light era 0,72 R\$/kWh. Considerando o desempenho do automóvel de 10,7 km/l e o do veículo elétrico de 0,25 kWh/km, o gasto médio de um veículo comum seria de 0,30 R\$/km e o do veículo elétrico 0,18 R\$/km, sendo 66% mais barato, mesmo com o forte aumento das tarifas de energia nos últimos anos.

No Brasil, como pode ser visto na Tabela 1, as vendas são pequenas. Entretanto, no ano de 2014 as vendas aumentaram em 74% em relação a 2013. Em 2015, provavelmente em decorrência da crise econômica, as vendas estagnaram. As vendas podem ser um reflexo da maior quantidade de modelos ofertados e indicar uma boa visão que os consumidores brasileiros possuem do carro elétrico, norteados assim uma interessante oportunidade de negócios para as montadoras automobilísticas.

Tabela 1 – Vendas de veículos elétricos – Brasil (Anfavea, 2015)

Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Total Ano
2011	3	17	10	10	13	34	20	34	29	12	9	9	200
2012	9	16	7	3	13	23	5	3	2	2	18	16	117
2013	45	22	53	50	12	29	65	45	23	39	52	56	491
2014	93	61	65	53	94	52	61	79	71	53	87	86	855
2015	72	56	61	73	72	74	74	100	82	55	65	62	846

O fraco desenvolvimento dos veículos elétricos no Brasil está intrinsecamente relacionado à falta de incentivos governamentais para esta tecnologia. Os incentivos não se baseiam apenas no valor de venda do veículo, mas também na instalação de fábricas, acessórios e principalmente na posterior utilização do veículo no dia a dia. Maiores detalhes de incentivos governamentais serão vistos no Capítulo 5.

As projeções de vendas mundiais de veículos elétricos são baixas, mas otimistas. As vendas globais aumentaram 53% em 2014 em comparação com 2013, sendo que o maior aumento proporcional ocorreu nos veículos elétricos “puros”, movidos apenas por bateria. Em quatro países, a participação no mercado dos veículos elétricos ultrapassa 1% do total de vendas. Por exemplo, na Noruega, 13% dos veículos vendidos em 2014 são elétricos. Na Holanda, 4% das vendas foram de veículos elétricos (International Energy Agency - IEA, 2015). O crescimento da venda está relacionado com a diminuição do custo das baterias, que diminuiu 50% de 2011 para 2013 (International Energy Agency - IEA, 2015).

Já o conceituado World Energy Outlook, na sua edição de 2013, mantém-se cauteloso com o desenvolvimento dos veículos elétricos. O estudo relata que as vendas estão crescendo, mas ainda representam uma pequena fração das vendas totais nos países analisados. Mesmo com incentivos lançados em diversos países, as vendas atuais estão longe das expectativas governamentais. As metas de longo prazo estão mantidas, mas o relatório olha com ceticismo o alcance das mesmas. O relatório enfatiza a dificuldade de fazer previsões sobre essa tecnologia, pois as presentes vendas são baixas, mas inúmeros fabricantes e marcas de luxo lançam novos modelos de veículos elétricos. Um ponto crucial para a tecnologia deslançar, segundo o WEO, seria uma grande melhoria no desempenho das baterias e diminuição dos preços de venda (The International Energy Agency, 2013).

A integração dos veículos elétricos depende do desenvolvimento da *smart grid*, promovendo tarifas diferenciadas para o carregamento dos veículos, permitir que as baterias possam aumentar a capacidade de armazenamento de energia do sistema e até propiciar maior integração de fontes renováveis, pois como relatado em (Richardson, 2012), há a possibilidade que painéis solares sejam construídos em estacionamentos e assim permitir que o carregamento de veículos elétricos seja feito por meio da energia advinda da geração fotovoltaica.

De acordo com Faruqui (2009), a penetração dos veículos elétricos no longo prazo é função de vários fatores, tais como:

- Custo dos veículos;
- Preço da gasolina e sua volatilidade;

- Performance e autonomia;
- Infraestrutura para carregamento das baterias;
- Preço da energia.

2.4 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para a International Energy Agency – IEA, a eficiência energética é uma forma de gerir e restringir o crescimento no consumo de energia. Algo é mais energeticamente eficiente se ele oferece mais serviços para a mesma entrada de energia, ou os mesmos serviços com menor consumo de energia (International Energy Agency - IEA, 2015). Já para o Departamento de Energia dos Estados Unidos, a eficiência energética é uma das mais fáceis e menos custosas formas de combater as alterações climáticas, melhorar a competitividade das nossas empresas e reduzir os custos da energia para os consumidores (U. S. Department of Energy, 2015). É interessante diferenciar eficiência energética e conservação de energia. A conservação de energia é reduzir ou não usar um serviço para economizar energia. Exemplo bem simples é que desligar uma lâmpada é conservação de energia, mas substituir por uma lâmpada mais eficiente é eficiência energética.

A partir da década de 70 e a onda dos choques do petróleo, o conceito de eficiência energética ficou mais evidente. Com o grande aumento do preço do barril de petróleo, o uso racional das atividades era necessário do ponto de vista econômico. Assim, uma série de hábitos de consumo foi alterada, fazendo com que um mesmo objetivo fosse alcançado utilizando-se um menor consumo de energia.

Atualmente a eficiência energética é mais focada na questão ambiental, sem deixar de lado os custos elevados da energia de origem fóssil. Deste modo, vários países, notadamente os EUA, vêm colocando em prática diversos programas de eficiência energética, com resultados expressivos. Os EUA gastam anualmente US\$ 7,5 bilhões com eficiência energética, sendo o estado da Califórnia o recordista de economia de energia, com um total de 4,6 GWh de energia conservada em 2012 (Faruqi, 2013). Aliás, o estado da Califórnia é um caso a parte no estudo de eficiência

energética. Desde a década de 60, o consumo per capita vem se distanciando do resto do país, como é possível observar na Figura 4:

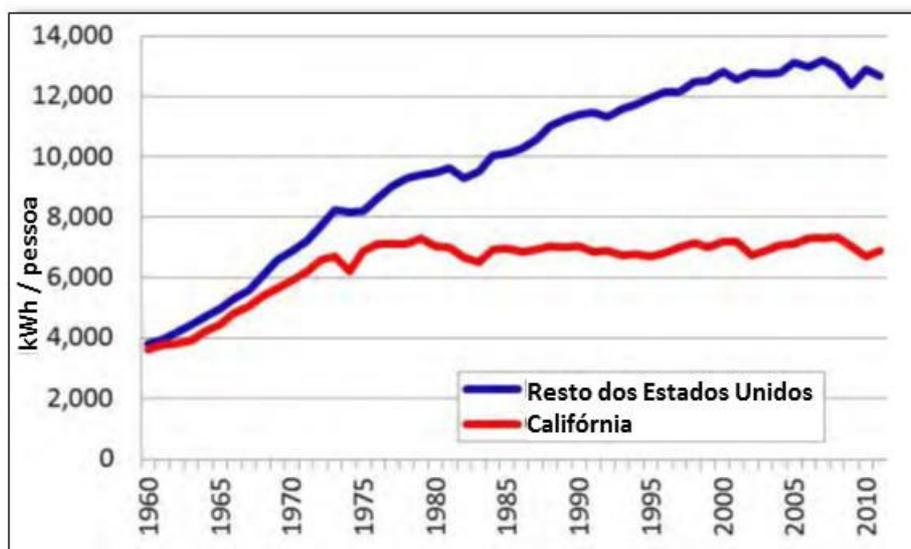


Figura 4 – Efeito da eficiência energética – Califórnia (Faruqui, 2013)

No Brasil, o principal programa de conservação de energia é o Procel. Ele foi instituído em 30 de dezembro de 1985 e é o programa do governo brasileiro, coordenado pelo MME e executado pela Eletrobrás, destinado a promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. Estima-se que em 2013 o Procel tenha alcançado um resultado de economia de energia de aproximadamente 9,744 bilhões de kWh. Essa energia ainda pode ser convertida em emissões evitadas de 935 mil tCO₂ equivalentes, o que corresponde também às emissões proporcionadas por 321 mil veículos durante um ano (Eletrobrás - Procel, 2014).

Desde 1986, a Eletrobrás investiu mais de R\$ 1,5 bilhão em ações de eficiência energética do Procel, contando com recursos ordinários da própria Eletrobrás, da Reserva Global de Reversão - RGR, além de outros investimentos provenientes de fundos internacionais. Considerando os resultados acumulados do Procel no período de 1986 a 2013, a economia total obtida foi da ordem de 70,1 bilhões de kWh.

Além do Procel há outros programas destinados à eficiência energética. São eles: Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE, coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO e o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural - CONPET, cuja coordenação executiva é de responsabilidade da Petrobras, o Programa de apoio a

Projetos de Eficiência Energética - PROESCO, cuja coordenação executiva pertence ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2013).

A Empresa de Pesquisa Energética – EPE, no seu planejamento de longo prazo, o Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050, dá atenção especial à eficiência energética, mostrando em nível governamental e de forma integrada, a indicação de eficiência energética no longo prazo para o país. Assim, os estudos da demanda de energia desenvolvidos pela EPE consideram e explicitam obrigatoriamente a contribuição quantitativa da eficiência energética na redução da demanda energética que deve ser atendida pela expansão da oferta de energia em qualquer horizonte, seja ele de médio ou longo prazo (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014).

De acordo com a EPE, a dinâmica para penetração dos ganhos de eficiência energética é composta de duas parcelas: progresso tendencial, que corresponde ao movimento tendencial do consumidor final de energia, que inclui contribuições como a reposição tecnológica natural devido ao término da vida útil de equipamentos, os efeitos de políticas, programas e ações já em prática no país; e progresso induzido, necessitando da instituição de programas e ações adicionais orientados para o incentivo à eficiência energética, por caráter transversal ou voltados para setores específicos (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014).

O potencial de eficiência energética se divide em três: potencial técnico, que estabelece um limite de penetração das medidas, dado pela substituição de todos os usos da energia por equivalentes com a tecnologia mais eficiente disponível. Este potencial não considera custos ou qualquer outro impedimento de absorção da tecnologia; já o potencial econômico corresponde a um subconjunto do potencial técnico, onde são consideradas apenas as medidas que apresentam viabilidade econômica para implementação; e finalmente o potencial de mercado, que procura analisar as medidas que seriam introduzidas “por si mesmas”, ou seja, aquelas cuja adoção traria redução de custos ao usuário, analisadas, portanto, pela sua ótica, em particular a taxa de desconto praticada e a tarifa de energia a que está submetido (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014). O conceito de eficiência energética no âmbito da *smart grid* está acima do potencial técnico, pois traz novas tecnologias que levarão a eficiência energética a outro nível.

O principal objetivo da eficiência energética é a redução global do uso da energia, assim os programas nessa área são criados para incentivar a redução global de energia ao longo do ano e não focados em algumas horas do dia, sendo esta a principal diferença em relação à resposta da demanda. Mesmo assim, há a diminuição da demanda de ponta decorrente destas ações, correspondendo a um efeito secundário (Hledik, 2009).

De acordo com Faruqui & Mitarotonda (2012), são cinco os pontos que a *smart grid* trará como novidade em eficiência energética. São eles:

- **Informação** – Os consumidores terão informações on-line à medida que a energia é consumida e terão ideia de como gerenciar estes custos;
- **Códigos e Normas** – Novos padrões para equipamentos, construções e processos industriais;
- **Tecnologias Facilitadoras** – Para controlar em tempo real os custos em equipamentos sensíveis ao preço, como termostatos. Para isso, é importantíssima a instalação de *in-home displays* – IHDs, que possibilitará o acesso a este tipo de informação;
- **Financiamento** – Para acelerar a adoção de novas tecnologias inteligentes, sendo importante introduzir incentivos governamentais na forma de descontos ou abatimento nas contas de energia;
- **Tarifas Inteligentes** – Destaca-se a importância da criação da Inclining Block Rate – IBR para a eficiência energética. Com a utilização da IBR o consumidor pagará um valor por kWh de acordo com seu consumo mensal. Assim, ultrapassando um determinado valor de consumo no mês, a tarifa sofre um acréscimo, influenciando assim na diminuição no consumo de energia mensal.

CAPÍTULO 3 – PREVISÃO DA DEMANDA E PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO

3.1 – INTRODUÇÃO

A previsão de demanda energética bem fundamentada é um indicador para um planejamento seguro de geração e transmissão de energia elétrica, diminuindo assim as incertezas quanto ao suprimento de energia para o horizonte considerado.

Neste capítulo, será descrita a conceituação de demanda de energia elétrica, seu impacto no planejamento do setor elétrico e métodos de previsão da demanda, principalmente os utilizados pela EPE.

Após isso, será apresentado o modelo de planejamento energético atualmente utilizado no Brasil, caracterizando principalmente a importância de um planejamento robusto em um sistema hidrotérmico.

3.2 – PREVISÃO DA DEMANDA

A previsão da demanda é determinada em duas formas: previsão da demanda de consumo de energia e previsão da demanda de potência. A demanda de consumo de energia representa a energia elétrica total consumida em um período de tempo determinado, normalmente um ano, sendo a potência integrada em número de horas do período, em MWh (Unsuhay-Vila, 2013).

A demanda de potência corresponde à potência em determinado instante ou intervalo de tempo curto. Assim, pode ser integrada de hora em hora e, neste caso, corresponde ao valor médio no intervalo de 60 minutos, caracterizando a demanda integrada, em MWh/h. Também pode se referir à demanda máxima instantânea, em

MW, que corresponderá ao maior valor assumido pela carga em um curto intervalo de tempo.

Tanto a demanda integrada quanto a demanda máxima instantânea são informações da maior relevância, na medida em que os sistemas de geração e transmissão tem que estar preparados para atender a estas solicitações extremas (Unsihuay-Vila, 2013).

De acordo com Filho (2010), uma série de fatores influencia o comportamento da previsão da demanda, e os principais são:

- Variações de preço da energia elétrica;
- Existência de fontes substitutas de energia;
- Crescimento populacional;
- Produto Interno Bruto - PIB;
- Utilização da capacidade industrial instalada;
- Fatores endógenos que definem o comportamento histórico da série de demanda;
- Cenários políticos e econômicos;
- Avanços da ciência e tecnologia;
- Legislação regulatória do setor.

3.2.1 – MODELOS DE PREVISÃO DA DEMANDA

De acordo com Filho (2010), os modelos de projeção podem ser considerados como a reprodução complexa e incompleta da realidade futura, refletida de maneira simplificada. É complexa por abranger um conjunto de variáveis que regem setores que vão além da exclusividade do setor energético, como setores econômicos e meteorológicos; e incompleta por haver um horizonte de incertezas que traz margem a erros estatísticos. Portanto, os modelos de projeção de demanda são essenciais para as tomadas de decisões do planejamento da expansão e operação da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica (Ferreira, 2006).

A seguir, serão apresentadas as principais metodologias aplicadas na previsão de demanda de energia, aplicabilidade, vantagens e desvantagens:

- **Modelos econométricos (*Top-Down*)** – Baseiam-se na teoria econômica neoclássica, partindo de sistema de regressões e funções de custos e produção vindos da teoria microeconômica. Para modelar a previsão da demanda no longo prazo, usam as variáveis econômicas na justificativa da evolução da variável, como por exemplo, a projeção do PIB no horizonte de estudo (Filho, 2010). Estes modelos, baseados em equações matemáticas invariáveis no tempo, se tornam inadequados quando são relevantes as complexidades do setor econômico, pois se baseiam no comportamento histórico das séries temporais, partindo da premissa de que o comportamento futuro poderá ser previsto a partir das situações do passado (Ferreira, 2006). Estes modelos são bastante úteis para prever possibilidades tecnológicas radicalmente diferentes no futuro, com impactos ambientais significativamente diferentes (Wills, 2013). Possuem boa aplicabilidade em estudo de curto prazo, quando não há grande possibilidade de mudanças bruscas de ordem econômica e social. Os modelos *top-down* possuem bom detalhamento macroeconômico e microeconômico, mas tendem a não ter bom desempenho para detalhamento tecnológico (Wills, 2013).
- **Modelos de uso-final (*Bottom-up*)** – Tem o objetivo de mensurar o impacto do uso de energia para os diversos sistemas e dispositivos eletrointensivos, fazendo descrição física detalhada do sistema energético (Lucena, et al., 2012). Nas previsões de comportamento futuro de acordo com a metodologia de usos finais, é analisada uma série de fatores, tais como: tecnologias empregadas, processos de consumo, eficiência dos equipamentos consumidores de energia, fatores climáticos, aspectos socioeconômicos associados aos hábitos de consumo, classe social, renda média familiar, entre outros (Ferreira, 2006). Não são dependentes de séries históricas, necessitando apenas de ajustes no ano-base (Lucena, et al., 2012). Os modelos *bottom-up* possuem bom detalhamento tecnológico, um detalhamento microeconômico regular e pouco detalhamento macroeconômico (Wills, 2013).

- **Modelos de tendência** - A vantagem desses modelos é a simplicidade e facilidade de uso. É bastante útil quando não existe a disponibilidade de dados suficientes para se aplicar modelos mais complexos. Possui bons resultados se utilizada isoladamente para a previsão de cenários de curto prazo. Neste horizonte, desconsidera-se a possibilidade de ocorrência de alterações significativas nos cenários externos que influenciam a série temporal utilizada, como por exemplo, rupturas econômicas. Pode levar a erros, pois leva em consideração o comportamento histórico da série temporal (Ferreira, 2006).
- **Modelos Dinâmicos** – A demanda de energia elétrica é uma variável de estudo caracterizada por ser influenciada em grande escala por fatores externos. Para realizar uma boa relação entre a mudança de comportamento externo e a demanda de energia é interessante usar técnicas computacionais autoadaptativas capazes de identificar correlações, tendências e sazonalidades complexas que encontram-se escondidas. Para isso são utilizadas técnicas de inteligência computacional, principalmente redes neurais, para realizar estes estudos. Conforme descrito em (Ferreira, 2006), na República da Irlanda é realizado um estudo de previsão da demanda diária, semanal e anual (para até quinze anos) utilizando esta técnica com bons resultados encontrados.

3.3 – PLANEJAMENTO ENERGÉTICO NO BRASIL

O órgão responsável pelo planejamento energético de longo prazo é a Empresa de Pesquisa Energética – EPE, que lançou as primeiras notas técnicas do Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050. O PNE 2050 tem como objetivo o planejamento de longo prazo no setor energético do país, orientando tendências e balizando as alternativas de expansão desse segmento nas próximas décadas. O documento é composto de uma série de estudos que buscam fornecer insumos para a formulação de políticas energéticas segundo uma perspectiva integrada dos recursos disponíveis (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014).

De forma geral, o PNE 2050 quantifica no cenário macroeconômico nacional, a trajetória de evolução do PIB, que terá sua consistência verificada por meio do Modelo

de Consistência Macroeconômica de Longo Prazo – MCMLP, adaptado na EPE a partir de modelagem proposta pelo Banco Mundial. Na quantificação do cenário demográfico, será aplicado o Modelo de Estimativa de Parâmetros Demográficos – MEDEM, desenvolvido na EPE a partir de modelagem proposta pelo IBGE. Na projeção do consumo final de energético será utilizado um modelo do tipo *bottom-up*, denominado Modelo Integrado de Planejamento Energético – MIPE, desenvolvido na COPPE/UFRJ e aprimorado na EPE. Especificamente para a projeção do consumo residencial de energia elétrica aplica-se o Modelo de Projeção da Demanda Residencial de Energia – MSR, também do tipo *bottom-up*, desenvolvido na COPPE/UFRJ e aprimorado na EPE. (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014).

No lado da oferta são utilizados dois modelos para avaliar a transformação da energia primária: o Modelo de Estudo do Refino de Petróleo – PLANDEPE, desenvolvido na EPE, que permite dimensionar a expansão do parque de refino de petróleo e o Modelo de Planejamento da Expansão do Sistema Elétrico – PLANEL, desenvolvido na EPE, que permite calcular a solução de expansão da oferta de energia elétrica que minimiza o custo da expansão e da operação, considerando os custos de investimento nas usinas e nas linhas de transmissão que interligam os subsistemas, os custos dos combustíveis utilizados na geração térmica, assim como outras restrições operativas e ambientais (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014).

Os resultados dos estudos de oferta e da demanda são consistidos e integrados com a aplicação do Modelo Matriz Energética Brasileira – MATRIZ, desenvolvido pelo Cepel. Como resultado final, obtém-se a evolução da composição da oferta interna de energia, permitindo construir cenários da matriz energética brasileira para os próximos 40 anos (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014).

O processo de estimativa da demanda de energia no PNE 2050 tem os cenários econômicos de longo prazo como um de seus principais insumos de informação. A partir da elaboração de cenários setoriais da atividade agropecuária, serviços e indústria, além das demandas de infraestrutura e mobilidade, modelos setoriais específicos permitem estimar a evolução da demanda por fonte e por setor, em nível nacional. As perspectivas de autoprodução de eletricidade e energia nestes setores de consumo, como o de geração distribuída, também são parte importante do processo, que apontará os

requisitos de demanda de energia que o sistema energético brasileiro deverá atender no horizonte de estudo (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014).

Na Figura 5 o processo de consumo de energia, com as metodologias e modelos utilizados, é apresentado.

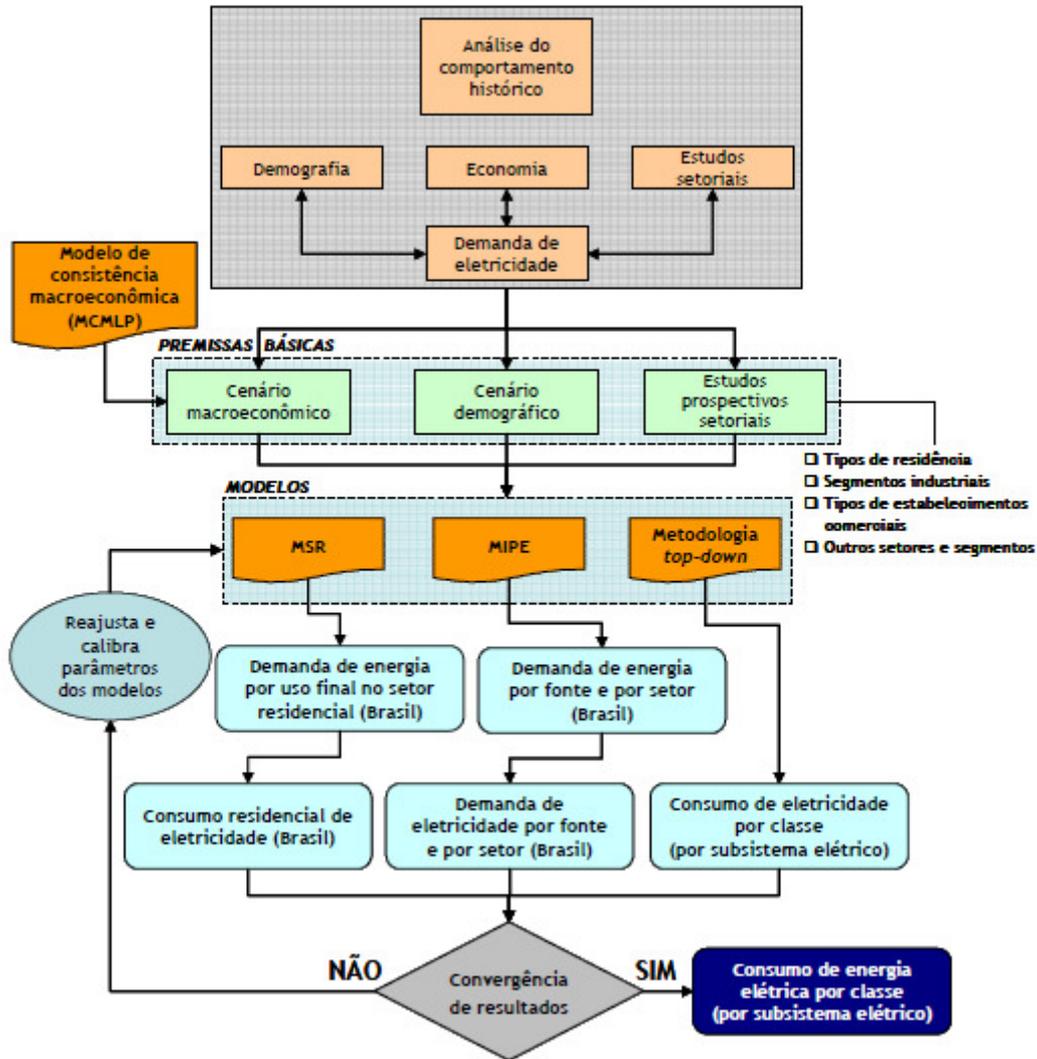


Figura 5 – Processo de previsão da demanda de eletricidade (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2011).

De acordo com a EPE, em sua nota técnica (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2011), três abordagens paralelas são utilizadas para realizar as previsões de demanda. Uma metodologia é do tipo *top-down* quando é realizada a projeção do mercado de energia elétrica, elaborada por subsistema elétrico e por classe de consumo: residencial, industrial, comercial e outras. O conjunto de “outras classes” inclui o

segmento rural, poderes públicos, serviço público, iluminação pública e consumo próprio das concessionárias do setor. A projeção por classe de consumo baseia-se na evolução de alguns parâmetros característicos de cada segmento do mercado, bem como na evolução do PIB e da população (Ministério de Minas e Energia - MME, 2007).

Já as outras duas abordagens seguem modelos do tipo *bottom-up*, baseados na análise dos usos finais da eletricidade em cada setor da economia e dos serviços que os solicitam. A primeira abordagem utiliza o Modelo Integrado de Planejamento Energético - MIPE desenvolvido no Programa de Planejamento Energético da COPPE. Trata-se de um modelo técnico-econômico de projeção de demanda, oferta de energia e de emissões de CO₂ advindos do uso da energia. O modelo permite avaliar a implicação de cenários prospectivos de padrões de uso da energia e estilos de desenvolvimento nas trajetórias de demanda e oferta de energia projetadas para o Brasil para o horizonte de estudo. É um modelo apropriado para estudos de longo prazo, como o PNE, bem como se aplica a estudos de médio prazo, como o PDE (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2011).

A segunda abordagem, o Modelo do Setor Residencial, é um modelo técnico-econômico de simulação paramétrica específica para a análise e projeção da demanda de energia no setor residencial. Esta metodologia é mais apropriada à análise da eficiência energética nas residências uma vez que ela incorpora explicitamente a substituição de equipamentos, assim como possíveis substituições energéticas em determinados usos finais. Em relação ao consumo de eletricidade por domicílio, a evolução da posse de equipamentos é determinante do ritmo de crescimento da demanda deste setor. Sendo assim, na metodologia *bottom-up* empregada para a projeção da demanda residencial de energia elétrica, a evolução da posse média advém da estimativa sobre a evolução do estoque dos principais eletrodomésticos presentes nos domicílios. A projeção do estoque é realizada a partir da diferença entre a estimativa de evolução das vendas e o sucateamento dos equipamentos considerados, admitindo a premissa geral de que ao final da vida útil eles são substituídos por outros mais eficientes. Desta forma, o estoque se expande e se torna cada vez mais eficiente. Além da renovação da parcela do estoque que é sucateada, o ritmo de crescimento das vendas também decorre do incremento no número de novas ligações à rede, função do aumento da renda e sua melhor repartição entre as famílias, propiciando deste modo aquisição de novos equipamentos (Ministério de Minas e Energia - MME, 2007).

As três metodologias (uma do tipo *bottom-up* e duas do tipo *top-down*) produzem resultados similares e necessitam de pequenos ajustes nas variáveis para se chegar ao resultado final (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2011).

3.4 – PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO

O planejamento tradicional, como relatado anteriormente, procura expandir recursos de oferta com o propósito de atender ao crescimento da demanda futura com segurança, minimizando os custos econômicos desta expansão. Já o planejamento energético moderno necessita contemplar objetivos múltiplos: econômicos, estratégicos, sociais e ambientais, requerendo um processo mais complexo, que integre estes objetivos muitas vezes conflitantes (Lucena, 2012).

O planejamento moderno tem evoluído em direção ao PEI – Planejamento Energético Integrado, e cada vez menos se pratica preferencialmente a expansão da oferta a custo mínimo (Lucena, 2012). Isto significa integrar um leque com mais opções tecnológicas, incluindo as tecnologias de eficiência energética e controle de carga sobre o lado da demanda, bem como fontes descentralizadas, fazendo assim uma mistura de recursos potenciais. Além disso, significa integrar uma ampla gama de custos, incluindo os custos ambientais e outros custos sociais, para a avaliação e seleção de potenciais recursos técnicos (Swisher, et al., 1997).

O resultado esperado das mudanças trazidas pelo PEI é criar um ambiente econômico mais favorável para o desenvolvimento e aplicação de tecnologias eficientes de uso final e tecnologias mais limpas e menos centralizadas, com foco nas fontes renováveis. Assim, o PEI significa que essas opções serão consideradas, e a inclusão dos custos ambientais, entre outros custos, permite que eles irão aparecer relativamente atraentes em comparação com opções tradicionais de suprimento de energia (Swisher, et al., 1997).

Deste modo, é incluso um amplo espectro de recursos tecnológicos para expansão de energia, como ações em eficiência energética, gestão de carga pelo lado da

demanda, maior utilização de geração descentralizada, entre outras, fazendo com que todas essas opções concorram em um mesmo patamar de análise, buscando uma solução de mínimo custo total para a sociedade, onde não apenas a vertente econômica é levada em consideração. Portanto, o PEI é importantíssimo para a inclusão da *smart grid* no planejamento energético de longo prazo, pois novas tecnologias surgirão com o desenvolvimento da *smart grid* e até o momento não são consideradas na expansão tradicional do setor.

Dentre os objetivos do PEI, estão (Swisher, et al., 1997) e (Lucena, et al., 2012):

- Estar em conformidade com os objetivos nacionais, regionais e locais de desenvolvimento;
- Certificar de que todos os consumidores têm acesso a serviços de energia elétrica;
- Manter a confiabilidade do fornecimento;
- Minimizar os impactos ambientais da oferta e uso da eletricidade;
- Aumentar a segurança energética, minimizando o uso de recursos externos;
- Fornecer benefícios econômicos locais.

3.4.1 – RESPOSTA DA DEMANDA NO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO INTEGRADO

A resposta da demanda já é utilizada em diversos planejamentos energéticos integrados de longo prazo ao redor do mundo, já sendo uma importante variável na definição da expansão do mercado para os próximos anos.

Em pesquisa feita pelo Berkeley Lab em 19 estudos realizados nos EUA e no Canadá, 14 estudos incorporam a resposta da demanda como parte do planejamento. Grande parte destes estudos, cerca de 12 deles, desenvolvem o *portfolio* de candidatos de resposta de demanda fora do processo de planejamento, e então processam este

portfolio ao modelo da expansão. Os dois programas restantes usam o modelo de planejamento para desenvolver e avaliar o conjunto de candidatos de resposta da demanda (Satchwell & Hledik, 2013).

Nos dois tipos de análise, o potencial de mercado dos programas de resposta da demanda foi utilizado para obter curvas de recursos, em que estes recursos foram classificados de acordo com o custo nivelado da energia conservada pelos programas. Deste modo, os modelos de planejamento permitiram que esses novos recursos do lado da demanda competissem com recursos do lado do suprimento de energia, desenvolvendo assim um conjunto de recursos de menor custo (Satchwell & Hledik, 2013).

Um item importante no planejamento energético integrado, os impactos ambientais, também é ponto de destaque da resposta de demanda. Programas de resposta da demanda possuem a expectativa de diminuir a emissão de CO₂, pois evitam a geração em horários de demanda máxima, momento este que fontes de geração mais poluentes são acionadas para atender à demanda. Obviamente, este resultado pode variar dependendo do mix de usinas que são acionadas em cada país para este objetivo. Além disso, como poderá ser visto no capítulo 5, a resposta da demanda pode assumir um importante papel na integração de fontes renováveis, principalmente energia solar, e assim contribuir por uma matriz energética mais limpa.

CAPÍTULO 4 - CONJUNTO, LÓGICA E SISTEMAS *FUZZY*

4.1 - INTRODUÇÃO

Nesta seção serão apresentados os principais conceitos dos modelos *fuzzy*, que possuem a característica principal de funcionar de maneira satisfatória em um ambiente de informações vagas e imprecisas, descritas em linguagem natural e convertê-las em um formato numérico.

4.2 – CONJUNTOS *FUZZY*

A primeira publicação sobre conjunto *fuzzy* possui mais de 50 anos, no trabalho seminal de Zadeh (1965). No texto é descrito que:

A noção de um conjunto *fuzzy* fornece um ponto de partida conveniente para a construção de uma estrutura de trabalho conceitual que se assemelha em muitos aspectos do modelo utilizado no caso de conjuntos comuns, mas é mais geral que este e pode vir a ter um alcance muito maior de aplicabilidade, particularmente nos domínios da classificação de padrões e processamento de informações. Essencialmente, esse quadro fornece uma maneira natural de lidar com os problemas em que a fonte de imprecisão é a ausência de critérios bem definidos de pertinência e não da presença de variáveis aleatórias.

Na descrição acima, “imprecisão” não é entendido como falta de precisão em algo, e sim com a falta de conhecimento sobre um determinado parâmetro. A imprecisão, ou incerteza, em sistemas baseados em conhecimento pode se originar de várias fontes: da confiabilidade parcial da informação, da imprecisão inerente à linguagem de representação na qual a informação é expressa, da pouca integridade da informação e da agregação da informação advinda de várias fontes (Uchôa, et al., 2012).

Assim, a teoria dos conjuntos *fuzzy* fornece uma estrutura matemática rigorosa em que fenômenos conceituais vagos podem ser rigorosamente estudados, como é verificado no desenvolvimento da *smart grid* no Brasil.

Atualmente a teoria dos conjuntos *fuzzy* possui várias aplicações em diferentes áreas de estudo, como apresentado a seguir (Zimmermann, 2001) e (Munakata, 2008):

- Aplicação na matemática e em diferentes áreas como topologia, álgebra e lógica;
- Algoritmos de controle e programação matemática;
- Aplicações na economia e medicina, quando envolve processamento de informações imprecisas;
- Aplicação em modelos de transporte, modelos de manutenção e modelos de controle de estoques;
- Aplicação em sistemas de potência, como em sistemas de transmissão e previsão de demanda.

Os sistemas *fuzzy* possuem pontos fortes como os apresentados a seguir (Zimmermann, 2001), (Neto, et al., 2006) e (Munakata, 2008):

1 – Sistemas *fuzzy* funcionam satisfatoriamente em aplicações onde a modelagem matemática é difícil ou quando depende de aproximações que podem levar a resultados ruins;

2 – Bons resultados em aplicações que requerem descrição humana, natural ou intuição;

3 – É uma técnica flexível, onde a mudança em algumas das variáveis de estudo é realizada facilmente;

4 - A gestão de incerteza desempenha um papel particularmente importante. Incerteza de informações na base de conhecimento induz incerteza nas conclusões, e, portanto, a máquina de inferência *fuzzy* deve ser equipada com os recursos computacionais para analisar a transmissão de incerteza das premissas às conclusões e associar a estas uma medida de incerteza que possibilite o entendimento do usuário final.

4.2.1 – CONJUNTOS CONVENCIONAIS

Os conjuntos tradicionais são definidos pela enumeração de seus elementos ou por uma condição que defina se o elemento pertence ou não ao conjunto. Seja A um conjunto definido no universo I dos números inteiros positivos menores que 10, isto é, $A \subset I$. Neste caso podemos definir o conjunto A como a seguir (Falcão, 2010):

$$A = \{1, 2, 3, \dots, 10\} \text{ ou } A = \{x \mid x \in I \wedge x \leq 10\}$$

Também podemos representar este mesmo conjunto através de uma função de pertinência $\mu_A(X)$, que mapeia cada elemento de X com um valor de pertinência entre 0 e 1:

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{Se } x \in I \wedge x < 10 \\ 0 & \text{Se } x \notin I \vee x \geq 10 \end{cases}$$

4.2.2 – CONJUNTOS FUZZY

Os conjuntos *fuzzy* podem ser vistos como uma generalização da teoria dos conjuntos convencionais, na qual a função de pertinência dos elementos do conjunto podem variar entre 0 e 1, para conjuntos normalizados. Neste caso, não é possível dizer que um determinado elemento não pertence ao conjunto, e sim que o elemento pertence ao conjunto com certo grau de pertinência. Como bem relatado em (Munakata, 2008), nem tudo no mundo é 0 ou 1, preto ou branco, sim ou não; também, às vezes, são envolvidas áreas cinzentas.

Como exemplo, considere o conjunto de números inteiros próximos a 10. Este conjunto pode ser definido por uma função de pertinência discreta apresentada na tabela abaixo. Os elementos com valores de função de pertinência iguais a zero foram desconsiderados. A representação gráfica do conjunto é mostrada a seguir.

x	7	8	9	10	11	12	13
$\mu_A(X)$	0,2	0,6	0,8	1	0,8	0,6	0,2

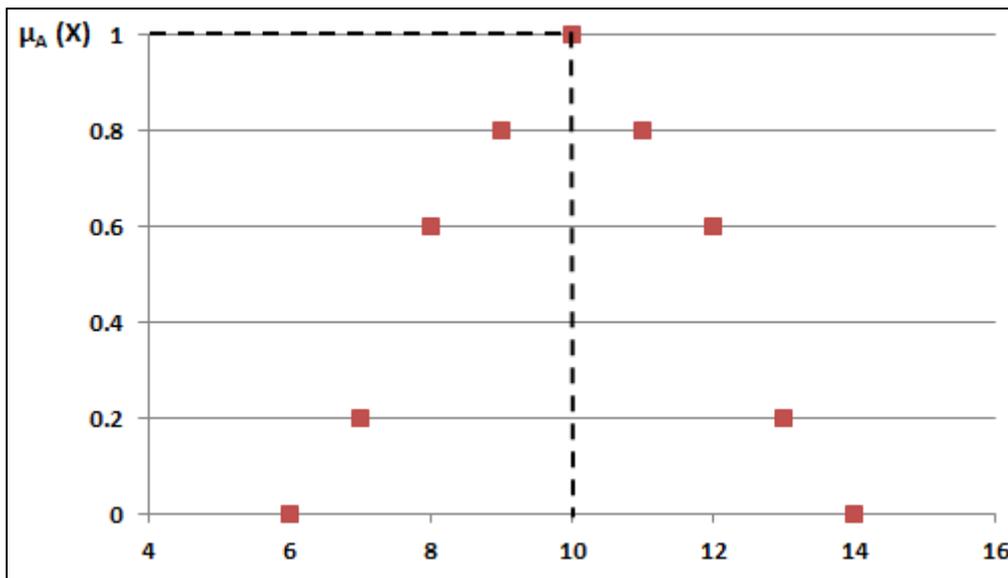


Figura 6 – Representação gráfica da função de pertinência.

4.2.3 – FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

A função de pertinência é o componente crucial de um conjunto *fuzzy* e todas as operações realizadas pelos conjuntos *fuzzy* são definidas pelas suas funções de pertinência. O intervalo de uma função de pertinência é um subconjunto de números reais não negativos, sendo o maior número um número finito (Zimmermann, 2001).

Não existem regras para a definição de uma função de pertinência para cada área específica. Um ponto importante é que aplicações muito sensíveis à escolha de diferentes funções de pertinência são inadequadas para modelagem *fuzzy*.

4.2.4 – VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

A motivação para o uso de palavras ou frases em vez de números na lógica *fuzzy*, é que caracterizações linguísticas são, em geral, menos específicas do que caracterizações numéricas (Zimmermann, 2001). Uma variável linguística *fuzzy* é uma variável cujo valor é expresso qualitativamente por um termo linguístico (por exemplo, um adjetivo) e quantitativamente por uma função de pertinência (Braña, 2008).

Como exemplo, consideremos a variável “*tensão*”. Suponhamos que essa variável possa assumir os valores linguísticos “*muito baixa, baixa, normal, alta e muito alta*”. O conjunto de valores assumidos pela variável linguística é denominado Conjunto

de Termos e representado por $T(x)$, onde x é a variável estudada. Os valores assumidos pela variável linguística são representados por conjuntos *fuzzy* definidos pelas correspondentes funções de pertinência (Falcão, 2010).

Na Figura 7 essas funções de pertinência são apresentadas para a variável tensão, supondo variações em torno do valor nominal em “por unidade” (pu):

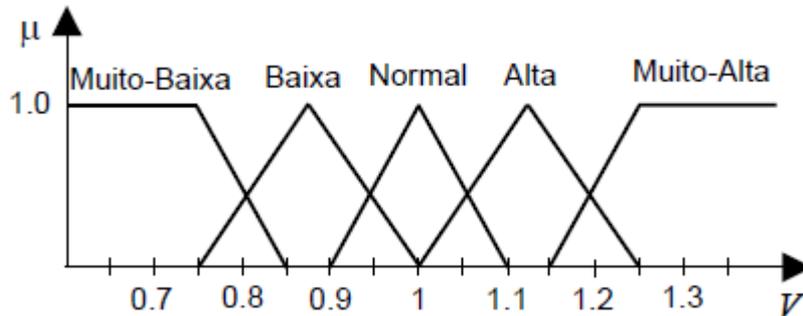


Figura 7 – Representação gráfica das funções de pertinência da variável tensão (Falcão, 2010)

4.2.5 – OPERAÇÕES COM CONJUNTOS FUZZY

Do mesmo modo que os conjuntos tradicionais, os conjuntos *fuzzy* também possuem operações, e como dito anteriormente, são realizadas através de suas funções de pertinência. A seguir são apresentados os conceitos indicados por Zadeh, em 1965, que formalizam uma estrutura consistente para os conjuntos *fuzzy*.

As operações são realizadas de forma similar às feitas em conjuntos tradicionais e são apresentadas a seguir. Admitam-se os conjuntos $A \subset X$ e $B \subset X$. Deste modo:

- União

$$A \cup B = \{(x, \mu_{A \cup B}(x)), x \in U\}$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

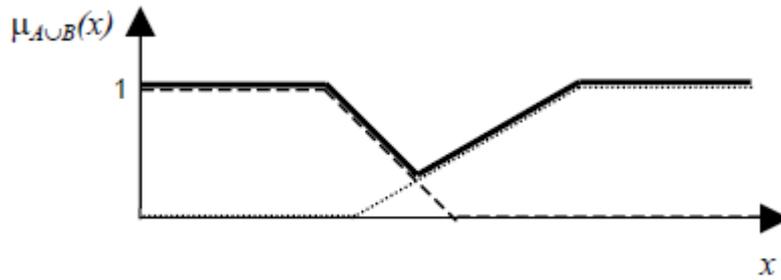


Figura x

Figura 8 – Operação união em conjuntos *fuzzy* (Falcão, 2010)

- Interseção

$$A \cap B = \{(x, \mu_{A \cap B}(x)), x \in U\}$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

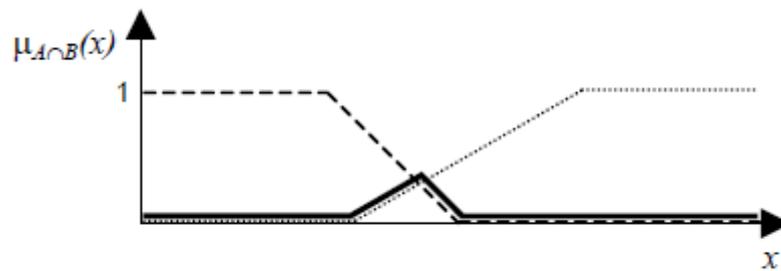


Figura 9 – Operação interseção em conjuntos *fuzzy* (Falcão, 2010)

- Complemento

$$A^c = \{(x, \mu_{A^c}(x)), x \in U\}$$

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

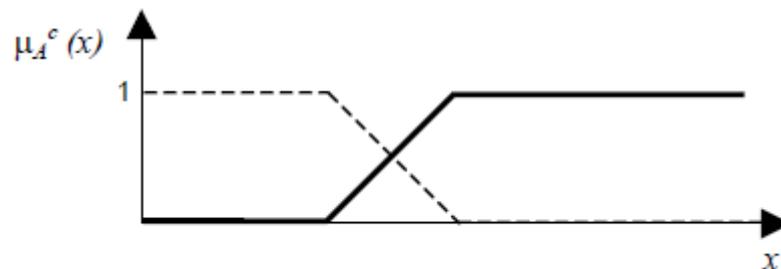


Figura 10 – Operação complemento em conjuntos *fuzzy* (Falcão, 2010)

- Propriedades

Comutatividade: $A \cup B = B \cup A; A \cap B = B \cap A$

Associatividade: $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C); (A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$

Idempotência: $A \cup A = A; A \cap A = A$

Distributividade: $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$

4.2.6 – DEFINIÇÕES BÁSICAS DE CONJUNTOS FUZZY

Sendo um conjunto *fuzzy* $A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\}$:

Conjunto suporte: $S(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\}$. Ou seja, o suporte de um conjunto *fuzzy* é o conjunto de elementos de X que possuem grau de pertinência maior que zero.

Altura: $H(A)$. É o maior grau de pertinência dentre todos os elementos de A .

Conjunto *fuzzy* normalizado: se $H(A) = 1$, ou seja, um conjunto *fuzzy* A é chamado de normal quando a sua altura é igual a 1, ou seja, pelo menos um grau de pertinência, dos elementos que compõem o conjunto, possui valor máximo, enquanto que os conjuntos que não possuem altura igual a 1 são chamados de subnormal.

Cardinalidade: $|A| = \sum \mu_A(x)$ (discreto) ou $|A| = \int \mu_A(x) dx$ (contínuo).

Corte de nível- α ou corte- α : $A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$. Corresponde ao conjunto que contém todos os elementos do conjunto universo X com grau de pertinência em A maior ou igual a α .

Conjunto *fuzzy* convexo: se $\forall x_1, x_2 \in X$ e $\forall \lambda \in [0, 1]$ então: $\mu_A[\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2] \geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)]$.

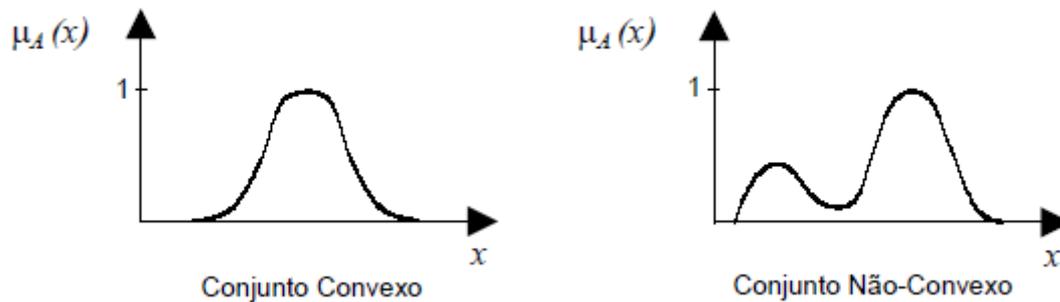


Figura 11 – Convexidade de conjuntos *fuzzy* (Falcão, 2010)

4.3 – LÓGICA *FUZZY*

Na lógica clássica, envolvendo conjuntos tradicionais, proposições são declarações envolvendo termos previamente definidos. Proposições podem ser combinadas de diversas formas, produzindo resultados verdadeiros ou falsos.

Sejam duas proposições denominadas de R e S , seguem abaixo exemplos de combinações dessas proposições (Zimmermann, 2001) e (Falcão, 2010):

- Conjunção ($R \wedge S$) – Afirma-se a verdade simultânea de duas proposições distintas;
- Disjunção ($R \vee S$) – Afirma-se a verdade de uma ou duas proposições;
- Condicional ($R \Rightarrow S$) – A verdade de uma proposição implica na verdade da outra;
- Equivalência ($R \Leftrightarrow S$) – Afirma-se que ambas as proposições são verdadeiras ou falsas;
- Negação ($R \neg S$) – Realiza-se uma proposição à frase “*é falso que...*”.

Dependendo dos valores lógicos atribuídos a cada uma das proposições é possível construir a Tabela-Verdade abaixo:

Tabela 2 – Tabela-verdade de proposições lógicas

R	S	$R \wedge S$	$R \vee S$	$R \Rightarrow S$	$R \Leftrightarrow S$	$R \neg S$
V	V	V	V	V	V	F
V	F	F	V	F	F	F
F	V	F	V	V	F	V
F	F	F	F	V	V	V

Assim como visto no caso dos conjuntos, a utilização da lógica tradicional na lógica *fuzzy* também é realizada pelas funções de pertinência. Aqui, é feita a substituição das funções de pertinência booleanas (0 ou 1, Verdadeiro ou Falso) pelas funções de pertinência *fuzzy*, definidas no intervalo entre 0 e 1, no caso de conjuntos normalizados.

Sejam os conjuntos *fuzzy* A e B , com elementos $x \in A$ e $y \in B$. Deste modo, a proposição:

Se x é A , Então y é B tem uma função de pertinência $\mu_{A \rightarrow B}(x,y) \in [0, 1]$.

4.4 – SISTEMAS FUZZY

Nesta seção serão abordados a teoria sobre regras em sistemas *fuzzy* e o sistema de inferência *fuzzy*, que abrange as seguintes etapas: a *fuzzy*ificação, *defuzzy*ificação e inferência realizada nos consequentes das regras *fuzzy*. Ao final, um exemplo ilustrativo mostrará o funcionamento do sistema *fuzzy*.

4.4.1– REGRAS FUZZY

Todo o conhecimento do projetista do sistema *fuzzy* sobre o processo a ser controlado é armazenado como regras. Assim, as regras têm uma influência básica sobre o comportamento do sistema e, portanto, deve ser formulada com exatidão. O desenvolvimento de regras pode ser demorado, e os projetistas de um sistema *fuzzy* têm de traduzir o conhecimento do processo em regras adequadas (Zimmermann, 2001).

A regra *fuzzy* é composta por um antecedente (a parte “*Se*”) e um conseqüente (a parte “*Então*”), construindo a seguinte estrutura:

Se <Antecedentes> Então <Consequente>

Os antecedentes possuem uma condição (ou premissa), enquanto que a parte conseqüente descreve uma condição ou ação a ser tomada quando as premissas forem verdadeiras.

Uma diferença entre os antecedentes de regra *fuzzy* e de uma regra clássica é que a regra *fuzzy* descreve uma condição elástica, ou seja, uma condição que pode ser parcialmente satisfeita; já a regra clássica descreve uma condição rígida, pois a regra não funciona se os antecedentes forem completamente satisfeitos (Braña, 2008).

4.4.2– ESTRUTURA DE SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

O sistema de inferência *fuzzy* possui a seguinte configuração apresentada na Figura 12. Nos próximos tópicos serão apresentados os componentes do sistema *fuzzy*.

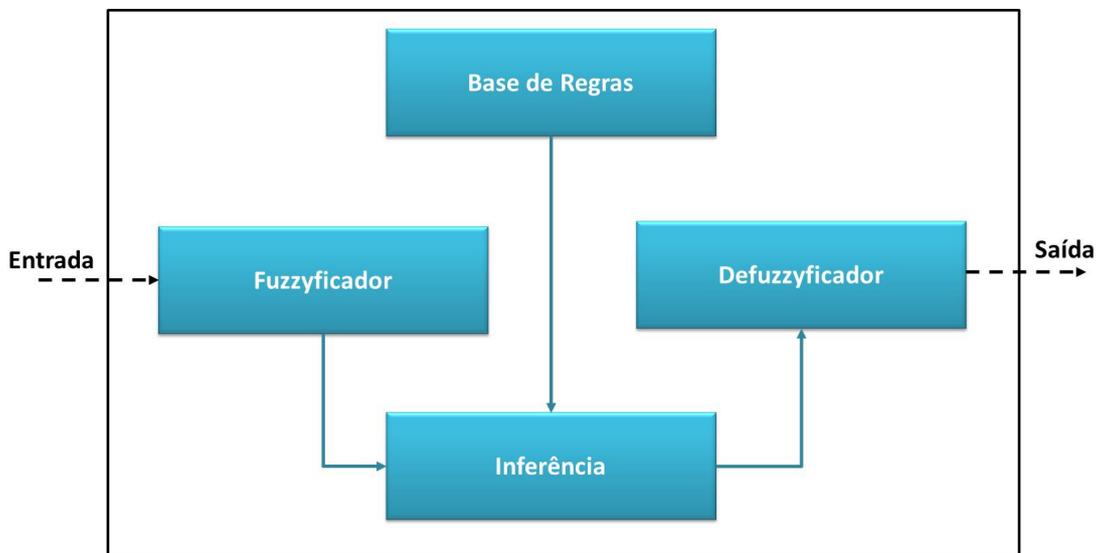


Figura 12 – Sistema de Inferência *fuzzy*

4.4.2.1 – ENTRADA

Representa as variáveis de entrada que serão avaliadas no sistema *fuzzy*, possuindo funções de pertinência ao longo do espectro de análise. No caso da presente tese, este espectro irá de 0 a 10, que são as avaliações possíveis para cada uma das variáveis de entrada.

4.4.2.2 – BASE DE REGRAS

É um conjunto de regras do tipo “*Se...Então*” criadas pelo especialista.

Regra (r): *SE u_1 é F_1^r e u_2 é F_2^r e ... u_n é F_n^r ENTÃO v é G^r , $r = 1, \dots, N$*

onde F_i^r , $r = 1, \dots, N$, e G^r são conjuntos *fuzzy* definidos em $U_i \subset \mathcal{R}$, $r = 1, \dots, N$, e $V \subset \mathcal{R}$, respectivamente.

4.4.2.3 – FUZZYFICADOR

Determina o grau de pertinência de cada entrada no antecedente da regra. Se o antecedente tem mais de um componente, os operadores *fuzzy* E (parametrizados na tese como mínimo) e OU (parametrizados na tese como máximo) são utilizados para combinar os efeitos, como descrito abaixo (Falcão, 2010):

$$\alpha_r = \min_{i=1, \dots, n} \{ \mu_i(u_i) \} \text{ ou } \alpha_r = \max_{i=1, \dots, n} \{ \mu_i(u_i) \}$$

Sendo:

α_r : combinação do grau de pertinência dos antecedentes da regra;

$\mu_i(u_i)$: grau de pertinência do *i-ésimo* antecedente para o valor da *i-ésima* entrada (u_i);

4.4.2.4 – INFERÊNCIA

Nesta etapa é determinado o grau de validade dos consequentes das regras e combinam-se os resultados no conjunto *fuzzy* de saída. O princípio utilizado assume que “*regras com baixo grau de pertinência no antecedente (α_r) devem ter pouca validade no consequente*”. Esse processo é implementado pelo operador Max-Min (ou Mandani):

$$\mu_G = \text{Max} \{ \text{Min} \{ \alpha_r, \mu_i(ui) \}, \{ \mu_r(ui) \} \}$$

A operação acima equivale a redefinir os conjuntos *fuzzy* associados ao conseqüente das regras (modificação da forma das funções de pertinência) e a combinação dos mesmos em um conjunto *fuzzy* da saída. Essa operação é realizada em dois passos:

- **Implicação - Min:** “cortando” a função de pertinência do conseqüente no ponto indicado pelo valor α_r (combinação do grau de pertinência dos antecedentes da regra);
- **Agregação - Max:** União dos conjuntos *fuzzy*, representando o conseqüente das regras. A saída do processo de agregação é um conjunto *fuzzy* para cada variável de saída

4.4.2.5 – DEFUZZYFICADOR

Nesta etapa as regiões resultantes na etapa de inferência são convertidas em valores numéricos para a variável de saída do sistema *fuzzy*. Nesta etapa, é feita a correspondência entre a região *fuzzy* criada e o valor esperado pelo especialista. Deste modo, é realizada a transformação da forma fuzzyficada para forma determinística ou precisa, determinando o valor da saída do sistema proposto (Neto, et al., 2006).

Há inúmeras técnicas de defuzzyficação e as mais usadas são: centroide, bissetor, primeiro valor máximo e valor médio dos máximos. No presente trabalho é utilizado o método centroide.

Este método escolhe a ação de controle que corresponde ao centro de massa com pertinência maior do que zero. A área é ponderada com o valor da função de pertinência. A ideia deste método é o de agregar as informações sobre possíveis ações de controle, que são representadas pela função de pertinência (Zimmermann, 2001).

4.4.2.6 – SAÍDA

Representa as variáveis de saída que serão avaliadas no sistema *fuzzy*, possuindo funções de pertinência ao longo do espectro de análise. No caso da presente tese, este espectro irá de 0 ao impacto máximo possível de cada variável de saída. As variáveis de saída analisadas na tese são: impacto na energia e impacto na demanda máxima.

4.4.3 – EXEMPLO DE SISTEMA DE INFERÊNCIA

Abaixo será apresentado um exemplo de funcionamento de um sistema de inferência *fuzzy*, baseado no exemplo disponibilizado pelo manual do *toolbox* do Matlab® para sistema *fuzzy*, com adaptações para o presente trabalho. As funções de pertinência e valores informados não são os usados na modelagem do problema.

- **Objetivo do sistema:** Determinação do impacto na demanda máxima na resposta da demanda a partir de informações nas variáveis de entrada “*Sistema de Tarificação*” e “*Projeto-Piloto*”.

- **Regras:**

Regra 1: SE Sistema de Tarificação é fraco OU Projeto-Piloto é fraco, ENTÃO Impacto é baixo.

Regra 2: SE Sistema de Tarificação é médio, ENTÃO Impacto é médio.

Regra 3: SE Sistema de Tarificação é forte OU Projeto-Piloto é forte, ENTÃO Impacto é forte.

- **Funções de Pertinência:** As avaliações podem ser dadas de 0 a 10 e o impacto medido entre 0 a 30%.

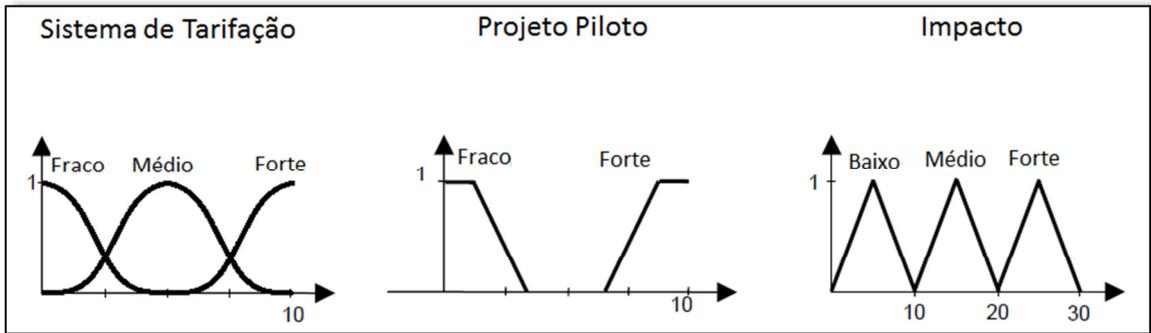


Figura 13 – Funções de Pertinência

- **Fuzzyficação:** Grau de pertinência das variáveis de entrada.

Notas atribuídas - *Sistema de Tarifaço*: **7,5**

Projeto-Piloto: **8,0**

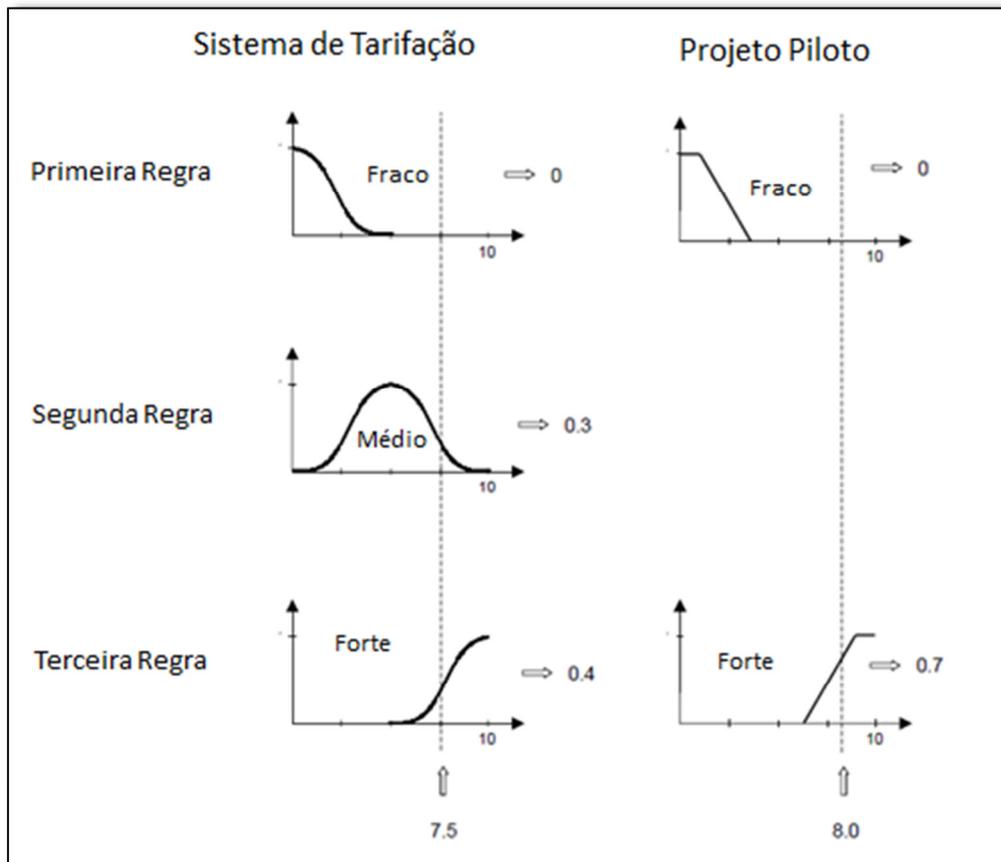


Figura 14 – Operação de fuzzyficação

- **Aplicação do Operador Fuzzy:** Realização da combinação dos antecedentes. No exemplo abaixo é utilizado o operador *fuzzy* “OR”, que seleciona o valor máximo entre os dois valores.

Regra 1: Sistema de Tarifação é fraco OU Projeto-Piloto é fraco: $\max [0, 0] = 0$

Regra 2: Sistema de Tarifação é médio: **0.3**

Regra 3: Sistema de Tarifação é forte OU Projeto-Piloto é forte $\max [0.4, 0.7] = 0.7$

- **Etapa de Inferência:** Nesta etapa ocorre o corte das funções de pertinência no valor determinado pelo operador *fuzzy*, fase essa chamada de implicação; posteriormente é realizada a combinação dos conjuntos *fuzzy* de cada regra criada em um único conjunto *fuzzy*, na fase chamada de agregação.

No exemplo abaixo é utilizado o método de implicação “mínimo” e o método de agregação “máximo”, os mesmos utilizados na parametrização da tese.

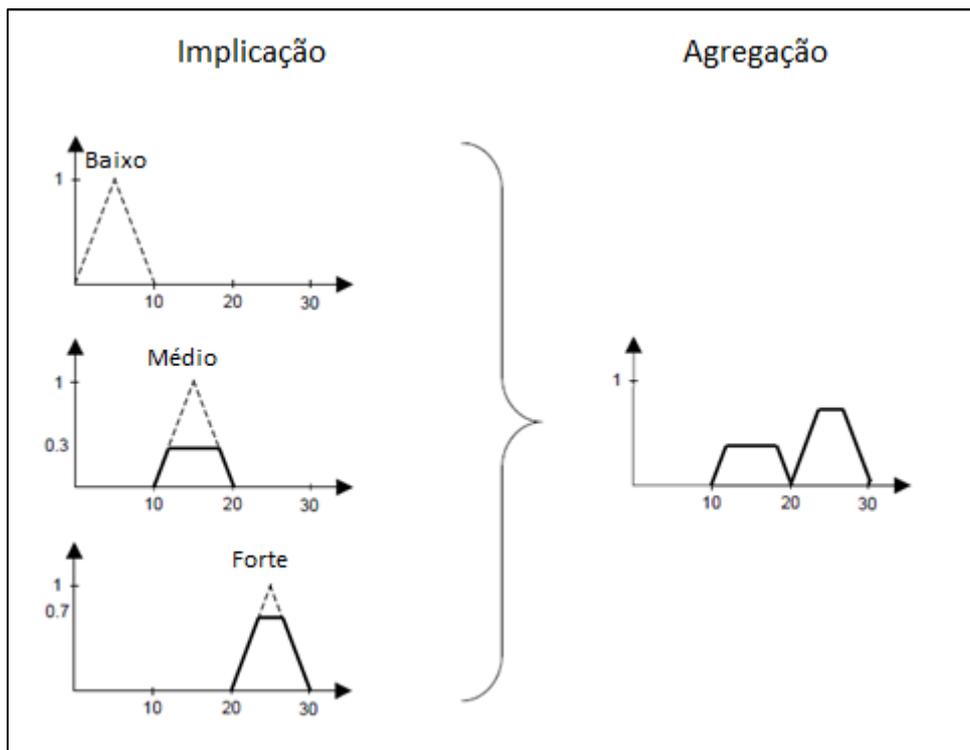


Figura 15 – Etapa de Inferência

- **Defuzzificação:** Nesta etapa as regiões resultantes na etapa de inferência são convertidas em valores para a variável de saída do sistema *fuzzy*. No exemplo

abaixo é utilizado o método centroide, o mesmo usado na parametrização do sistema *fuzzy* da tese. Na defuzzyficação realizada, o resultado encontrado foi 23. Ou seja, o impacto na demanda máxima na resposta da demanda seria de 23%.

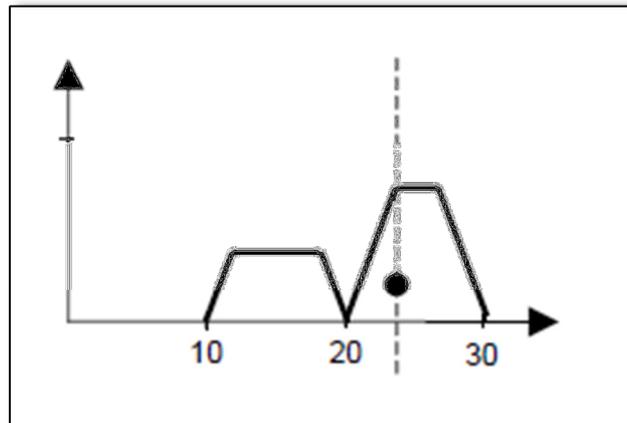


Figura 16 – Defuzzyficação

CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

5.1 – INTRODUÇÃO

No Brasil, o principal documento governamental sobre planejamento energético é o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE, elaborado anualmente pela EPE. O PDE possui uma visão integrada da expansão da demanda e oferta de diversos energéticos para os próximos dez anos. Como exemplo, é realizada a projeção de diversas variáveis, como demanda de energia, geração, transmissão e produção de petróleo e gás natural. A partir deste documento podem-se delinear estratégias de desenvolvimento mais condizentes com a realidade do país e até mesmo antever determinados problemas estruturais e assim tomar medidas necessárias para que os mesmos sejam eliminados.

Um dos capítulos mais importantes do PDE é o referente à projeção de geração de energia elétrica. Neste capítulo, é definido um cenário para expansão do parque de geração de energia elétrica e interligações entre os subsistemas no horizonte decenal (Ministério de Minas e Energia - MME, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014).

Um dos principais dados de entrada para a formulação do planejamento da geração no PDE é a previsão da demanda, pois um dos princípios básicos do planejamento é o atendimento do mercado em sua totalidade no horizonte indicado.

No último PDE, o único abatimento realizado na projeção de demanda no horizonte decenal refere-se à eficiência energética e geração distribuída. No último documento lançado foram contemplados ganhos de eficiência energética em um total de 5,3% do consumo total de eletricidade no horizonte decenal, referindo-se a uma redução de geração na ordem de 44 GWh. Para geração distribuída, apenas a partir do PDE 2023 foi realizada uma projeção para geração distribuída, principalmente devido à Resolução Normativa 482/2012. Mas, de acordo com o próprio documento, optou-se por projetar a difusão desta tecnologia com base na manutenção da política de *net metering*, sem políticas de incentivo para o horizonte de estudo. Desta forma, e reconhecendo-se que a magnitude e extensão da difusão tecnológica da fotovoltaica é também função das

políticas de incentivos destas fontes no país, pode-se afirmar que a projeção é conservadora. (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014). No PDE 2024, foi estimado que a geração distribuída de pequeno porte pode gerar cerca de 1,6 TWh no final do horizonte de estudo.

Como pode ser visto, as tecnologias envolvidas no campo de *smart grid* não são contempladas na análise de projeção de demanda, sendo que estas tecnologias trarão impactos tanto no consumo de energia quanto na demanda máxima do SIN, e as mesmas não foram analisadas nos documentos já lançados pelo PNE 2050 e PDE 2024. Assim, o presente trabalho tem o objetivo de realizar previsões de inserção de tecnologias *smart grid* que, de acordo com a literatura técnica internacional, terão maior desenvolvimento nos próximos anos. São elas: Resposta da Demanda, Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética.

O estudo será de longo prazo, até 2050, utilizando como cenário de referência para dados de energia o PNE 2050, tendo como outros anos de análise os anos de 2030 e 2040. Este ano foi escolhido por ser o horizonte de estudo mais longo já feito no Brasil. Os impactos a serem analisados serão: Impacto na Energia e Impacto na Demanda Máxima. Para a previsão das emissões evitadas de CO₂ pela inserção de tecnologias *smart grid* foi realizado um ensaio a partir dos cenários apresentados pela Latin American Modeling Project And Integrated Climate Modelling And Capacity Building In Latin America – LAMP–CLIMACAP até 2050 para o Brasil.

5.2 - METODOLOGIA PROPOSTA

Como observado em Lucena (2012), a previsão do consumo é uma ferramenta de suporte essencial para a tomada de decisões do sistema elétrico, sendo importante para o planejamento da operação e expansão dos sistemas de geração, transmissão e distribuição. A *smart grid* terá importante influência no sistema elétrico brasileiro nos próximos anos e mensurar esse impacto é de suma importância para o bom planejamento do setor do país. Construir uma metodologia para realizar a previsão dos impactos da *smart grid* na demanda de energia requer uma base de dados sólida que permita delimitar com exatidão quais são as áreas que a *smart grid* irá impactar.

A definição da metodologia empreendeu um processo longo e composto de diversas etapas, apresentado na Figura 17 e explicada posteriormente. De forma macro, o processo de construção da metodologia foi composto por três etapas: estudo do tema *smart grid*, modelagem do sistema *fuzzy* e simulação dos cenários. A modelagem do sistema foi realizada pelo toolbox *fuzzy* do software Matlab[®].

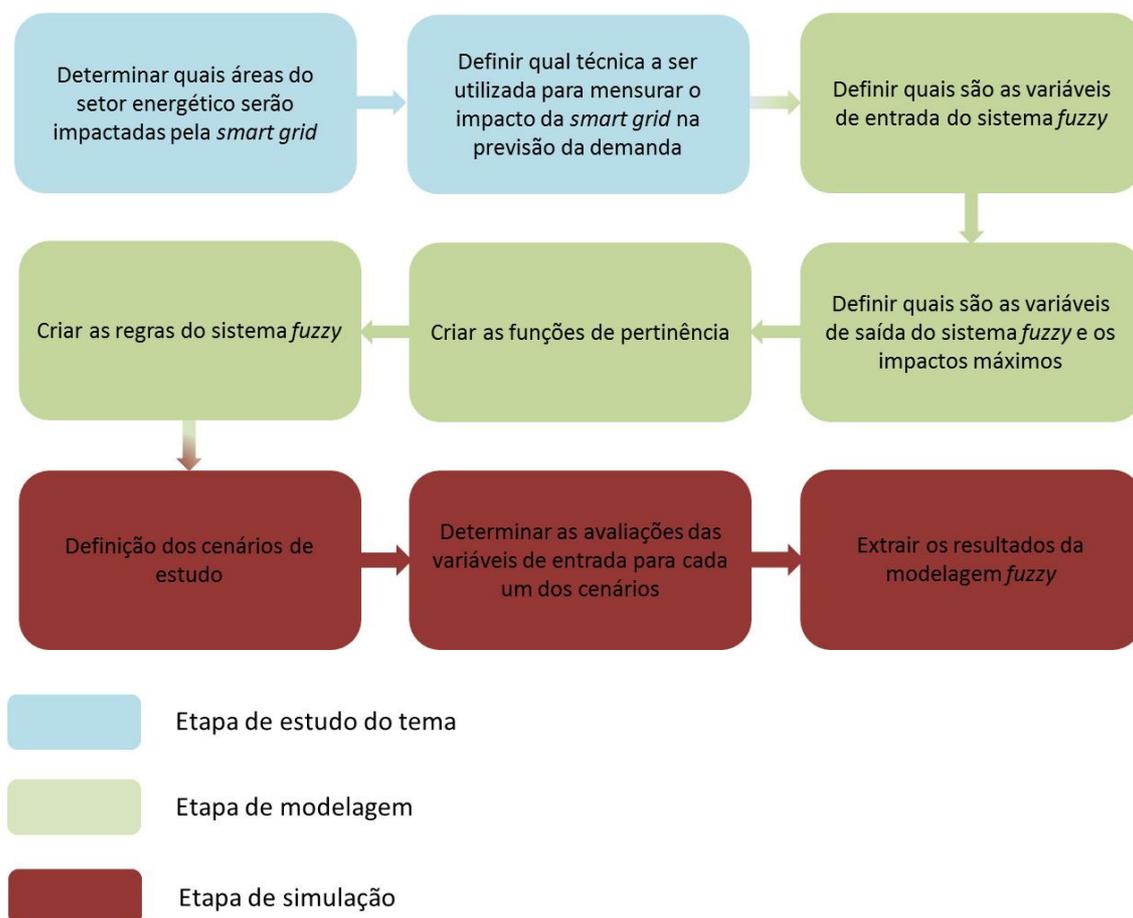


Figura 17 – Etapas do desenvolvimento da metodologia

A primeira etapa consiste em adquirir conhecimento sobre o tema *smart grid*. Descobrir qual seu conceito, função e importância no cenário energético brasileiro e mundial. Para isso, foram consultados livros e relatórios internacionais que estudavam o tema de forma abrangente.

Visto a importância do tema, a próxima etapa consiste em delimitar quais são as áreas no sistema energético que sofrerão impactos com o desenvolvimento da *smart grid*. Dentre as diversas áreas que a *smart grid* irá influenciar nas próximas décadas em várias especialidades, quatro serão profundamente impactadas: Resposta da Demanda,

Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética. Portanto, para a previsão da demanda de longo prazo, será analisado o desenvolvimento destas quatro áreas no âmbito da *smart grid*. Possuindo o PNE 2050 como referência de horizonte de estudo, foi definido que também serão avaliados os anos de 2030 e 2040 para visualizar a tendência dos impactos de cada variável de estudo até o final do horizonte.

O próximo passo foi determinar qual técnica seria adotada para estimar estes impactos. Dentre outras técnicas estudadas, foi escolhida a lógica *fuzzy*, que é um sistema de conceitos para tratar meios de raciocínio que são mais aproximados do que exatos, sendo uma boa técnica para tratar problemas com incerteza para os quais não existem históricos de dados confiáveis, que é o caso do desenvolvimento da *smart grid* no Brasil nos próximos anos. Além disso, é uma técnica que permite trabalhar matematicamente expressões em linguagem natural ou “falada”. Em um conjunto tradicional, uma proposição tem que ser “totalmente verdadeiro” ou “totalmente falso”. Já na teoria *fuzzy*, uma proposição, como por exemplo, o desenvolvimento de sistema de tarifação para veículos elétricos em 2040, pode ser “parcialmente alto”, possuindo um grau de pertinência em relação a esta proposição.

Na construção da metodologia para a presente tese, cinco elementos são essenciais para a perfeita modelagem do problema em um ambiente *fuzzy*: variáveis de entrada, funções de pertinência, regras, variáveis de saída e defuzzificação. Nos próximos tópicos, serão apresentadas as particularidades de cada um deles.

5.2.1 - VARIÁVEIS DE ENTRADA

Representam as variáveis que serão analisadas pelo sistema *fuzzy*, possuindo valores convencionais, ou “crisp”. No caso específico da tese, as variáveis de entrada receberão a denominação de “Dimensões de Análise”, pois a partir delas poderemos dimensionar o impacto da *smart grid* no Brasil.

Portanto, para cada área que a *smart grid* irá impactar (Resposta da Demanda, Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética) foi realizado um estudo profundo para se qualificar quais ações/áreas/tecnologias serão importantes para o pleno desenvolvimento de cada área. Exemplificando: no capítulo 6 foram elencadas quais ações/áreas/tecnologias são importantes no desenvolvimento da

Resposta da Demanda. São elas: Sistema de Tarifação, Projetos-piloto, Regulamentação e Tecnologias & Padrões. Cada um desses itens será representado por uma variável de entrada.

Para cada uma dessas variáveis de entrada, ou dimensões de análise, será dada uma avaliação entre 0 e 10, que corresponderá ao desenvolvimento de cada dimensão de estudo nos cenários avaliados. Este procedimento será realizado para cada uma das áreas de estudo.

5.2.2 - VARIÁVEIS DE SAÍDA

Representam os resultados esperados na metodologia, ou seja, o impacto na demanda no planejamento energético brasileiro. Desta forma, haverá duas variáveis de saída: impacto na energia e impacto na demanda máxima, que possuem resultados independentes entre si.

As variáveis de saída, aqui denominadas de “Impactos nos Sistemas de Energia”, possuem intervalo de estudo entre zero ao impacto máximo de cada tecnologia no horizonte de estudo. O impacto máximo foi estimado em pesquisas realizadas em relatórios, teses, estudos governamentais e resultados de projetos em *smart grid* em todo o mundo. Maiores detalhes sobre o impacto máximo em cada tecnologia serão apresentados ainda neste capítulo nas seções 5.4 a 5.7.

5.2.3 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Para cada variável de entrada e variável de saída foram construídas funções de pertinência, que refletem o conhecimento que o especialista tem em relação à intensidade que a variável de estudo pertence ao conjunto *fuzzy*. A função de pertinência mapeia os elementos da variável estudada no intervalo considerado no estudo. Para a presente tese, foram utilizados dois formatos para as funções de pertinência: gaussiana e seno.

Estes formatos foram utilizados porque possuem o comportamento esperado do desenvolvimento da *smart grid* no Brasil: suavidade no seu formato, sem mudanças abruptas no intervalo de estudo, que corresponderiam a rupturas tecnológicas no

desenvolvimento da smart grid no Brasil. Além disso, ambas possuem o núcleo, a região da função de pertinência com completa pertinência ao conjunto estudado, que pode ser modelado por um intervalo longo de análise, sendo esta uma característica importante para a modelagem deste problema.

No decorrer do processo de construção da metodologia, foram testados outros formatos para as funções de pertinência na tese, como o formato triangular e trapezoidal. Apesar dos resultados com estes formatos serem próximos dos encontrados no resultado final, verificou-se no decorrer do intervalo de discurso destas variáveis (entre 0 e 10) rápidas mudanças nos resultados em pequenas alterações nas avaliações, comportamento decorrente do formato destas funções. Deste modo, o uso destes formatos de funções foi descartado.

Na Figura 18, temos a representação das funções de pertinência da “Dimensão de Análise”, a variável de entrada, “Regulamentação”, na área “Resposta da Demanda”. Em um cenário hipotético, em que a avaliação dada para a variável seja 7, o grau de pertinência na função de pertinência “Forte” é 1; já para a função “Fraca” o valor é pouco superior a 0. Neste momento houve a fuzzyficação da entrada convencional “7” em dois valores.

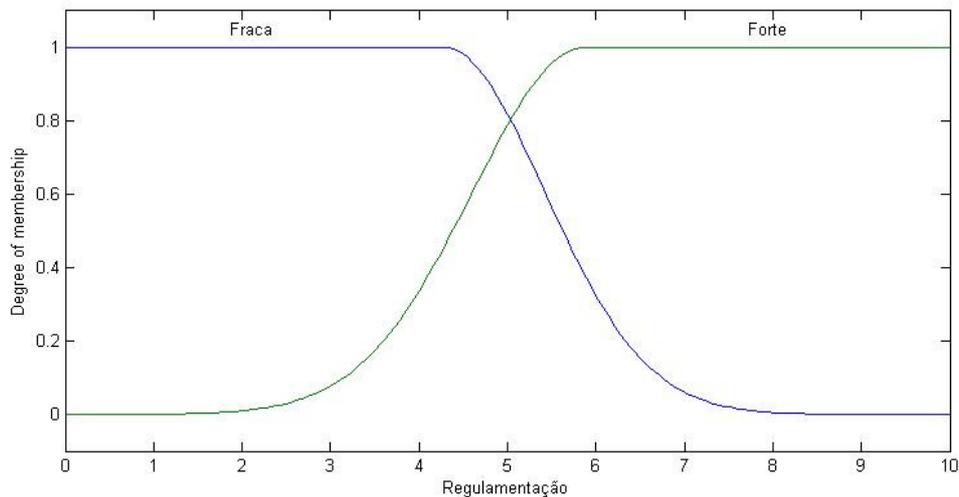


Figura 18 – Funções de pertinência – Regulamentação – Resposta da Demanda

5.2.4 - REGRAS

São regras no formato “*Se ... Então...*” escolhidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*. Tem a função de avaliar o antecedente da regra (a variável de entrada) e aplicar o resultado ao consequente (a variável de saída). As regras podem ser ativadas parcialmente, dependendo da construção do antecedente da regra.

Foram criadas regras com as combinações possíveis de todas as variáveis de entrada de cada área de estudo. As regras são apresentadas no Anexo A.

5.2.5 - CONSTRUÇÃO DOS CENÁRIOS E SIMULAÇÃO

Com o sistema *fuzzy* modelado para a metodologia, é possível construir cenários para o estudo de caso. Esta etapa consiste em, dado o cenário, determinar quais as avaliações serão dadas para cada variável de entrada nas áreas de estudo para que as avaliações reflitam o comportamento esperado do cenário escolhido. Ou seja, em um cenário que é esperado um bom desenvolvimento das tecnologias em *smart grid*, as avaliações serão altas. Do contrário, as avaliações serão menores.

As avaliações do presente trabalho foram dadas pelo autor a partir dos estudos realizados, experiências nacionais e internacionais no âmbito da *smart grid* e, principalmente, o esperado desenvolvimento no Brasil.

Outro especialista pode dar diferentes avaliações para cada uma das dimensões de análise, de acordo com o seu próprio entendimento do assunto. Mas, com o sistema *fuzzy* bem modelado e robusto, os resultados encontrados não irão diferir muito do aqui apresentado, resultando em impactos da mesma ordem de grandeza.

Com as avaliações dadas em todas as variáveis de entrada das tecnologias estudadas, o cenário está construído, sendo possível avaliar o impacto da *smart grid* na previsão da demanda do sistema energético brasileiro.

Nas próximas seções serão apresentadas cada uma das tecnologias, com suas respectivas “Dimensões de Análise”.

5.3 – RESPOSTA DA DEMANDA

A resposta da demanda é de suma importância para o pleno desenvolvimento da *smart grid*, sendo que sem o seu total avanço, dificilmente todas as outras tecnologias irão chegar ao máximo ponto de evolução, pois a resposta da demanda e a tarifação dinâmica atuam fortemente em todas as dimensões da *smart grid*. O gerenciamento da demanda, na forma de resposta da demanda, está intimamente ligado com a maior participação do consumidor no mercado energético, deixando de ser apenas um simples usuário para ter forte influência na demanda diária de energia e no comportamento da curva de carga do sistema. Logo, em um cenário em que a resposta da demanda está desenvolvida, o fluxo de informação e de energia flui nos dois sentidos, entre a concessionária e os consumidores.

Para que isso ocorra, é imprescindível a presença de infraestrutura de medição avançada, por meio de *smart meters*. A partir da disseminação dos *smart meters*, haverá a possibilidade de se desenvolver ações voltadas à resposta da demanda, como a tarifação dinâmica. Este não é um conceito novo, pois desde a década de 70 são desenvolvidos experimentos de preços em eletricidade pela já extinta Federal Energy Administration – FEA, organização do governo dos EUA criada em 1974 para enfrentar a crise de petróleo. Mas apenas a grave crise de energia ocorrida na Califórnia, em 2000 e 2001, em que uma nova onda de estudos e incentivos financeiros voltou a ser direcionada para o gerenciamento da demanda, impulsionou o desenvolvimento de diversos projetos neste tema.

Em análise realizada em diversas referências, a importância do desenvolvimento da resposta da demanda no sucesso da *smart grid* é destacada. Portanto, foi criado um módulo para a implementação da modelagem *fuzzy*. Ela é composta por quatro variáveis de entrada: Sistemas de Tarifação, Tecnologias & Padrões, Regulamentação e Projetos-piloto, apresentadas a seguir.

5.3.1 – VARIÁVEIS DE ENTRADA – DIMENSÕES DE ANÁLISE

As variáveis de entrada representam uma importante parte da construção da modelagem *fuzzy*, pois a partir dos dados destas variáveis, em conjunto com as regras

criadas, as variáveis de saída – no caso, os impactos decorrentes da introdução da resposta da demanda – podem ser mensuradas em um universo *fuzzy*. A seguir são apresentadas as variáveis de entrada, bem como as funções de pertinência que as regem.

5.3.1.1 – SISTEMAS DE TARIFAÇÃO

No Brasil, para grande maioria dos consumidores de baixa tensão é cobrado um único valor pelo consumo de energia elétrica, independentemente da hora do dia e do período do ano. O objetivo da tarifação dinâmica é oferecer diferentes preços de energia em diferentes períodos de tempo do dia e ano para refletir o custo variante do tempo no suprimento de eletricidade (Faruqui & Palmer, 2011).

Um sistema de tarifação que reflita de forma mais real o custo da energia de forma dinâmica pode diminuir o impacto na demanda do principal “vilão” do sistema elétrico brasileiro residencial: o chuveiro elétrico. Em vários meses do ano, a demanda máxima do SIN ocorre entre 18-19h, devido em grande parte do uso do chuveiro elétrico. Com o uso de tarifas dinâmicas, que indicam ao consumidor que naquele espaço de tempo a energia está mais cara, há a possibilidade de menor uso do chuveiro, substituição por outra tecnologia ou alteração do horário de banho.

De acordo com a teoria econômica, quase todas as mercadorias obedecem à lei da procura decrescente, ou seja, a quantidade procurada diminui quando o preço aumenta. Esta teoria baseia-se em dois pilares: o efeito substituição, que reflete a troca de um bem similar para outro; e efeito renda, que traduz a perda do poder econômico com o aumento de determinado preço (Souza, 2010).

A elasticidade é o tamanho do impacto que a alteração em uma variável, como o preço, exerce sobre outra variável, como a demanda. Ela pode ser inelástica, quando a quantidade demandada não responde com muita intensidade a alterações nos preços; elástica, quando a quantidade demandada responde com muita intensidade a alterações nos preços; unitária, quando a quantidade demandada muda na mesma proporção que o preço se altera; perfeitamente inelástica, quando a quantidade demandada não muda se houver alteração nos preços; e perfeitamente elástica, quando a quantidade demandada muda infinitamente com uma alteração nos preços.

Em mercados de energia elétrica, a demanda tende a ser mais elástica no longo prazo, em função da possibilidade dos consumidores substituírem equipamentos ineficientes por tecnologias de menor consumo. No curto prazo, a demanda tende a ser pouco elástica (ou rígida), pois a energia elétrica é um bem não estocável e seu fornecimento em tempo real está sujeito a restrições técnicas. De acordo com (Campos, et al., 2014), há uma grande variedade de valores de elasticidade mensurados para o Brasil, tanto de longo e curto prazo. Para consumidores residenciais, a elasticidade no longo prazo pode chegar a -0,413 e no curto prazo a elasticidade, de acordo com um dos estudos, pode ser de -0,270.

Atualmente, há uma série de tipos de tarifação dinâmica, desde os mais simples aos mais complexos. O ganho principal de tarifas mais dinâmicas é produzir ganhos econômicos em larga escala, e não apenas em kWh vendidos a alguns clientes ou em poucas horas durante eventos críticos, além de refletir melhor os custos de suprimento de energia (U.S. Department of Energy Smart Grid Investment Grant, 2010).

A seguir os sistemas de tarifação já praticados no mundo são apresentados por ordem de complexidade.

5.3.1.1.1 – TIME OF USE – TOU

A tarifa Time of Use - TOU divide o dia em períodos de tempo e oferece uma programação de taxas para cada período. Por exemplo, um período de demanda máxima pode ser definido como o período de duas ou mais horas. O preço da energia é mais elevado durante o período de demanda máxima do sistema e menor durante o período fora da ponta, refletindo a variação média do custo da energia, indicando que o consumidor deve diminuir seu consumo nestes períodos de maior uso do sistema elétrico.

Em alguns casos, as taxas de TOU pode ter um período intermediário, ou até dois períodos de pico. Além disso, os preços podem variar de acordo com estações do ano ou períodos secos e úmidos. Com uma tarifa TOU, há certeza de quanto as taxas custarão e quando elas irão ocorrer (The Brattle Group, 2012). A tarifação tipo TOU é a

mais difundida no mundo (Souza, 2010) e é a “porta de entrada” para a tarifação dinâmica.

Como desvantagem, a tarifa TOU não é dinâmica, e, portanto, não reflete a situação em tempo real do sistema elétrico, mesmo em dias críticos de atendimento a demanda.

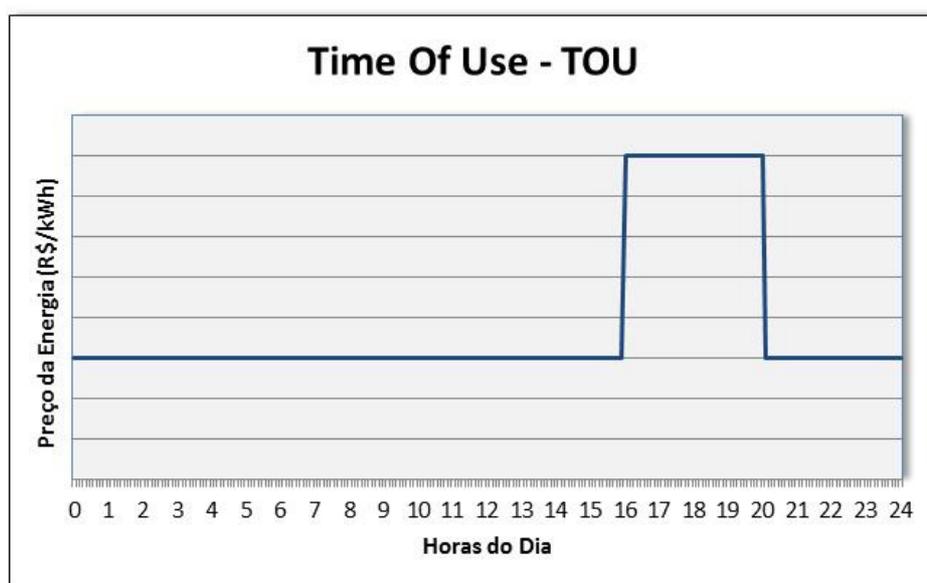


Figura 19 – Tarifa TOU (Faruqui & Sergici, 2009)

Programas de redução de demanda, no mesmo estilo da TOU, já são usados por muito tempo ao redor no mundo. No Brasil, desde a década de 80 é utilizada a estrutura tarifária horossazonal, onde há a diferenciação do preço de energia por horário (ponta e fora da ponta) e regime hidrológico anual (período úmido e seco). Este tipo de tarifação só é usada por consumidores conectados na rede acima de 2,3 kV e inclusos nas tarifas verde e azul. A tarifa verde é composta por quatro valores diferenciados de acordo com o horário do dia e a época do ano, além de um valor fixo. Já a tarifa azul é compulsória para todos os consumidores conectados na tensão igual ou superior a 69kV,

A ANEEL aprovou em 2011, durante reunião pública da diretoria, a alteração da estrutura tarifária aplicada ao setor de distribuição de energia. O novo regulamento prevê a aplicação de tarifas diferenciadas por horário de consumo, oferecendo tarifas mais baratas nos períodos em que o sistema é menos utilizado pelos consumidores, a denominada tarifa branca.

Assim, os consumidores de baixa tensão terão duas modalidades tarifárias a escolher:

- **Modalidade convencional:** monômnia, com um preço de consumo de energia em R\$/MWh sem distinção horária, como já praticado;
- **Modalidade branca:** monômnia, com três preços de consumo de energia em R\$/MWh, de acordo com os postos tarifários.

Os postos tarifários são denominados de: ponta, intermediário e fora de ponta. Sendo eles:

- **Horário de ponta:** período composto por 3 horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, aprovado pela ANEEL para toda a área de concessão, com exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, Corpus Christi e feriados nacionais;
- **Posto intermediário:** definido como o período de 2 horas, sendo 1 hora imediatamente anterior e outra imediatamente posterior ao horário de ponta;
- **Fora de ponta:** será definido como o horário complementar ao de ponta e ao intermediário. Note-se que feriados e finais de semana são considerados período fora de ponta durante todas as horas do dia.

5.3.1.1.2 – CRITICAL PEAK PRICING – CPP

Sob uma taxa Critical Peak Pricing – CPP, os consumidores pagam preços mais altos durante os dias em que o custo de energia está alto ou quando a rede elétrica é severamente estressada (The Brattle Group, 2012). Os preços ficam mais altos, pois um maior número de usinas com custo de geração alto são despachadas para atender a demanda máxima do sistema, encarecendo assim o custo total de suprimento.

Em troca, os participantes recebem um desconto sobre o preço da tarifa padrão durante as outras horas da estação ou ano, para manter constante a receita total anual da concessionária. Os clientes são normalmente notificados de um "evento de demanda

crítica" com um dia de antecedência. Os eventos críticos são limitados por ano, de acordo com a concessionária e o contrato assinado entre as partes.

Uma variação do CPP é o Varying Peak Pricing – VPP, onde é possível variar o preço da energia no momento de demanda máxima. Aproximadamente 20% dos consumidores da concessionária OGE, nos EUA, estão sob a VPP (Faruqui, 2015).

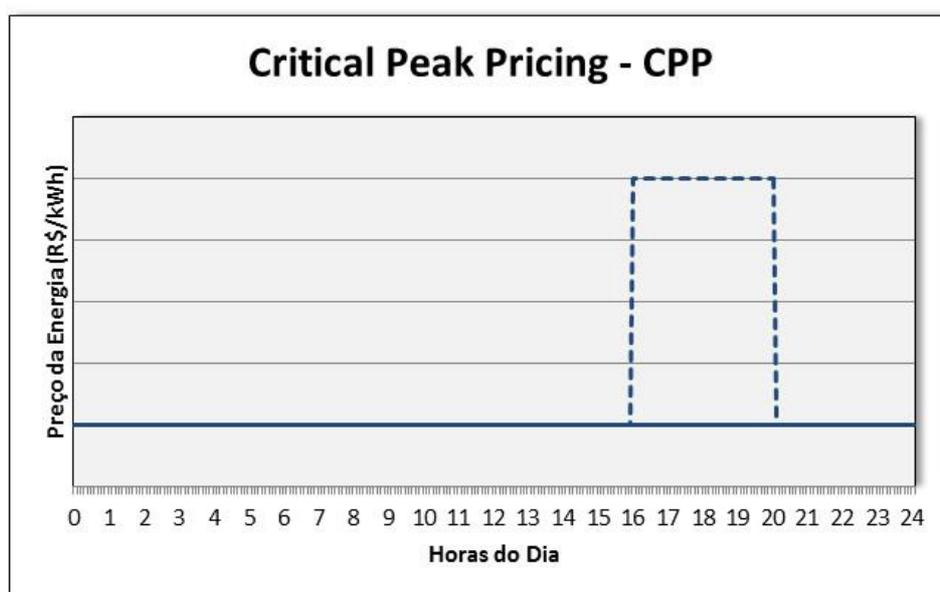


Figura 20 – Tarifa CPP (Faruqui & Sergici, 2009)

5.3.1.1.3 – PEAK TIME REBATE – PTR

Similar ao CPP, só que em vez de cobrar uma taxa mais elevada durante os eventos críticos, os participantes são pagos para as reduções de carga, estimada em relação à previsão de que o cliente teria consumido em condições de tarifa fixa. Se os clientes não desejam participar, basta pagar a tarifa de energia em vigor. Existem projetos-piloto desenvolvidos utilizando PTR, como em Maryland, Washington e na Califórnia (Faruqui & Sergici, 2009).

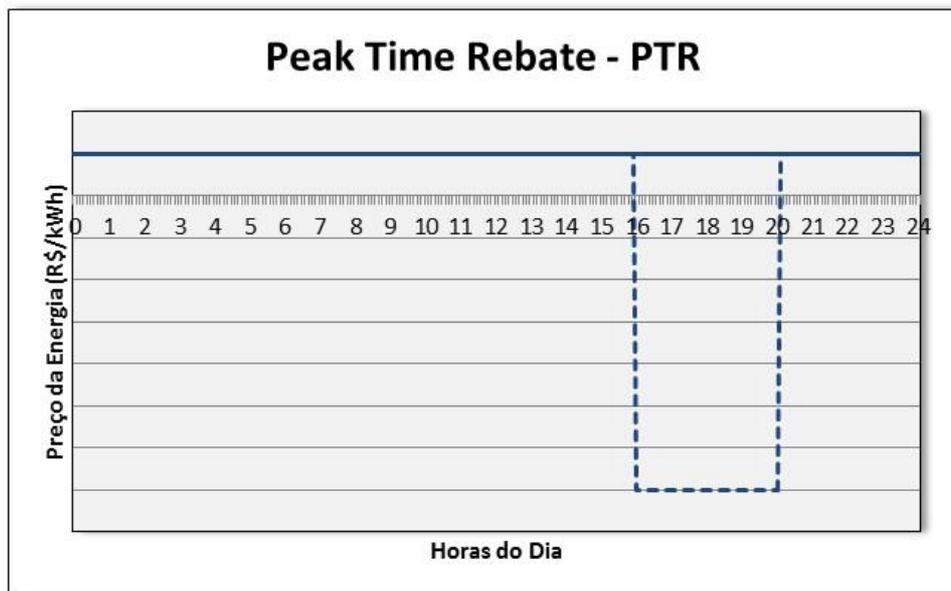


Figura 21 – Tarifa PTR (Faruqui & Sergici, 2009)

5.3.1.1.4 - REAL TIME PRICING – RTP

Os participantes de programas RTP pagam energia a uma taxa que está ligada ao preço de energia por cada hora. Os consumidores são informados sobre os preços de energia por hora com um dia de antecedência ou até uma hora de antecedência. Normalmente, apenas os maiores clientes (acima de um megawatt de carga) em regiões específicas utilizam preços por hora. No entanto, existem duas concessionárias nos Estados Unidos que oferecem RTP a clientes residenciais: AMEREN e Commonwealth Edison (The Brattle Group, 2012). Neste tipo de tarifação mais complexa, os consumidores são incentivados a modificar seu padrão de consumo em resposta a preços, o que contribui para o equilíbrio de mercado, aumentando a segurança do sistema e a diminuição de picos de preços (Souza, 2010).



Figura 22 – Tarifa RTP (Faruqui & Sergici, 2009)

Como dito anteriormente, quanto mais complexo o sistema de tarifação, maior o risco assumido pelo consumidor na forma de variação no preço e também o possível ganho financeiro obtido, conforme apresentado na Figura 23. Além das tarifas apresentadas, aparece a Inclining Block Rates, específica para eficiência energética que será analisada posteriormente; Seasonal Rates, que utiliza tarifas variáveis ao longo de determinados períodos do ano; e Super TOU, que é a tarifa TOU com tarifa muito maior nos períodos de demanda máxima.

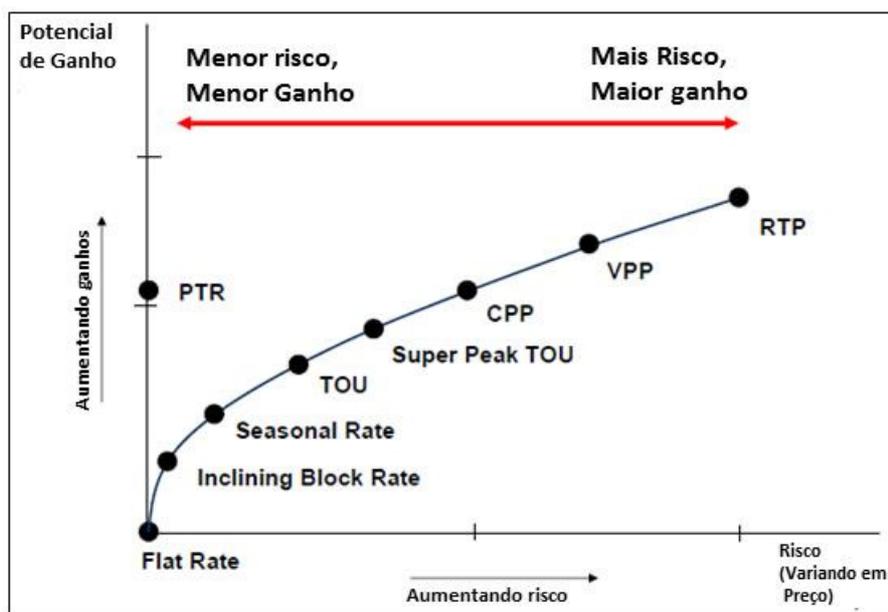


Figura 23 – Relação riscos e ganhos em tarifas dinâmicas (Faruqui & Palmer, 2011)

Baseado em uma avaliação da penetração dos diversos sistemas de tarifação, foram criadas funções de pertinência que representam o desenvolvimento de sistemas de tarifação na resposta da demanda no sistema elétrico brasileiro, como mostrado na Figura 24 e explicada posteriormente. São elas:

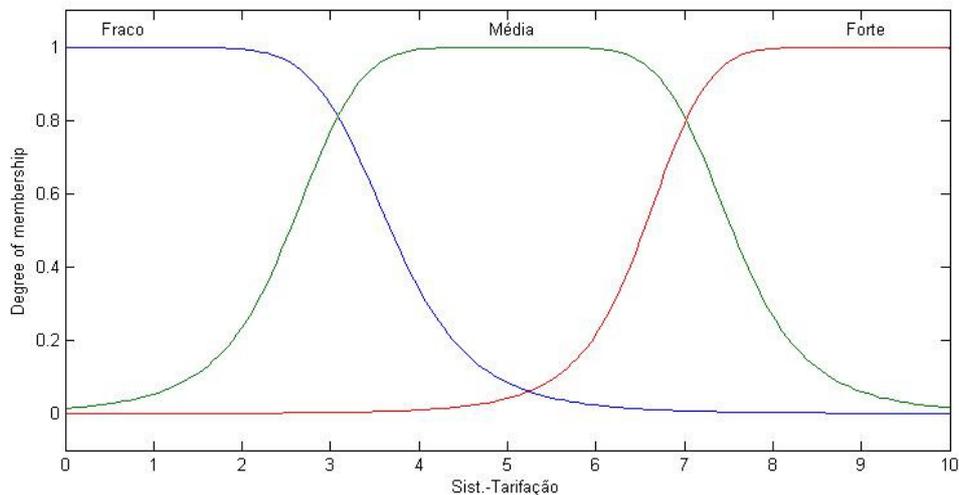


Figura 24 – Funções de Pertinência – Sistemas de Tarifação

- **FRACO** – Representa pouco desenvolvimento de sistemas de tarifação, com apenas a introdução da tarifa branca no Brasil;
- **MÉDIA** – Esta função de pertinência apresenta um maior desenvolvimento da tarifa tipo TOU, além da introdução de um maior leque de opções de sistemas de tarifação, como tarifa tipo CPP, VPP e PTR;
- **FORTE** – Já esta função de pertinência representa pleno uso de tarifa TOU, CPP, VPP e PTR no horizonte de estudo, bem como a introdução de tarifas dinâmicas mais complexas, como a RTP, promovendo assim uma ampla participação do consumidor no mercado de energia por meio da utilização de sistemas de tarifação.

5.3.1.2 – PROJETOS-PILOTO

A criação de projetos-piloto é essencial para o bom funcionamento de qualquer programa voltado à resposta da demanda. E mais importante do que a própria

implementação do projeto em si, é desenvolver ferramentas de análises dos resultados encontrados. De acordo com Kagan et al. (2013), para obter resultados vantajosos, esses programas devem ser desenhados de maneira criteriosa, de maneira que possam obter evidências que sejam válidas tanto para a população selecionada quanto para o restante dos consumidores.

Um projeto-piloto deve cobrir um espaço no tempo considerável, por ao menos um ano, para conseguir captar todos os sinais de comportamento dos clientes, principalmente em um país como o Brasil, que ainda não possui estudos pretéritos que sinalizem a modificação do consumo com a utilização de novas tecnologias em energia e que possui características de consumo de energia diverso nas regiões do país.

Além do aspecto temporal, um ponto importante no design de projetos-piloto é cobrir todas as faixas de renda da população afetada. Como o consumo em diferentes classes é bem diferenciado, é necessário analisar o comportamento principalmente da baixa renda, que possui pouco lastro de mudança no consumo. Pesquisas já realizadas mostram que mesmo na baixa renda há boa diminuição no consumo global e diminuição no horário de ponta (Faruqui & Palmer, 2011).

Outro aspecto interessante a ser abordado nos projetos-piloto é o possível ganho financeiro pelos consumidores. Para evitar falsas expectativas, uma análise econômica tem que ser bem realizada para que quando o projeto for implantado em larga escala as premissas sejam bem conhecidas (Faruqui & Sergici, 2010). Principalmente como observado pela concessionária OG&E, dos EUA, aparentemente poupar dinheiro é o principal motivador para consumidores aderirem a programas baseados em preços ou adquirirem equipamentos voltados ao gerenciamento da demanda (U.S. Department of Energy, 2013).

Com isso, foram criadas funções de pertinência que representem o desenvolvimento de projetos-piloto baseados em resposta da demanda no sistema elétrico brasileiro, como mostrado na Figura 25 e explicada posteriormente. São elas:

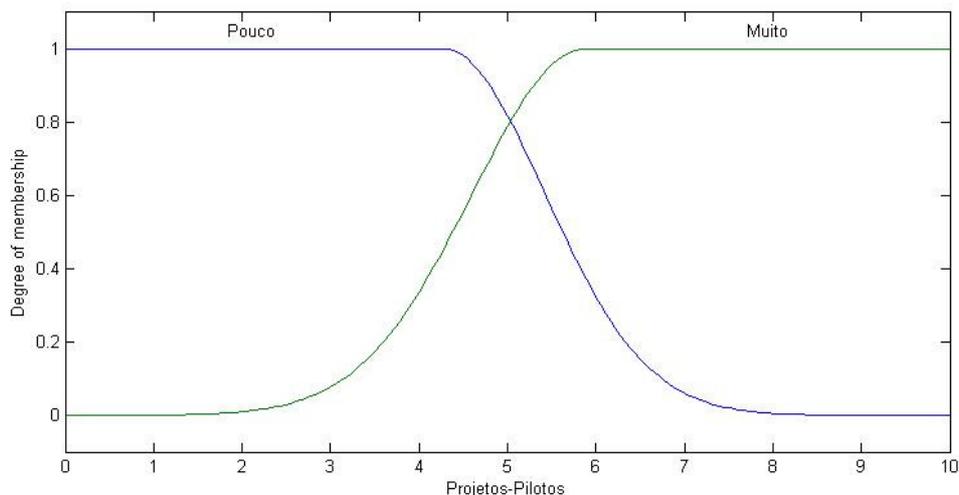


Figura 25 – Funções de Pertinência – Projetos-Piloto

- **POUCO** – Sinaliza poucos projetos no Brasil no horizonte de estudo, seguindo a atual situação do país, onde apenas nove projetos são conduzidos atualmente;
- **MUITO** – Representa um maior número de projetos no Brasil, em diversas regiões, abrangendo grande parte das classes sociais e renda, bem como tipos de clima.

5.3.1.3 – REGULAMENTAÇÃO

A ANEEL aprovou no dia 22/11/2011, durante reunião pública da diretoria, a alteração da estrutura tarifária aplicada ao setor de distribuição de energia. O novo regulamento prevê a aplicação de tarifas diferenciadas por horário de consumo, oferecendo tarifas mais baratas nos períodos em que o sistema é menos utilizado pelos consumidores.

Estrutura tarifária é a forma como os diversos tipos de consumidores pagam pelo uso da energia elétrica, divididos por subgrupos e modalidades de tarifas de acordo com horas de uso, nível de tensão e localização. A nova sistemática, que seria aplicada a cada distribuidora a partir de sua revisão tarifária, entre 2012 e 2014, modifica padrões vigentes desde a década de 1980 e considera as mudanças que ocorreram na oferta e na demanda de energia nesse período.

Mas, em 11/02/2014, a ANEEL adiou a aplicação da tarifa branca, prevista para entrar em vigor a partir daquele mês. Um dos motivos é a falta de medidores com “múltipla tarifação” no mercado.

Ou seja, em dois anos e meio não se conseguiu ao menos homologar medidores eletrônicos, parte principal do monitoramento dos sistemas de tarifação. Provavelmente esta falta de homologação não se deu por falta de iniciativa dos fabricantes dos medidores, visto o grande mercado que o Brasil proporcionará, mas sim da falta de vontade governamental para introduzir mudanças no setor elétrico. Não há informação disponível sobre a atual utilização de tarifa branca pelos consumidores de baixa tensão.

Um arcabouço regulatório forte e seguro é parte necessária para a plena implementação da *smart grid* no Brasil, pois várias cadeias produtivas serão alteradas com a entrada de novos *players*, fazendo com que determinados nichos de mercado sejam alterados. Um conjunto de leis forte vindo da esfera federal é indispensável para o desenvolvimento da resposta da demanda.

De acordo com Ribeiro (2011), uma das transformações trazidas pela *smart grid* que certamente se deparará com significativas resistências regulatórias para se realizar reside justamente no “último dos elos” da cadeia industrial do setor de energia elétrica, aquele referente às relações entre prestadora do serviço de distribuição e consumidores. Logo, leis bem fundamentadas e que possuam sua formulação com participação de toda a sociedade será importante para resguardar o setor de judicialização.

Outro ponto importante é a divulgação da nova regulamentação. No Brasil, são famosos os casos de “leis que não pegam”. Deste modo, serão necessários fortes investimentos na divulgação das novas leis, indicando claramente os benefícios das novas tarifas e tecnologias, bem como possíveis riscos financeiros que o consumidor terá se não alterar seu padrão de consumo.

Observa-se que uma campanha de educação e treinamento dos novos usuários é ponto chave para os programas alcançarem seus objetivos.

Com isso, foram criadas funções de pertinência que representem o desenvolvimento de regulamentação na resposta da demanda no sistema elétrico brasileiro, como mostrado na Figura 26 e explicada posteriormente. São elas:

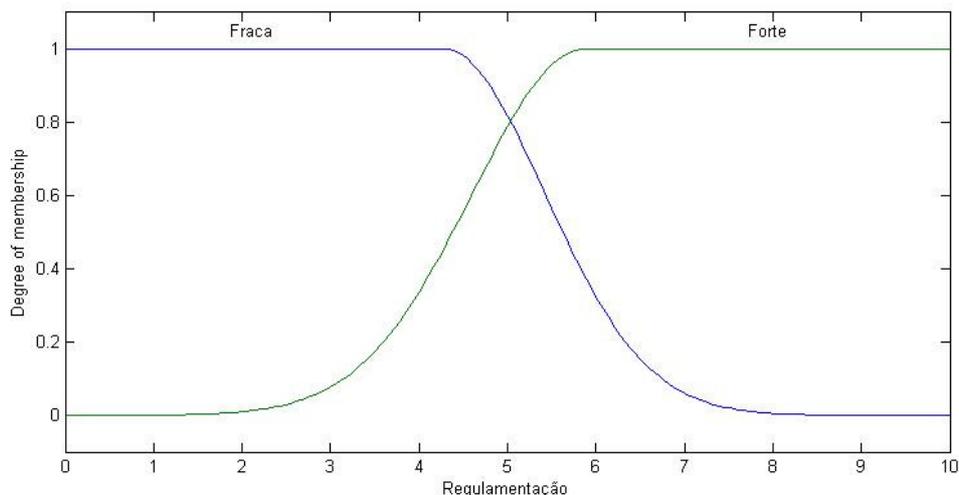


Figura 26 – Funções de Pertinência – Regulamentação

- **FRACA** – Sinaliza pouca atuação governamental na área regulatória, sem participação efetiva no desenvolvimento da resposta da demanda, como observado atualmente;
- **FORTE** – Representa maior ação regulatória, com leis fortes e bem regulamentadas, fazendo com que haja o distanciamento de insegurança jurídica.

5.3.1.4 – TECNOLOGIAS & PADRÕES

A chegada de novos sistemas de tarifação só será possível com profundas mudanças na tecnologia envolvida no sistema de medição dos consumidores de energia. E essa mudança será trazida majoritariamente pelos *smart meters*. Um medidor inteligente é um medidor elétrico que registra o consumo de energia elétrica em intervalos de uma hora ou menos e comunica a informação diária, ou até horária, de volta para a concessionária para efeitos de controle e faturação. Os medidores inteligentes permitem a comunicação bidirecional entre os medidores e o sistema central. Assim, ao contrário dos monitores de energia em casa, os medidores inteligentes podem coletar dados para a comunicação remota.

Na Nota Técnica 43/2010, da ANEEL, que versa sobre contribuições para minimizar as barreiras para instalação de geração distribuída de pequeno porte, foi determinado que o sistema de medição pode ter as mesmas especificações do

consumidor cativo do Grupo A, mais a medição em quatro quadrantes, se houver dois fluxos de energia na mesma instalação (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2011) . Além disso, um medidor inteligente pode ter inúmeras outras funções, tais como cadastrar datas e período de falta de energia, transmitir mensagens, alarmes em caso de falha ou fraudes, entre outras. Com mais essas funções, haverá maior interação entre o consumidor de energia e a concessionária, fazendo com que melhores resultados sejam alcançados.

De acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2015), o número total de consumidores no Brasil, em Dezembro de 2015, era de 77,8 milhões de consumidores, sendo 67 milhões de consumidores residenciais, ligados na rede de baixa tensão. Estes consumidores residenciais, em conjunto com consumidores comerciais serão o foco de atuação da introdução dos *smart meters*.

Sendo este um potencial mercado consumidor, é viável que grandes empresas fabricantes de medidores se instalem no país ou aumentem seu parque produtor, fazendo com que mais benefícios econômicos sejam trazidos ao país.

Um ponto de extrema importância na implantação dos novos medidores é a escolha do padrão tecnológico e sistemas de comunicação entre os pontos de conexão. Nos EUA e Europa, as distribuidoras possuem liberdade de escolha destes itens, garantindo a interoperabilidade dos sistemas. Este procedimento é útil em pequena escala, mas ocorrendo expansão futura dos sistemas ou substituição de equipamentos de medição no Brasil, a forma de atacar essa questão tem que ser bem pensada para evitar problemas de comunicação entre consumidores e concessionárias (Kagan, et al., 2013).

Interoperabilidade se alude à capacidade de diversos sistemas de trabalhar em conjunto (GridWise Alliance, 2011). Em sistemas elétricos, refere-se à contínua conectividade fim-a-fim de software e hardware através dos sistemas de transmissão e distribuição, melhorando a coordenação de fluxos de energia, com informação em tempo real (GridWise Alliance, 2011).

Existem duas opções: cada concessionária definir seu próprio padrão de interoperabilidade ou que seja criado um grande grupo de trabalho para que seja definido um conjunto de padrões e protocolos na implantação da *smart grid* no Brasil

(Kagan, et al., 2013). A segunda opção é a mais indicada para o Brasil, pois não há um mercado instalado, não havendo prejuízos para concessionárias e fabricantes.

Além da chegada dos *smart meters*, as tecnologias facilitadoras são necessárias para alcançar resultados mais arrojados (Faruqui, 2009), (Faruqui & Palmer, 2011), (Faruqui & Sergici, 2009) e (Gellings, 2009). Estas tecnologias serão introduzidas para ajudar os consumidores a entenderem seu padrão de consumo, seja por meio de sites de internet ou IHDs, para poderem controlar equipamentos, como centrais de ar-condicionado e termostatos.

Em estudos realizados nos EUA, a adição de tecnologias de controle de equipamentos de alto consumo pode dobrar ou até triplicar a resposta a determinados eventos da resposta da demanda (Faruqui & Sergici, 2009) e (Faruqui, 2014).

O resultado apresentado pela Brattle Group (Faruqui & Sergici, 2009) em 34 estudos, com 163 experimentos é enfático em relação ao uso de tecnologias. Filtrando os resultados por sistemas de tarifação e uso de tecnologias, observa-se um aumento considerável de redução de demanda máxima com a introdução de tecnologias facilitadoras. Portanto, é necessário que um conjunto de tecnologias como as citadas anteriormente sejam introduzidas para que resultados mais arrojados sejam alcançados, utilizando tarifação mais simples, como a TOU, ou tarifas realmente dinâmicas, como a CPP, como podemos observar na Figura 27.

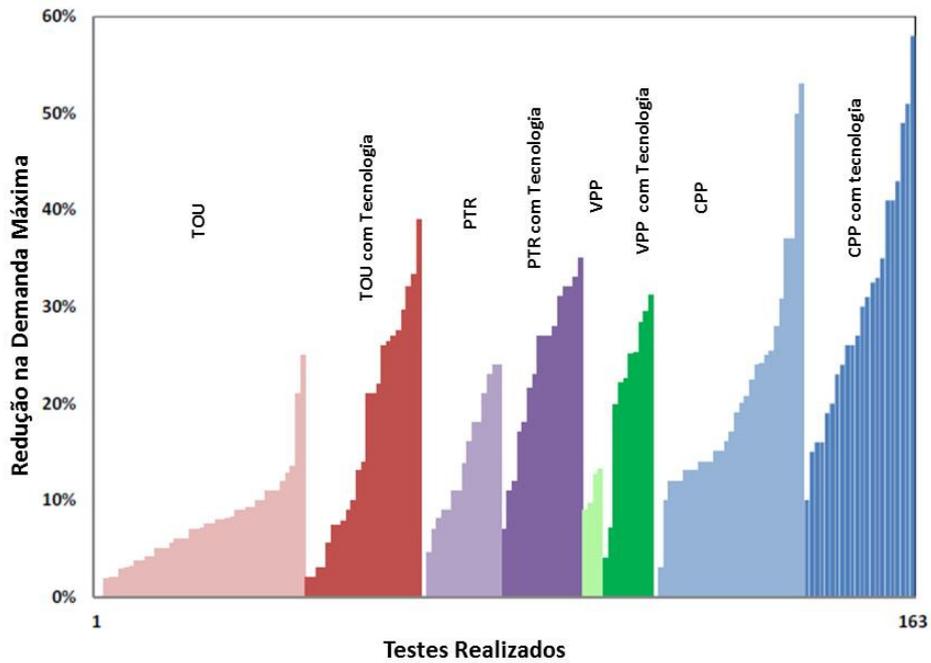


Figura 27 – Redução da demanda máxima – Sistema de tarifação (Faruqui & Sergici, 2009).

A razão do preço na ponta e preço fora da ponta é um fator de preponderância na redução da demanda máxima, como pode ser analisado na Figura 28. Nela, é observada uma tendência de aumento da redução da demanda máxima conforme aumenta-se esta razão. Além disso, estes ganhos são maximizados com a inclusão de tecnologias facilitadoras.

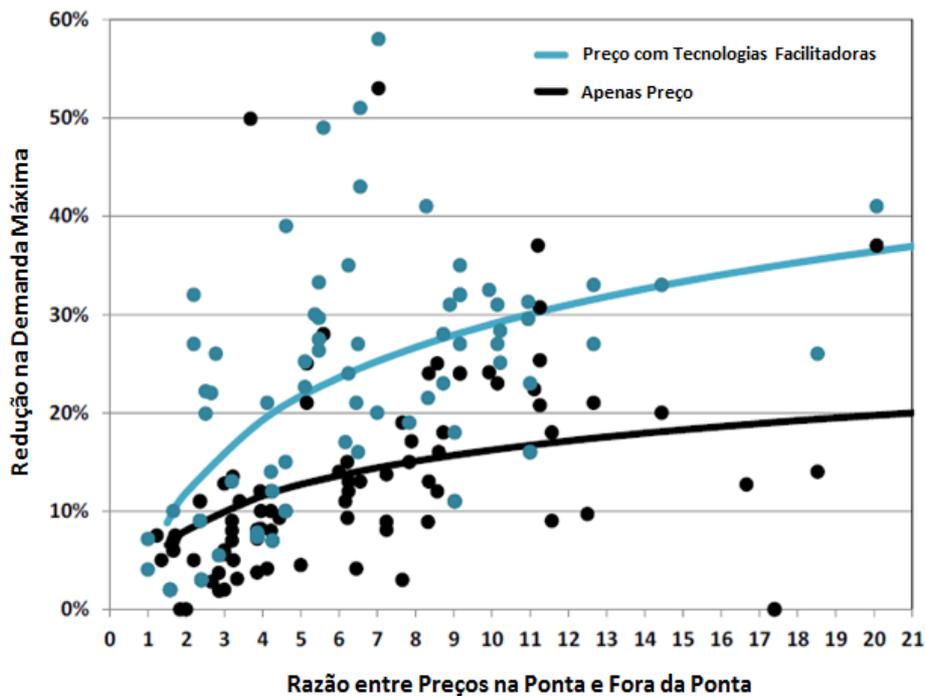


Figura 28 – Redução da demanda máxima - Sistema de tarifação e tecnologias facilitadoras (Faruqui & Sergici, 2009).

Um exemplo eficaz da introdução de tecnologias foi desenvolvido pela Baltimore Gas and Electric entre 2008 e 2009. Foi colocado nas residências um “globo de energia”, que muda sua cor dependendo do preço da energia e trocava o fluxo do ar-condicionado central quando o preço de energia chegava a altos níveis. Com a introdução destes itens, a diminuição na demanda máxima foi de 21% para 33% (Hledik, 2009).

Visto a importância deste item para o desenvolvimento da *smart grids*, foram criadas funções de pertinência que representem o desenvolvimento de tecnologia e padronização no sistema elétrico brasileiro, como mostrado na Figura 29 e explicada posteriormente. São elas:

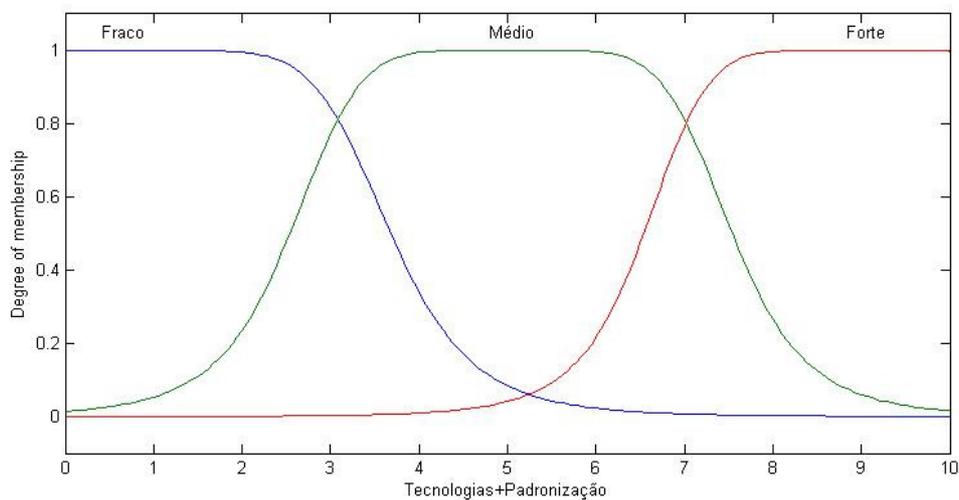


Figura 29 – Funções de Pertinência – Tecnologias & Padronização

- **FRACO** – Sinaliza a introdução de poucos medidores inteligentes, não havendo grandes mudanças no mercado;
- **MÉDIO** – Representa maior difusão de medidores inteligentes, introdução de IHDs e maior número de concessionárias provendo acesso ao consumidor do seu consumo por meio de portais de internet ou aplicativos;
- **FORTE** – Representa grande uso de *smart meters*, IHDs e outras tecnologias facilitadoras. Da mesma forma, representa adoção robusta de padrões, fazendo

com que haja maior capacidade de conexão segura entre concessionárias e consumidores.

5.3.2 – REGRAS

No sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido, as implicações (ou consequentes) das regras foram determinadas a partir de todos os dados coletados em documentos oficiais, estudos desenvolvidos e resultados de projetos-piloto. Para que o conjunto de regras se tornasse consistente, um grande conjunto de informações, como resultados já alcançados, comportamento dos consumidores e projeções futuras foi coletado em vários países do mundo e no Brasil. A partir da análise de todas estas informações, o autor determinou o consequente de cada uma das regras, que representa o impacto da resposta da demanda no sistema elétrico.

Foram criadas 36 regras a partir da combinação de todas as funções de pertinência das variáveis de entrada descritas nas seções anteriores, que são apresentadas no Anexo A.

5.3.3 – VARIÁVEIS DE SAÍDA – IMPACTOS NOS SISTEMAS DE ENERGIA

Há duas variáveis de saída relativas à variável de entrada Resposta da Demanda. São elas: demanda máxima e energia. Todas estas variáveis de saída representarão um impacto positivo no sistema de energia brasileiro, ou seja, haverá diminuição em cada um dos itens analisados, trazendo benefícios para a sociedade.

O impacto de cada uma das variáveis de saída será mensurado no capítulo referente ao estudo de caso da tese.

5.4 – PEQUENA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração renovável possui o benefício de aumentar a sustentabilidade, reduzir os impactos ambientais e emissão de gases de efeito estufa, e aumentar a segurança e diversificação do parque de geração de energia de um país. O aumento de geração

variável será um desafio importante no sistema elétrico brasileiro nos próximos anos e a introdução da *smart grid* contribuirá para reduzir as barreiras impostas a esse tipo de geração e assim facilitar a integração de fontes renováveis de energia.

Como citado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014) a partir de dados da International Energy Agency, os sistemas residenciais e comerciais irão corresponder por aproximadamente 60% da geração fotovoltaica, restando 30% para grandes centrais e 10% para sistemas isolados.

No Brasil, a geração distribuída por meio de fontes renováveis se encaminha para, no âmbito da *smart grid*, ser a tecnologia que mais terá sucesso na penetração no mercado brasileiro no curto prazo. Grande parte desta maior possibilidade de acesso aos consumidores está no texto da Resolução Normativa 482/2012 que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, reduzindo barreiras para a conexão destes tipos de fontes. Uma das novidades trazidas por essa Resolução é o sistema de compensação de energia elétrica, que é o arranjo no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica nessa mesma unidade consumidora ou em outra do mesmo titular previamente cadastrada. Desta forma, a rede da distribuidora funcionará como uma bateria, armazenando o excedente de energia até o momento que a unidade fornecedora necessite da energia proveniente da distribuidora (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2014). Esse sistema é também conhecido pelo termo em inglês *net metering*.

Além disso, a ANEEL aprovou descontos no TUSD e TUST para fontes solares aplicável nos 10 primeiros anos de operação da usina por meio da Resolução Normativa 481/2012.

Sendo o Brasil um país de ótimas possibilidades de inserção de pequena geração distribuída por meio de fontes renováveis e a *smart grid* sendo peça fundamental para a maior difusão desta tecnologia, foi criado um módulo para mensurar o impacto desta tecnologia no sistema energético brasileiro. Neste intuito foram criadas três variáveis de entrada: Sistemas de Tarifação, Regulamentação & Incentivos Governamentais e Tecnologia & Armazenamento, apresentadas a seguir.

5.4.1 – VARIÁVEIS DE ENTRADA - DIMENSÕES DE ANÁLISE

Conforme mencionado anteriormente, as variáveis de entrada representam uma importante parte da construção da modelagem *fuzzy*. A seguir são apresentadas as variáveis de entrada em pequena geração distribuída, bem como as funções de pertinência que as regem.

5.4.1.1 – SISTEMA DE TARIFICAÇÃO

A utilização de sistema de tarifação adequado para a geração distribuída é de suma importância para o seu pleno desenvolvimento.

As fontes de energia que serão utilizadas na disseminação da pequena geração distribuída, as energias solar e eólica, possuem maior variabilidade e imprevisibilidade de geração do que as fontes convencionais, portanto, o momento de máxima geração destas fontes em algumas horas do dia não coincidirá com consumo da unidade consumidora. Assim, é importante que o excedente da geração verificada seja vendido para a concessionária de energia ou, ao menos, inserido como crédito em uma futura fatura de energia.

Esta variabilidade é mais notada na energia solar. Como pode ser observada na Figura 30, a geração solar possui alta geração entre 9-14hs, momento de maior incidência solar, e nenhuma geração a partir do horário noturno, momento este que na maioria das residências brasileiras o consumo de energia aumenta devido ao uso do chuveiro elétrico e de eletrodomésticos. De acordo com (Zilles, 2011), comparando-se a curva de geração típica solar e a curva de carga do consumidor, há a possibilidade de exportação à rede de quase 65% de energia gerada. Com a possibilidade da inclusão de um sistema de armazenamento de energia, é também possível abater o consumo residencial no período da noite.

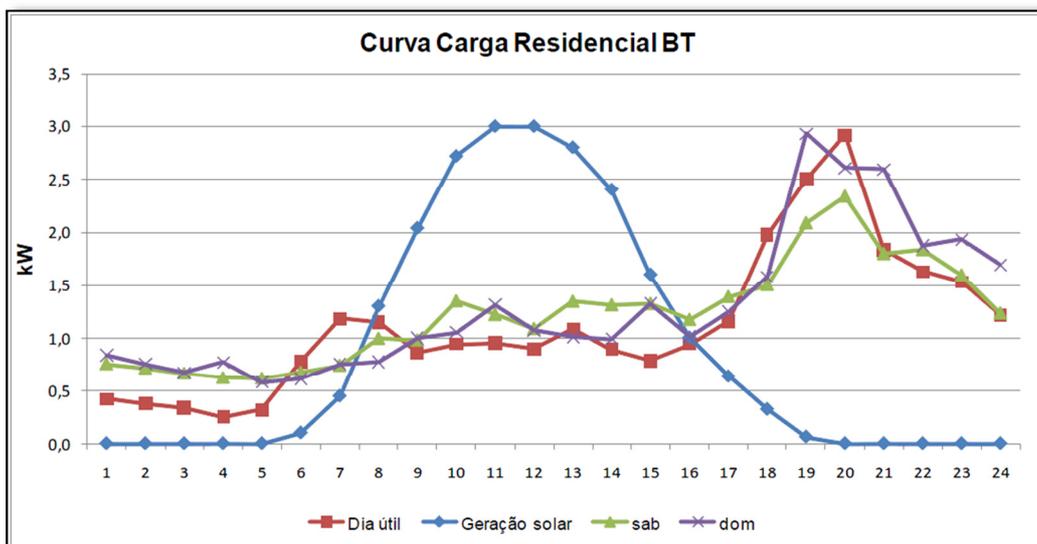


Figura 30 – Curvas de demanda residencial e geração solar (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2011)

A maior utilização de geração distribuída na forma de energia solar pode aplacar um dos maiores problemas do setor energético nos últimos anos: a demanda máxima do SIN. No final de 2013 e início de 2014, o Brasil bateu seguidos recordes de consumo de energia, sendo que todos os momentos de demanda máxima do SIN ocorreu no período da tarde, principalmente entre 14-15hs, devido às altas temperaturas alcançadas, longo período sem chuvas e a consequente utilização de aparelhos de ar-condicionado em residências. Com a utilização de energia solar residencial, a energia requerida à rede poderá ser reduzida consideravelmente.

A Resolução Normativa 482/2012 insere o *net metering* no cenário elétrico brasileiro, por meio do sistema de compensação de energia. Esse sistema permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria, armazenando esse excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia da distribuidora. Assim, a energia elétrica gerada por essas unidades consumidoras é cedida à distribuidora local, sendo posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica dessa mesma unidade consumidora (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2014). Se em um ciclo de faturamento a energia injetada na rede pelo micro ou minigerador for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia na próxima fatura. Caso contrário, o consumidor pagará a diferença entre a energia consumida e a gerada naquele mês.

Em 2015, a Resolução Normativa 482/2012 foi alterada pela Resolução Normativa 687/2015, permitindo assim que mais consumidores façam uso deste mecanismo. Os objetivos da revisão do regulamento são: reduzir as barreiras ainda existentes à conexão dos micro e minigeradores à rede das distribuidoras; compatibilizar as regras do sistema de compensação de energia elétrica com as condições gerais de fornecimento; aumentar o público alvo e realizar aperfeiçoamentos na regra. Com a revisão poderão ser enquadrados como mini e microgeração distribuída projetos de todas as fontes renováveis, além da cogeração qualificada. Os limites de potência serão de 75 kW para microgeração, e 3 MW (hidro) e 5 MW (outras fontes renováveis) para minigeração. Os créditos em energia excedentes tiveram prazo de resgate estendido de 36 para 60 meses. Além disso, foi criada a possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios, com empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras. Nessa configuração, a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos consumidores.

A revisão da resolução criou a figura da “geração compartilhada”, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados. As novas regras entraram em vigor no primeiro dia de março de 2016.

Um ponto importante do maior uso do sistema de compensação de energia é a forma de incidência dos impostos em cada Estado, principalmente o ICMS. Na seção referente à regulamentação e incentivos, será dada especial atenção a este item, que causa discordância de entendimentos entre a ANEEL e o Conselho Nacional de Política Fazendária – CONFAZ.

As Resoluções 482/2012 e 687/2015, apesar de representarem um importante passo, necessitam de aprimoramentos ou de serem acompanhadas de novas medidas. Por exemplo, é relevante que o proprietário de pequena geração distribuída tenha a possibilidade de vender energia à concessionária ou até diretamente a outros consumidores no momento da geração. Esta possibilidade de venda on-line à concessionária é mais importante em um cenário em que a tarifação dinâmica é utilizada, pois o momento do excedente de energia pode coincidir com o espaço de tempo determinado como o de maior valor da tarifa de energia. Outra ação importante

que pode contribuir para maior disseminação de pequena geração distribuída é a adoção de prêmios no momento em que o mesmo vende energia à rede. Ou seja, se no momento em que o pequeno gerador vende energia, o sistema elétrico está passando por um momento de demanda máxima, a concessionária pagaria um valor superior que o normalmente pago pela energia.

Portanto, foram criadas funções de pertinência que representem o desenvolvimento de sistema de tarifação em pequena geração distribuída no sistema elétrico brasileiro, como mostrado na Figura 31 e explicada posteriormente. São elas:

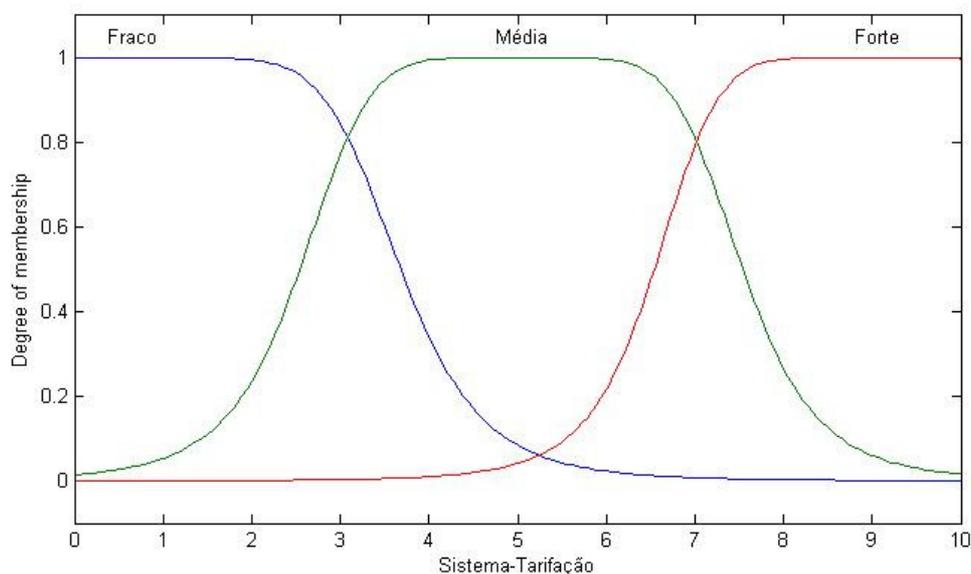


Figura 31 – Funções de Pertinência – Sistema de Tarifação

- **FRACO** - Esta função de pertinência representa um fraco desenvolvimento dos sistemas de tarifação para geração distribuída no horizonte de estudo, com pouca utilização do sistema de compensação de energia;
- **MÉDIA** – Sinaliza uma maior utilização de sistemas de tarifação, como o sistema de compensação de energia, com a possibilidade de venda de energia à concessionária;
- **FORTE** – Representa uma maior dinamização do processo de sistemas de tarifação para geração distribuída, incluindo forte presença do sistema de compensação de energia e a possibilidade de venda de energia à concessionária e

diretamente a outros consumidores. Além disso, há a possibilidade de adoção de prêmios na venda de energia em períodos de stress do sistema.

5.4.1.2 - REGULAMENTAÇÃO & INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS

A questão regulatória talvez seja a mais importante para o desenvolvimento da geração distribuída no Brasil (Dias, et al., 2012). Em diversos países, somente após a definição clara das leis que regem a geração distribuída este tipo de geração deslanchou (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2011) e (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2012). Como já relatado, a Resolução Normativa 482/2012 foi o primeiro passo claro na direção de proporcionar uma base legal para maior utilização de pequena geração distribuída no Brasil.

No Brasil, há uma série de incentivos à inserção de fontes renováveis e os mais importantes são listados abaixo:

- Programa Luz para Todos – Possibilitando a instalação de painéis solares para quem não tem acesso à energia elétrica;
- Descontos na Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão – TUST e na Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição – TUSD;
- Convênio nº 101, de 1997, do Conselho Nacional de Política Fazendária, que isenta do ICMS as operações envolvendo vários equipamentos destinados à geração de energia elétrica por células fotovoltaicas e por empreendimentos eólicos, mas não abrange todos os equipamentos utilizados pela geração solar, como inversores e medidores;
- Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura – REIDI, com suspensão de pagamentos de PIS/PASEP e COFINS;
- Condições diferenciadas de financiamento pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES, inclusive com condições especiais para fontes solares;

- Fundo Clima, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, que disponibiliza recursos, inclusive não reembolsáveis, para financiar projetos, estudos e empreendimentos que visem à redução dos impactos da mudança do clima;

Apesar destes e outros incentivos, a possibilidade de maior desenvolvimento da pequena geração distribuída só se deu com a Resolução Normativa 482/2012. Até o lançamento desta resolução havia apenas 3 consumidores nestas condições. Já em dezembro de 2015 existiam 1.731 consumidores que se enquadravam na RN 482, com mais de 16,5 MW de potência instalada. Em 96% destas novas instalações são atendidas por meio de solar fotovoltaica, mostrando a vocação desta fonte para o atendimento em pequena escala.

Conforme mencionado anteriormente, a maior utilização do mecanismo de compensação de energia depende da forma de incidência dos impostos em cada Estado, principalmente o ICMS. Em abril de 2013, o Conselho Nacional de Política Fazendária – CONFAZ publicou o Convênio ICMS 6, que estabelece a incidência do imposto sobre o consumo bruto de energia proveniente da distribuidora antes de que qualquer compensação da geração própria. Assim, a energia gerada que não é consumida pela residência e é exportada para a distribuidora e posteriormente utilizada, será tributada.

Esta forma de tributação torna a pequena geração distribuída menos atrativa para o consumidor, trazendo malefícios para a disseminação desta forma de geração de energia. Este convênio tem caráter ilustrativo e cabe a cada estado seguir ou não esta orientação. Até dezembro de 2015, os estados de São Paulo, Tocantins, Pernambuco, Rio Grande do Norte já tinham aderido ao Convênio ICMS 16, de abril de 2015, que possibilita a cobrança de ICMS da diferença entre o consumido e o injetado na rede. O estado de Minas Gerais já praticava a desoneração antes do lançamento deste convênio.

Em dezembro de 2015 foi lançado o ProGD - Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (Ministério de Minas e Energia - MME, 2015), que prevê R\$ 100 bilhões de investimentos, com uma adesão de mais 2 milhões de unidades consumidoras até 2030 com geração de 48 TWh. Como pontos relevantes do programa estão o incentivo da atuação dos agentes vendedores de energia de

empreendimentos de geração distribuída e estudos para permitir a venda no mercado livre da energia gerada de forma distribuída.

Vários especialistas afirmam que a adoção de *feed-in* seria uma boa opção para a disseminação da geração distribuída com fontes renováveis. Este é um mecanismo que consiste em uma política pública destinada a acelerar o investimento em energias renováveis por meio da oferta de contratos de longo prazo para produtores desse tipo de energia. Cerca de 40 a 50 países desenvolveram o *feed-in*, sendo que este é o mecanismo mais utilizado na União Europeia e responsável pelo significativo crescimento da utilização de energias renováveis no abastecimento da Europa. Esse incentivo foi implantado pelos governos em vários países, e não pelos órgãos reguladores, pois se trata de política pública voltada para a diversificação da matriz energética, com o uso de fontes renováveis. Tais tarifas normalmente são garantidas por um período determinado, de 10 a 20 anos, que seria o tempo necessário para permitir o desenvolvimento das fontes alternativas, com consequente redução de custos (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2011).

De acordo com Costa (2006), que realizou análise de políticas de incentivos às fontes renováveis no Reino Unido, Alemanha e Holanda, comprovou que a tarifa *feed-in* proporcionou de forma mais eficiente a participação de fontes renováveis na matriz energética destes países.

Outro sistema utilizado em alguns países é o de cotas. Aqui, é estabelecida uma cota de energia a ser compulsoriamente adquirida pelas distribuidoras para cada fonte de energia que se deseja incentivar, repassando os custos de compra dessa energia mais cara aos consumidores (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2011).

É também necessário dinamizar a indústria de produção de equipamentos voltados a fontes renováveis, fazendo com que o preço dos equipamentos fique mais acessível. Um exemplo de iniciativa é a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços - ICMS no estado do Rio de Janeiro para as indústrias voltadas para a produção de energia eólica e solar. Conforme mencionado em Silva (2015), o custo de aquisição de equipamentos e o prazo de maturação de projetos é um obstáculo à pequena geração distribuída de fonte solar. Apesar de obter ganhos imediatos com a redução da conta de energia elétrica, o custo de aquisição dos equipamentos é um entrave.

Outros incentivos podem ser lançados para dinamizar o setor, visando sempre corrigir falhas do mercado, maximizar o ganho da sociedade e, principalmente, ter fundamento jurídico robusto a fim de evitar incertezas e custos à sociedade provenientes de questionamentos judiciais (Silva, 2015), como os listados a seguir:

- Não cobrar o custo de adequação pelos consumidores, seguindo a regulamentação que trata da tarifa branca;
- Isentar a cobrança da cobrança da Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública - COSIP;
- Zerar a cobrança de ICMS e IPI de peças de módulos fotovoltaicos importados;
- Utilização do FGTS para compra de equipamentos de geração.

Desta forma, foram criadas funções de pertinência que representem o desenvolvimento de regulamentação e incentivo governamentais no âmbito de pequena geração distribuída no sistema elétrico brasileiro, como mostrado na Figura 32 e explicada posteriormente. São elas:

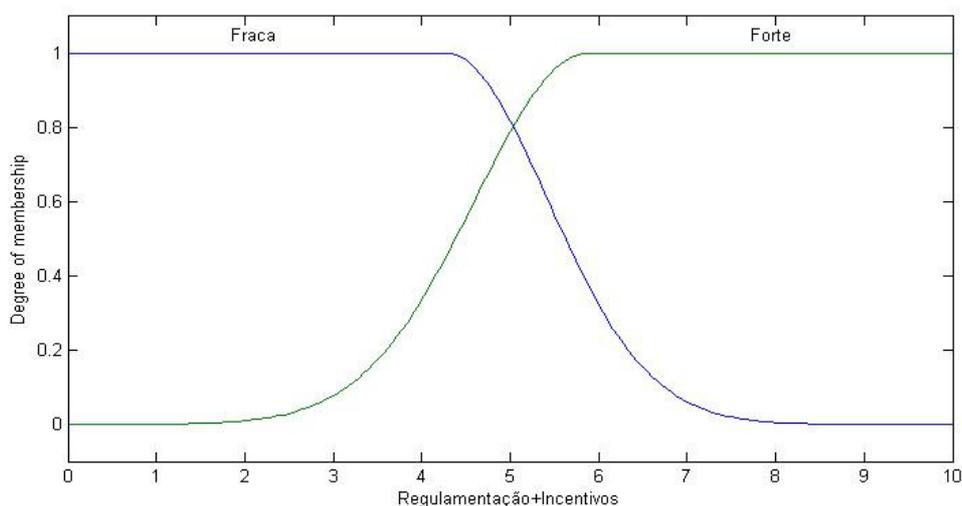


Figura 32 – Funções de Pertinência – Regulamentação & Incentivos

- **FRACA** – Representa o fraco desenvolvimento de políticas voltadas à regulamentação de pequena geração distribuída, mantendo-se as atuais leis já implantadas e poucos incentivos governamentais;

- **FORTE** – Representa a adoção maciça de leis que regulamentam a pequena geração distribuída, principalmente tornando mais fácil sua conexão com a rede elétrica e minimizando a burocracia existente. Mais incentivos governamentais são utilizados, como a tarifa *feed-in* e uma ação conjunta entre esferas governamentais visando à diminuição de impostos dos equipamentos de pequena geração distribuída.

5.4.1.3 - TECNOLOGIA & ARMAZENAMENTO

Atualmente a principal dificuldade para maior inserção de geração distribuída no Brasil é o alto custo dos equipamentos de geração, particularmente a geração fotovoltaica. Logo, é de suma importância a criação de incentivos próprios para estes sistemas para possibilitar o crescimento de vendas de kits de geração, principalmente para residências e consumidores de baixa tensão, e assim iniciar um ciclo virtuoso de ganhos de escala de produção e diminuição de preços.

No Brasil, a pequena geração distribuída se dará primordialmente por meio de geração solar e eólica. Principalmente pelo país ter boas condições geográficas para gerar por meio destes dois “combustíveis” e por já haver uma indústria incipiente alocada para geração eólica.

A energia eólica já participa dos leilões promovidos pelo Governo há alguns anos, alcançando bons resultados em relação ao preço da energia, mas para fins de atendimento à pequena geração distribuída um novo nicho de mercado tem que ser atacado, pois a potência das turbinas tem que ser menor para possibilitar a instalação nas grandes cidades e caber dentro da regulamentação atual.

De acordo com o World Wind Energy Association – WWEA, em seu Small Wind World Report, há 807 mil unidades de pequenos geradores eólicos no mundo, sendo que 72% estão instalados na China, país que começou a utilizar este tipo de geração ainda na década de 80 (Gsänger & Pitteloud, 2015). Na América do Sul, apenas a Argentina se destaca, com 8.500 unidades instaladas. De acordo com o mesmo relatório, a disseminação de pequena geração eólica depende da inserção de tarifas *feed-*

in e a indústria especializada espera que até 2020, 2 GW de potência sejam instaladas no mundo.

A energia solar começa a dar seus primeiros passos no Brasil. Nos leilões promovidos pela EPE ao longo de 2014 e 2015 foram comercializados 3.049 MW de potência instalada. Já o estado de Pernambuco fez o 1º leilão de energia solar do Brasil, onde foram contratados 122,82 MW de um total de 6 projetos. O prazo para instalação é de 18 meses, com contrato de 20 anos. Estados como São Paulo e Minas Gerais também planejam leilões exclusivos para geração solar.

De acordo com Andrade et al. (2014), o armazenamento de energia no âmbito de geração de energia possui inúmeras aplicações, como aumento da capacidade firme de geração, regulação de frequência, promover o acompanhamento da demanda, gerenciamento da demanda pelo horário de utilização, diminuição da demanda de ponta, aumento da confiabilidade e qualidade do fornecimento de energia e estabilização de geração por fontes alternativas, podendo possuir tempo de atuação desde alguns minutos a até várias horas.

O armazenamento de energia no Brasil ainda possui desenvolvimento incipiente, com apenas algumas iniciativas à pesquisa no país (Kagan, et al., 2013), com isso o preço de qualquer mecanismo de armazenamento ainda é muito alto, não sendo possível o seu desenvolvimento sem um pesado incentivo.

Para o atendimento à pequena geração distribuída, a tecnologia que se enquadra é a bateria, principalmente a de chumbo-ácido, do tipo “descarga profunda” ou “estacionária”, pois esse tipo pode ser descarregado entre 20% e 80% de sua capacidade máxima, e recarregada novamente todos os dias (Andrade, et al., 2014). As baterias podem ter papel fundamental no desenvolvimento da energia solar, pois em grande parte das residências brasileiras o consumo de energia é baixo no momento em que a insolação é maior. Com a instalação de baterias, esta energia pode ser armazenada e utilizada em momentos de maior consumo. Porém, atenção especial tem que ser dada ao descarte de baterias utilizadas no setor residencial. As Resoluções CONAMA 401/2008 e 424/2010 determinam que os usuários são obrigados a coletar as baterias esgotadas ou ineficientes para o sistema, com a finalidade de dar uma destinação ambiental adequada. Constatado o esgotamento da bateria, o usuário precisa entregá-la em qualquer

estabelecimento em que o produto seja comercializado ou à rede de assistência técnica autorizada do fabricante (Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, 2008).

Foram criadas funções de pertinência que representem o desenvolvimento de tecnologias e armazenamento em pequena geração distribuída no sistema elétrico brasileiro, como mostrado na Figura 33 e explicada posteriormente. São elas:

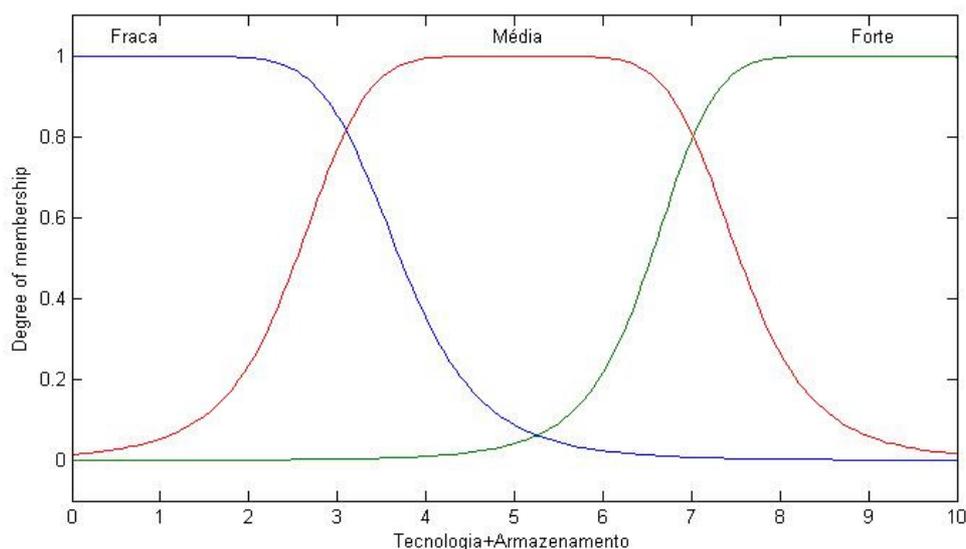


Figura 33 – Funções de Pertinência – Tecnologia & Armazenamento

- **FRACA** – Representa pequeno desenvolvimento de tecnologias voltadas à pequena geração distribuída e armazenamento, com alterações marginais e ações isoladas;
- **MÉDIA** – Representa um maior conjunto de intervenções, como diminuição de impostos para compra de equipamentos e algumas ações voltadas ao armazenamento de energia;
- **FORTE** – Sinaliza fortes mudanças em relação à situação atual. Várias ações integradas em várias esferas governamentais são tomadas, fazendo com que o custo em tecnologias caia. Há desenvolvimento de tecnologias voltadas ao armazenamento de energia, fazendo com que o custo diminua e fique mais acessível ao consumidor comum.

5.4.2 – REGRAS

No sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido, as implicações (ou consequentes) das regras foram determinadas a partir de todos os dados coletados em documentos oficiais, estudos desenvolvidos e resultados de projetos-piloto. Para que o conjunto de regras se tornasse consistente, um grande conjunto de informações, como resultados já alcançados, comportamento dos consumidores e projeções futuras foi coletado em vários países do mundo e no Brasil. A partir da análise de todas estas informações, o autor determinou o consequente de cada uma das regras.

Foram criadas 18 regras a partir da combinação de todas as funções de pertinência das variáveis de entrada, que estão dispostas no Anexo A.

5.4.3 – VARIÁVEIS DE SAÍDA – IMPACTOS NOS SISTEMAS DE ENERGIA

Há duas variáveis de saída relativas à Pequena Geração Distribuída. São elas: demanda máxima e energia. Todas estas variáveis de saída representarão um impacto positivo no sistema elétrico, ou seja, haverá diminuição em cada um dos itens analisados.

O impacto de cada uma das variáveis de saída será mensurado no capítulo referente ao estudo de caso da presente proposta.

5.5 - VEÍCULOS ELÉTRICOS

5.5.1 – INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os veículos elétricos receberam maior atenção do mercado. A preocupação em reduzir os impactos ambientais decorrentes da emissão de substâncias nocivas ao ser humano pelo setor automotivo torna os veículos elétricos uma opção interessante. De acordo com o Balanço Energético Nacional – BEN, de 2015, o setor de transportes é responsável pela emissão de 221,9 MtCO₂,

correspondendo a 45,7% do total de emissões antrópicas associada à matriz energética brasileira (Ministério de Minas e Energia – MME e Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2015). Além disso, o desenvolvimento de um forte mercado de veículos elétricos diminuiria a dependência do país em relação aos preços internacionais do petróleo e seus derivados para uso automotivo.

Tecnologias no âmbito da *smart grid* suportam o desenvolvimento dos veículos elétricos através de tarifação dinâmica, medições bidirecionais, fluxo bidirecional de energia, com aplicações V2G – *vehicle-to-grid*. Estes elementos proporcionam maior adoção de veículos elétricos, melhorando o retorno do investimento dos compradores e minimizando a necessidade de investimento em infraestrutura.

Visto a importância deste item, será avaliado neste módulo qual o impacto decorrente da introdução dos veículos elétricos em um ambiente *smart grid*. Para isso, foram criadas quatro variáveis de entrada na modelagem *fuzzy*: Sistemas de Tarifação, Incentivos Governamentais, Tecnologias e Infraestrutura & Padronização, apresentadas a seguir.

5.5.2 – VARIÁVEIS DE ENTRADA – DIMENSÕES DE ANÁLISE

Conforme mencionado anteriormente, as variáveis de entrada representam uma importante parte da construção da modelagem *fuzzy*. A seguir são apresentadas as variáveis de entrada em veículos elétricos, bem como as funções de pertinência que as regem.

5.5.2.1 – SISTEMAS DE TARIFAÇÃO

O desenvolvimento de um sistema de tarifação especial para veículos elétricos é primordial para sua maior utilização pelo mercado consumidor (Velloso, 2010), (DTE Energy, 2011), (Castro & Ferreira, 2010) e (Union of Concerned Scientists, 2012). Como relatado em (Union of Concerned Scientists, 2012), um veículo elétrico típico rodando por dia cerca de 48 km diários requererá cerca de 10 kWh de energia para ser carregado completamente todos os dias, ou cerca de 230 kWh por mês, descontando-se um menor carregamento em finais de semana. O consumo médio residencial brasileiro em 2015, segundo a EPE em sua resenha mensal de julho de 2015 é de 165 kWh

(Empresa de Pesquisa Energética, 2015). Mas de acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2015), o consumo médio residencial pode variar no Brasil de 66 a 309 kWh dependendo da distribuidora. De qualquer modo, o uso de veículos elétricos acarretará um aumento substancial de gastos com energia elétrica para um consumidor comum. Logo, é imprescindível o desenvolvimento de sistemas de tarifação especial para veículos elétricos para proporcionar um maior uso deste tipo de veículo com menor impacto econômico ao consumidor. Isto posto, esta variável de entrada irá mensurar o impacto que o desenvolvimento de tarifas específicas para veículos elétricos irá ter no sistema elétrico nacional. Um abrangente estudo nesse tema pode ser visto em (Simon, 2013).

De acordo com o apresentado por Union of Concerned Scientists (2012), vários estados americanos já possuem sistemas de tarifação específicos para veículos elétricos, onde o valor da tarifação em períodos de ponta do sistema elétrico local pode chegar a quase 500% do valor utilizado em períodos fora de ponta, como o sistema de tarifação utilizado pela Hawaiian Electric.

As pesquisas realizadas pela Union of Concerned Scientists mostra que a grande maioria dos carregamentos de baterias em ambientes com tarifação especial, cerca de 76 a 94%, ocorre durante os períodos fora de ponta, quando o valor da eletricidade está mais baixo, chegando assim a conclusão que aderir a planos específicos de tarifação para veículos elétricos poderia proporcionar ganhos financeiros adicionais aos consumidores (Union of Concerned Scientists, 2012). O mesmo comportamento foi percebido pela pesquisa realizada pelo EVProject (Schey, et al., 2012). Também de acordo com a mesma pesquisa, há um programa realizado pela Sacramento Municipal Utility District, que envolve a instalação de um submedidor instalado entre o medidor principal e o carregador do veículo elétrico, gerando assim uma conta separada, como também já é realizada pela cidade de San Diego (Union of Concerned Scientists, 2012).

Portanto, dar ao consumidor a possibilidade de separar o uso do carregador dos outros aparelhos de sua residência, junto com outros incentivos para recarregar seu veículo elétrico em determinados períodos, irá ajudar o consumidor a gerenciar sua demanda de energia elétrica, bem como controlar os gastos com o carregamento das baterias.

Este último exemplo é mostrado na Figura 34, em que o veículo elétrico possui um próprio medidor para mensuração do gasto mensal.

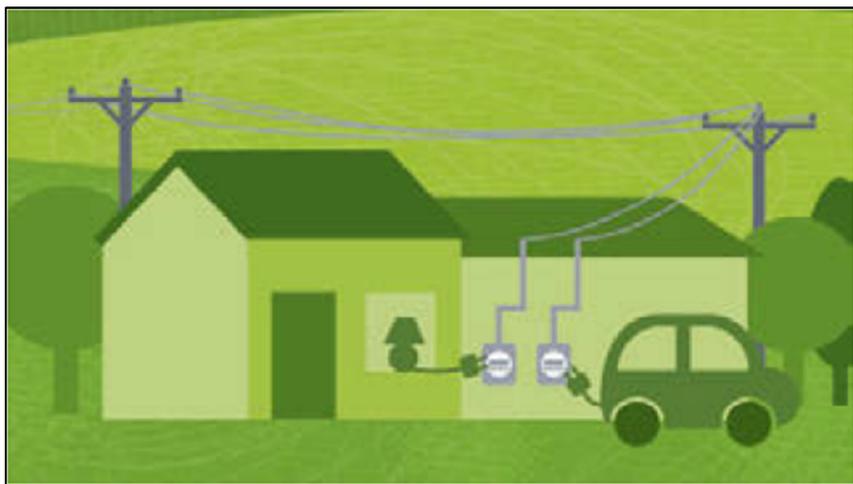


Figura 34 – Medidor específico para veículos elétricos (Union of Concerned Scientists, 2012)

No estudo apresentado pela Brattle Group (Faruqui, 2012) é apresentado o comportamento dos consumidores de energia que possuem veículo elétrico. De acordo com diversos experimentos realizados com tarifação dinâmica, a elasticidade média nos EUA em consumidores de energia em baixa tensão é de $-0,04$. Adotando-se esta elasticidade para o carregamento de veículos elétricos, é visto que, mesmo com a adoção de tarifação dinâmica, não resolveria o acréscimo de energia que o carregamento proporcionaria, reduzindo apenas um pouco a demanda da residência. Este problema só seria solucionado adotando-se taxas de elasticidade mais otimistas, como as visualizadas na Figura 35. Como os proprietários de veículos elétricos tendem a ser mais proativos no gerenciamento de energia, o comportamento pode ser real. Mesmo assim, taxas como $-0,80$ são extremamente otimistas, sendo necessária a implantação de alternativas de carregamento, como a adoção de temporizador nas tomadas de carregamento dos veículos elétricos e mesmo “tomadas inteligentes”, que recebem a informação de preços mais baixos de energia e iniciam o carregamento do veículo elétrico conectado.

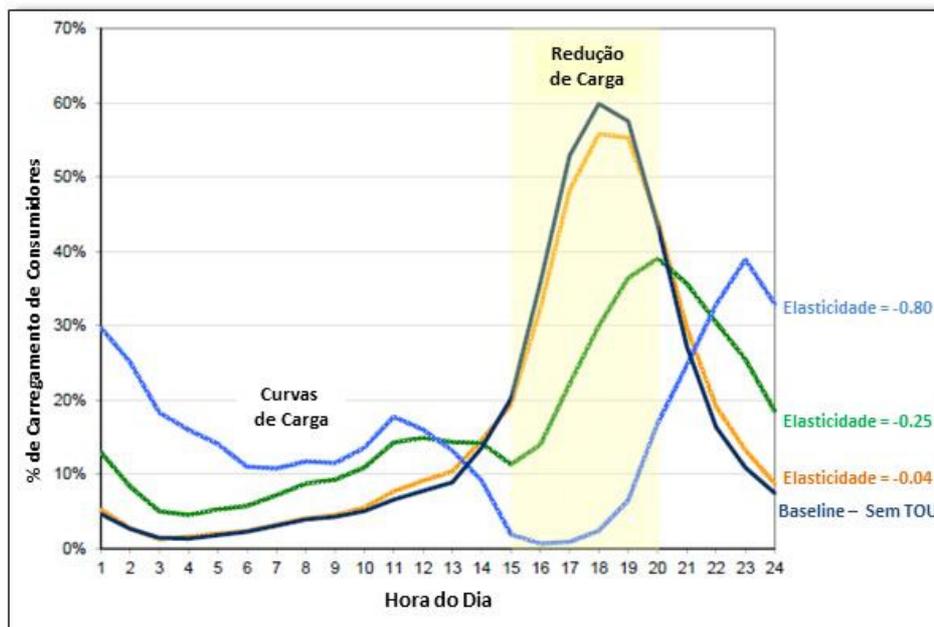


Figura 35 – Elasticidade no carregamento de veículos elétricos (Faruqui, 2012)

A importância da utilização de tarifas de energia para veículo elétrico é corroborada por projetos que estão sendo desenvolvidos, sendo um dos mais importantes o EVProject, liderada pela ECOTality. A ECOTality tem parceria com a Nissan North America, a General Motors, o Idaho National Laboratory, entre outros, para implantar e coletar dados de mais de 5.000 Nissan LEAFs e Chevrolet Volts e mais de 10.000 sistemas de carregamento em 18 regiões dos Estados Unidos (Schey, et al., 2012).

Neste projeto fica claro o impacto da utilização de tarifas mais baixas em momentos do dia em que a demanda global do sistema é menor. Na cidade de Nashville, nos EUA, onde não há tarifação específica para veículo elétrico, o comportamento de recarga residencial segue a rotina dos proprietários, ou seja, à medida que os moradores chegam às suas residências, no período entre 16h e 20h, a demanda por carregador aumenta, como apresentado na Figura 36:

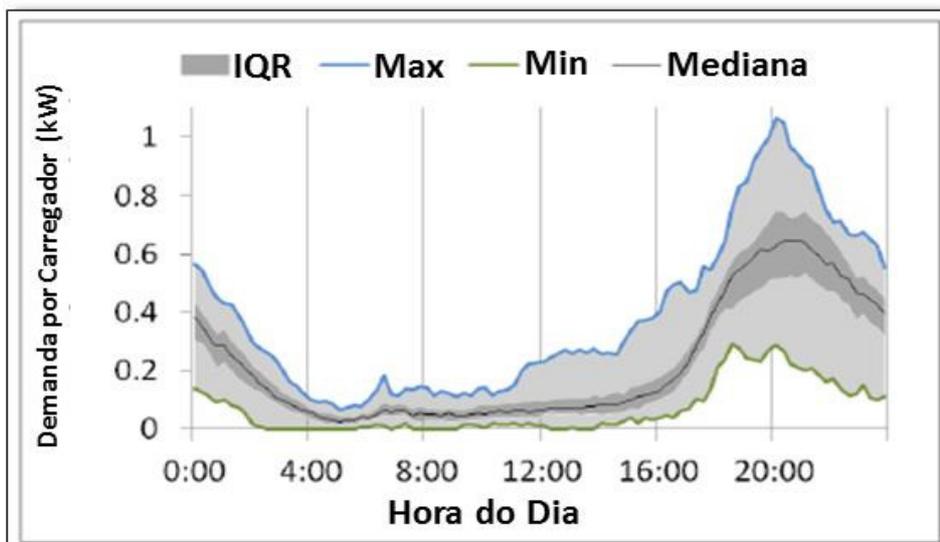


Figura 36 – Comportamento da demanda por carregador – Sem tarifação específica (Schey, et al., 2012)

Analisando a cidade de São Francisco, onde há tarifação horária, é percebido um grande aumento da demanda logo após a meia-noite, quando inicia-se o período de tarifa mais baixa. Nesta cidade há o programa experimental de “reabastecimento veicular de baixa emissão”, onde é incentivado o carregamento de veículos elétricos nas horas que a geração de energia é realizada por fontes menos poluentes. Outro ponto importante neste programa é a aplicação de temporizador de carregamento de veículos, que fica bem claro na Figura 37. Um problema que pode ocorrer é a saturação de transformadores em áreas com muitos veículos, pois pode ocorrer um grande aumento de carga em um curto espaço de tempo. Logo, medidas como a temporização guiada, onde cada residência possui uma hora específica de início de recarga, pode ser implantada para equacionar este problema.

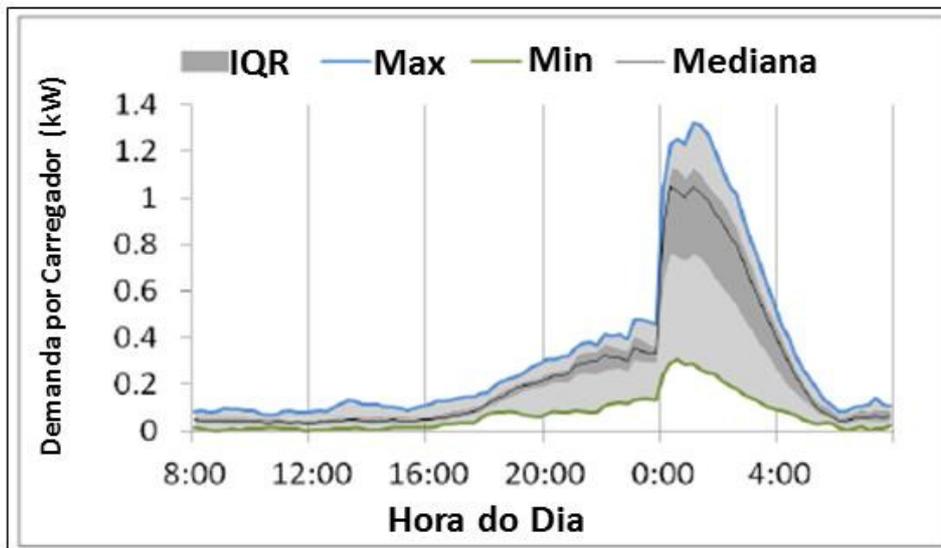


Figura 37 – Comportamento da demanda por carregador – Com tarifação específica (Schey, et al., 2012)

Sem a instalação de tecnologias especiais para veículos elétricos, haverá aumento da demanda máxima no sistema elétrico, requerendo maior investimento na geração, além de causar impactos no sistema de distribuição pelo carregamento coincidente de grande número de veículos elétricos, principalmente no período da noite (Asia-Pacific Economic Cooperation - APEC, 2011). Com estratégias especiais de carregamento, estudos indicam que a carga global seria normalizada, fazendo melhor uso de usinas que geram na base, não requerendo a instalação de novas unidades (Richardson, 2012). Em estudos desenvolvidos nos EUA, a tarifação dinâmica específica para veículos elétricos irá contribuir para minimizar os impactos ambientais da rede elétrica (Asia-Pacific Economic Cooperation - APEC, 2011). Analisada a importância dos sistemas de tarifação na inserção dos veículos elétricos no mercado brasileiro, foi construída uma variável de entrada que possui as seguintes funções de pertinência:

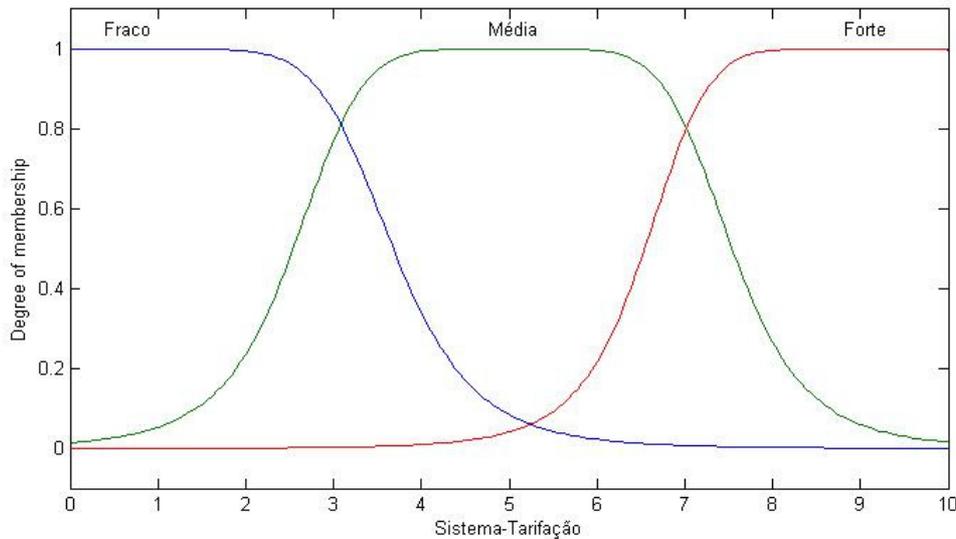


Figura 38 – Modelagem Fuzzy – Variáveis de Entrada – Sistemas de Tarifação

- **FRACO** - Esta função de pertinência representa uma fraca evolução de sistemas de tarifação específica para veículos elétricos, sendo que no horizonte de estudo analisado, as melhorias observadas neste campo referem-se à evolução natural das tarifas hoje utilizadas, como por exemplo, um maior uso da tarifação branca, mas sem atingir uma importante porcentagem da população e sem ser específica aos veículos elétricos;
- **MÉDIA** - Esta função de pertinência representa um maior desenvolvimento de ações em sistemas de tarifação voltados para os veículos elétricos, por exemplo, uma maior disseminação da utilização de tarifação baseada no tempo, como a tarifa branca. Nesta função de pertinência não é representado nenhum programa ou ação voltada ao carregamento de baterias para consumidores residenciais. Ou seja, as tarifas utilizadas pelos consumidores em suas residências será a mesma cobrada para o carregamento dos veículos elétricos;
- **FORTE** - Esta função de pertinência representa uma forte atuação das tecnologias que abrangem a *smart grid* para os veículos elétricos. Como exemplo, a aplicação de tarifas especiais para veículos elétricos e a possibilidade de programação de recargas de acordo com horários em que a tarifa de energia está mais baixa. Também está representada por esta função uma maior difusão de tarifas baseadas no tempo, mesmo aquelas não específicas para veículos elétricos.

5.5.2.2 – INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS

Atualmente o preço médio de um veículo elétrico no Brasil é muito superior a um modelo equivalente movido a combustível convencional. Como exemplo, o híbrido Toyota Prius custa na faixa de R\$ 120.000,00, com um modelo que ostente a mesma potência de motor e conforto, movido a gasolina, custando pelo menos 60% deste valor.

Assim, é imprescindível que mecanismos governamentais sejam praticados para que o veículo elétrico se desenvolva no Brasil, pois o valor do veículo é um dos principais entraves para que o mercado se desenvolva. No Brasil a carga tributária pode chegar a 75%: são 25% relativos ao Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI, 13% de PIS/COFINS, 12% a 18% de Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação - ICMS, conforme o estado (Wittmann, et al., 2013). Somam-se a isso as taxas alfandegárias e despesas recorrentes da importação de produtos, fazendo com que o preço fique impraticável. Como relatado em (Velloso, 2010), a simples equiparação a veículos flexfuel já traria a redução do IPI de 25% para 7%.

Em todos os países em que o veículo elétrico tem alguma participação relevante (ou pretende-se que tenha no futuro) há incentivos governamentais, com diversos tipos de ações para fomentar a compra de veículos elétricos. Abaixo vão algumas delas (Associação Brasileira de Veículos Elétricos - ABVE, 2014) e (Velloso, 2010):

- **Canadá** - Como as províncias do país são mais independentes do governo federal, comparativamente com o Brasil, existem muitas iniciativas em cada província. Manitoba divulgou um *roadmap* sobre a implantação de veículos elétricos, enquanto a Província de Ontário oferece uma ajuda de custo entre US\$ 4.900 a US\$ 8.320, na compra de veículos elétricos desde março de 2010;
- **Coreia do Sul** - Compradores de veículos elétricos no país asiático terão cortes em impostos no valor de até 4,2 milhões de won (cerca de US\$ 3.600). Todos os compradores de carros elétricos terão redução de 5% no imposto de consumo especial, que abrange também o imposto sobre a educação e redução de 7% no imposto de aquisição de bens;

- **Portugal** - Subsídio de €5.000 para os primeiros 5.000 carros elétricos vendidos, além de um incentivo de €1.500 para quem utilizar um carro de combustão interna como parte do pagamento de um carro elétrico;
- **Espanha** - O preço sugerido pelo veículo terá abatimento em até 25% do valor final ou até chegar à cota de €6.000. O benefício também é concedido para ônibus, vans e táxis. Neste caso o valor do bônus poderá ir de €15.000 a €30.000.
- **Alemanha** - Carros elétricos e híbridos *plug-in* estão isentos do imposto de circulação anual por um período de cinco anos, a partir da data da sua primeira matrícula. Em março de 2011, o governo alemão anunciou que deverá dobrar a ajuda para indústria, oferecendo 2 bilhões de euros (US\$ 2,8 bi) até 2013, com o objetivo do país se tornar líder mundial em carros elétricos e tenha 1 milhão destes veículos rodando até 2020;
- **EUA** – Em 2009 concedeu US\$ 2,4 bilhões em recursos federais para empresas e universidades para o desenvolvimento de energia renovável, em especial veículos elétricos e baterias, além de subsídios de US\$ 7.500 para aquisição de veículos elétricos. Há incentivos para compra de veículos elétricos em 21 estados americanos, além de iniciativas federais;
- **China** - Estabeleceu um programa de US\$ 1,5 bilhão para a inovação na sua indústria automobilística, além de um subsídio de US\$ 8.800 para o comprador do veículo elétrico.

No Brasil, apenas recentemente os primeiros passos em relação a este assunto foram dados. Em setembro de 2011, a Caixa Econômica Federal lançou uma linha de financiamento para automóveis novos ecoeficientes, que oferece juros menores para veículos com baixa emissão de poluentes e que tenham sido classificados com a melhor avaliação no programa Nota Verde do Ibama (Associação Brasileira de Veículos Elétricos - ABVE, 2014). No Congresso Nacional o projeto de Lei 2092/11, que ainda guarda parecer, visa à isenção dos veículos elétricos e suas peças da incidência do IPI. O projeto de Lei do Senado 255/2010, por sua vez, propõe a isenção de IPI por 10 anos

aos carros híbridos ou elétricos de fabricação nacional. Estes dois projetos de leis foram “engavetados” em 2015 (Notícias Automotivas, 2015). Em 2012, foi proposta a Lei 3895, que cria a figura do revendedor varejista de eletricidade para abastecimento de veículos automotivos elétricos ou híbridos.

Como pode ser observado, são ações individuais de parlamentares que buscam melhorar a situação dos veículos elétricos no Brasil e não uma ação conjunta e estruturada, como é visto em outros países. O primeiro passo tomado pelo governo federal para possibilitar a inserção de veículos elétricos no Brasil foi a redução para zero da alíquota do imposto de importação, que era de 35%, pela Câmara de Comércio Exterior - Camex para essa categoria de veículo.

No âmbito estadual algumas medidas foram tomadas, como por exemplo, a isenção ou diminuição do Imposto Sobre a Propriedade de Veículos Automotores - IPVA para veículo elétrico, como é apresentado na Figura 39:

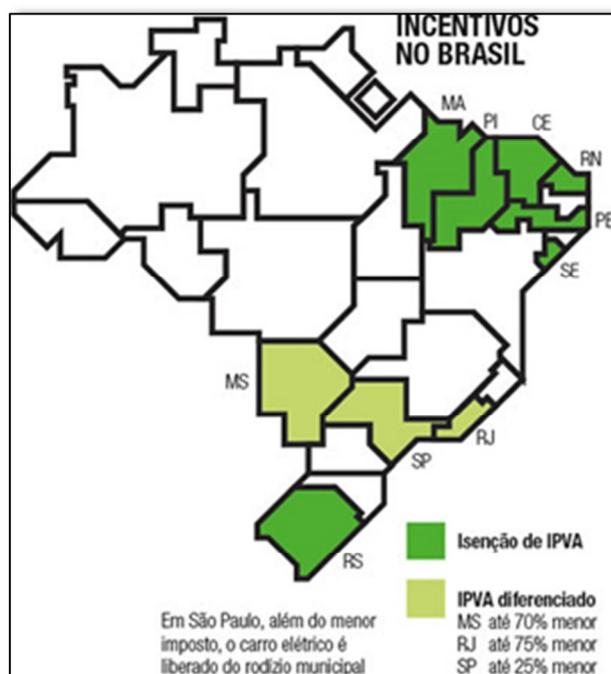


Figura 39 – Alterações na cobrança do IPVA nos estados (Associação Brasileira de Veículos Elétricos - ABVE, 2014)

Como disposto em Wittmann et al. (2013), Velloso (2010) e Castro & Ferreira (2010), há diversas vertentes a serem atacadas pelo Governo Federal para que no médio/longo prazo o mercado consumidor de veículos elétricos cresça. A primeira, e mais importante, é a área fiscal. Atualmente, os carros híbridos e elétricos, por não

possuírem uma classificação própria na tabela de incidência do IPI, pagam a mais alta alíquota desse imposto para veículos (25%). No campo da tributação é possível, portanto, realizar alguns avanços rápidos, como a redução do IPI para um patamar próximo ao dos demais veículos. Neste caso, o Brasil seguiria o caminho já percorrido por diversos países citados acima. Além disso, pode ser importante incluir descontos no Imposto de Renda do comprador do veículo elétrico, incluindo assim uma nova oportunidade de benefício ao consumidor.

Uma segunda área de ação, voltada ao desenvolvimento de longo prazo, é o estímulo em Pesquisa & Desenvolvimento. O foco principal seria desenvolver programas no campo das baterias para veículo elétrico, sendo este um dos principais entraves tecnológicos deste tipo de veículo. A criação de um centro de pesquisa, seguindo, por exemplo, o Centro Tecnológico da Aeronáutica e Embrapa, seria importante para desenvolver no próprio país novas tecnologias no ramo de transportes elétricos.

A terceira vertente de apoio governamental seria o estímulo a compras, em especial ao transporte público, principalmente em relação a ônibus elétricos, devido ao alto consumo deste tipo de veículo, contribuindo para diminuição de poluição sonora e emissão de gás carbônico (Velloso, 2010).

Todos estes incentivos listados acima necessitam ser temporários, tendo que existir por um determinado tempo para possibilitar o nascimento de um mercado consumidor e de uma rede industrial local fortificada e com boa base de implantação, para que com a retirada gradual dos incentivos, a mesma se desenvolva e passe a competir de igual para igual com as outras tecnologias que estão há décadas implantadas.

Visto a essencialidade dos incentivos governamentais na inserção dos veículos elétricos no mercado brasileiro, foi construída uma variável de entrada que possui as seguintes funções de pertinência:

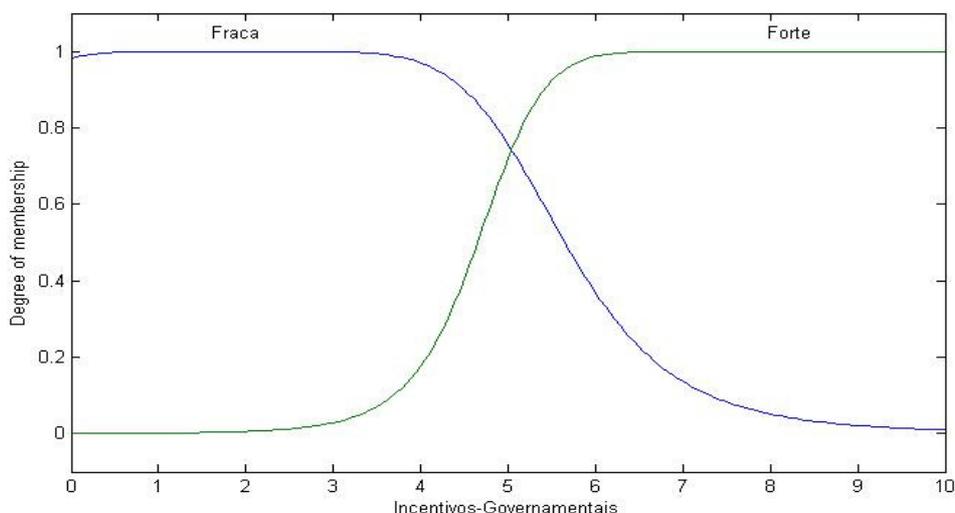


Figura 40 – Funções de Pertinência – Incentivos Governamentais

- **FRACA** – Esta função de pertinência representa o atual estágio de desenvolvimento no campo de incentivos governamentais no Brasil: ações isoladas, sem nenhuma ação integrada em todas as esferas governamentais, não possibilitando assim um crescimento robusto e consistente dos veículos elétricos;
- **FORTE** – Representa o pleno desenvolvimento de todas as ações apresentadas acima, abrangendo desde incentivos fiscais a ações em P&D em universidades e centros de pesquisa, possibilitando assim um desenvolvimento consistente de veículo elétrico no Brasil.

5.5.2.3 – TECNOLOGIAS

Para possibilitar maior disseminação da utilização dos veículos elétricos no Brasil, um obstáculo tem que ser superado: a difusão tecnológica. Dois pontos são importantes: o aumento de número de modelos ofertados ao consumidor e o desenvolvimento tecnológico das baterias dos veículos elétricos. Portanto, uma variável de entrada, chamada “*Tecnologias*”, foi criada para mensurar o impacto dos veículos elétricos no sistema elétrico brasileiro levando em consideração essas variáveis.

O custo de aquisição de qualquer veículo elétrico, comparado a um veículo “comum”, está relacionado com o custo da bateria, sendo este um dos principais pontos

para a pouca diminuição do preço dos carros elétricos (Velloso, 2010), (Impinnisi, 2014), (Castro & Ferreira, 2010) e (Borba, 2012). O custo da bateria em veículos elétricos vendidos atualmente está entre US\$ 8.000 a US\$ 14.000, dependendo da capacidade e tipo do veículo. Atualmente, as baterias de íons de lítio custam US\$ 650/kWh e segundo estudos realizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, o preço médio tem que cair para a casa de US\$ 200/kWh para permitir maior difusão dos veículos elétricos (Impinnisi, 2014). A IEA estima que em 2020 o preço já esteja próximo desta meta, entre US\$ 300/kWh a US\$ 200/kWh (Impinnisi, 2014). O que determina o custo das baterias é o elevado valor dos materiais envolvidos na fabricação quando realizada em baixa escala. Uma indústria fabricante de bateria com produção de 10.000 unidades chega a ter um custo por bateria de 60 a 80% acima do custo de uma planta para 100.000 unidades (Velloso, 2010). Ou seja, as poucas vendas atuais faz com que o mercado produtor de baterias não se expanda. Esta relação é bem visualizada no caso de telefones celulares. No início, estes tinham enormes baterias, com curta vida útil e necessitando de numerosas recargas. Com o desenvolvimento deste mercado e o uso maciço dos celulares, as baterias tornaram-se menores e mais eficientes.

Existem quatro tipos principais de baterias: chumbo-ácido, sódio, íon de lítio, níquel-hidreto metálico e zebra. As baterias de chumbo-ácido, muito difundidas no início do desenvolvimento dos veículos elétricos, possui custo baixo, mas apresenta pouca autonomia, com cerca de 90 km por recarga completa (Borba, 2012) e (Velloso, 2010). Já as baterias de íon de lítio parecem ser o próximo padrão de baterias (Velloso, 2010) e (Borba, 2012). Estas baterias apresentam energias específicas de mais de 150 Wh/kg e potências específicas de 200 W/kg. Como desvantagem, estão no fato de necessitarem de um sistema de carregamento preciso, sem variações e também a escassez deste produto no mundo. A IBM está desenvolvendo uma nova tecnologia com baterias de íons de lítio que utiliza oxigênio do ar e permite que a autonomia alcance a 800 km por carga completa (Impinnisi, 2014).

O desenvolvimento desta tecnologia está avançado atualmente, sendo que a cada 18 meses a densidade de energia aumenta em 15%, o custo por kWh armazenado cai 15% e a vida cíclica aumenta também em 15% (Impinnisi, 2014).

No futuro, o carregamento pode ser feito por supercapacitores, que absorvem picos de potência do freio regenerativo que as baterias não conseguem absorver.

Como dito em Borba (2012), o problema das baterias pode ser solucionado adotando-se técnicas alternativas. Em uma delas, a propriedade do automóvel é separada da propriedade da bateria, assim, a bateria pode se tornar uma *commodity*. O aluguel de baterias de carros elétricos também já é utilizado por várias empresas, como a General Electric.

De acordo com Clean Energy Ministerial (2013), há uma direta correlação entre vendas e variedade de produção de veículos elétricos. Como apresentado na Figura 41, com um aumento do número de modelos oferecidos em três anos, as vendas também cresceram em boa proporção, sugerindo que quanto mais modelos de veículos elétricos chegam ao mercado consumidor mais unidades são vendidas, pois isso acarreta em mais opções de compra e até possibilitando maior concorrência e possível diminuição nos preços.

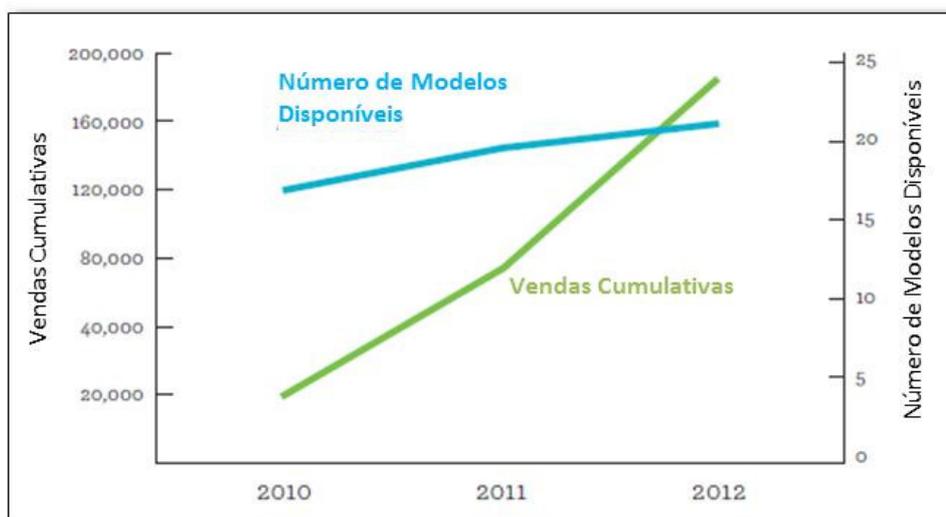


Figura 41 – Relação entre modelos ofertados e vendas de veículos elétricos (Clean Energy Ministerial, 2013)

Não há nenhum veículo fabricado no Brasil, sendo todos eles importados, como por exemplo, o Ford Fusion Hybrid, Toyota Prius e Mitsubishi i-MiEV. Logo, urge a instalação de fábricas de veículos elétricos no Brasil para aumentar a participação nas vendas e fomentar o desenvolvimento de uma série de outras áreas, como por exemplo, as baterias.

Assim, para esta variável de entrada foram criadas as funções de pertinência apresentadas a seguir:

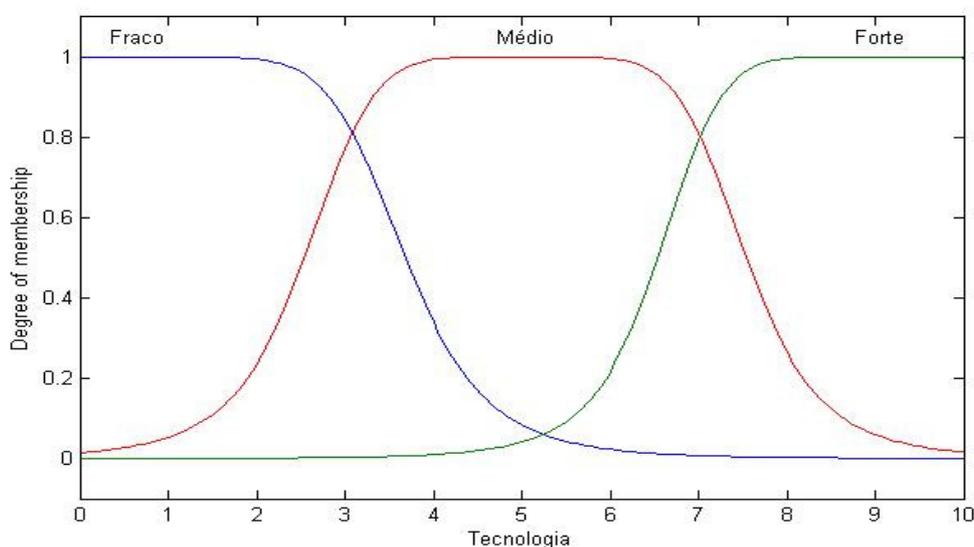


Figura 42 – Função de Pertinência – Tecnologia

- **FRACO** – Esta função de pertinência representa o baixo desenvolvimento tecnológico nas baterias e a pouca inserção de novos modelos de veículos elétricos no mercado brasileiro;
- **MÉDIO** – Esta função de pertinência representa um maior desenvolvimento das baterias, sem chegar a acontecer uma ruptura de tecnologia. Em relação aos modelos, há a chegada de um maior número de modelos importados;
- **FORTE** – Esta função de pertinência mostra uma ruptura tecnológica em relação às baterias, ocorrendo uma mudança significativa na sua eficiência e, conseqüentemente, no seu custo. Também há a instalação de linhas de montagem de veículos elétricos no Brasil, fazendo com que haja a dinamização no mercado consumidor.

5.5.2.4 – INFRAESTRUTURA & PADRONIZAÇÃO

No Brasil não existe uma rede de infraestrutura preparada para receber veículos elétricos, principalmente para os movidos a bateria, que possuem menor autonomia e necessitam que suas baterias sejam carregadas para possibilitar a realização de longas

viagens. Sem isso, os veículos elétricos podem ficar restritos a trajetos urbanos, de curto percurso. Visto isso, infraestrutura é uma variável de entrada na modelagem para análise do impacto de veículos elétricos no sistema de energia.

De acordo com Borba (2012), a recarga pode ser realizada de forma indutiva ou condutiva. A recarga condutiva representa a transferência de energia elétrica por meio de contato físico através de um meio condutor, enquanto que a recarga indutiva é feita por indução eletromagnética. Hoje, a recarga indutiva é a mais amplamente usada.

Os dispositivos de carregamento são divididos em 3 grupos: níveis I, II e III. Os dispositivos de nível I são aqueles comuns, em 127 V, que podem estar em qualquer garagem, sendo importante a instalação de um circuito específico na residência para atender a esta ligação. As tomadas de nível II, já em 220 V, surgem como uma aposta para os analistas para o futuro próximo (Castro & Ferreira, 2010) e (Schaeffer & Soares, 2010), pois o tempo de recarga é menor. Mas para isso é necessária a instalação de um painel elétrico dedicado, com um aumento do custo de instalação. Já os dispositivos de nível III são aqueles próprios para eletropostos, pois requerem uma tensão de maior amplitude e necessitam de um custo muito elevado para instalar apenas para uma residência. Abaixo, na Tabela 3, são apresentadas algumas informações sobre estes três tipos de dispositivos:

Tabela 3 – Características dos Pontos de Recarga (Castro & Ferreira, 2010)

Atributos	Nível I	Nível II	Nível III
Tensão Elétrica (V)	127 CA	220 CA	600 CC
Potência (kW)	1,5 – 2,0	2,5 -3,5	<240
Tempo de Recarga – Bateria de 24kW	16 horas	4-8 horas	30 minutos
Custo total (US\$)	833-878	1,5-2 mil	25-50 mil

Outro ponto importante é a adoção de um padrão universal, sendo este um tema fundamental para o avanço da tecnologia (Borba, 2012) e (Alcântara, 2010). Isto se refere à adoção de uma padronização dos conectores nas estações de recarga, assim como os protocolos de comunicação entre os veículos e estações de recarga. Já existem duas normas para padrões de carregadores, indicando que possivelmente haverá uma

divisão de padrões nos países. A primeira norma, SAE J1772, é uma norma criada pela Society of Automotive Engineers – SAE e usada pelos EUA e Japão. Já a norma IEC 62196 é uma norma internacional desenvolvida pela International Electrotechnical Commission – IEC e adotada pela Europa (Borba, 2012). Logo, a definição de uma norma a ser utilizada no Brasil, em consonância com as normas utilizadas no resto do mundo, é primordial para o pleno desenvolvimento de uma infraestrutura de recarga.

Visto que nos grandes centros urbanos a população vive em prédios e os mesmos não possuem uma grande quantidade de tomadas nas garagens, impossibilitando o carregamento simultâneo dos veículos elétricos, a criação de eletropostos é de suma importância para o desenvolvimento dos veículos elétricos. Assim, o surgimento de eletropostos possibilitaria a compra de veículo elétrico por pessoas que não possuem garagem, além de dar mais liberdade aos usuários de percorrerem maiores distâncias e não ficarem restritos à autonomia de uma recarga completa de bateria, principalmente em veículos movidos exclusivamente a baterias.

De acordo com diversos estudos, quando não há tarifação específica para veículo elétrico o carregamento das baterias é realizado quando os proprietários chegam às suas residências. Em um estudo realizado com 6 mil veículos elétricos nos EUA, o percentual de recarga realizada nas residências foi de 80% (DTE Energy, 2011) e (Schey, et al., 2012). Um comportamento que foi visto na cidade de Nashville, apresentado na Figura 36.

Um ponto importante no carregamento é a cultura de um povo. Como relatado em Clean Energy Ministerial (2013), os americanos tendem a serem menos usuais no carregamento de seus veículos em tomadas que não os pertencem. Na Figura 43, pode-se perceber que o Japão segue outro caminho: houve a preferência de carregamentos rápidos (nível III), em eletropostos ou similares. Isto pode estar relacionado com a grande densidade demográfica japonesa, onde não há a possibilidade de possuir grande quantidade de carregadores nas residências ou prédios. A opção por carregadores lentos nos EUA pode ter relação com a prevalência de veículos híbridos no país, onde a recarga durante a viagem em eletropostos é de menor recorrência.

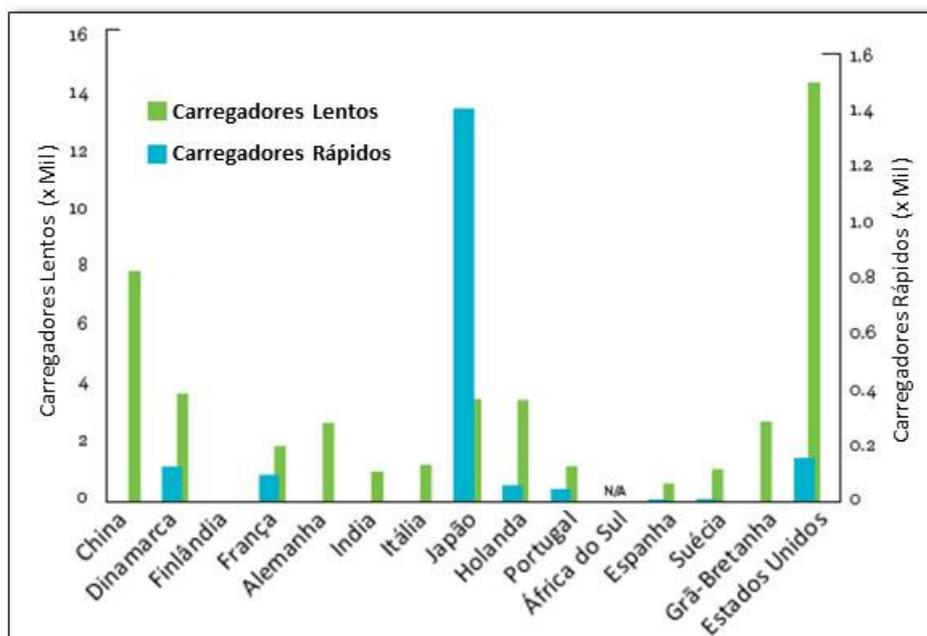


Figura 43 – Pontos de recarga em países (Clean Energy Ministerial, 2013)

De acordo com U.S. Department of Energy (2014), os donos de veículos híbridos *plug-in* são mais propensos a recarregar seus carros em estações de carregamento públicas. Estas estações são usadas primordialmente durante o dia e tem potencial de aumentar a demanda máxima do sistema elétrico, sendo necessárias medidas para minimizar esse efeito, como por exemplo, impedir o carregamento rápido em horas do dia que a demanda máxima é alcançada.

Determinada a importância do desenvolvimento de tecnologia para o aumento de vendas dos veículos elétricos no Brasil, foram criadas três funções de pertinência para mensurar este impacto, como mostrado na Figura 44 e explicada posteriormente:

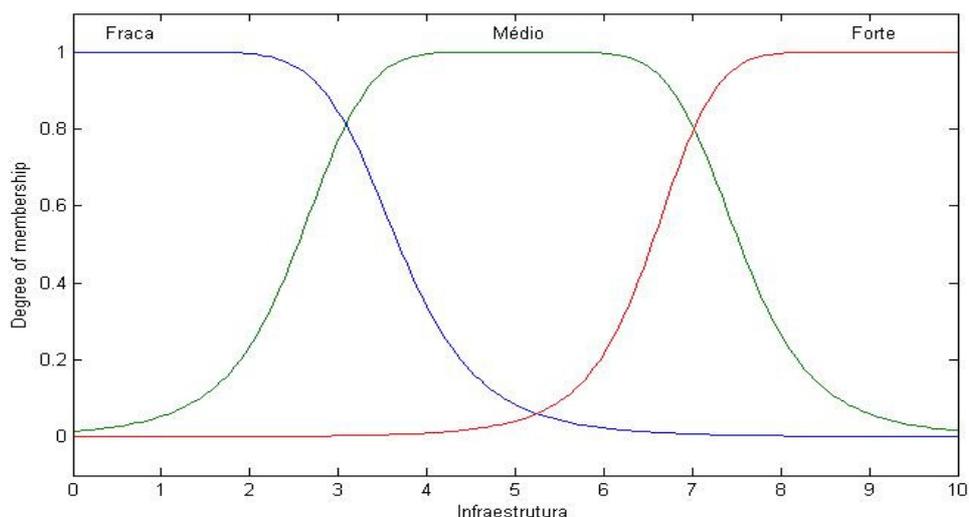


Figura 44 – Função de Pertinência – Infraestrutura e Padronização

- **FRACA** – Esta função de pertinência representa um fraco desenvolvimento da infraestrutura no Brasil no horizonte de estudo, sem mudanças estruturais significativas que possibilitem maior difusão dos veículos elétricos;
- **MÉDIO** - Esta função mostra uma maior entrada de carregadores do tipo II e III em eletropostos, fazendo com que a possibilidade de maiores viagens realizadas pelos veículos elétricos aumente;
- **FORTE** – Já nesta função há grande disseminação de postos de recarga, bem como a adoção de um padrão de carregadores.

5.5.3 – REGRAS

No sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido, as implicações (ou consequentes) das regras foram determinadas a partir de todos os dados coletados em documentos oficiais, estudos desenvolvidos e resultados de projetos-piloto. Para que o conjunto de regras se tornasse consistente, um grande conjunto de informações, como resultados já alcançados, comportamento dos consumidores e projeções futuras foi coletado em vários países do mundo e no Brasil. A partir da análise de todas estas informações, o autor determinou o consequente de cada uma das regras.

Foram criadas 54 regras a partir da combinação de todas as funções de pertinência das variáveis de entrada, que são informadas no Anexo A.

5.5.4 – VARIÁVEIS DE SAÍDA – IMPACTOS NOS SISTEMAS DE ENERGIA

Seguindo o apresentado anteriormente para os outros módulos da modelagem *fuzzy*, há duas variáveis de saída relativas à variável de entrada “Veículos Elétricos”. São elas: demanda máxima e energia. Diferentemente de todas as outras tecnologias apresentadas neste trabalho, a introdução em massa de veículos elétricos no mercado nacional irá resultar em impactos negativos na demanda máxima e energia, principalmente se não forem adotados sistemas de tarifação específicos para os veículos elétricos. Isso pode ocorrer, pois esta é uma nova carga a ser considerada no sistema elétrico e se não forem tomadas medidas específicas, principalmente para demanda máxima, problemas podem ocorrer no sistema elétrico. (Faruqui, 2009).

O impacto de cada uma das variáveis de saída será mensurado no capítulo referente ao estudo de caso da presente proposta.

5.6 - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

5.6.1 – INTRODUÇÃO

O principal objetivo da eficiência energética é abranger a otimização das transformações, do transporte e do uso dos recursos energéticos, desde suas fontes primárias até seu aproveitamento final.

Com a grande importância do melhor uso de energia nos dias atuais e o impacto que a *smart grid* pode trazer para a eficiência energética, foi criado um módulo específico para esta tecnologia no âmbito da *smart grid*. Portanto, foram criadas três variáveis de entrada: Sistemas de Tarifação, Tecnologias e Incentivos Governamentais, que são apresentadas a seguir,

5.6.2 – VARIÁVEIS DE ENTRADA – DIMENSÕES DE ANÁLISE

As variáveis de entrada representam uma importante parte da construção da modelagem *fuzzy*, pois a partir dos dados destas variáveis em conjunto com as regras criadas, as variáveis de saída podem ser mensuradas em um universo *fuzzy*. A seguir são apresentadas as variáveis de entrada, bem como as funções de pertinência que as regem.

5.6.2.1 – SISTEMAS DE TARIFICAÇÃO

A introdução de tarifação dinâmica trará inúmeros benefícios para o sistema elétrico brasileiro, e entre eles, o aumento dos níveis de eficiência energética dos consumidores. O conceito de eficiência energética está focado na diminuição global de uso de energia, durante todo o ano, ao contrário de mecanismos de resposta da demanda, que estão focados na redução da demanda máxima do sistema, que ocorre durante algumas horas do ano.

Eficiência energética no conceito de *smart grid* é relacionada ao uso mais consciente da energia. Com o advento da *smart grid* e todo o conjunto de tecnologias, os consumidores poderão ter mais controle e conhecimento sobre seu perfil de consumo, podendo assim diminuir seu consumo global, e até mesmo reduzir o consumo em momentos de demanda máxima, sendo este um benefício secundário.

Um sistema de tarifação voltado à eficiência energética irá possuir significativa importância nesta redução do consumo e por isso é uma variável de entrada para a modelagem do impacto de eficiência energética.

O principal mecanismo de tarifação para eficiência energética é a *Inclining Block Rates – IBR*. O princípio básico da utilização deste mecanismo é que o preço da energia aumenta conforme a utilização mensal do consumidor. Mas ao invés de aumentar uniformemente a cada kWh consumido, aumenta em blocos de kWh (Faruqi, 2008). Assim, a IBR pode ser muito efetiva para a promoção de eficiência energética, pois o consumidor saberá de antemão quais serão os níveis de aumento do preço de energia e assim poderá modular seu uso de energia ao longo do mês, contribuindo para a redução do consumo de energia.

Como relatado em Faruqi (2008), algumas características fazem a IBR ser bastante atrativa para a eficiência energética:

- Pode ser aplicada a todos os consumidores e não apenas àqueles que escolheram participar;
- Possui custo de implantação baixo, não sendo mandatório o uso de *smart meters*;
- Aumenta a economia em conjunto de outras tecnologias de eficiência energética, como a utilização de *in-home displays* (IHDs);
- É de fácil entendimento e utilização.

O funcionamento da IBR é mostrado na Figura 45. Em uma residência com consumo mensal de energia de 800 kWh, terá seu consumo contabilizado da seguinte forma: os primeiros 343 kWh custarão R\$ 0,143; o consumo entre 343 e 447 kWh custarão R\$ 0,166 e assim sucessivamente até o total de 800 kWh. A tarifa crescente ao longo do uso mensal de energia faz com que o consumidor tenda a utilizar menos a energia conforme a quantidade usada no mês vá aumentando, contribuindo assim para a eficiência energética.

A companhia energética da África do Sul – NERSA, usa a IBR desde 2010, com 4 blocos de consumo, com o primeiro bloco de tarifas cobrindo o consumo até 50 kWh (National Energy Regulator of South Africa - NERSA, 2012).

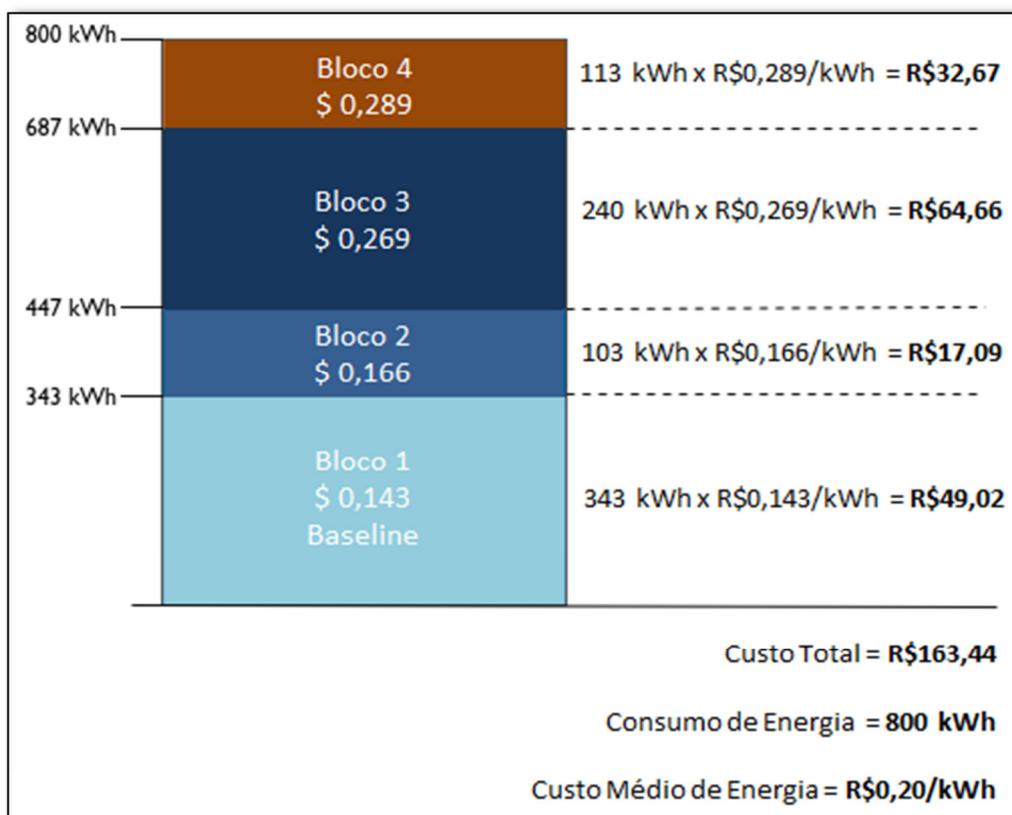


Figura 45 – Comportamento básico da IBR (EPIC Energy Blog, 2013)

Para ter controle sobre o uso mensal é necessário que o consumidor tenha acesso ao seu consumo mensal diário, seja por meio de sites de internet, aplicativos ou informações telefônicas.

Além da introdução da IBR, os mecanismos de tarifação chegarão ao máximo de eficiência com a utilização conjunta com tarifação dinâmica. O uso duplo de IBR e tarifas dinâmicas já é verificado na Califórnia e no Canadá (Faruqui, 2008) e (Hledik, 2009).

As bandeiras tarifárias introduzidas nas contas de energia dos consumidores brasileiros a partir de 2015 foram criadas com o intuito inicial de indicar ao consumidor o preço de energia mais alto e assim exercer um papel mais ativo na definição da conta de energia, sendo um primeiro passo voltado à eficiência energética no sistema de tarifação. O sistema possui três bandeiras: verde, amarela e vermelha, indicando as condições do sistema elétrico. Bandeira verde indica condições favoráveis de geração de energia, sem aumento da tarifa de energia; a bandeira amarela indica condições de geração mais severas, com a tarifa sofrendo acréscimo de R\$ 1,50 para cada 100 kWh consumido; já a bandeira vermelha registra condições mais custosas de geração. A

bandeira vermelha possui dois patamares: o primeiro patamar, de R\$ 3,00 por cada 100 kWh consumidos, será acionado quando o CVU da térmica mais cara sendo utilizada estiver entre R\$ 422,56/MWh e R\$ 610/MWh. Já o segundo patamar, com o valor de R\$ 4,50 para cada 100 kWh consumidos, será utilizado quando o CVU da térmica mais cara acionada ultrapassar os R\$ 610/MWh. Estas informações são referentes a janeiro/2016, sendo possível sua alteração ao longo do horizonte.

Assim, com a utilização das bandeiras tarifárias o consumidor pode modular seu consumo, diminuir o valor da conta e conseqüentemente contribuir para melhor uso dos recursos energéticos.

Determinada a importância de sistema de tarifação para o desenvolvimento da eficiência energética, foram criadas três funções de pertinência para mensurar este impacto, como mostrado na Figura 46 e explicada posteriormente:

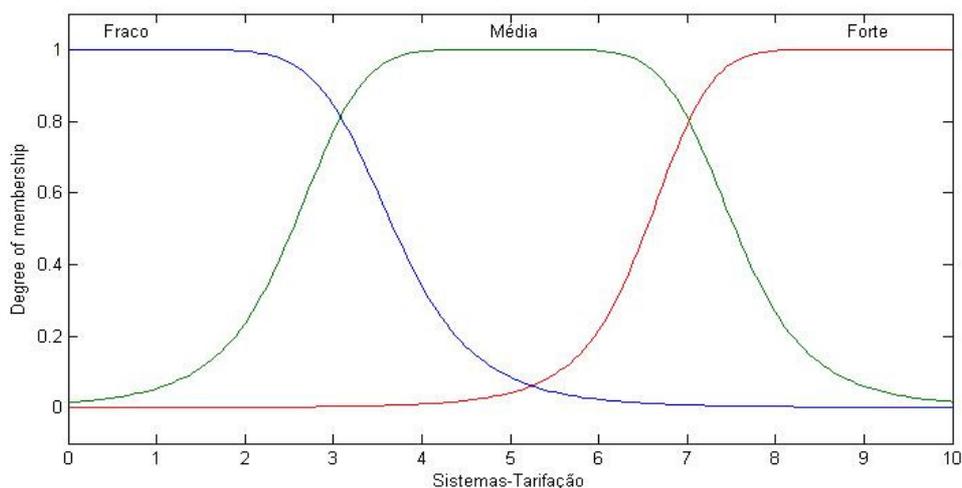


Figura 46 – Função de Pertinência – Sistema de Tarifação

- **FRACO** – Um desenvolvimento fraco representa a atual inserção deste tipo de mecanismo de tarifação no Brasil, onde não há incentivos para diminuição do consumo por meio de preços de energia. Esta função de pertinência engloba o atual cenário brasileiro, com o começo do uso das bandeiras tarifárias. Este sistema de tarifação é um primeiro passo em direção à busca de diminuição de consumo por meio de preços de energia, apesar de não ser o ideal para se buscar altas reduções. Como relatado em Charles River Associates (2005), os mecanismos de tarifação trarão mudanças em eficiência energética apenas se algo inovador for introduzido;

- **MÉDIA** – Representa alguns avanços nos mecanismos de tarifação e a principal é a introdução de tarifação dinâmica, que traz como benefício secundário a diminuição de energia ao longo do dia;
- **FORTE** – Sinaliza grande utilização de Inclining Block Rates, além da utilização em larga escala de outros sistemas de tarifação, como a VPP e PTR.

5.6.2.2 – TECNOLOGIAS

Como visto na dimensão de análise “Sistemas de Tarifação”, prover mecanismos de informação ao consumidor de energia é imprescindível para que a eficiência energética no âmbito de *smart grid* alcance seu máximo desenvolvimento.

Assim, nesta variável de entrada será analisado o impacto que as tecnologias inovadoras trarão para que o consumidor de energia elétrica tenha maior conhecimento sobre a utilização deste insumo, e assim, mudar seu comportamento.

O ponto principal para possibilitar o conhecimento do uso diário é a disseminação dos *smart meters*, pois a partir da instalação destes dispositivos, o equipamento fundamental para a eficiência energética pode ser instalado: os *in-home displays* - IHDs. Este pequeno e portátil equipamento mostra a utilização de energia em tempo real, acessando as informações vindas dos *smart meters*. Normalmente, estes dispositivos são wireless, possibilitando uma fácil leitura dos dados de consumo e deste modo o usuário poderá ter pleno conhecimento sobre seu histórico, utilizando a energia de forma mais eficiente.

Na Figura 47 é apresentado um IHD com informação de temperatura atual, consumo de energia e custo diário de energia:



Figura 47 – IHD típico para uso em *smart grid*

Além dos IHDs e *smart meters*, outra nova tecnologia são os equipamentos sensíveis a preços dinâmicos. Ou seja, são eletrodomésticos (como ar-condicionados, lavadoras de roupa, termostatos, etc) que equipados com dispositivos conectados diretamente aos *smart meters*, serão acionados ou desligados mediante sinalização em tempo real, fazendo com que o uso da energia diminua em momento de altas demandas de energia. Estes equipamentos possuem a habilidade de se comunicar com uma variedade de sinais externos como preços de energia, eventos emergenciais, previsões do tempo, entre outras variáveis (Gellings, 2009). Além disso, estes equipamentos têm a característica de possuírem alta eficiência.

Em outra vertente, também já existem projetos que testam um sistema instalado junto a chuveiros elétricos que recicla a energia térmica utilizado na água do banho, chegando a reduzir o consumo em até 45%, contribuindo para a eficiência energética.

Foram criadas duas funções de pertinência para mensurar este impacto, como mostrado na Figura 48 e explicada posteriormente:

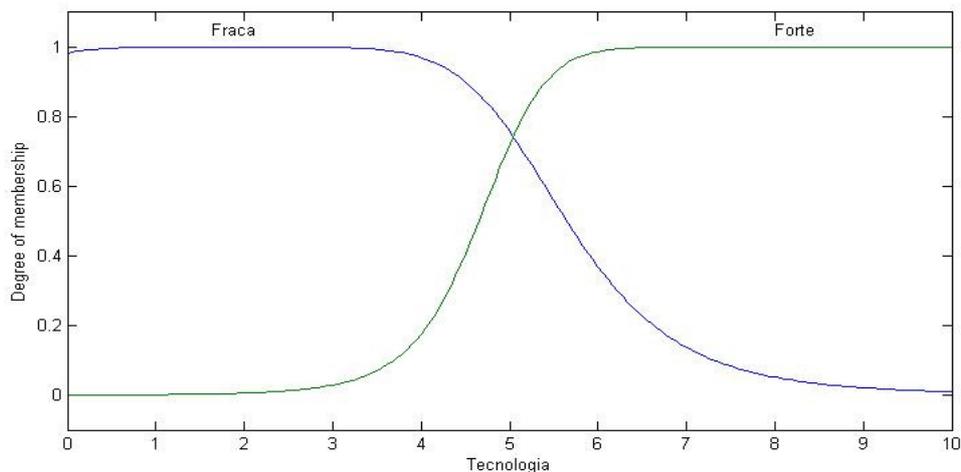


Figura 48 – Função de Pertinência – Tecnologia

- **FRACA** – Nesta função de pertinência a introdução dos *smart meters* se dá de forma tímida, bem como a introdução *dos in-home displays*;
- **FORTE** – Sinaliza um maior desenvolvimento do mercado de *smart meters* e IHDs, fazendo com que o consumo de energia seja mais racional e assim ocorra diminuição do consumo. Também há a introdução em maior escala de eletrodomésticos sensíveis ao preço de energia indicado pela concessionária a partir dos *smart meters*.

5.6.2.3 – INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS

Como visto no Capítulo 2, o Procel possui importante papel na disseminação da eficiência energética, abrangendo desde lâmpadas a construção de edificações e instalações industriais. Mas isso não é o suficiente, possuindo sempre em vista o conceito de *smart grid* e as melhorias que ela trará. Logo, devido às grandes mudanças necessárias em eficiência energética, incentivos governamentais são essenciais para se alcançar o pleno desenvolvimento deste item (Hledik, 2009).

Portanto, esta variável de entrada retrata o impacto de incentivos governamentais nas tecnologias *smart grid* em eficiência energética, não sendo realizada nenhuma análise nos programas já realizados pelo governo federal e até por governos estaduais e municipais.

De acordo com a EPE (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2013), os ganhos de eficiência energética estimados compõem-se basicamente de duas parcelas. A primeira delas denomina-se progresso tendencial, e corresponde ao movimento tendencial do consumidor final de energia, que inclui contribuições tais como a reposição tecnológica natural devido ao término da vida útil de equipamentos, os efeitos de políticas, programas e ações de conservação já em prática no país. Pode-se dizer que corresponde a uma trajetória do tipo *business-as-usual*. Já a segunda parcela de contribuição denomina-se progresso induzido, necessitando da instituição de programas e ações adicionais orientados para o incentivo à eficiência energética. Assim, todas as ações aqui apresentadas enquadram-se no progresso induzido, ou seja, necessitando de mecanismos que possibilitem o seu pleno desenvolvimento.

Um exemplo de incentivo governamental está na adoção de incentivos fiscais para a compra de IHDs, *smart meters* e equipamentos sensíveis ao preço para consumidores e até incentivos para as distribuidoras repassarem de graça estes dispositivos para os consumidores que não podem adquirir estes equipamentos devido ao seu custo.

Outro exemplo nesta área é a maior ação do Procel em ações voltadas à conscientização da população sobre os benefícios da eficiência energética, principalmente ao uso global dos equipamentos domésticos e como os IHDs podem diminuir a conta de energia elétrica e desta forma impactar no planejamento energético e no meio ambiente, podendo ser criada uma vertente do Procel especializada em *smart grid*.

Foram criadas três funções de pertinência para mensurar este impacto, como mostrado na Figura 49 e explicada posteriormente:

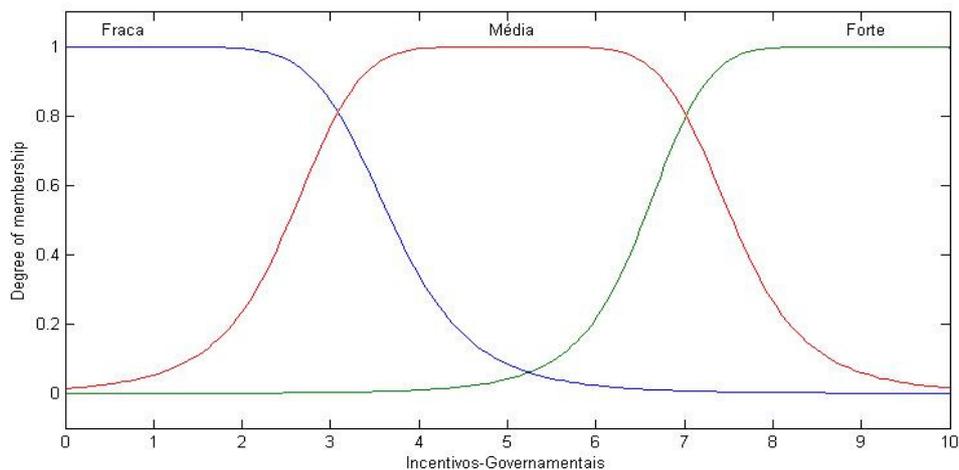


Figura 49 – Função de Pertinência – Incentivos Governamentais

- **FRACA** – Representa pouca participação governamental com importância no âmbito de *smart grid* e eficiência energética, não sendo realizado nenhum programa ou projeto específico;
- **MÉDIA** – Sinaliza um maior apoio governamental em ações voltadas ao desenvolvimento da eficiência energética no campo de *smart grids*;
- **FORTE** – Sinaliza uma participação mais arrojada de ações governamentais, inclusive para a instalação de empresas fabricantes de IHDs e *smart meters*.

5.6.3 – REGRAS

No sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido, as implicações (ou consequentes) das regras foram determinadas a partir de todos os dados coletados em documentos oficiais, estudos desenvolvidos e resultados de projetos-piloto. Para que o conjunto de regras se tornasse consistente, um grande conjunto de informações, como resultados já alcançados, comportamento dos consumidores e projeções futuras foi coletado em vários países do mundo e no Brasil. A partir da análise de todas estas informações, o autor determinou o consequente de cada uma das regras, que representa o impacto da eficiência energética no sistema elétrico.

Foram criadas 18 regras a partir da combinação de todas as funções de pertinência das variáveis de entrada descritas nas seções anteriores, que são apresentadas no Anexo A.

5.6.4 – VARIÁVEIS DE SAÍDA – IMPACTOS NOS SISTEMAS DE ENERGIA

Seguindo o apresentado anteriormente para os outros módulos da modelagem *fuzzy*, há duas variáveis de saída relativas à variável de entrada Eficiência Energética. São elas: demanda máxima e energia. Todas estas variáveis de saída representarão um impacto positivo no sistema de energia brasileiro, ou seja, haverá diminuição em cada um dos itens analisados, trazendo benefícios para a sociedade.

O impacto de cada uma das variáveis de saída será mensurado no capítulo referente ao estudo de caso da tese.

CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE CASO

6.1 – INTRODUÇÃO

O objetivo do presente estudo é mensurar o impacto da introdução de novas tecnologias que são trazidas, ou mais bem difundidas, com o advento da *smart grid* no sistema elétrico brasileiro, no horizonte de longo prazo, até 2050, possuindo 2030 e 2040 como outros anos de análise. O ano de 2050 foi escolhido por ser o horizonte de estudo mais longo já feito no Brasil, por meio do PNE 2050, desenvolvido pela EPE.

Foram analisadas quatro áreas que, de acordo com a literatura especializada, sofrerão grande impacto com a disseminação da *smart grid*. São elas: Resposta da Demanda, Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética. Dentre as várias combinações de cenários que podem ser construídos, o autor selecionou quatro cenários que possuem maior probabilidade de ocorrer no longo prazo, como apresentado a seguir:

- **Cenário 1** – Cenário de baixo desenvolvimento da *smart grid*;
- **Cenário 2** – Cenário de alto desenvolvimento da *smart grid*;
- **Cenário 3** – Cenário de alto desenvolvimento para Resposta da Demanda e Pequena Geração Distribuída e baixo desenvolvimento para Veículos Elétricos e Eficiência Energética;
- **Cenário 4** – Cenário de alto desenvolvimento para Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética e baixo desenvolvimento para Resposta da Demanda.

Para cada um destes cenários serão dadas avaliações para cada uma das variáveis de entrada que compõem cada tecnologia na implementação *fuzzy* construída. Estas avaliações serão condizentes com o avanço esperado para cada uma das tecnologias/áreas em cada cenário e vão impactar diretamente cada uma das variáveis de

saída. As variáveis de saída são: Impacto na Energia e Impacto na Demanda Máxima, variáveis de estudo no estudo da demanda energética.

Para a previsão das emissões de CO₂ evitadas pela inserção de tecnologias *smart grid* foi realizado um ensaio a partir dos cenários apresentados Latin American Modeling Project And Integrated Climate Modelling And Capacity Building In Latin America – LAMP-CLIMACAP até 2050 para o Brasil no artigo “Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy” (Lucena, et al., 2015). Neste projeto, seis modelos geraram perfis de geração do sistema energético brasileiro até 2050 sob diferentes taxas de carbono e redução de emissões de CO₂ advindas de combustíveis fósseis e indústrias.

Deste modo, para os quatro principais cenários construídos pelo LAMP-CLIMACAP até 2050 (baixo preço de CO₂, alto preço de CO₂, 20% de abatimento de emissões de combustíveis fósseis e indústria e 50% de abatimento de emissões de combustíveis fósseis e indústria), foi feito um estudo mensurando o impacto da *smart grid* na emissão de CO₂, com os dados de diminuição de energia advindos da implementação *fuzzy* para os cenários 1 a 4 apresentados anteriormente.

Apesar da emissão de CO₂ não estar ligada diretamente ao planejamento energético clássico, a grande preocupação de organismos internacionais em relação à emissão de gases de efeito estufa nas próximas décadas e a vocação que a *smart grid* possui de tornar a matriz energética mais limpa, faz com que uma análise nesta direção seja realizada.

No presente trabalho, o ponto principal da implementação *fuzzy*, no que diz respeito aos impactos decorridos na introdução de cada tecnologia, é a determinação da máxima previsão de cada variável de saída da implementação *fuzzy*, ou seja, no impacto na energia e impacto na demanda máxima, em cada uma das áreas de estudo em *smart grid*. Como pode ser visto na Figura 50, as funções de pertinência que compõem cada variável de saída são construídas ao longo de um intervalo iniciando em 0, que corresponde ao mínimo impacto, e finalizando com o máximo valor que a variável de saída pode ter – o máximo impacto em energia ou demanda máxima. Um exemplo é apresentado na Figura 50, que mostra o impacto em energia em eficiência energética, que possui um valor máximo de impacto no horizonte de estudo de 1,4%.

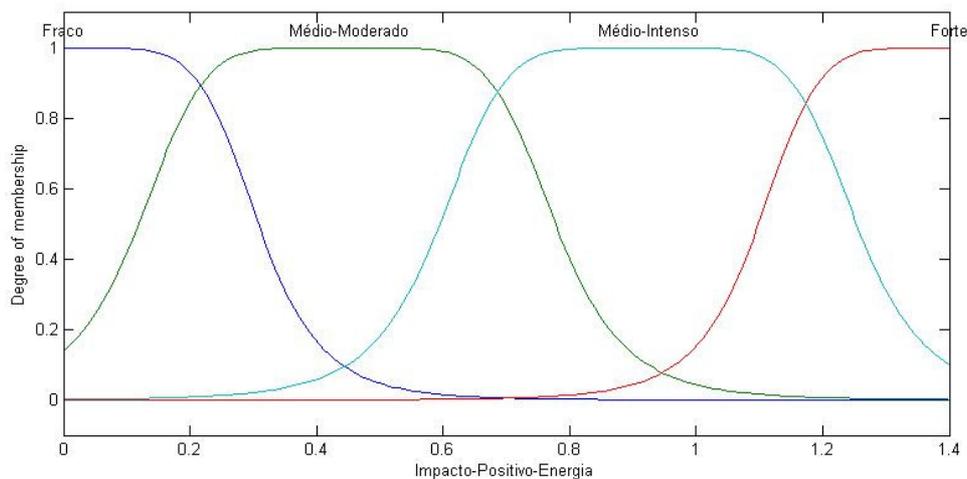


Figura 50 – Funções de Pertinência – Variáveis de saída

Para a definição do valor de máximo impacto de cada variável serão utilizados trabalhos realizados no Brasil e exterior. Não possuindo qualquer valor para o Brasil, os dados originados de outros países serão avaliados e trazidos para a realidade brasileira, respeitando as características energéticas, geográficas, econômicas e sociais do país. Na oportunidade de existir qualquer informação sobre o impacto de qualquer tecnologia no Brasil, esta terá preponderância sobre as demais.

Não há nenhum estudo realizado para o Brasil que abranja todas as tecnologias e conceitos aqui apresentados. Deste modo, não serão avaliadas comparações com nenhum outro estudo. O trabalho mais próximo já realizado foi o projeto de P&D, capitaneado pela ABRADDEE (Kagan, et al., 2013), que deu origem a dois livros, que foram usados como fonte de pesquisa para este trabalho.

Logo, para determinar os impactos na demanda máxima e energia, serão utilizados em grande parte estudos realizados no exterior, em sua maioria nos EUA, onde há grande diversidade de estudos abrangendo um número consistente de estados e classes sociais.

O cenário de referência em relação ao consumo total de eletricidade será o valor apresentado na Nota Técnica “Demanda de Energia 2050” (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014), apresentada pela EPE, que norteia os estudos do PNE 2050. Em 2050, o consumo total de eletricidade será de 1.624 TWh.

Não há projeção de demanda máxima nos estudos já lançados pelo PNE 2050, portanto para chegar a uma estimativa deste valor foi calculada uma relação entre as variáveis demanda máxima (MW) e energia (MWmédios) no PDE 2024, último plano decenal lançado oficialmente pela EPE até a conclusão da presente tese. Dividindo-se estas duas variáveis, a relação tem o valor médio nos 10 anos de estudo de 1,28, ou seja, a demanda máxima é, em média, 28% maior do que a carga de energia.

De acordo com a Nota Técnica “Demanda de Energia 2050”, a carga de energia em 2050 será de 196.977 MWmédios. Deste modo, a demanda máxima projetada para este presente trabalho, utilizando a relação de 1,28, será de 252.131 MW.

Nas próximas seções, primeiramente serão apresentados os impactos máximos em energia e demanda máxima de cada área da *smart grid*. Em uma segunda etapa, serão mostrados detalhadamente os cenários analisados e, finalmente, o estudo de redução de emissão de CO₂ a partir dos dados do LAMP-CLIMACAP será apresentado.

6.2 – RESPOSTA DA DEMANDA

A resposta da demanda é a principal, ou ao menos a mais visível tecnologia a ser implantada com a *smart grid*. Em muitos textos e análises, resposta da demanda e *smart grid* são termos que são confundidos. Em outros documentos, *smart grid* apenas se relaciona com resposta da demanda.

Diferentemente das outras tecnologias em *smart grid*, há um grande número de projeções e resultados de estudos de projetos-piloto já realizados em diferentes países, englobando desde projetos realizados em pequenas cidades até projeções feitas para países diversos como Estados Unidos e Nova Zelândia.

O que iguala a resposta da demanda das outras tecnologias em *smart grid* é a falta de dados nacionais. Nenhum projeto-piloto teve resultado divulgado até a finalização desta tese e existem poucos estudos nacionais sobre o futuro da resposta da demanda para o Brasil.

6.2.1 – IMPACTO NA ENERGIA

O impacto no consumo de energia muitas vezes é negligenciado nas análises de resposta da demanda, sendo o impacto na demanda máxima o foco principal de vários estudos. Mas como apresentado anteriormente, a diminuição no consumo de energia é um impacto importante na resposta da demanda, pois os consumidores tendem a ter maior controle sobre seu consumo e visualizando excessos cometidos na utilização diária.

No decorrer da pesquisa para a realização desta tese, foram analisados 36 estudos, apresentados no Anexo B, que mensuram o impacto da resposta da demanda no consumo de energia. Destes, 13 estudos são resultados de projetos-piloto e 23 são oriundos de projeções realizadas por institutos de pesquisa.

Como pode ser observado, é uma grande gama de dados, com diferentes premissas de estudos, abrangendo diversos países, classes sociais e econômicas, que em muitos casos, diferem da realidade brasileira no momento e até para os próximos 35 anos. Desta forma, foram utilizadas algumas métricas para verificar qual o impacto de cada um destes estudos na energia. São elas:

Tabela 4 – Métricas – Impactos em energia – Resposta da demanda

Métricas	Valores (%)
Média Global	7,29
Média - Previsões	4,75
Média - Projetos-Piloto	8,71
Mediana Global	5,50
Mediana - Previsões	3,00
Mediana - Projetos-Piloto	6,90

Avaliando as métricas apresentadas acima, pode-se inferir que as 23 previsões realizadas, com valores médios de 4,75%, tem a tendência de menores valores médios de impactos de energia, com valores representando 54% dos valores médios dos

projetos-piloto. A mediana traz valores mais conservadores, pois elimina-se os extremos inferiores e superiores dos estudos realizados.

Também é possível analisar todos os estudos por meio de faixas de impactos, como pode ser observado na Figura 51. É possível observar que dezessete estudos (47,2%) estão na faixa de impacto entre 0 a 5%. Já os estudos que determinam grande impacto no consumo de energia, ou seja, maior que 20%, são apenas três estudos.

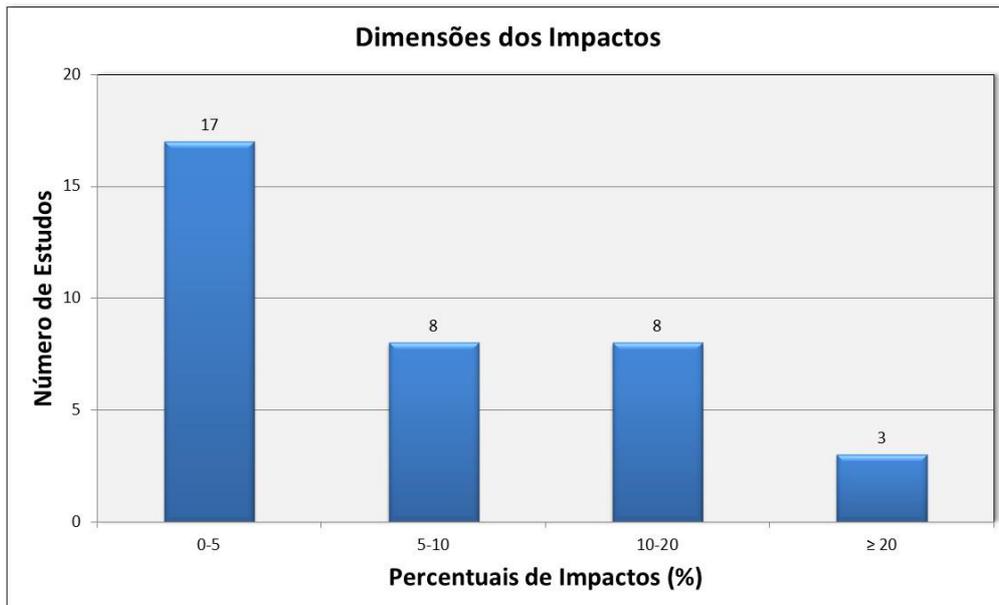


Figura 51 – Dimensões dos impactos por faixas de valores

Portanto, por conservadorismo, para se determinar o impacto máximo que pode ser alcançado no consumo de energia por meio da resposta da demanda em 2050, será utilizada a mediana de todos os estudos. Assim, o impacto máximo da resposta da demanda no consumo de energia é de 5,5%, correspondendo a uma diminuição de aproximadamente 90 TWh em 2050.

A seguir, são apresentadas as funções de pertinência da variável de saída “Impactos em Energia” e o comportamento das variáveis de entrada “Projeto-Piloto” e “Sistemas de Tarifação” em todo o universo de avaliações.

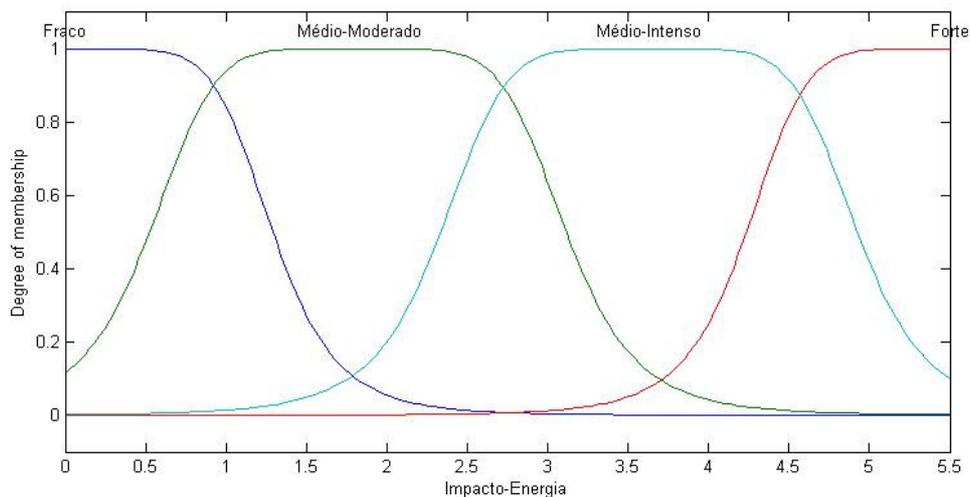


Figura 52 – Variáveis de saída – Impacto em energia

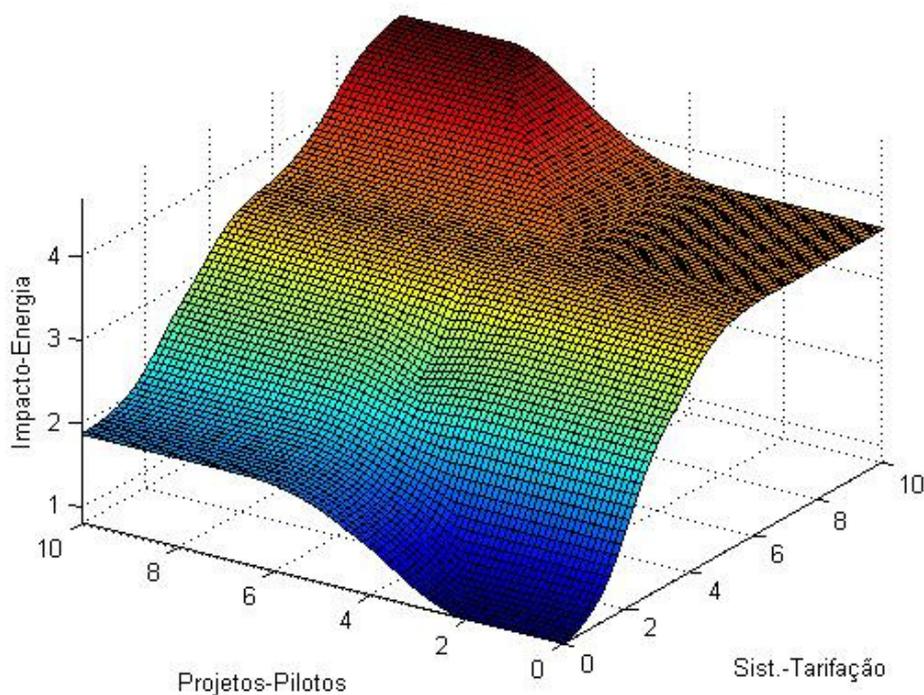


Figura 53 – Curvas de níveis - Energia

6.2.2 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA

O objetivo clássico da resposta da demanda é a diminuição da demanda de energia em momentos de stress do sistema, normalmente com preços elevados de energia, trazendo assim maior participação dos consumidores de energia no comportamento da carga.

Vários dos trabalhos que servirão de base para mensurar o impacto em demanda máxima focam exclusivamente este impacto, negligenciando possíveis ganhos no consumo de energia. A mudança na demanda máxima é advinda principalmente com fortes mudanças no sistema de tarifação adotado.

Um dos principais trabalhos, já apresentado no capítulo 4, é o “Arcturus: International Evidence on Dynamic Pricing” (Faruqui & Sergici, 2009). Nele foram analisados 34 estudos com 163 tipos de tarifação, englobando sete países de quatro continentes e sendo assim um importante banco de dados sobre este tema. Analisando a Figura 54, já apresentada anteriormente, percebe-se que quanto mais complexo for o sistema de tarifação utilizado, maior é a resposta da demanda. Além disso, com a inserção da tecnologia há um aumento dos ganhos médios de cada sistema de tarifação.

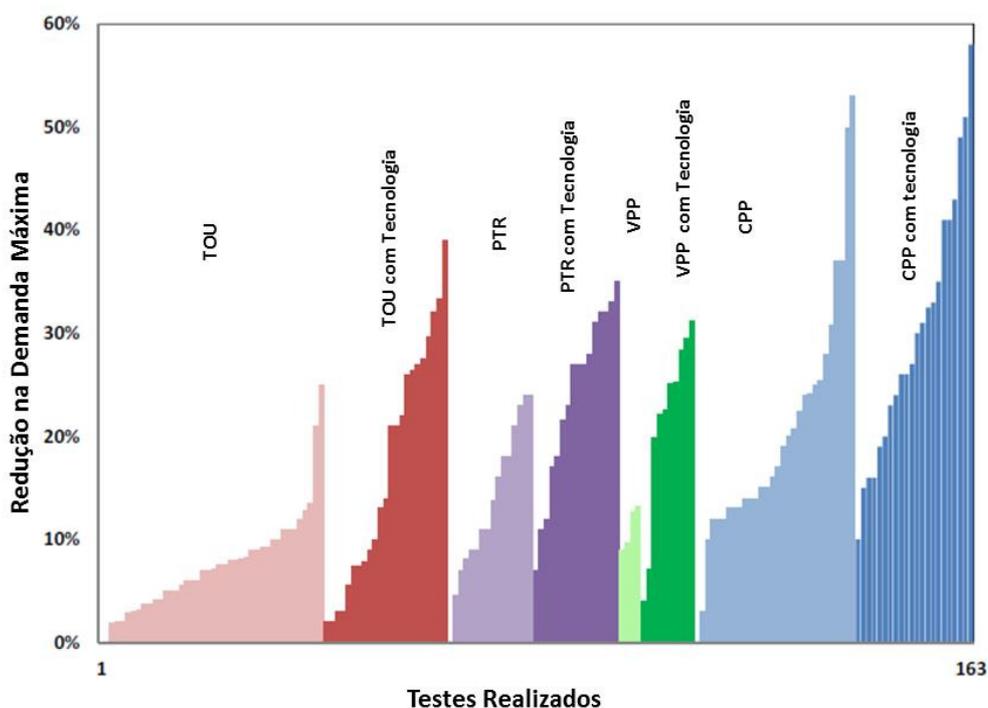


Figura 54 – Comportamento das tarifas dinâmicas (Faruqui & Sergici, 2009)

Para mensurar o impacto na demanda máxima foram utilizados 73 estudos: 15 previsões de institutos e 58 projetos-piloto, contando com o já citado Arcturus, que engloba 34 estudos. Estes estudos são apresentados no Anexo B.

Da mesma forma que o apresentado na seção referente ao impacto da energia, este conjunto de estudos representa uma grande gama de dados, com diferentes premissas de metodologia, abrangendo diversos países, classes sociais e econômicas,

que em muitos casos, diferem da realidade. Desta forma, foram utilizadas algumas métricas para verificar qual o impacto de cada um destes estudos na energia. São elas:

Tabela 5 – Métricas – Impactos em demanda máxima – Resposta da demanda

Métricas	Valores (%)
Média Global	18,40
Média - Previsões	15,42
Média - Projetos-Piloto	19,17
Mediana Global	16,00
Mediana - Previsões	15,00
Mediana - Projetos-Piloto	17,00

Avaliando as métricas apresentadas acima, pode-se inferir que as 15 previsões realizadas, com valores médios de 15,42%, tem a tendência de menores valores de impactos de energia, com valores representando 80% dos valores médios dos projetos-piloto. A mediana traz valores mais conservadores, pois elimina-se os extremos inferiores e superiores dos estudos realizados. Mesmo utilizando diversas métricas, os valores não diferem muito entre si, indicando que os impactos na demanda máxima mensurados por diversos institutos convergem para uma mesma direção.

Analisando os estudos por faixas de impactos, é possível inferir que 68% dos estudos possuem impacto maior que 10% na demanda máxima. Além disso, apenas 5 estudos determinam que possuem impacto menor que 5%, como pode ser visto na Figura 55.

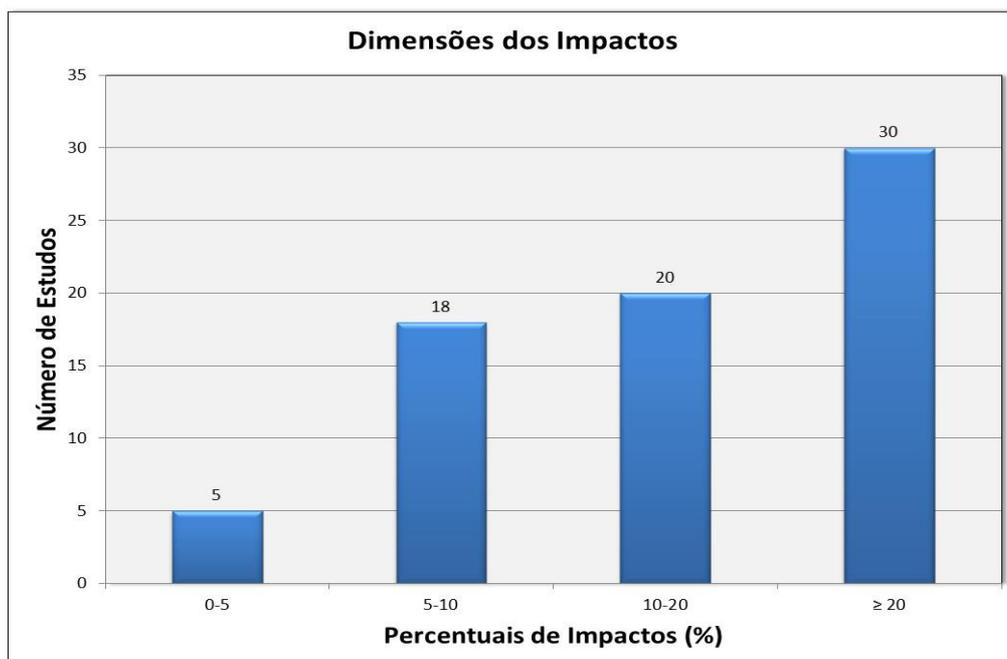


Figura 55 – Dimensões dos impactos por faixas de valores

Portanto, analisando todas as variáveis relacionadas ao impacto na demanda máxima devido à resposta da demanda, e sendo conservador na análise, será utilizada a mediana de todos os estudos. Assim, o impacto máximo da resposta da demanda na demanda máxima é de 16%, correspondendo a uma diminuição de mais de 40.000 MW em 2050.

A seguir, são apresentadas as funções de pertinência da variável de saída “Impactos em Demanda Máxima” e o comportamento das variáveis de entrada “Regulamentação” e “Sistema de Tarifação” em todo o universo de avaliações.

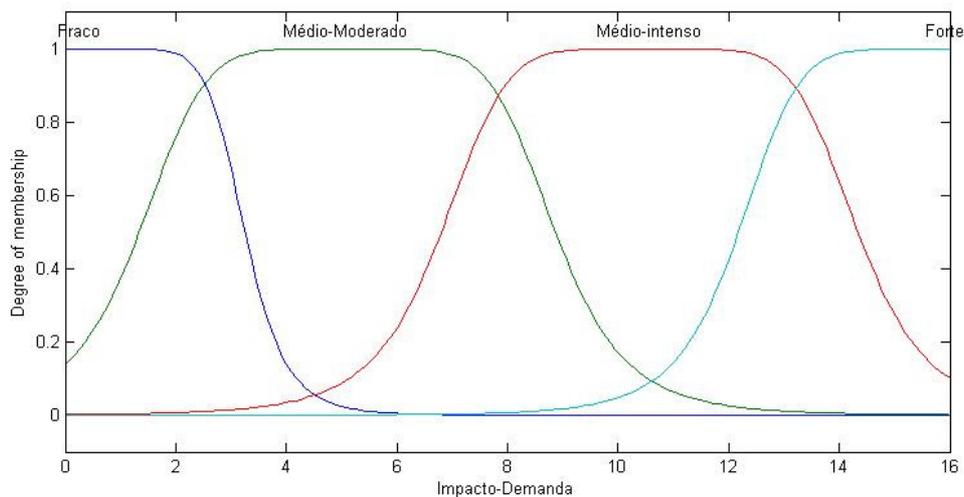


Figura 56 – Variáveis de saída – Impacto em demanda máxima

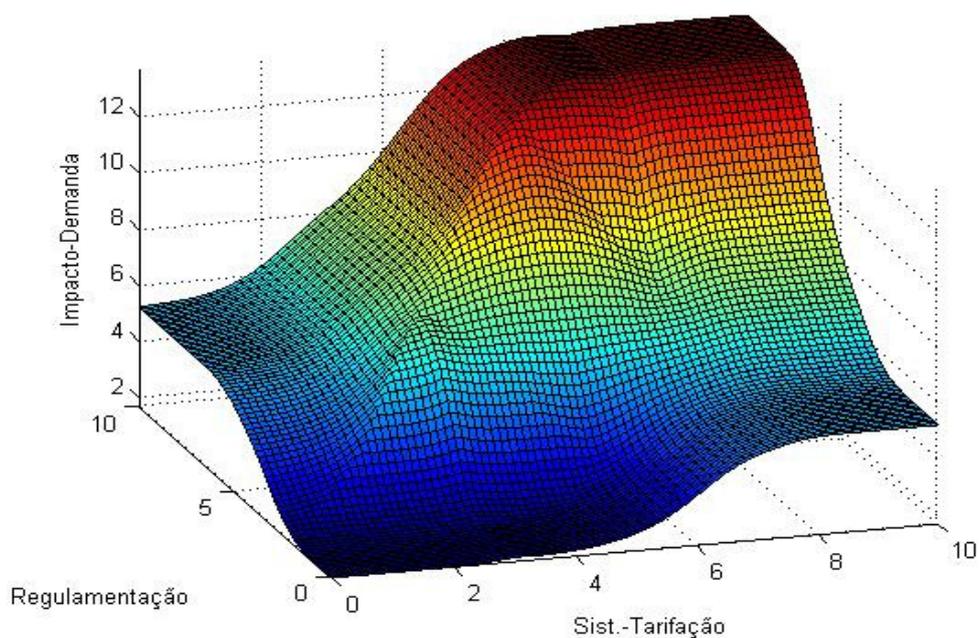


Figura 57 – Curvas de níveis – Demanda máxima

6.3 – PEQUENA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A introdução em maior escala de pequena geração distribuída, na forma de mini/microgeração trará impactos significativos no sistema energético brasileiro. Como relatado no Capítulo 5, a geração distribuída impactará no consumo global de energia, na demanda máxima e na emissão de CO₂. O presente trabalho tem enfoque energético

e não elétrico, logo, a introdução de pequena geração distribuída trará outros benefícios à rede elétrica, como diminuição de perdas elétricas e minimização de tempo de *blackouts*, que não serão avaliados no presente trabalho.

6.3.1 – IMPACTO NA ENERGIA

O primeiro trabalho publicado no Brasil para previsão de desenvolvimento da geração distribuída com a *smart grid* é o livro resultante do programa de P&D desenvolvido pela ABRADDEE (Kagan, et al., 2013). Em relação à geração distribuída, o programa de P&D mensura o impacto em 2030 para três cenários, para geração solar, eólica e biomassa.

Para geração solar é estimado o total de MW instalado e total de clientes atendidos para as cinco regiões do Brasil, fazendo ao final uma totalização para todo o país. Para geração eólica e biomassa são apresentados a potência total instalada em MW e o número de clientes no país nos três cenários até 2030. Neste trabalho, o impacto na matriz energética em 2030 varia de 3% a 8%, dependendo do cenário utilizado.

Na Nota Técnica “Demanda de Energia 2050” (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014), sobre o comportamento da demanda de energia do Brasil até 2050, é dedicado um capítulo para a introdução de geração distribuída de pequeno porte no país, sem citar a *smart grid*. De acordo com a EPE, há a grande possibilidade de inserção em larga escala de pequena geração distribuída, principalmente por parte de geração solar em residências, determinada principalmente pela queda dos custos do sistema fotovoltaico.

Nesta nota técnica foram criados dois cenários: cenário de referência e cenário de novas políticas. No cenário de novas políticas, há maior introdução de fontes descentralizadas de energia por meio de incentivos governamentais e diminuição dos preços de equipamentos, como pode ser visto na Figura 58:

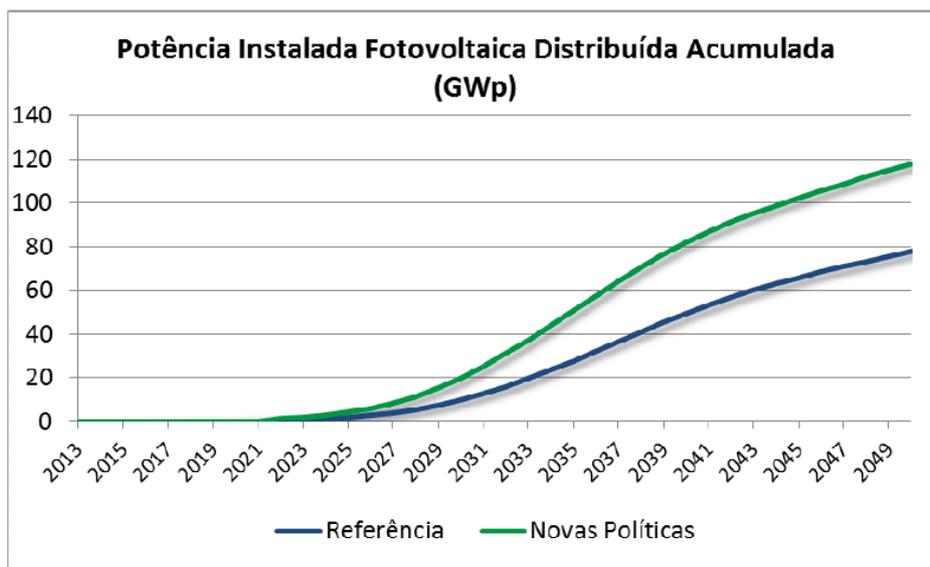


Figura 58 – Potência instalada fotovoltaica acumulada. Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014)

No cenário de novas políticas, em 2050, a potência instalada final será de 118 GWp, e utilizando uma eficiência média de 12% no conjunto fotovoltaico conforme descrito em (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014), teremos uma geração de 124 TWh, correspondendo a 7,64% da eletricidade em 2050, muito próximo do estimado pela ABRADEE em seu trabalho. Como a eficiência utilizada é estimada, foi determinado que as duas previsões para o Brasil, da ABRADEE e EPE, possuem o mesmo valor de 8%.

O modelo Igrid (Faruqui, 2009), desenvolvido pela consultoria The Brattle Group em colaboração com a National Association of Regulatory Utility Commissioners – NARUC, organização sem fins lucrativos que representa o Estado Americano em comissões de serviço público que regulam os serviços públicos que prestam serviços essenciais como energia, telecomunicações, água e transporte, quantifica os impactos trazidos pela *smart grid* nos EUA em 2050 em diversas tecnologias. Em relação à geração distribuída, o enfoque foi direcionado para o armazenamento de energia e crescimento da geração eólica. De acordo com o projeto, nos Estados Unidos, a maior penetração de geração distribuída se dará em consumidores comerciais e industriais de pequeno e médio porte.

O projeto cita a importância da geração solar, mas relata que é necessária uma pesquisa mais profunda para indicar seus impactos. De acordo com essa fonte, o impacto da geração distribuída nos EUA em 2050 será de 4%.

O relatório elaborado pelo U.S. Department of Energy, dos EUA, tem o objetivo de estimar alguns dos benefícios do desenvolvimento de tecnologias que compõem a *smart grid* nos projetos desenvolvidos pelo Smart Grid Investment Grant – SGIG (Pacific Northwest National Laboratory, 2012). Para isso, utilizou o simulador GridLab-D, específico para mensurar o impacto de tecnologias da *smart grid* no sistema de distribuição.

Para sistemas fotovoltaicos o estudo dividiu o país em cinco regiões, cada uma delas com um tipo de clima. Deste modo, a mudança de consumo de energia anual diminuiria de 0,2% a 2,5%. Esta diferença de comportamento é resultado do nível de penetração de sistemas fotovoltaicos em cada região, que varia de 1 a 6%.

Em outra previsão, a Energy Information Administration – EIA, órgão responsável por dados estatísticos de energia do governo dos Estados Unidos, faz uma previsão que em 2040, a geração distribuída será capaz de reduzir a energia em até 2,2% (U.S. Energy Information Administration, 2015).

Assim, temos cinco valores de impactos máximos de diminuição de consumo anual de energia:

Tabela 6 – Impactos máximos em energia – Pequena Geração Distribuída

Impacto na Energia (%)	
Fonte	Percentual
ABRADEE	8,0
Igrid	4,0
SGIG	2,5
EIA	2,2
EPE	8,0

Analisando as cinco previsões percebe-se a diferença de valores. Obviamente, são retratados dois países diferentes, com premissas e horizontes distintos. Portanto,

serão adotados pesos para cada um dos números para que possíveis erros de projeções e tendências regionais sejam diluídos. Por ser uma análise específica para o Brasil, as previsões da ABRADDEE e EPE terão maior peso no valor máximo final. O resultado é o seguinte:

Tabela 7 – Pesos e Valor Final

Impacto na Energia (%)			
Fonte	Valores Médios (%)	Peso	Valor Final (%)
Previsão - Brasil	8,0	0,6	5,96
Previsão Exterior	2,9	0,4	

Portanto, na análise realizada, o impacto máximo de pequena geração distribuída no consumo de energia será de 5,96% em 2050, correspondendo a uma diminuição de consumo de 96,79 TWh de consumo final de eletricidade em 2050, possuindo como referência os números já lançados em notas técnicas do PNE 2050.

A seguir, são apresentadas as funções de pertinência da variável de saída “Impactos em Energia” e o comportamento das variáveis de entrada “Regulamentação & Incentivos Governamentais” e “Sistemas de Tarifação” em todo o universo de avaliações.

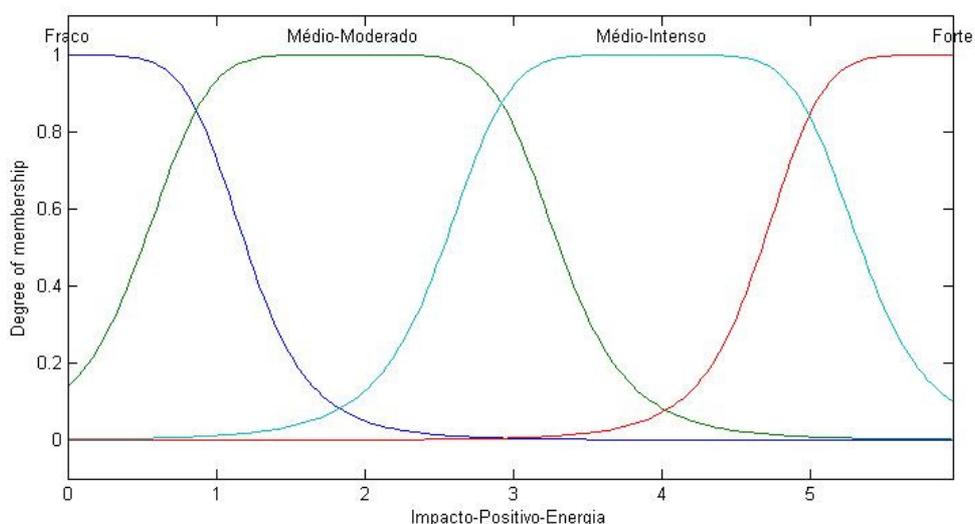


Figura 59 – Variáveis de saída – Impacto em energia

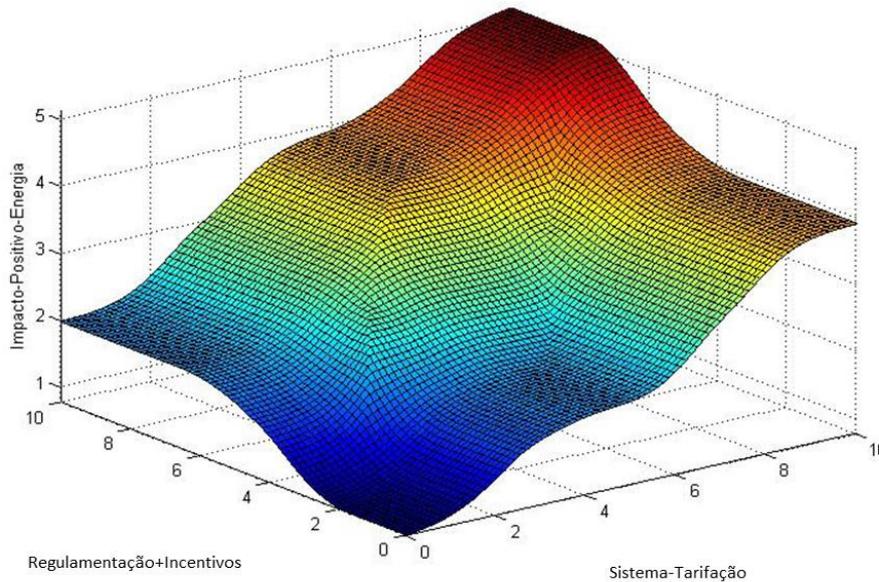


Figura 60 – Curvas de níveis – Energia

6.3.2 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA

Do mesmo modo do apresentado na seção anterior, três trabalhos mostram resultados para impactos na demanda máxima, sendo este um impacto secundário na disseminação de pequena geração distribuída.

No livro resultante do P&D desenvolvido pela ABRADDEE (Kagan, et al., 2013), o impacto indicado nas previsões foi de 2 a 6%. Não há no livro considerações sobre os conceitos utilizados para se chegar à diminuição de demanda máxima. Logo, por suposição, o valor de 2% corresponderia ao cenário conservador e 6% ao acelerado.

O modelo Igrid (Faruqui, 2009) mensura um impacto de 3% em redução de demanda máxima para 2050 nos EUA por meio de geração distribuída, assumindo que 50% da capacidade da bateria será despachada durante o horário de demanda máxima. Ou seja, de acordo com essa fonte, é importante que haja um sistema de armazenamento de energia para que a geração distribuída alcance o objetivo de diminuir a demanda máxima.

O trabalho elaborado pela SGIG mensura que o impacto na demanda máxima para geração solar distribuída variará de aumento de 1% a diminuição de 7,5%. Como o simulador GridLab realiza análises na rede de distribuição, foi diagnosticado que a

adição de unidades de geração solar, possuindo nas unidades consumidoras cargas com dependência de tensão, pode criar aumentos de demanda devido ao aumento de tensão local (Pacific Northwest National Laboratory, 2012).

Assim, temos três valores de impactos máximos de diminuição de demanda máxima:

Tabela 8 – Impactos máximos em demanda máxima – Pequena Geração Distribuída

Impacto na Energia (%)	
Fonte	Percentual
ABRADEE	6,0
Igrid	3,0
SGIG	7,5

Da mesma forma que realizado no estudo de energia, foram determinados pesos em cada uma das previsões, dando maior relevância para as previsões realizadas no Brasil. O resultado é apresentado na Tabela 9, de 5,70%, correspondendo a uma redução em 2050 de cerca de 14.370 MW na demanda máxima.

Tabela 9 – Pesos e Valor Final

Impacto na Demanda Máxima (%)			
Fonte	Valores Médios (%)	Peso	Valor Final (%)
Previsão - Brasil	6,0	0,6	5,70
Previsão Exterior	5,3	0,4	

A seguir, são apresentadas as funções de pertinência da variável de saída “Impactos em Demanda Máxima” e o comportamento das variáveis de entrada “Tecnologia & Armazenamento” e “Regulamentação & Incentivos Governamentais” em todo o universo de avaliações.

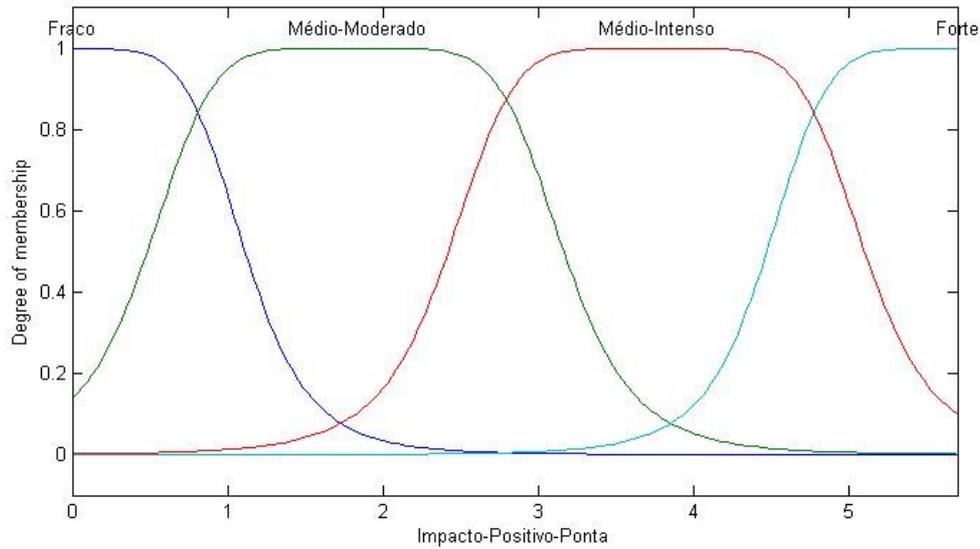


Figura 61 – Variáveis de saída – Impacto em demanda máxima

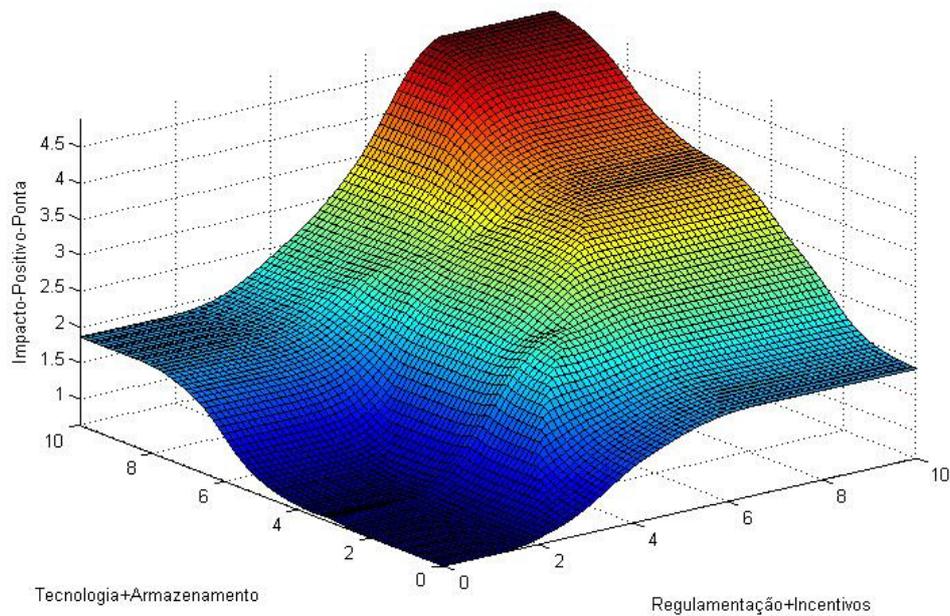


Figura 62 – Curvas de níveis – Demanda máxima

6.4 – VEÍCULOS ELÉTRICOS

A entrada em larga escala de veículos elétricos no mercado brasileiro trará mudanças significativas no sistema de energia. Diferentemente de todas as outras tecnologias aqui analisadas, os veículos elétricos irão introduzir uma nova carga, trazendo impactos negativos no sistema energético principalmente se nenhuma medida for tomada principalmente em relação a sistemas de tarifação específicos para veículos

elétricos, acarretando em aumento no consumo de energia nas residências e, dependendo do momento de conexão para carregamento das baterias, poderá ocorrer aumentos indesejáveis na demanda máxima do sistema (Schey, et al., 2012), (Shao & Pipattanasomporn, 2013).

6.4.1 – IMPACTO NA ENERGIA

O primeiro passo para se determinar qual será o impacto da introdução dos veículos elétricos na energia consumida no Brasil até 2050 consiste em especificar qual será o consumo anual dos vários tipos de veículos elétricos em kWh/ano. Atualmente no mercado mundial existem diversos modelos de veículos elétricos disponíveis, portanto, será utilizado um valor médio de consumo para veículo elétrico puro e veículo elétrico híbrido.

Primeiramente determina-se o consumo médio de um veículo elétrico em km/kWh. Para os veículos puramente elétricos, movidos a bateria, há uma grande quantidade de dados, sendo que os valores variam de 4,71 a 6,06 km/kWh (Borba, 2012), (Velloso, 2010), (Itaipu Binacional, 2010) e (Clean Energy Ministerial, 2013). De acordo com Borba (2012), a relação de 6 km/kWh é adequada para o estudo, logo, este valor será adotado no presente trabalho.

Para veículos híbridos, os valores variam de 6 a 14,3 km/kWh (Borba, 2012), sendo novamente o valor médio informado por Borba (2012), de 9 km/kWh para veículos híbridos, utilizado para a simulação.

Conforme descrito por Schmitt (2010), a distância média percorrida anualmente por veículos está associada ao nível de mobilidade da população e tem impactos significativos na demanda de combustíveis, e no caso dos veículos elétricos, no consumo de energia.

Há uma relação implícita entre a idade do veículo e distância percorrida anualmente. Veículos mais novos tem a tendência de possuírem maior quilometragem anual e a partir de determinado tempo de uso a distância percorrida média se estabiliza.

Em Schmitt (2010), é apresentada uma formulação que calcula a distância média percorrida a partir da idade do veículo, chegando ao valor de 14,6 mil km/ano, ou 40 km/dia para o Brasil. Este valor é próximo do calculado pela IEA para a América Latina, que é de 15 mil km/ano e inferior ao mensurado para os Estados Unidos, de 19,2 mil km/ano, onde há maior utilização deste meio de transporte devido ao maior poder aquisitivo da população e menor valor do preço da gasolina. Portanto, na presente tese será utilizado o valor de 40 km/dia. Deste modo, o consumo anual de um único veículo elétrico já pode ser calculado, de acordo com as equações abaixo:

$$\text{ConsumoEnergiaDia} = \text{DistânciaMédia} \div \text{ConsumoMédioTipoVE}$$

$$\text{ConsumoEnergiaAnual} = \text{ConsumoEnergiaDia} \times 365$$

Sendo:

ConsumoEnergiaDia = Consumo diário de energia em kWh/dia, por tipo de veículo elétrico;

DistânciaMédia = Distância percorrida média por veículos, de 40 quilômetros ao dia;

ConsumoMédioTipoVE = Consumo diário de energia em km/kWh, sendo 6 km/kWh para veículos elétricos puros e 9 km/kWh para elétricos híbridos;

ConsumoEnergiaAnual = Consumo anual de energia, em kWh/ano, por tipo de veículo elétrico;

Seguindo as equações listadas acima, temos os seguintes valores de consumo de energia anual para cada tipo de veículo elétrico:

Tabela 10 – Consumo Anual – Veículo Elétrico

Consumo Anual (kWh/ano)	
Tipos	Valores
VE – Puro	2433,3
VE – Híbrido	1622,2

Na Nota Técnica “Demanda de Energia 2050”, apresentada pela EPE, é divulgada a previsão de entrada dos veículos elétricos até 2050. De acordo com o

documento, até 2050 a frota nacional de veículos híbridos alcançará a marca de 64,43 milhões de unidades, representando 52% de toda a frota nacional e os veículos elétricos chegarão a 11,83 milhões de unidades, representando 9% da frota.

Previsões para a entrada de veículos elétricos são bem díspares em diferentes países: para os EUA as previsões chegam a 40% em 2040; para a China e Japão, em 2020, em um cenário agressivo, a inserção de veículos elétricos chega a 22%. Outra previsão para o Japão, realizada pela Karplus em 2009, prevê que os veículos elétricos ocupem todo o mercado em 2050. Na Nova Zelândia, é previsto que os veículos elétricos tenham a participação de 35% do mercado em 2040 (Asia-Pacific Economic Cooperation - APEC, 2011).

Do total de veículos híbridos, na análise da EPE, não há entrada de veículos híbridos *plug-in*, que fazem uso da rede elétrica para carregamento das baterias. Este comportamento não segue o estudo realizado pelo Departamento de Energia dos EUA (U.S. Energy Information Administration, 2015), que prevê que dentre os veículos híbridos que irão entrar no mercado americano até 2040, último ano de previsão já realizada, 18,9% dos veículos híbridos serão híbridos *plug-in*. Por conservadorismo, utilizaremos este valor para calcularmos o potencial de consumo de energia dos veículos elétricos no Brasil, ou seja, 12,2 milhões de veículos híbridos serão do tipo *plug-in*.

Desta maneira, a energia consumida anualmente pelos veículos elétricos já pode ser dimensionada. A fórmula utilizada é a seguinte:

$$Energia\ Consumida = ConsumoEnergiaAnual \times Frota$$

Sendo:

EnergiaConsumida = Energia consumida por todos os carros elétricos;

ConsumoEnergiaAnual = Consumo anual de energia, em kWh/ano, por tipo de veículo elétrico;

Frota = Frota de carros elétricos, por tipo de veículo elétrico;

Utilizando a equação, o valor da energia consumida pelos carros elétricos é a seguinte:

Tabela 11 – Veículos Elétricos – Energia solicitada

Energia Total (TWh)	
Tipos	Valores
VE – Puro	28,71
VE – Híbrido	19,81

Assim, o limite máximo de energia consumida pelos veículos elétricos em 2050 é de 48,52 TWh, que corresponde a um aumento de 2,98% em relação a energia consumida neste ano de acordo com PNE 2050.

A seguir, são apresentadas as funções de pertinência da variável de saída “Impactos em Energia” e o comportamento das variáveis de entrada “Incentivos Governamentais” e “Tecnologias & Padronização” em todo o universo de avaliações.

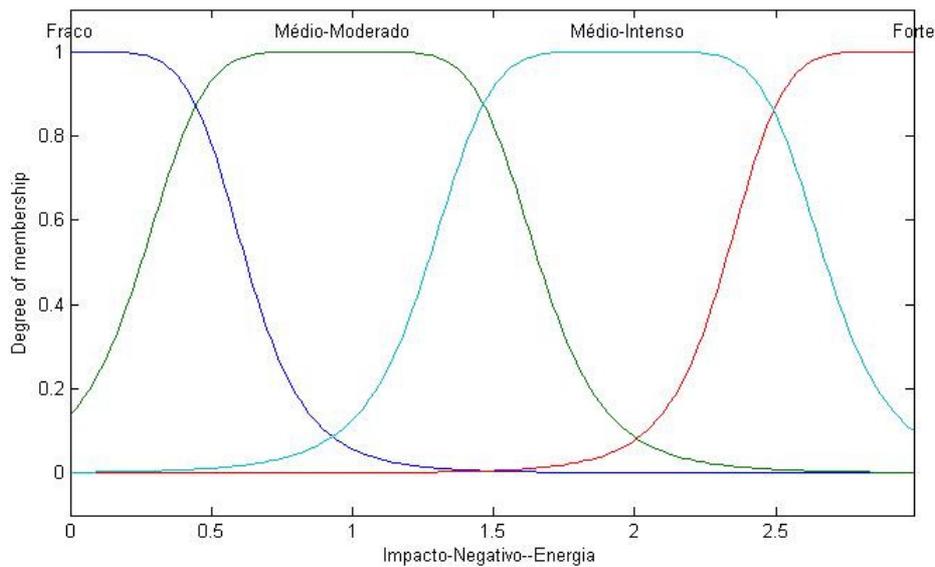


Figura 63 – Variáveis de saída – Impacto em energia

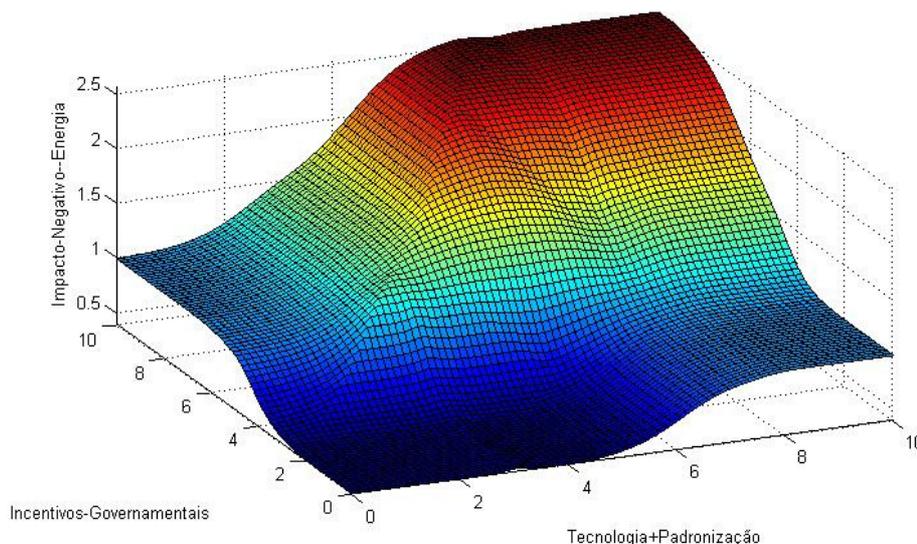


Figura 64 – Curvas de níveis – Energia

6.4.2 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA

O momento da recarga poderá impactar consideravelmente a demanda máxima do sistema elétrico brasileiro. De acordo Borba (2012), Schey et al (2012) e Shao e Pipattanasomporn (2013) o proprietário de veículo elétrico tende a iniciar seu carregamento no momento em que chega à residência, que se dá em sua maioria entre 18-20h, como mostrado no Capítulo 4.

Como apresentado em Schaeffer & Soares (2010), há três níveis de carregamento:

- **Nível 1** – Utiliza tomada elétrica residencial padrão, em 127 V;
- **Nível 2** – Em 220 V, sendo necessária a instalação de um painel elétrico e disjuntor dedicado, com um aumento do custo de instalação;
- **Nível 3** – Recarga própria para eletropostos, este nível necessita de custo elevado de instalação. Realiza o carregamento rápido das baterias em corrente contínua.

Para se determinar a demanda máxima exigida para o carregamento dos veículos elétricos, algumas premissas foram adotadas:

- 70% dos veículos elétricos serão carregados em tomadas de nível 1, a uma potência de 1,9 kW (Schaeffer & Soares, 2010);
- 30% dos veículos elétricos serão carregados em tomadas de nível 2, a uma potência de 7,7 kW (Schaeffer & Soares, 2010);
- No momento de demanda máxima do sistema elétrico, não será permitida recarga em tomadas do nível 3 para evitar o sobrecarregamento do sistema;
- Por conservadorismo foi adotada a superposição de 50% de carregamento, ou seja, 50% de toda a frota estariam realizando a recarga no mesmo período.

Portanto, o cálculo da demanda máxima possui a seguinte equação:

$$DMVE = (Nível1 \times Frota \times PotNível1 + Nível2 \times Frota \times PotNível2) \times Sup$$

Sendo:

DMVE = Demanda máxima, em MW, alcançada pelo carregamento de veículos elétricos;

Nível1 = Percentual de veículos elétricos carregados em tomadas nível 1;

PotNível1 = Potência de carregamento de veículos elétricos em tomadas nível 1;

Nível2 = Percentual de veículos elétricos carregados em tomadas nível 2;

PotNível2 = Potência de carregamento de veículos elétricos em tomadas nível 2;

Sup = Superposição de carregamento de veículos elétricos.

Utilizando esta formulação, a demanda máxima atingida por veículos elétricos, em 2050, será de 43,7 GW, correspondendo a um acréscimo de 17,3% na demanda máxima em 2050.

A seguir, são apresentadas as funções de pertinência da variável de saída “Impactos em Demanda Máxima” e o comportamento das variáveis de entrada

“Incentivos Governamentais” e “Sistemas de Tarifação” em todo o universo de avaliações.

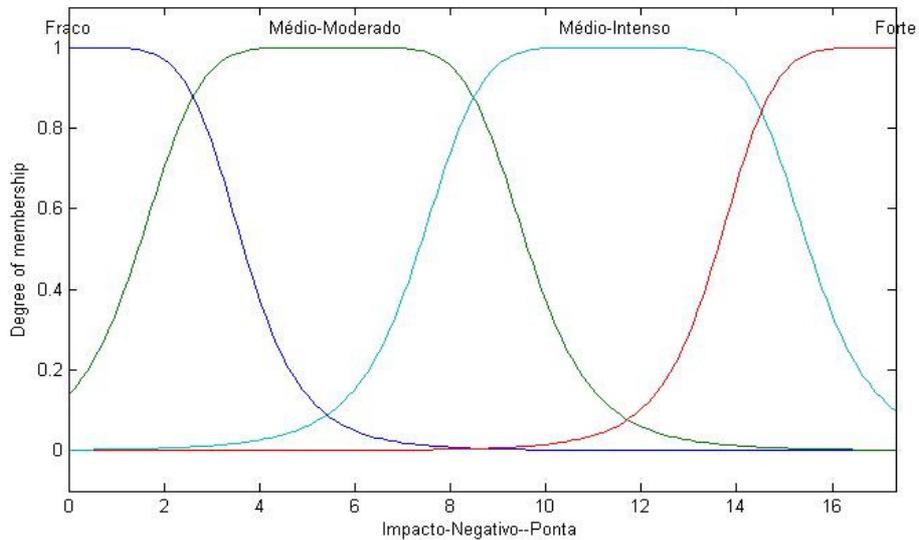


Figura 65 – Variáveis de saída – Impacto em demanda máxima

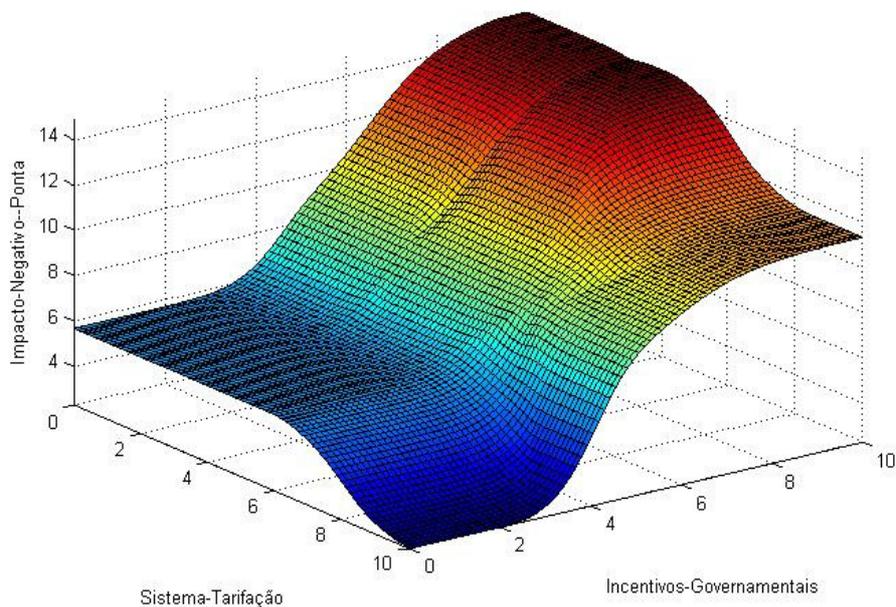


Figura 66 – Curvas de níveis – Demanda máxima

6.5– EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O principal objetivo da eficiência energética é abranger a otimização das transformações, do transporte e do uso dos recursos energéticos, desde suas fontes

primárias até seu aproveitamento final. De acordo com (Gellings, 2009), as razões principais para aumentar a eficiência energética em todo o mundo podem ser agrupadas em quatro fatores principais: o consumo de energia do mundo está crescendo devido ao crescimento populacional e aumento do uso de energia per capita nos países desenvolvidos e em desenvolvimento; recursos de combustíveis fósseis são finitos, e o custo para extrair e utilizar esses recursos de uma forma ambientalmente segura está se tornando cada vez mais caro; a dependência de fontes de energia compromete a segurança nacional; e há uma percepção crescente de que o meio ambiente está sofrendo como resultado da extração de recursos naturais durante décadas.

Desde modo, os impactos na energia e demanda máxima alcançados por ações desenvolvidas em eficiência energética no contexto da *smart grid* serão mensurados nesta seção.

6.5.1 – IMPACTO NA ENERGIA

O principal impacto das ações de eficiência energética é no consumo global de energia elétrica, sendo este o principal motivador de seu desenvolvimento.

Até o momento não há nenhum trabalho acadêmico ou resultado de projeto-piloto que mesure os possíveis ganhos energéticos advindos de ações de eficiência energética no âmbito da *smart grid* no Brasil. Desde modo, para ser possível realizar esta análise será utilizada uma fonte: resultados do modelo Igrid (Faruqui, 2009), que tem como base os Estados Unidos, com o ano de 2050 como referência.

O modelo Igrid, desenvolvido pela consultoria The Brattle Group em colaboração com a National Association of Regulatory Utility Commissioners – NARUC, estima que nos Estados Unidos haverá diminuição de consumo de energia de 6,5% por residência que adotar os *in-home displays* – IHD, com participação de 30% dos consumidores residenciais em 2050. Além disso, outras ações serão tomadas em instalações comerciais e indústrias, em *smart grid*, que contribuirão em economias de 9% por participante, também em 2050 (Faruqui, 2009).

À vista disso, o modelo Igrid estima que a energia conservada pela adoção de técnicas de eficiência energética exclusivas no conceito de *smart grid* chegaria a 1,4%

em 2050. Nesta modelagem não há cenários mostrando possíveis variações ao longo dos anos.

Assim, algumas considerações devem ser tomadas para se chegar ao valor máximo de economia de energia por meio de eficiência energética pela *smart grid*:

- Nas notas técnicas já lançadas pelo PNE 2050, não há nenhuma consideração a respeito de aplicação de tecnologia *smart grid* em eficiência energética;
- Nas variáveis de entrada descritas no capítulo 5 não há nenhuma ação que já é tomada para se diminuir o consumo de energia por meio de programas de eficiência energética no Brasil, já que todas se baseiam em um novo conceito;
- O Procel, em seu programa de ações, não descreve nenhuma atuação em eficiência energética por meio da *smart grid*;
- O valor adotado no presente trabalho será um acréscimo de eficiência energética nos dados já levantados por instituições brasileiras para o futuro, como o Procel.

Portanto, para fins de simulação, foi adotado o valor de 1,4% calculado pelo modelo Igrid, como o percentual máximo de redução de energia alcançado por ações em *smart grid* na área de eficiência energética no Brasil, que corresponde a uma redução em 2050 de 22,73 TWh. Apesar da *smart grid* está em um nível de desenvolvimento muito superior nos Estados Unidos em comparação ao Brasil, é esperado que ações em eficiência energética em *smart grid* tenham sucesso no país, devido ao bom desempenho alcançado por programas governamentais nessa área, como o Procel e Conpet, por isso foi adotado o mesmo valor de redução de energia nos dois países.

A seguir, são apresentadas as funções de pertinência da variável de saída “Impactos em Energia” e o comportamento das variáveis de entrada “Sistemas de Tarifação” e “Tecnologia” em todo o universo de avaliações.

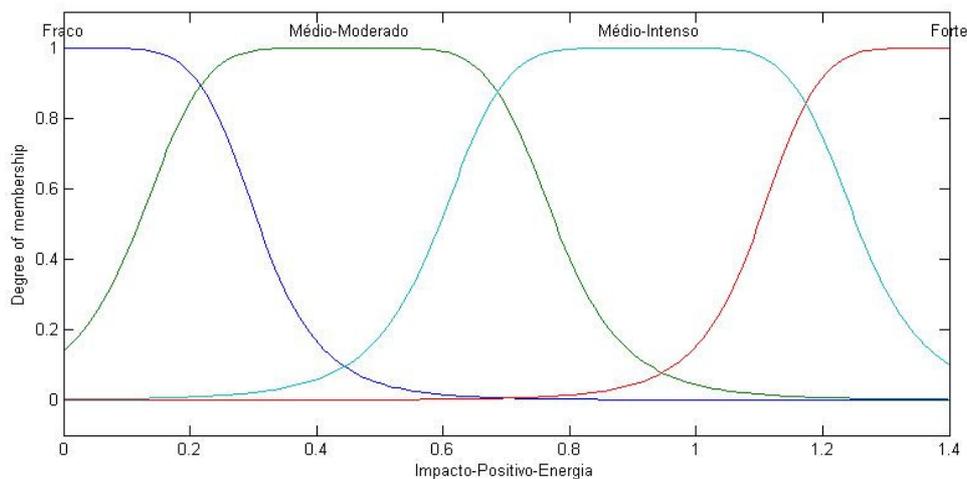


Figura 67 – Variáveis de saída – Impacto em energia

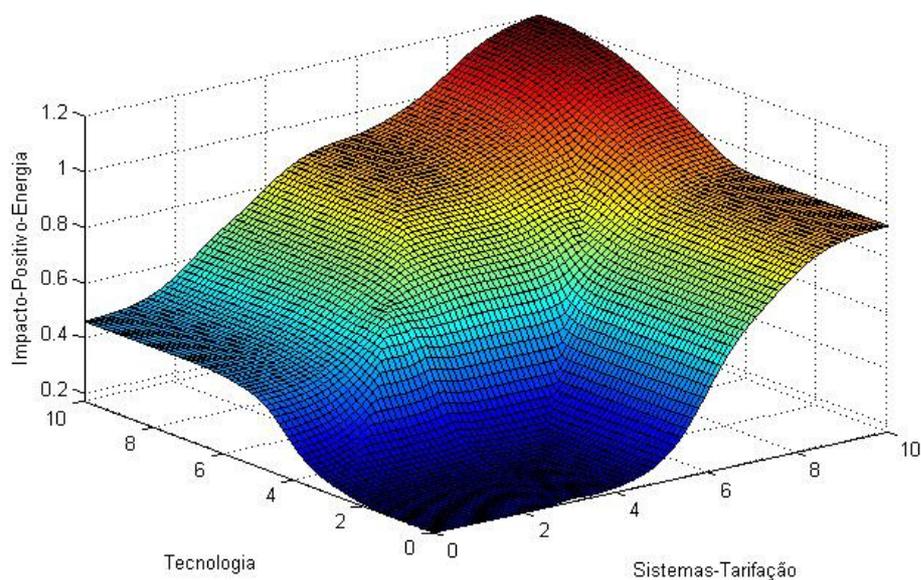


Figura 68 – Curvas de níveis – Energia

6.5.2 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA

A diminuição da demanda máxima de energia é uma dos impactos trazidos pela difusão da eficiência energética, e seguindo o apresentado na determinação do impacto na energia, até o momento não há nenhum trabalho acadêmico ou resultado de projeto-piloto que mensure os possíveis ganhos energéticos advindos de ações de eficiência energética no âmbito da *smart grid* no Brasil, portanto para ser possível realizar esta

análise serão utilizados os resultados do modelo Igrid (Faruqui, 2009), que tem como base os EUA, com o ano de 2050 como referência.

Na modelagem Igrid, a redução de demanda máxima nos EUA até 2050 é estimada em 1,5%. O percentual de redução da demanda máxima se encontra na mesma proporção de diminuição de consumo de energia informado pelo Igrid.

Portanto, para fins de simulação, foi adotado o valor de 1,5% calculado pelo modelo Igrid como o percentual máximo de redução de energia alcançado por ações em *smart grid* na área de eficiência energética, que corresponde a uma redução em 2050 de 3.780 MW.

A seguir, são apresentadas as funções de pertinência da variável de saída “Impactos em Demanda Máxima” e o comportamento das variáveis de entrada “Tecnologia” e “Incentivos Governamentais” em todo o universo de avaliações.

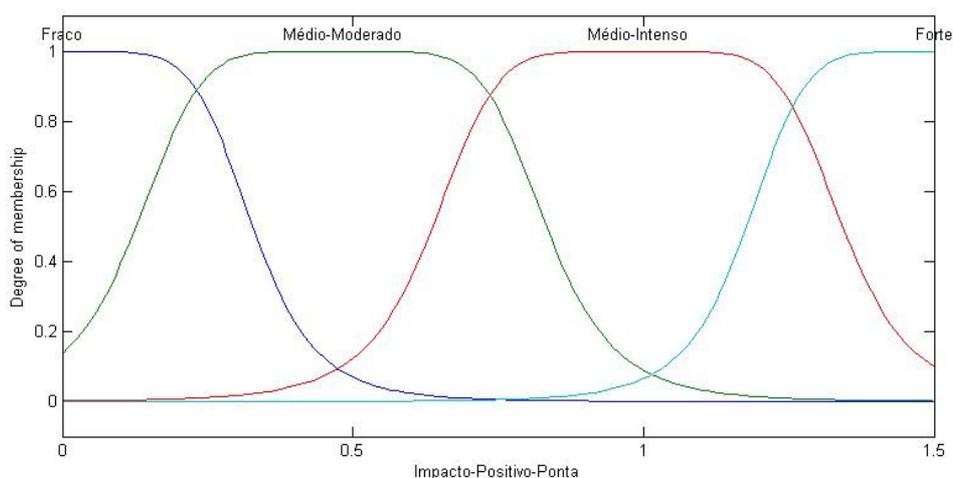


Figura 69 – Variáveis de saída – Impacto em demanda máxima

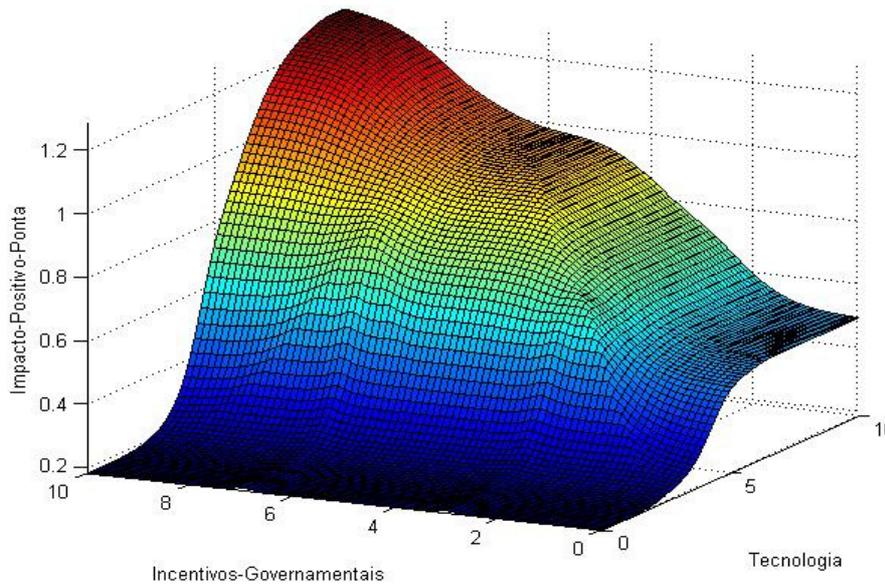


Figura 70 – Curvas de níveis – Demanda máxima

6.6 – CENÁRIOS AVALIADOS

Prever o futuro é uma das características mais marcantes da humanidade. Em todo final de ano há uma profusão de astrólogos, cartomantes e sensitivos prevendo acontecimentos em programas na televisão. Previsões que vão desde o casamento de uma atriz famosa até o início de uma nova guerra mundial. E esta não é uma atividade dos dias atuais. Há milhares de anos, em qualquer civilização, estudiosos se debruçam sobre encarar e prever o futuro.

Na Babilônia antiga, a astrologia era utilizada para prever eventos que iriam influenciar a vida dos seus cidadãos. Em Alexandria, o mais antigo horóscopo data de 409 a.C e por ele, reis e rainhas estudavam suas próximas ações no império. Mas, aparentemente em nenhuma civilização a tentativa de prever o futuro era tão usada como no Império Romano: o Imperador Augusto (63 a.C. – 4 d.C.) era um adepto da astrologia e chegou até a cunhar moedas com seu signo. O Imperador Tibério, antes de cada batalha por novo território, estudava o mapa astrológico de seus rivais.

O futuro é o momento em que os pensamentos estão direcionados, e normalmente, nossas ações são tomadas prevendo o que pode ocorrer no próximo passo. E isso também é levado em consideração em ambientes empresariais e governamentais.

O planejamento de estratégias eficientes e o desenvolvimento de cenários alternativos se tornaram de suma importância para lidar com as incertezas do futuro.

De acordo com Albarello (2008), a introdução de planejamento de cenários se deu nos Estados Unidos, por Herman Kahn na RAND Corporation no âmbito militar nos anos 50. Posteriormente, Kahn continuou seus estudos no Hudson Institute, criado por ele na década de 60.

Cenário é o conjunto formado pela descrição coerente de uma situação futura e pelo encaminhamento dos acontecimentos que permitem passar da situação original a uma situação futura. A construção de cenários não tem a finalidade de prever o futuro, mas sim estudar as muitas possibilidades futuras plausíveis e preparar a organização para enfrentar cada um desses cenários (Albarello, 2008).

De acordo com Centrais Elétricas Norte do Brasil S/A – ELETRONORTE (2005), cenários são resultados prováveis da evolução dos fenômenos atuais, a partir de possibilidades lógicas e consistentes, projetadas a partir da combinação de hipóteses. Sua finalidade é orientar a ação presente para futuros possíveis, frente às oportunidades e incertezas.

Em Lucena (2012), descrevem-se três tipos de cenários possíveis: tendenciais, onde busca-se manter as forças motrizes e tendências históricas; exploratórios, onde são avaliados os caminhos diferentes assumindo quebra de tendências; e normativos, em que há uma configuração de futuros desejáveis, buscando uma trajetória para alcançar os mesmos.

No Brasil, a construção de cenários é uma atividade recente. Só a partir da década de 80 que empresas estatais que operam em segmentos de longo prazo de maturação, como Eletrobrás e Petrobras, iniciaram a construção de cenários sobre demanda de combustíveis e energia (Buarque, 2003).

Deste modo, os cenários que serão apresentados na presente tese não tem o objetivo de acertar qual será o estado final do conjunto de tecnologias estudadas em *smart grid*, principalmente no horizonte de estudo de longo prazo. O objetivo está na identificação de caminhos que poderão ocorrer no futuro, fazendo com que a tomada de decisão dos responsáveis pelas ações se torne mais fácil e rápida.

Como mencionado anteriormente serão analisadas quatro áreas em *smart grid*. São elas: Resposta da Demanda, Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética. Os quatro cenários analisados são apresentados a seguir:

- **Cenário 1** – Cenário de baixo desenvolvimento da *smart grid*. Neste caso, todas as tecnologias envolvidas terão baixo desenvolvimento;
- **Cenário 2** – Cenário de alto desenvolvimento da *smart grid*. Neste cenário, todas as tecnologias envolvidas terão alto desenvolvimento;
- **Cenário 3** – Cenário de alto desenvolvimento para Resposta da Demanda e Pequena Geração Distribuída, e baixo desenvolvimento para Veículos Elétricos e Eficiência Energética. Cenário criado levando-se em consideração um maior desenvolvimento de atividades que hoje já recebem atenção especial no Brasil.
- **Cenário 4** – Cenário de alto desenvolvimento para Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética, e baixo desenvolvimento para Resposta da Demanda. Cenário criado para apresentar a importância do desenvolvimento da resposta da demanda em um ambiente *smart grid*.

Os quatro cenários apresentados serão comparados com o cenário de referência, que é o cenário sem a introdução das tecnologias *smart grid*. Este cenário de referência é balizado pelas notas técnicas já lançadas pelo PNE 2050. O cenário de referência em relação ao consumo total de eletricidade será o valor apresentado na Nota Técnica “Demanda de Energia 2050”, apresentada pela EPE, que norteia os estudos do PNE 2050. Em 2050, de acordo com o plano, o consumo total de eletricidade será de 1.624 TWh. Já para demanda máxima, utilizando relação entre as variáveis demanda máxima (MW) e energia (MWh médios) do PDE 2024 e usando esta relação nos dados de energia do PNE 2050, o cenário de referência é de 252.131 MW.

6.6.1 – CENÁRIOS EM AMBIENTES *FUZZY*

Em um ambiente *fuzzy*, a entrada é sempre realizada por um valor numérico limitado ao universo de discurso da variável de entrada, que no caso analisado está entre os valores de 0 a 10, e a saída é um grau *fuzzy* com um grau de pertinência entre 0 e 1.

Como apresentado no capítulo 4, cada tecnologia em *smart grid* possui variáveis de entrada, nesta tese denominadas de “Dimensões de Análise”, que serão avaliadas de acordo com o desenvolvimento esperado de cada tecnologia nos cenários construídos. Abaixo são elencadas todas as Dimensões de Análise:

Tabela 12 – Dimensões de análise no ambiente *fuzzy*

DIMENSÕES DE ANÁLISE			
Resposta da Demanda	Pequena Geração Distribuída	Veículos Elétricos	Eficiência Energética
Sistema de Tarifação	Sistema de Tarifação	Sistema de Tarifação	Sistema de Tarifação
Regulamentação	Regulamentação & Incentivos Governamentais	Incentivos Governamentais	Tecnologias
Tecnologia & Padrões	Tecnologia & Armazenamento	Tecnologias	Incentivos Governamentais
Projetos-Piloto		Infraestrutura & Padronização	

Assim, em cada cenário, as dimensões de análise (variáveis de entrada do sistema *fuzzy*), receberão avaliações condizentes com o desenvolvimento esperado de cada tecnologia nos anos de 2030, 2040 e 2050. Ou seja, em um cenário que é esperado que determinada tecnologia possua um bom desenvolvimento, suas dimensões de análise terão avaliações altas. Caso contrário, as avaliações serão mais baixas.

Para a contabilização do resultado final em cada cenário é realizada a soma da diminuição (ou aumento) de cada tecnologia nos impactos analisados. Como cada redução em energia ou demanda máxima por cada tecnologia isoladamente pode afetar a redução da demanda de outra tecnologia aqui analisada, um resultado mais próximo da realidade somente poderia ser realizado por um modelo de planejamento energético integrado que modelasse com exatidão todas as tecnologias aqui abrangidas. A

utilização deste tipo de modelo foge ao escopo da presente tese e será foco de trabalhos futuros.

6.6.2 – CENÁRIO 1

O primeiro cenário avaliado traz baixa introdução das tecnologias em *smart grid* ao longo de todo o horizonte de estudo, portanto, as avaliações dadas nas dimensões de análise são baixas, possuindo como nota máxima nesse cenário a dimensão de análise “Regulamentação & Incentivos” na tecnologia “Pequena Geração Distribuída” em 2050, pois já é observado na atualidade um movimento para possibilitar o desenvolvimento dessa tecnologia no horizonte de estudo, com a criação de diversas normas que facilitam a adoção dessa tecnologia por parte dos consumidores.

Este comportamento não é observado, por exemplo, no caso dos veículos elétricos, que possuem a pior avaliação nesse cenário, pois é esperado que dentre todas as tecnologias estudadas, será aquela com maior dificuldade de desenvolvimento. A análise do desenvolvimento das áreas foi transformada em avaliações numéricas e são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Avaliações – Cenário 1

	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Regulamentação	Tecnologia & Padrões	Projeto-Piloto
RESPOSTA DA DEMANDA	2030	2	3	2	2
	2040	4	5	3	3
	2050	6	6	5	4
	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Incentivos Governamentais	Tecnologias	Infraestrutura & Padronização
VEÍCULOS ELÉTRICOS	2030	1	2	3	1
	2040	2	4	5	3
	2050	3	5	6	5
	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Regulamentação & Incentivos	Tecnologia & Armazenamento	
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	2030	2	5	3	
	2040	3	6	4	
	2050	6	7	6	
	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Tecnologias	Incentivos Governamentais	
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	2030	1	2	4	
	2040	2	4	5	
	2050	4	6	6	

Informadas as avaliações ao sistema *fuzzy*, temos os impactos na energia e demanda máxima para o cenário 1 para cada tecnologia. Lembrando que veículos

elétricos representam um impacto negativo ao sistema elétrico, ou seja, os mesmos acrescentam uma nova carga ao sistema.

Tabela 14 – Resultado por Tecnologia – Cenário 1

Impactos por Tecnologia (%)			
	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
RESPOSTA DA DEMANDA	2030	-0,96	-2,68
	2040	-1,65	-5,07
	2050	-2,14	-6,61
VEÍCULOS ELÉTRICOS	2030	0,49	2,87
	2040	0,90	5,24
	2050	1,09	6,42
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	2030	-1,40	-1,34
	2040	-1,75	-1,67
	2050	-2,34	-2,23
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	2030	-0,18	-0,19
	2040	-0,32	-0,23
	2050	-0,54	-0,33

Finalmente, somando todos os impactos, temos o resultado final. É possível observar que mesmo em um cenário de baixo desenvolvimento, a *smart grid* tem o poder de reduzir tanto a energia quanto a demanda máxima em níveis interessantes no horizonte de estudo. Como pode ser observado na Figura 71, a energia pode ser diminuída em 64 TWh em 2050. Na demanda máxima o impacto é ainda mais significativo: em 2050, a diminuição pode chegar a quase 7.000 MW no Cenário 1.

Tabela 15 – Resultado Final – Cenário 1

Impactos Finais (%)			
	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
TOTAL	2030	-2,05	-1,34
	2040	-2,81	-1,73
	2050	-3,93	-2,75

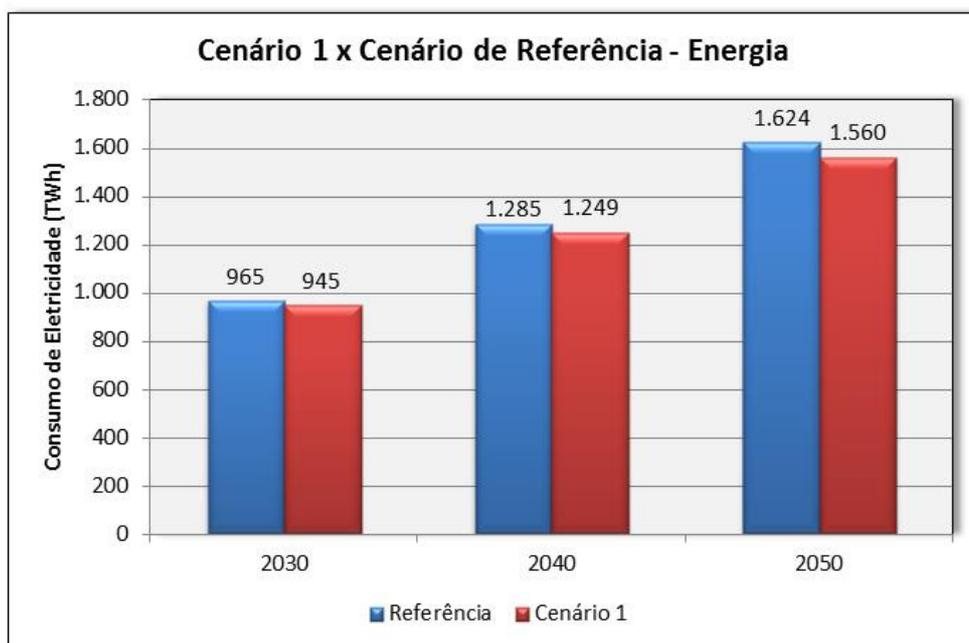


Figura 71 – Comparação Cenário 1 e Cenário de Referência – Energia

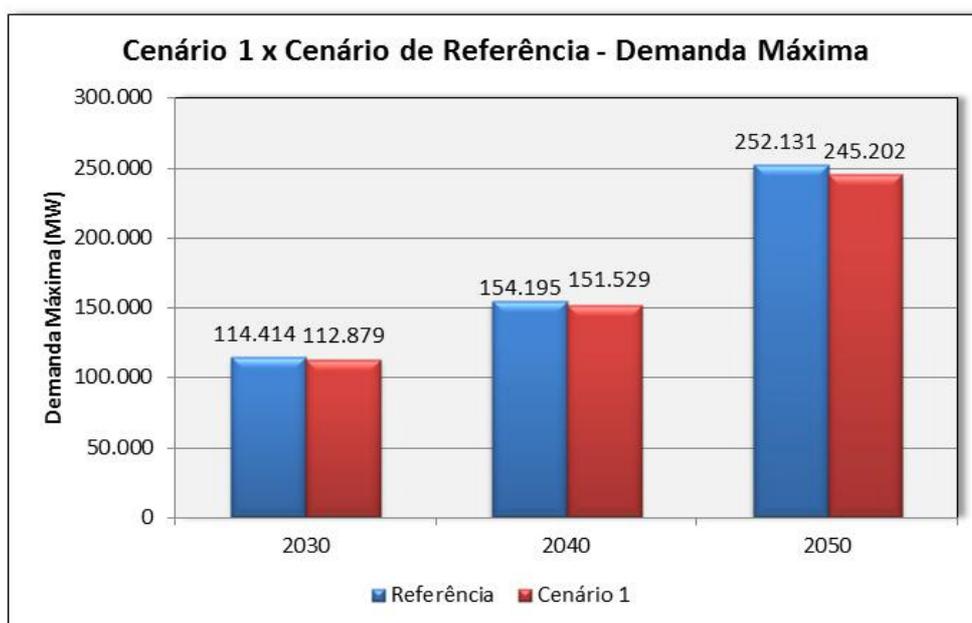


Figura 72 – Comparação Cenário 1 e Cenário de Referência – Demanda máxima

6.6.3 – CENÁRIO 2

O Cenário 2 apresenta alto desempenho das tecnologias *smart grid* no horizonte proposto, chegando ao seu máximo estágio de desenvolvimento em 2050. Assim, todas as tecnologias possuem maiores avaliações desde o primeiro ano de estudo, 2030, em

relação ao cenário anterior e atingem a maior avaliação possível em todas as dimensões de análise em 2050. As avaliações dadas para cada tecnologia encontram-se a seguir:

Tabela 16 – Avaliações – Cenário 2

RESPOSTA DA DEMANDA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Regulamentação	Tecnologia & Padrões	Projeto-Piloto
	2030	3	4	3	3
	2040	6	7	6	7
	2050	10	10	10	10
VEÍCULOS ELÉTRICOS	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Incentivos Governamentais	Tecnologias	Infraestrutura & Padronização
	2030	3	3	4	3
	2040	6	5	7	6
	2050	10	10	10	10
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Regulamentação & Incentivos	Tecnologia & Armazenamento	
	2030	5	7	5	
	2040	7	8	7	
	2050	10	10	10	
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Tecnologias	Incentivos Governamentais	
	2030	3	4	5	
	2040	6	6	8	
	2050	10	10	10	

Informadas as avaliações ao sistema *fuzzy*, temos os impactos na energia e demanda máxima para o cenário 2 para cada tecnologia. Lembrando que veículos elétricos representam um impacto negativo ao sistema elétrico, ou seja, os mesmos acrescentam uma nova carga ao sistema.

Tabela 17 – Resultado por Tecnologia – Cenário 2

Impactos por Tecnologia (%)			
RESPOSTA DA DEMANDA	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
	2030	-1,41	-4,61
	2040	-2,20	-10,30
	2050	-4,69	-13,70
VEÍCULOS ELÉTRICOS	Anos de Análise	Impacto Negativo na Energia	Impacto Negativo na Demanda Máxima
	2030	0,88	5,08
	2040	1,39	7,97
	2050	2,56	11,30
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
	2030	-2,01	-1,92
	2040	-3,16	-3,02
	2050	-5,11	-4,89
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
	2030	-0,33	-0,24
	2040	-0,79	-0,58
	2050	-1,20	-1,29

Finalmente, somando todos os impactos, temos o resultado final. Neste cenário temos qual o impacto máximo que a *smart grid* poderá ter no horizonte de estudo, com o desenvolvimento pleno de todas as tecnologias. É importante observar o grande impacto que a introdução de veículos elétricos poderá ter no sistema elétrico brasileiro. Por exemplo, em 2050, os ganhos adquiridos pelo alto desenvolvimento da resposta da demanda em demanda máxima quase que serão eliminados com a inserção em massa dos veículos elétricos, mesmo com as altas avaliações dadas na dimensão de análise “Sistema de Tarifação” em veículos elétricos.

Como pode ser observado nas Tabela 18, Figura 73 e Figura 74, a *smart grid* tem potencial para ser uma peça fundamental para o sistema elétrico brasileiro nas próximas décadas, sendo o responsável por diminuir o consumo de eletricidade em quase 200 TWh e diminuir a demanda máxima do sistema em mais de 20.000 MW. Para fins de comparação, até 2015, a demanda máxima histórica do sistema elétrico brasileiro é de 85.704 MW.

Estes resultados confirmam o que outras publicações relatam para outros países: a *smart grid* tem o poder de postergar ou até cancelar a construção de usinas, devido ao seu poder de tornar o uso da energia mais consciente, minimizar custos de operação do sistema e trazer ao consumidor um poder de gerenciar o uso de energia ao longo do dia.

Tabela 18 – Resultado Final – Cenário 2

Impactos Finais (%)			
	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
TOTAL	2030	-2,88	-1,69
	2040	-4,76	-5,93
	2050	-8,44	-8,58

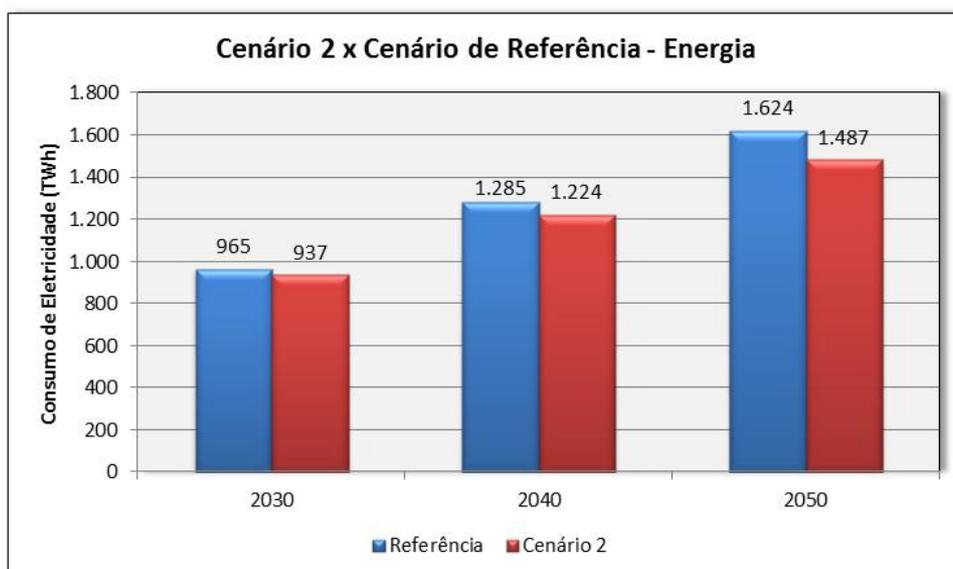


Figura 73 – Comparação Cenário 2 e Cenário de Referência – Energia

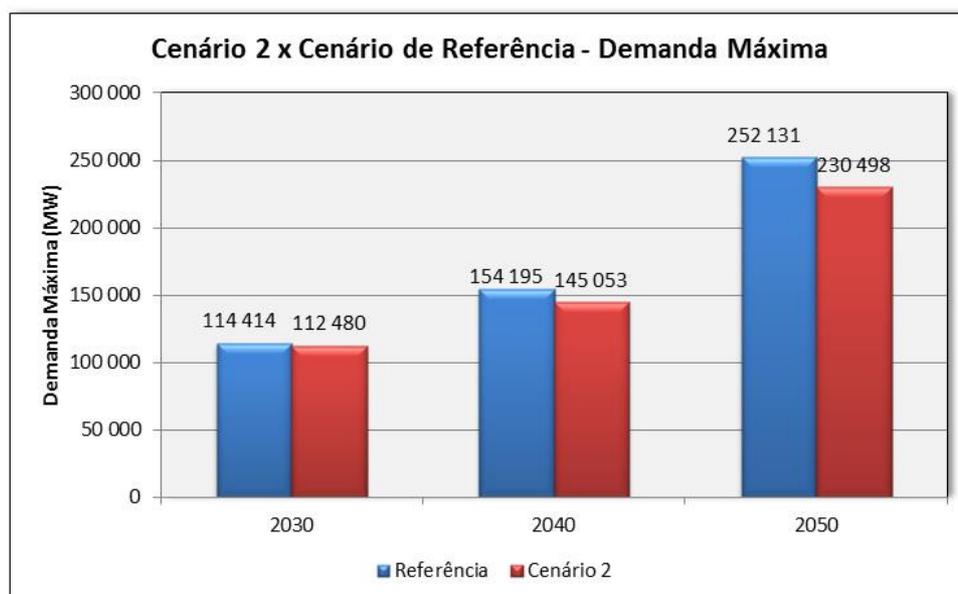


Figura 74 – Comparação Cenário 2 e Cenário de Referência – Demanda máxima

6.6.4 – CENÁRIO 3

Este cenário foi criado com o intuito de prever o comportamento do sistema elétrico brasileiro levando-se em conta o atual desenvolvimento das tecnologias em *smart grid*. Assim, tecnologias que hoje já possuem um início de desenvolvimento e ações governamentais no intuito de promovê-las, como Resposta da Demanda e Pequena Geração Distribuída, terão alto desenvolvimento. Já outras tecnologias, como Eficiência Energética e Veículos Elétricos, que hoje possuem baixo (ou nenhum)

desenvolvimento, manterão esse comportamento ao longo do horizonte de estudo. As avaliações são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 19 – Avaliações – Cenário 3

RESPOSTA DA DEMANDA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Regulamentação	Tecnologia & Padrões	Projeto-Piloto
	2030	3	4	3	3
2040	6	7	6	7	
2050	10	10	10	10	

VEÍCULOS ELÉTRICOS	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Incentivos Governamentais	Tecnologias	Infraestrutura & Padronização
	2030	3	2	3	1
2040	6	4	5	3	
2050	10	5	6	5	

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Regulamentação & Incentivos	Tecnologia & Armazenamento
	2030	5	7	5
2040	7	8	7	
2050	10	10	10	

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Tecnologias	Incentivos Governamentais
	2030	3	2	4
2040	6	3	5	
2050	10	6	6	

Informadas as avaliações ao sistema *fuzzy*, temos os impactos na energia e demanda máxima para o cenário 3 para cada tecnologia. Como já citado, os veículos elétricos representam um impacto negativo ao sistema elétrico.

Tabela 20 – Resultado por Tecnologia – Cenário 3

Impactos por Tecnologia (%)			
RESPOSTA DA DEMANDA	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
	2030	-1,41	-4,61
2040	-2,20	-10,30	
2050	-4,69	-13,70	

VEÍCULOS ELÉTRICOS	Anos de Análise	Impacto Negativo na Energia	Impacto Negativo na Demanda Máxima
	2030	0,49	2,87
2040	0,71	4,11	
2050	1,09	4,44	

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
	2030	-1,92	-1,92
2040	-3,16	-3,02	
2050	-5,11	-4,89	

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
	2030	-0,19	-0,20
2040	-0,25	-0,24	
2050	-0,87	-0,85	

Tabela 21 – Resultado Final – Cenário 3

Impactos Finais (%)			
TOTAL	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
	2030	-3,03	-3,86
	2040	-4,90	-9,45
	2050	-9,58	-15,00

Analisando o resultado do cenário 3, o ponto principal é o maior impacto observado na demanda máxima em relação ao cenário 2, que possui alto desenvolvimento de todas as tecnologias. Isto é devido à baixa introdução de veículos elétricos no Brasil no horizonte de estudo, fazendo com que não ocorra aumento da demanda máxima excessiva devido ao carregamento dos veículos no horário de ponta. Deste modo, em 2050, o impacto da demanda máxima é 6,42% superior ao cenário 2. Também há diminuição do impacto relativo ao desenvolvimento de eficiência energética, na ordem de 0,4%, em energia e demanda máxima.

Estes resultados ficam mais claros nas Figura 75 e Figura 76. Em energia, há a diminuição de 156 TWh em relação ao caso de referência em 2050. Já em relação à demanda máxima, é possível diminuir quase 38.000 MW. Os dados apresentados neste cenário reafirmam a importância de desenvolvimento de políticas eficazes de carregamento de veículos elétricos.

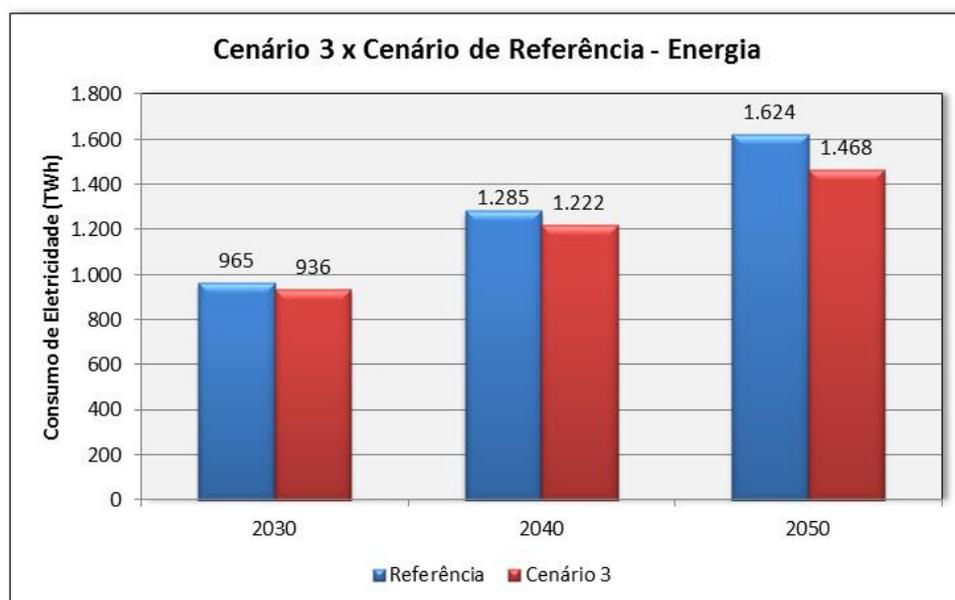


Figura 75 – Comparação Cenário 3 e Cenário de Referência – Energia

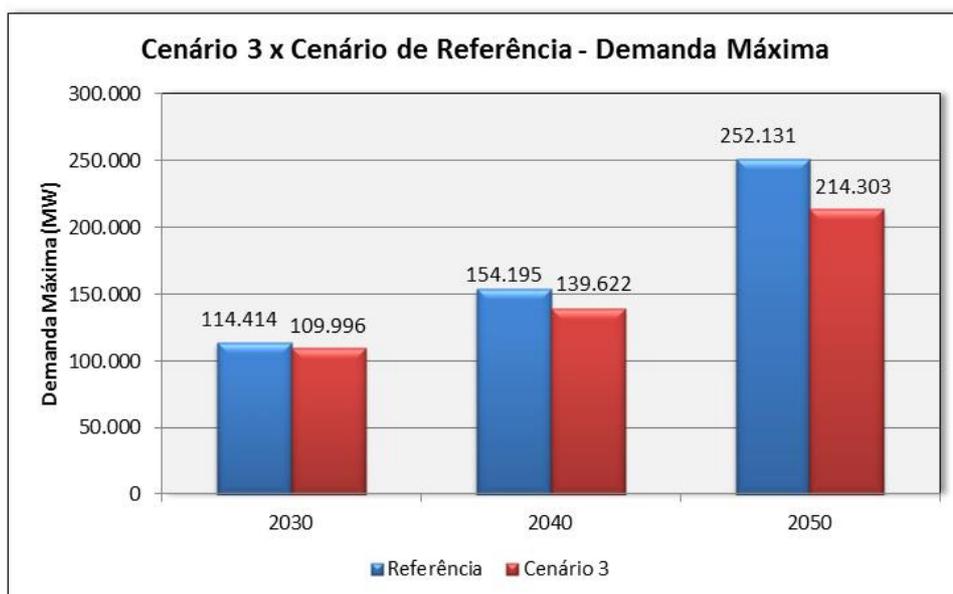


Figura 76 – Comparação Cenário 3 e Cenário de Referência – Demanda máxima

6.6.5 – CENÁRIO 4

O cenário 4 foi criado com o intuito de apresentar a importância do desenvolvimento da Resposta da Demanda em um ambiente *smart grid*. Portanto, nesse cenário, há alto desenvolvimento para Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética, e baixo desenvolvimento para Resposta da Demanda. Além disso, a dimensão de análise “Sistema de Tarifação”, presente em todas as tecnologias, também terá baixo desenvolvimento no horizonte de estudo. As avaliações são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 22 – Avaliações – Cenário 4

RESPOSTA DA DEMANDA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Regulamentação	Tecnologia & Padrões	Projeto-Piloto
	2030	2	3	2	2
	2040	4	5	3	3
	2050	5	6	4	4
VEÍCULOS ELÉTRICOS	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Incentivos Governamentais	Tecnologias	Infraestrutura & Padronização
	2030	2	3	4	3
	2040	4	5	7	6
	2050	5	10	10	10
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Regulamentação & Incentivos	Tecnologia & Armazenamento	
	2030	2	7	5	
	2040	4	8	7	
	2050	5	10	10	
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	Anos de Análise	Sistema de Tarifação	Tecnologias	Incentivos Governamentais	
	2030	2	4	5	
	2040	4	6	8	
	2050	5	10	10	

Informadas as avaliações ao sistema *fuzzy*, temos os impactos na energia e demanda máxima para o cenário 4 para cada tecnologia. Lembrando que veículos elétricos representam um impacto negativo ao sistema elétrico.

Tabela 23 – Resultado por Tecnologia – Cenário 4

Impactos por Tecnologia (%)			
	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
RESPOSTA DA DEMANDA	2030	-0,959	-2,68
	2040	-1,65	-5,07
	2050	-1,87	-6,55
VEÍCULOS ELÉTRICOS	2030	0,876	5,08
	2040	1,39	8,07
	2050	2,56	14,6
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	2030	-1,43	-1,38
	2040	-2,89	-2,76
	2050	-3,77	-3,61
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	2030	-0,317	-0,229
	2040	-0,779	-0,484
	2050	-0,886	-0,505

Tabela 24 – Resultado Final – Cenário 4

Impactos Finais (%)			
	Anos de Análise	Impacto na Energia	Impacto na Demanda Máxima
TOTAL	2030	-1,83	0,79
	2040	-3,93	-0,24
	2050	-3,97	3,94

Nas Tabela 23 e Tabela 24 é possível observar o grande impacto que a Resposta da Demanda possui no desenvolvimento da *smart grid*. Com baixas avaliações dadas, o resultado em 2050 para Resposta da Demanda é quase metade do observado nos cenários 2 e 3, que possuem alto desenvolvimento dessa tecnologia. Outro ponto de destaque é o grande impacto verificado em veículos elétricos na demanda máxima,

devido ao baixo desenvolvimento de sistema de tarifação específico para essa tecnologia. É importante observar que o impacto na energia para veículos elétricos neste cenário quanto no cenário 2 é o mesmo (2,56%), pois os carros continuarão a serem recarregados, consumindo a energia necessária para o total carregamento das baterias.

Este resultado fica mais evidente nas Figura 77 e Figura 78. Nela é possível observar que sem o desenvolvimento pleno da resposta da demanda e sistemas de tarifação, há aumento de demanda máxima no horizonte de estudo em relação ao cenário de referência, reforçando ainda mais a necessidade de estudos relacionados à inserção de veículos elétricos no Brasil e sistemas de tarifação específicos para essa tecnologia.

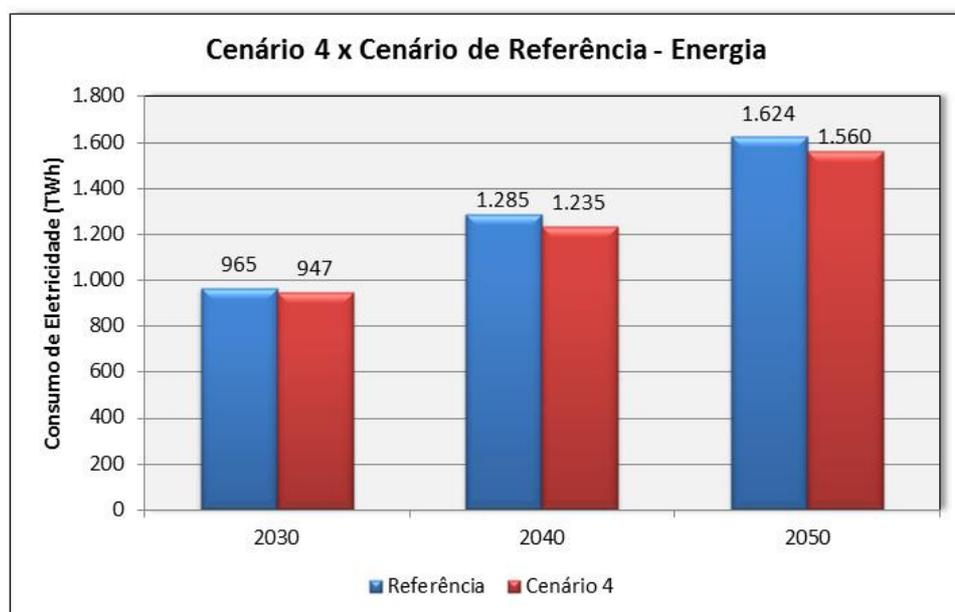


Figura 77 – Comparação Cenário 4 e Cenário de Referência – Energia

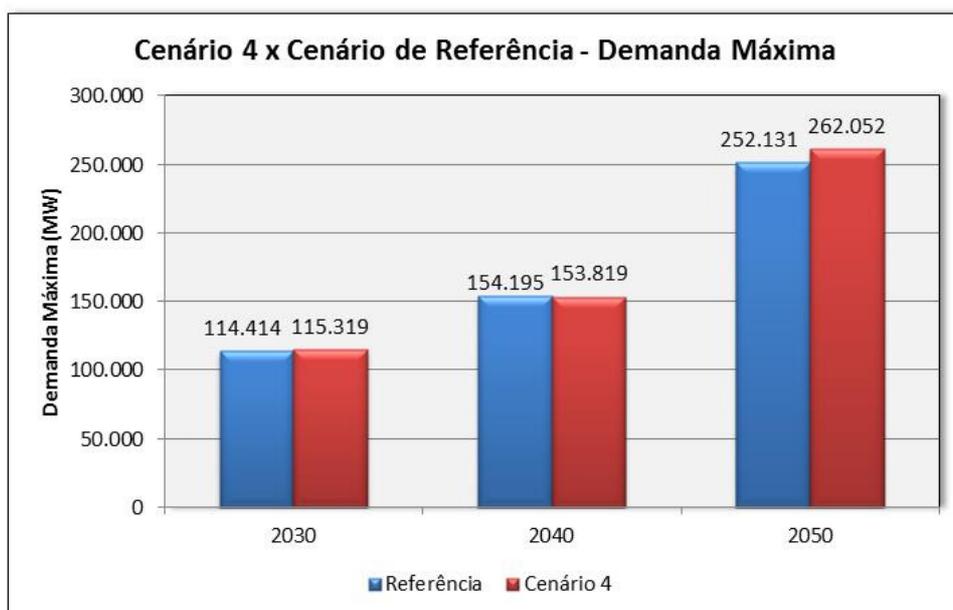


Figura 78 – Comparação Cenário 4 e Cenário de Referência – Demanda máxima

6.7 – IMPACTO NA EMISSÃO DE CO₂ NOS CENÁRIOS DE GERAÇÃO DO LAMP-CLIMACAP

6.7.1 – EMISSÃO DE CO₂ NO BRASIL E NO MUNDO

As atividades industriais e agrícolas desenvolvidas no último século possuem relação direta com o aumento da temperatura média da Terra. De acordo com a World Meteorological Organization – WMM (World Meteorological Organization– WMM, 2015), o ano de 2015 foi o mais quente já registrado na história, devido ao El Niño e o aquecimento global, sendo este último determinado principalmente pela emissão em grande escala de gases de efeitos estufa lançados na atmosfera. Portanto, a transformação da economia mundial baseado em energia limpa e renovável é imprescindível para a sustentabilidade do planeta ao longo prazo. E a *smart grid* pode ter papel fundamental neste processo da produção de energia, trazendo maior integração de fontes renováveis e diminuição do consumo médio de energia elétrica da população mundial (Greenpeace International, 2009).

De acordo com Davoli et al. (2012), desde o início da revolução industrial, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera aumentou 35% até 2011, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis e desmatamento. Se nenhuma

medida for tomada, a temperatura média do planeta poderá crescer de 1,4° a 5,8°C até 2100 de acordo com pesquisa do Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC.

Com a população mundial crescendo entre 40 a 100% até 2100 e o crescimento econômico na casa de 1000 a 2000% (Davoli, et al., 2012), é crucial que inovação e alta eficiência estejam presentes nos processos industriais, incluindo a geração de energia.

De acordo com o Balanço Energético Nacional – BEN (Ministério de Minas e Energia – MME e Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2015), de 2015 com ano base 2014, o total de emissões antrópicas associadas à matriz brasileira chegou a 485,2 MtCO₂eq, com um crescimento de 5,7% em relação a 2013. O Brasil ainda é um país com matriz limpa de geração de energia, pois para emitir 1 MWh o setor elétrico brasileiro emite 5 vezes menos que o setor europeu e 9 vezes menos que a geração de energia chinesa. Mas devido à escassez de chuvas e o consequente maior uso de geração térmica nos últimos anos, a intensidade de carbono na geração de energia no Brasil tem crescido. Em 2010, este fator estava em 51,2 kgCO₂/MWh, já em 2014 a intensidade de carbono era de 135,5 kgCO₂/MWh, um crescimento considerável em apenas 5 anos. Com a dificuldade de obtenção de licenças para usinas hidrelétricas com reservatório de acumulação no horizonte de médio prazo, conjugado com o crescimento da demanda estimado nos próximos anos, é esperado com a geração de energia no Brasil se torne mais “suja” se nenhuma medida for tomada.

Para promover ações com o intuito de desacelerar o aumento das emissões de gases de efeito estufa, em 2015 ocorreu a Conferência de Paris – COP-21, com um acordo mútuo de mais de 150 países para limitar o aumento da temperatura global em 2°C até 2100. O Brasil apresentou sua contribuição com meta de redução de emissões de 37% em 2025 em relação aos níveis de 2005, e está indicando que as emissões poderão ser reduzidas em até 43% em 2030 (República Federativa do Brasil, 2015). Um dos principais pontos está em aumentar o uso sustentável de energia renovável, excluindo energia hidrelétrica, para ao menos 23% da geração de eletricidade no Brasil no horizonte considerado.

6.7.2 – CENÁRIOS DE GERAÇÃO A PARTIR DO LAMP-CLIMACAP

O Latin American Modeling Project And Integrated Climate Modelling And Capacity Building In Latin America - LAMP-CLIMACAP é um projeto que envolveu seis equipes que produziu cinco cenários para a matriz energética brasileira até 2050 sob diferentes regimes de política climática. Os modelos utilizados neste estudo são: EPPA, GCAM, MESSAGE-Brasil, Phoenix, POLES e Tiam-ECN, sendo que nos cenários criados não há nenhuma indicação de introdução de tecnologias em *smart grid* citadas na presente tese. Os cinco cenários estudados são elencados abaixo, com detalhes sobre as simulações encontrados em Lucena et al. (2015):

- **Cenário Base** – Cenário business-as-usual;
- **Baixo Preço de CO₂** – Taxa de carbono de 10 US\$/tCO₂eq em 2020, crescendo 4%/ano, alcançando 32 \$/tCO₂eq em 2050;
- **Alto Preço de CO₂** – Taxa de carbono de 50 US\$/tCO₂eq em 2020, crescendo 4%/ano, alcançando 162 \$/tCO₂eq em 2050;
- **20% de Abatimento (FF&I)** – Emissões de CO₂ são reduzidas em 5% em 2020, com crescimento linear até 20% em 2050, em relação a 2010 para combustíveis fósseis e de indústrias (FF&I);
- **50% de Abatimento (FF&I)** – Emissões de CO₂ são reduzidas em 12,5% em 2020, com crescimento linear até 50% em 2050, em relação a 2010 para combustíveis fósseis e de indústrias (FF&I).

6.7.3 – IMPACTO DA *SMART GRID* NA EMISSÃO DE CO₂ NOS CENÁRIOS DE GERAÇÃO DO LAMP-CLIMACAP

Alcançar metas ambientais, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa dependerá muito de como será o mix de geração no Brasil no futuro. Deste modo, a

inserção de fontes renováveis é de suma importância para esse objetivo. E de acordo com Davoli et al. (2012), atender a demanda com fontes renováveis é de fato, seguro. A consultoria de energia Energynautics comparou 30 anos de dados meteorológicos com curvas de demanda na Europa com base em 15 minutos. A análise mostrou que com 90% da potência sendo fornecida por fontes renováveis, houve apenas 0,4% de chances que uma demanda máxima se correlacionou com baixa geração de solar e eólica, ocorrendo em apenas três meses nos últimos 30 anos.

De posse dos resultados encontrados nos quatro cenários de desenvolvimento da *smart grid* no Brasil até 2050, apresentados nas seções 6.6.2 a 6.6.5, pode ser possível determinar qual seria o impacto na emissão de CO₂ em cada um dos cinco cenários disponibilizados pelo LAMP-CLIMACAP, tendo como norte a eliminação da geração por meio de combustíveis fósseis e atendimento da demanda por fontes renováveis. Para isso, foi seguido o seguinte procedimento:

1. Já especificado o percentual de diminuição de energia nos quatro cenários de desenvolvimento da *smart grid*, diminuir a quantidade de energia correspondente nos anos 2030, 2040 e 2050 nos cinco cenários elencados pelo LAMP-CLIMACAP;

2. Para a retirada de geração especificada no item anterior, a prioridade são as fontes de geração a partir de combustíveis fósseis, com a hierarquização crescente de emissão de CO₂, ou seja, este seria um limite inferior de contribuição da *smart grid* para diminuição de emissão deste composto químico. As fontes com Carbon Capture and Storage – CCS têm 10% da emissão da fonte relacionada. Esta tecnologia baseia-se na captura do dióxido de carbono (CO₂) reduzido na queima de combustíveis fósseis em usinas termelétricas, refinarias de petróleo e outros processos, bem como o transporte e armazenamento deste elemento químico.

Para o cálculo da emissão de dióxido de carbono, foi adotado o seguinte procedimento:

- 2.1 - Utilizando os valores disponíveis no site <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=73&t=11>, foram adotados os seguintes fatores de emissão de carbono, em g/kJ, das fontes emissoras de combustíveis fósseis:

Tabela 25 – Fatores de emissão de carbono

Fatores de Emissão	
Fonte	Fator (g/kJ)
Carvão	0,092132
Carvão com CCS	0,009213
Gás Natural	0,050301
Gás Natural com CCS	0,005030
Óleo Combustível/Diesel	0,069347

2.2 – Para encontrar o heat-rate de cada fonte em kJ/kWh, primeiramente foi utilizada a eficiência média de cada fonte no Brasil, de acordo com o especificado em Nogueira et al. (2014). Este valor foi dividido por 3544, que é a relação de kJ para 1 kWh, ou seja, 1 kWh é igual a 3544 kJ. O resultado desta divisão é o heat-rate de cada fonte, em kJ/kWh, conforme especificado na tabela abaixo:

Tabela 26 – Fatores de eficiência energética

Eficiência Energética		
Fonte	Eficiência	Heat-Rate (kJ/kWh)
Carvão	0,30	11813,3
Carvão com CCS	0,23	15408,7
Gás Natural	0,50	7088,0
Gás Natural com CCS	0,44	7970,0
Óleo Combustível/Diesel	0,40	8860,0

2.3 – De posse destes dados é possível determinar a quantidade de CO₂ que é emitido por cada fonte para se gerar 1 kWh, multiplicando o heat-rate pelo fator de emissão, chegando aos seguintes valores:

Tabela 27 – Emissões de CO₂ em geração de energia

Emissões		
Fonte	Emissão (gCO ₂ /kWh)	Hierarquização
Gás Natural com CCS	40,09	1
Carvão com CCS	141,96	2
Gás Natural	356,53	3
Óleo Combustível/Diesel	614,41	4
Carvão	1088,39	5

3. Retirada da geração a partir da hierarquização acima. Se as gerações de todas as fontes estiverem zeradas ou mesmo com a retirada destas fontes, ainda há energia que pode ser abatida pela *smart grid*, é feita a retirada da geração das seguintes fontes, nessa ordem: nuclear, solar, biomassa, biomassa com CCS e eólica. Nesta segunda etapa de retirada, adotou-se o critério de custo de construção das usinas.

4. É realizado o cálculo de diminuição de emissão de CO₂, a partir da diminuição de geração calculada no item 3 e os fatores de emissão da Figura 27 .

6.7.3.1– RESULTADOS ENCONTRADOS

6.7.3.1.1 – CENÁRIO 1

O cenário 1 é representado por baixo desenvolvimento de *smart grid* no horizonte de estudo, logo, a contribuição é pequena para a diminuição de emissão de dióxido de carbono.

Todas as análises referenciadas serão limitadas ao ano de 2050, para dinamizar a leitura do texto, sabendo que os impactos nos anos de 2030 e 2040 são em menor escala daqueles apresentados para 2050.

Na Figura 79, é possível observar que no cenário-base a *smart grid* elimina em grande escala o gás natural, com exceção do modelo MESSAGE-Brasil, em que é diminuída a geração de carvão. Especial atenção será dada nessa análise ao modelo

MESSAGE-Brasil, que é uma adaptação realizada pela equipe do PPE/COPPE, do modelo MESSAGE - Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts, desenvolvido pela IIASA. Este modelo otimiza a expansão do sistema elétrico brasileiro, utilizando programação inteira-mista, foi projetado para formular e avaliar estratégias alternativas de abastecimento energético, avaliar políticas da expansão do sistema de energia, tendo restrições de disponibilidade e preço de combustíveis, restrições ambientais, penetração de novas tecnologias, entre outras (Jalal, et al., 2006).

Quando nos cenários já há diminuição de geração por meio dos combustíveis fósseis, como por exemplo, nos cenários de 20% e 50% de abatimento, são retiradas as gerações de gás natural com CCS, nuclear e carvão com CCS, que já são fontes com baixas emissões de CO₂.

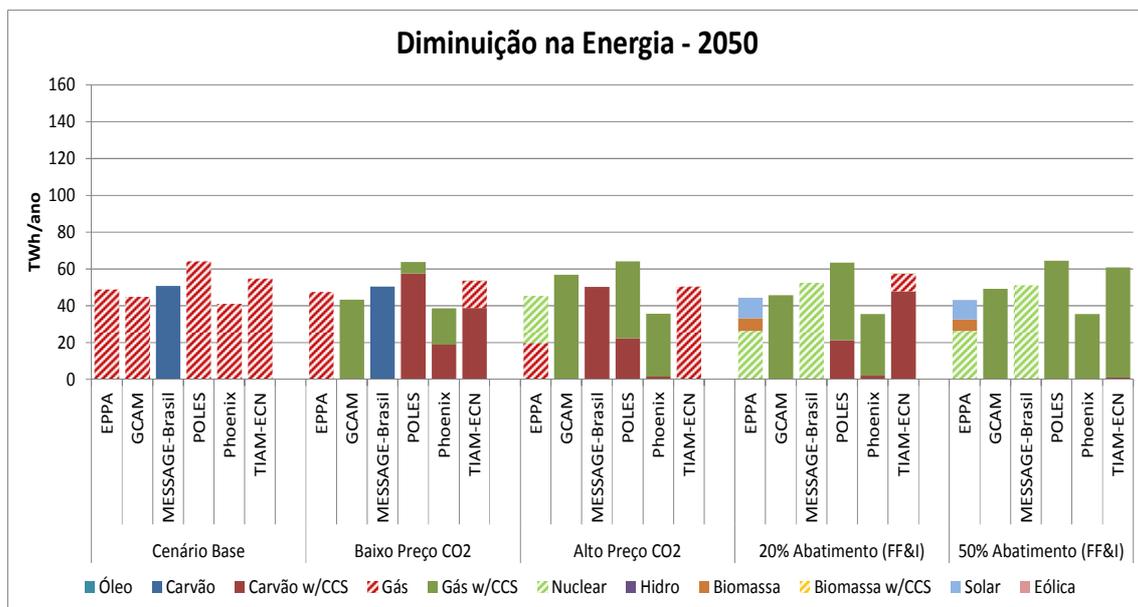


Figura 79 – Diminuição na energia – 2050 – Cenário 1

Este comportamento é mais evidente na Figura 80, onde é apresentada a diminuição de emissão de CO₂ em 2050. Nos cenários desenvolvidos pelo LAMP-CLIMACAP em que a tentativa de evitar a emissão em grande escala de CO₂ é mais branda, a *smart grid* consegue impactar em maior monta a emissão. Destaque para o modelo MESSAGE-Brasil, em que há grande diminuição de emissão de carvão nos cenários-base e com baixo preço de CO₂.

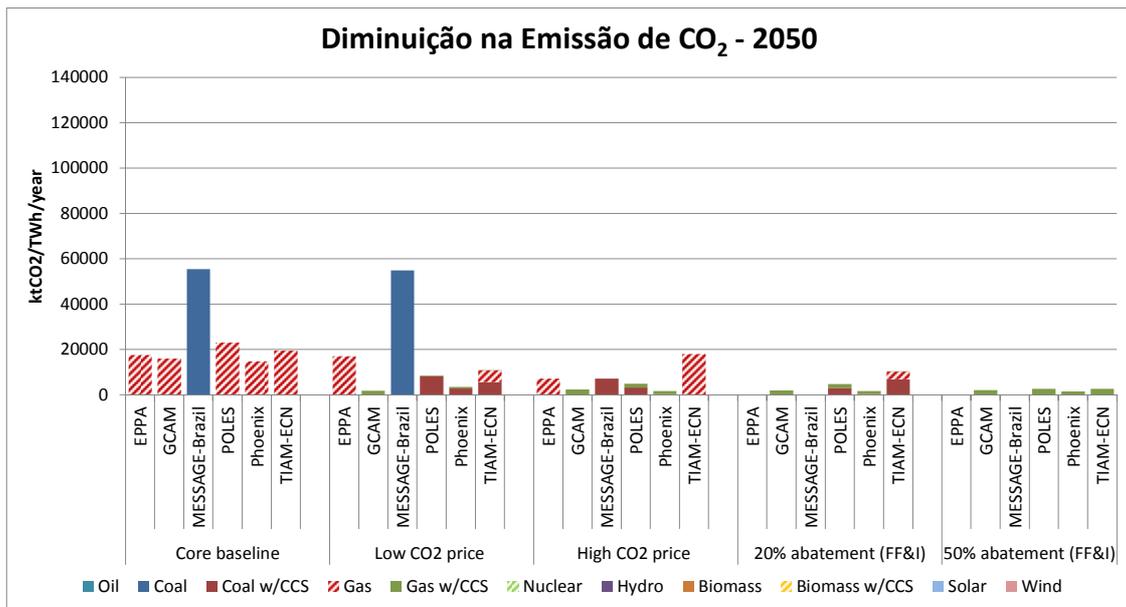


Figura 80 – Diminuição na emissão de CO₂ – 2050 – Cenário 1

6.7.3.1.2 – CENÁRIO 2

O cenário 2 é representado por alto desenvolvimento de *smart grid* no horizonte de estudo, logo, a contribuição é maior para a diminuição de emissão de dióxido de carbono em relação ao cenário 1.

Neste cenário, em que a diminuição de energia é mais otimista por parte da *smart grid*, é possível observar que um grande conjunto de fontes tem sua geração diminuída. Como apresentado na Figura 81, no cenário de 50% de abatimento de combustíveis fósseis, em alguns modelos de simulação há diminuição de geração de solar e biomassa, fontes que não emitem CO₂. Ou seja, para alguns modelos e cenários, a *smart grid* conseguiu zerar a geração de todas as fontes que emitem dióxido de carbono, caracterizando a importância da *smart grid* para o Brasil em termos de mudanças climáticas.

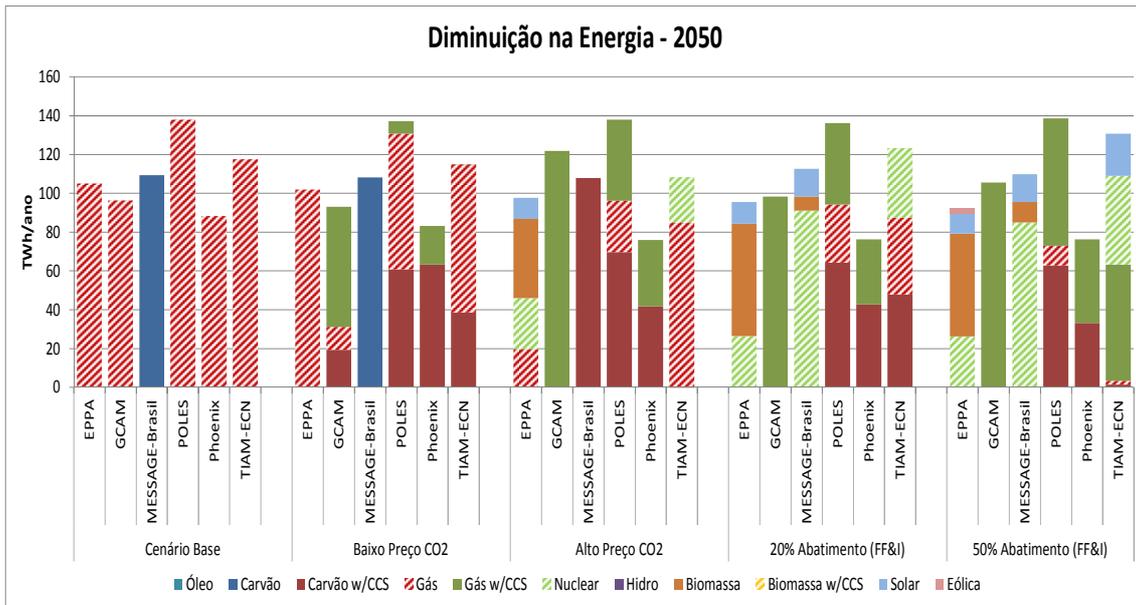


Figura 81 – Diminuição na energia – 2050 – Cenário 2

Na Figura 82 é constatado que em todos os cenários há a diminuição de emissões pela geração de gás natural, além de importantes diminuições de emissões por carvão com CCS. Destaque novamente para a eliminação da emissão de carvão no modelo MESSAGE-Brasil, principalmente nos cenários com grande geração de fontes com combustíveis fósseis. No cenário de alto preço de CO₂, o modelo MESSAGE-Brasil elimina a emissão por parte de carvão com CCS. Nos cenários com abatimento de combustíveis fósseis, é diminuída a emissão de gás natural, gás natural com CCS e carvão com CCS.

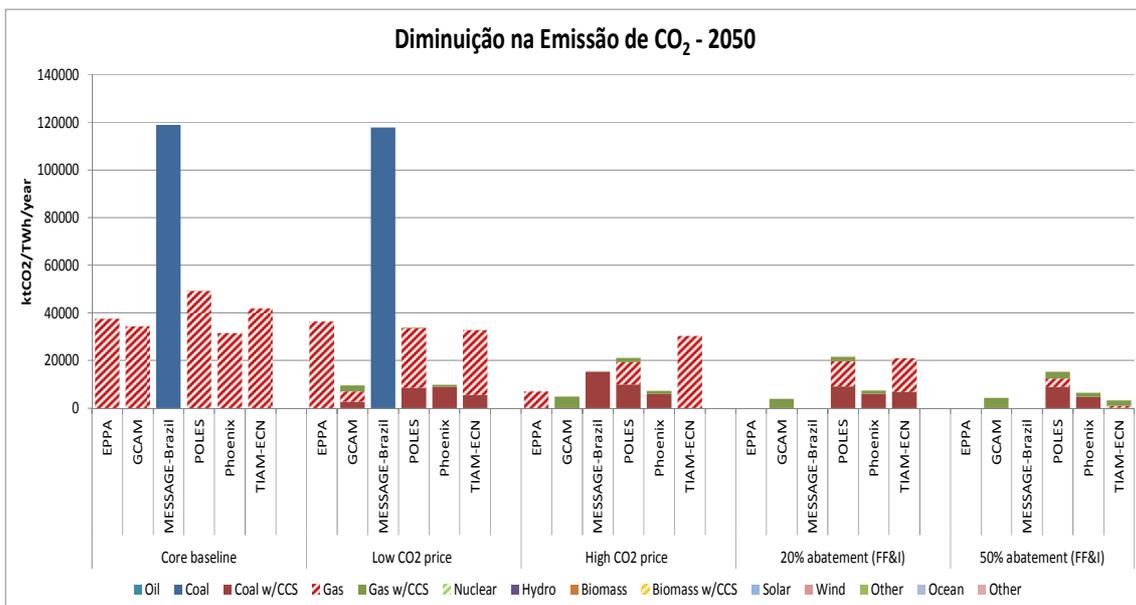


Figura 82 – Diminuição na emissão de CO₂ – 2050 – Cenário 2

6.7.1.3.3 – CENÁRIO 3

O cenário 3 é representado por alto desenvolvimento para Resposta da Demanda e Pequena Geração Distribuída, e baixo desenvolvimento para Veículos Elétricos e Eficiência Energética. Este cenário foi criado levando-se em consideração um maior desenvolvimento de tecnologias que hoje já recebem atenção especial no Brasil.

Neste cenário, com pouca introdução de veículos elétricos no horizonte de estudo, a *smart grid* consegue ter participação ainda mais relevante na diminuição da energia e emissão de CO₂, chegando a diminuir em grande escala fontes de geração que não emitem CO₂, como no modelo EPPA. Com a hierarquização utilizada, esse é um indicativo que todas as fontes de geração movidas a combustíveis fósseis foram eliminadas nesse ano de estudo. Destaque também pode ser dado ao modelo MESSAGE-Brasil, onde nos cenários com abatimento de emissões de 20% e 50%, são retiradas as gerações de fontes não emissoras de CO₂, como solar e biomassa, como apresentado na Figura 83.

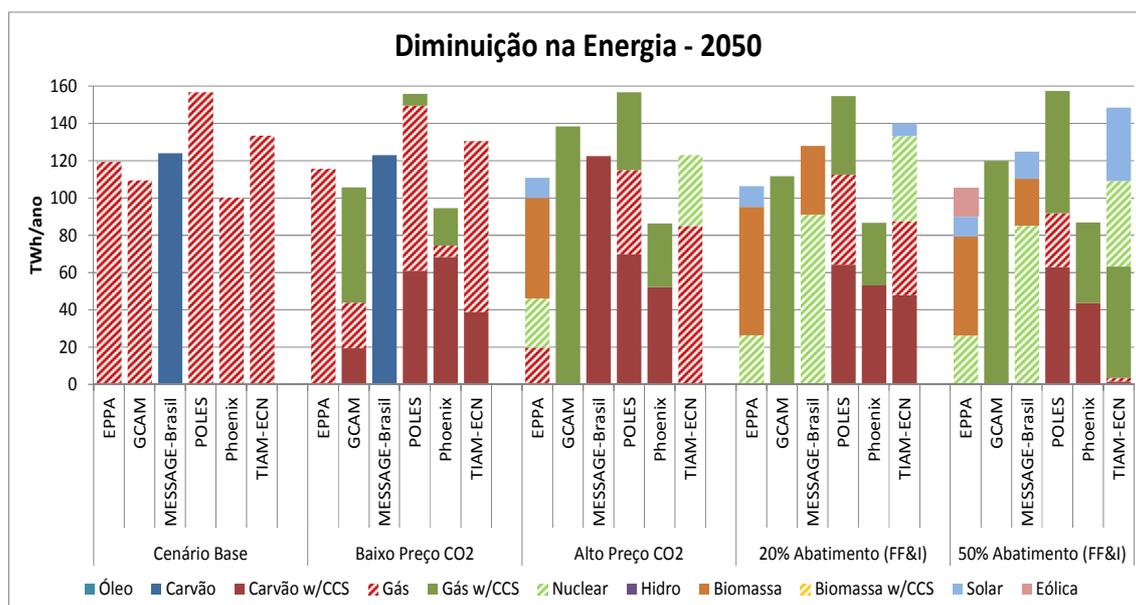


Figura 83 – Diminuição na energia – 2050 – Cenário 3

A diminuição de emissão chega aos seus mais altos índices nesse cenário, com a diminuição de quase 45.000 ktCO₂/TWh em 2050 nos modelos MESSAGE-Brasil e Poles no cenário base. Mesmo nos cenários em que a emissão de CO₂ já é restritiva, a *smart grid* consegue minorar a emissão, eliminando a geração de gás natural.

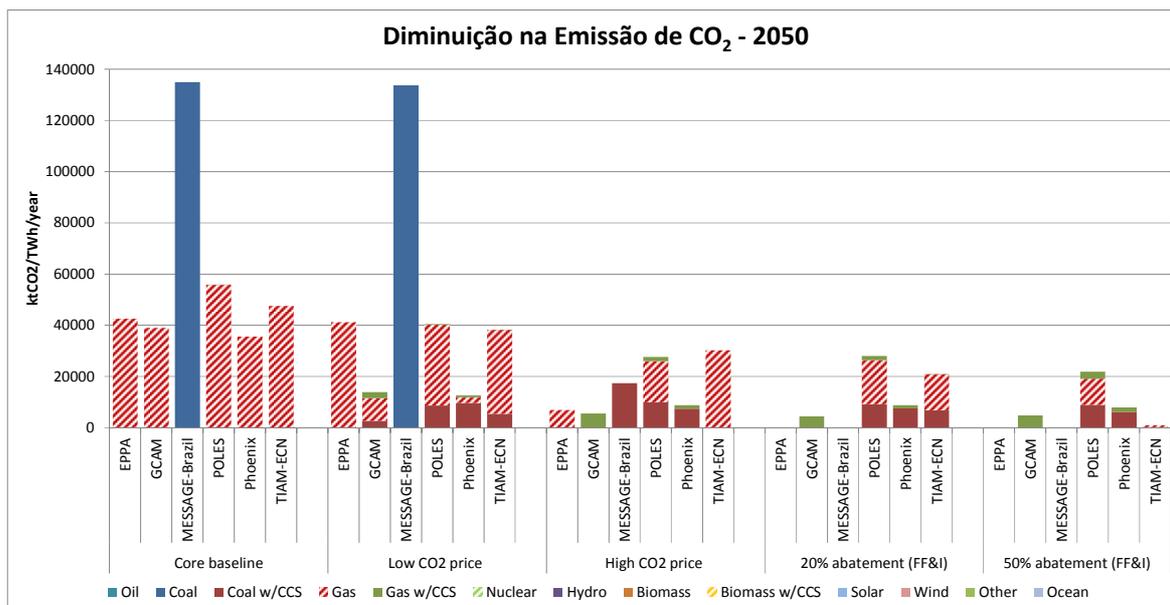


Figura 84 – Diminuição na emissão de CO₂ – 2050 – Cenário 3

6.7.1.3.4 – CENÁRIO 4

O cenário 4 é representado por alto desenvolvimento para Pequena Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética, e baixo desenvolvimento para Resposta da Demanda. Este é um cenário criado com o objetivo de apresentar a importância do desenvolvimento da resposta da demanda em um ambiente *smart grid*.

Este cenário tem diminuição de energia com pouca diferença do cenário 1, que possui pouca inserção de tecnologias *smart grid* no horizonte de estudo. A diferença dos dois cenários reside no impacto na demanda máxima, variável que não é analisada nesta seção.

Portanto, a geração de energia é diminuída em menor escala, mas ainda com valores importantes, chegando a diminuir mais de 60 TWh em alguns modelos do LAMP-CLIMACAP, como no modelo POLES. Neste cenário com pouca introdução de *smart grid*, fontes com baixa emissão de CO₂ são eliminadas, seguindo a hierarquização dada. Nos cenários com abatimento de emissões, (20% e 50%), no modelo MESSAGE-Brasil é eliminada a geração de energia nuclear. Os resultados são mostrados na Figura 85.

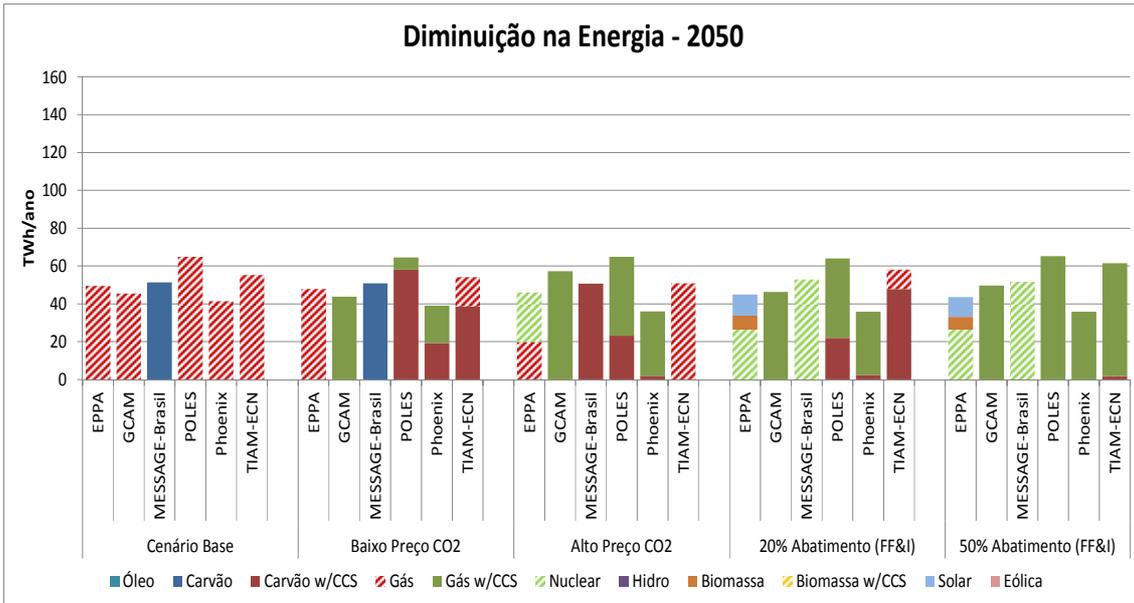


Figura 85 – Diminuição na energia – 2050 – Cenário 4

Como pode ser visto na Figura 86, a diminuição de emissão de CO₂ também é menor comparada aos outros cenários. Destaque novamente para a diminuição da emissão de carvão no modelo MESSAGE-Brasil e gás natural no modelo TIAM-ECN.

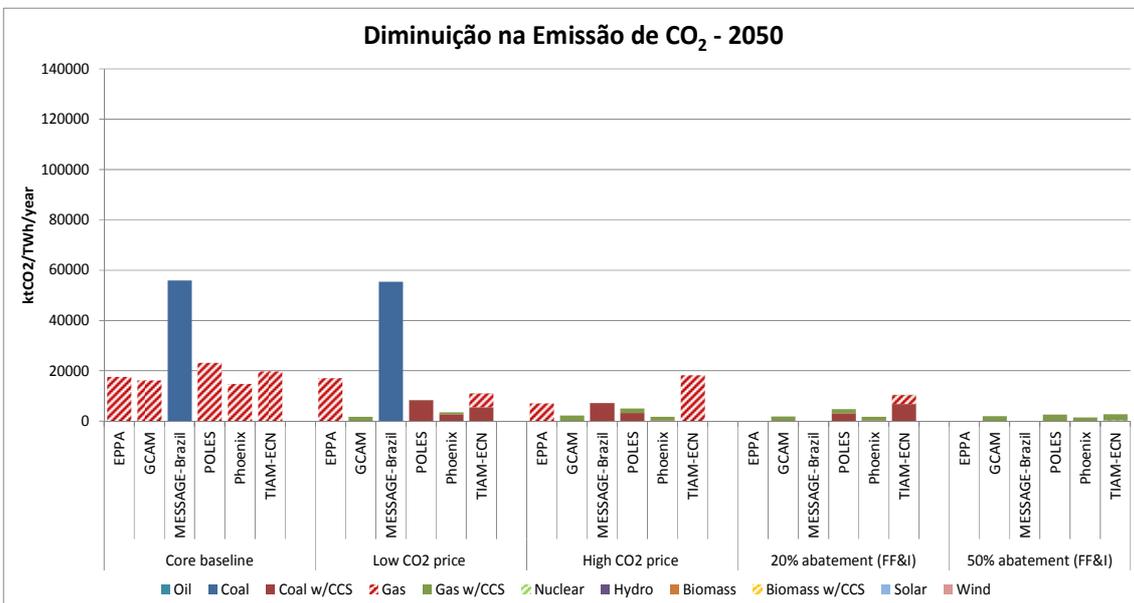


Figura 86 – Diminuição na emissão de CO₂ – 2050 – Cenário 4

CAPÍTULO 7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 – CONCLUSÃO

Conforme apresentado no decorrer deste trabalho, a *smart grid* terá papel fundamental no sistema elétrico brasileiro nas próximas décadas, sendo necessário realizar diversos estudos em todas as esferas governamentais na área de energia para desenvolver as diversas tecnologias que a *smart grid* abrange.

A *smart grid* ainda é pouco estudada no Brasil e há poucos resultados dos projetos-piloto desenvolvidos no país. A presente tese tem como um dos objetivos lançar luz sobre esse tema e alertar a importância no desenvolvimento do país, pois com a dificuldade de licitação de grandes usinas hidrelétricas, acarretando na perda de capacidade do sistema de energia energético de atender à demanda com energia dos reservatórios, o desenvolvimento da *smart grid* pode ser crucial para o atendimento à demanda.

Na presente tese foi apresentada uma metodologia que mensura o impacto que a *smart grid* terá na demanda, em termos de energia consumida e demanda máxima, e também foi avaliada a contribuição da *smart grid* na diminuição de emissão de CO₂ no sistema elétrico brasileiro. Para isso, foram analisadas quatro áreas que se mostram as mais fortes para se desenvolverem no futuro a partir da *smart grid*: Resposta da Demanda, Geração Distribuída, Veículos Elétricos e Eficiência Energética.

No presente trabalho foi apresentado o resultado global da introdução destas tecnologias em *smart grid* no horizonte de longo prazo, podendo ser avaliado conjuntamente todas as causalidades envolvidas no desenvolvimento das principais tecnologias em *smart grid* a partir do sistema *fuzzy* modelado, mostrando o desenvolvimento das tecnologias ao longo dos anos em quatro cenários construídos.

Nos resultados apresentados é possível observar a importância de mensurar os impactos da introdução da *smart grid* na demanda de energia, item que é negligenciado atualmente no planejamento energético de médio e longo prazo. Por exemplo, no sistema *fuzzy* desenvolvido para mensurar os impactos na demanda, a demanda máxima

pode ser diminuída em quase 10% no cenário de alto desenvolvimento da *smart grid* em 2050.

Com a robustez apresentada pelo sistema a partir dos resultados apresentados para o Brasil até 2050, a metodologia pode futuramente fazer parte de qualquer modelo de planejamento energético que queira considerar os efeitos da *smart grid* no Brasil.

A partir dos estudos realizados, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Nos resultados encontrados pela metodologia proposta, ficou evidenciada a eficácia do sistema *fuzzy* construído, dando resultados robustos nos diversos cenários construídos;
- De acordo com os resultados encontrados, é de suma importância realizar estudos das tecnologias abrangidas pela *smart grid*, visando o seu pleno desenvolvimento com impactos positivos para a sociedade, inclusive com a dinamização da cadeia produtiva destes itens;
- Conforme apresentado no cenário 4, é importante realizar estudos específicos dos impactos da introdução dos veículos elétricos no Brasil, pois os mesmos inserem uma nova carga no sistema elétrico;
- É importante incentivar a adoção da tarifa branca, sendo este o primeiro passo para o pleno desenvolvimento da tarifação dinâmica no Brasil, podendo chegar a resultados primorosos de redução de demanda máxima;
- Nos cenários avaliados, a pequena geração distribuída alcançar bons resultados para diminuir a demanda máxima e energia exigidas para o SIN. Deste modo, os recentes incentivos lançados pelo Governo Federal são determinantes para o desenvolvimento desta área e é fundamental que as outras tecnologias aqui elencadas também possuam incentivos;
- Conforme apresentado na seção 6.7.3, o desenvolvimento da *smart grid* terá relevância no alcance das metas de diminuição de emissão de CO₂ pelo setor de energia. É bom frisar que os cálculos apresentados na presente tese em relação à emissão de CO₂ são o limite inferior de diminuição deste composto químico, sendo possível que a diminuição da emissão seja bem superior a aqui apresentada.

7.2 – SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Seguindo a pesquisa desenvolvida nesta tese, outros tópicos necessitam de maior aprofundamento, tendo como objetivo auxiliar o entendimento do impacto da *smart grid* no sistema energético brasileiro. Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se listar:

- Estudo da elasticidade da resposta da demanda em período de longo uso de tarifas diferenciadas e seu impacto na previsão de demanda;
- Comportamento dos usuários de veículos elétricos com tarifas diferenciadas específicas para este tipo de automóvel no Brasil;
- Perfis de inserção de pequena geração distribuída, visualizando quais fontes seriam mais utilizadas pelos brasileiros em diversas regiões do país;
- Realização deste mesmo estudo utilizando softwares de planejamento energético integrado, como por exemplo, o MESSAGE-Brasil;
- Comportamento do consumo de energia com equipamentos domésticos inteligentes, em regiões com diferentes regimes de temperatura.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS

Administration, U. E. I., 2015. *Annual Energy Outlook 2015 With Projections to 2040*. Relatório da U.S. Energy Information Administration - EIA. Disponível em:

<http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2011. *Nota Técnica nº 0004/2011-SRD/ANEEL*, Brasília.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2012. *Resolução Normativa Nº 482*. Brasília.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2012. *Resolução Normativa Nº 481*. Brasília.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2013. *Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482/2012*. Brasília. Disponível em:

http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/faq_482_18-12-2012.pdf.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2014. *Micro e Minigeração Distribuída - Sistema de Compensação de Energia Elétrica*, Brasília. Disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf> .

Agência Nacional de Energia Elétrica, 2011. *Nota Técnica nº 0025/2011*, Brasília. Disponível em:

http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/042/documento/nota_tecnica_0025_gd.pdf.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2015. *Relatórios de Consumo*. Disponível em: <http://relatorios.ANEEL.gov.br/> Acesso em 3 Dezembro 2015.

Albarello, E. B., 2008. *A relevância da Construção de Cenários na Projeção de Mercado para o Setor de Energia Elétrica - Estudo de Caso: AES Eletropaulo*.

Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, Brasil.

Alcântara, M., 2010. "Veículo Elétrico, legislação do setor de energia e impacto sobre as concessionárias de distribuição". *2º Seminário Veículos Elétricos & Rede Elétrica*, Curitiba, Brasil.

Andrade, J. d., Impinnisi, P. & Bianchini, C., 2014. "Sistemas de armazenamento aplicados à geração distribuída e veículos elétricos". *2º Seminário Veículos Elétricos & Rede Elétrica*, Curitiba, Brasil.

Anfavea, 2015. *Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – ANFAVEA*. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/index.html> . Acesso em 13 Janeiro 2016.

Asia-Pacific Economic Cooperation - APEC. "Using smart grids to Enhance Use of Energy-Efficiency and Renewable-Energy Technologies". In: Report of APEC Energy Working Group, 2011. Disponível em:

http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-20389.pdf.

Associação Brasileira de Veículos Elétricos - ABVE , 2015. *ABVE - Associação Brasileira de Veículos Elétricos*. Disponível em: <http://www.abve.org.br/>. Acesso em 24 Maio 2014.

Barassa, E., 2015. *Trajatória Tecnológica do Veículo Elétrico: Atores, Políticas e Esforços Tecnológicos no Brasil*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Bianchin, C. G., 2014. *Sistemas de armazenamento aplicados à geração distribuída e veículos elétricos. 2º Seminário Veículos Elétricos & Rede Elétrica*, Curitiba, Brasil.

Borba, B., 2012. *Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético brasileiro*. Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Braña, J. P., 2008. *Processo de Tomada de Decisão em Projetos de Exploração e Produção de Petróleo: Uma Abordagem Sistêmica com Aplicação da Teoria de Lógica Fuzzy*. Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Brasil, D. O. C., 2012. *Impacto da Integração das Fontes Renováveis Alternativas de Energia no Sistema*. Apresentação na Rio+20. Rio de Janeiro, Brasil.

Buarque, S. C., 2003. *Metodologia e Técnicas de Construção de Cenários Globais e Regionais*. Texto para discussão n° 939, Ipea, Brasília.

Campos, J. G. F. d., 2014. *Smart grid e potencial de contribuição às mudanças climáticas no Brasil: Um estudo da tecnologia Plataforma Hemera*. Dissertação de Mestrado, Universidade São Paulo, São Paulo, Brasil.

Campos, R. A., Grego, D. D. & Ramos, D.. "Efficient pricing: An Opportunity for Cost Reduction System Expansion to Benefit the Consumer as Bounce Deployment of Smart Metering", *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA)*, São Paulo, 15-17 April 2013.

Castro, B. H. R. d. & Ferreira, T. T. F., 2010. *Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades*, Rio de Janeiro.

Centrais Elétricas Norte do Brasil S/A – ELETRONORTE, 2005. *Cenários Macroeconômicos para a Amazônia - 2005-2025*, Fortaleza.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica - CRESESB, 2001. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. 1 ed., Rio de Janeiro, Brasil.

- Chang, J., 2010. *Looking Forward: High Wind and Solar Penetration on the Grid*. Apresentação - NARUC Renewable Energy, Chicago.
- Chang, J., 2012. *Challenges of Renewable Integration*. 4th Annual Renewable Energy Technology Conference & Exhibition, Washington.
- Charles River Associates, 2005. *Primer on Demand-Side Management*, The World Bank, Oakland.
- Clean Energy Ministerial, 2013. *GLOBALEV Outlook - Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020*, New York.
- Coelba, 2013. *Estado da Bahia - Atlas do Potencial Eólico*. 1 ed. Salvador.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, 2008. *Resolução Conama n° 401*. Brasília.
- Costa, C. d. V., 2006. *Políticas de Promoção de Fontes Novas e Renováveis para Geração de Energia Elétrica: Lições da Experiência Européia para o Caso Brasileiro*. Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Davoli, F., Repetto, M. & Tornelli, C., 2012. *Boosting Energy Efficiency Through Smart Grid*. 1 ed., Genova, International Telecommunication Union - ITU.
- Dias, M. V. X., Borotni, E. d. C. & Haddad, J., 2012. *Geração Distribuída no Brasil: Oportunidades e Barreiras*. Revista Brasileira de Energia, Volume 11, Brasília.
- DTE Energy, 2011. *Plug-In Electric Vehicles and Infrastructure*, Texas. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/document/detroit_edison_dte_energy_plug_electric_vehicles_and_infrastructure.
- ECLAREON, 2013. *PV Grid Parity Monitor*, Chicago. Disponível em: <http://www.eclareon.eu/en/gpm>.
- Electric Power Research Institute - EPRI, 2008. *Integration of Energy Efficiency and Demand Response into Distribution Planning Processes*, Palo Alto. Disponível em: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001015985>.
- Eletrobrás - Procel, 2014. *Procel Resultados 2014 - Ano Base 2013*, Rio de Janeiro.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2011. *Nota Técnica DEA 03/11 - Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2011-2020)*, Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20110222_1.pdf.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2013. *Nota Técnica DEA 07/13*, Rio de Janeiro. Disponível em: www.epe.gov.br/leiloes/Documents/.../EPE-DEA-NT-010-2013.pdf.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014. *Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2014-2023)*, Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2026%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20e%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADa%20para%20os%20pr%C3%B3ximos%2010%20anos.pdf>.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014. *Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil - Condicionantes e Impactos*, Rio de Janeiro. Disponível em:

[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20\(Revisada\).pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20(Revisada).pdf).

Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2014. *Nota Técnica DEA 13/14 - Demanda de Energia 2050*, Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-14%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>

Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014. *Termo de Referência (TDR) para elaboração do PNE 2050*, Rio de Janeiro. Disponível em:

[http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/Estudos_20/PNE%202050%20-%20Termo%20de%20Refer%C3%Aancia%20\(TDR\).pdf](http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/Estudos_20/PNE%202050%20-%20Termo%20de%20Refer%C3%Aancia%20(TDR).pdf)

Empresa de Pesquisa Energética, 2015. *Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/Forms/EPEResenhaMensal.aspx>.

Energy Advantage, 2014. *Demand Response and Demand Side Management - What's the Difference?*. Disponível em:

<http://www.energyadvantage.com/blog/2010/02/demand-response-demand-side-management-what%E2%80%99s-difference/>.

EPIC Energy Blog, 2013. *The EPIC Energy Blog*.

Disponível em: <http://epicenergyblog.com/2013/06/19/residential-rates-revisited-part-2-inclining-block-rates/>.

Falcão, D. M., 2010. *Sistema Fuzzy - Notas de Aula*, Rio de Janeiro.

Falcão, D. M., 2011. *Página Sustentável*.

Disponível em: <http://www.paginasustentavel.com.br/artigos/76-redes-eletricas-inteligentes-smart-grid.html>.

Faruqui, A., 2008. *Inclining Toward Efficiency*, Commission Watch, Minnesota.

Disponível em:

<https://www.edockets.state.mn.us/EFiling/edockets/searchDocuments.do?method=showPoup&documentId=%7BB1048BFF-0703-41EE-B9D8-87AE2E9B9E3E%7D&documentTitle=20146-100165-08>

Faruqui, A., 2009. *The iGrid Project*, FERC/NARUC Collaborative, Seattle. Disponível

em: [http://www.naruc.org/meetings-and-events/meetings-](http://www.naruc.org/meetings-and-events/meetings-overview//Presentations/09%200711%20Faruqui%20Presentation%20The%20iGrid%20Project.pdf)

[overview//Presentations/09%200711%20Faruqui%20Presentation%20The%20iGrid%20Project.pdf](http://www.naruc.org/meetings-and-events/meetings-overview//Presentations/09%200711%20Faruqui%20Presentation%20The%20iGrid%20Project.pdf).

Faruqui, A., 2012. *Smart Pricing & Smart Charging*, Fortnightly Magazine, Outubro 2011, San Diego. Disponível em:

<http://www.fortnightly.com/fortnightly/2011/10/smart-pricing-smart-charging>

Faruqui, A., 2012. "The Future of Demand Growth", *Goldman Sachs 11th Annual Power and Utility Conference*, New York, 2012. Disponível em:

http://www.brattle.com/system/publications/pdfs/000/004/431/original/The_Future_of_Demand_Growth_Faruqui_Aug_14_2012_Goldman_Sachs.pdf?1378772105.

Faruqui, A., 2013. *Policies for Energy Provider-Delivered Energy Efficiency in North America*, Apresentação - The World Bank, Chicago. Disponível em:

http://www.brattle.com/system/publications/pdfs/000/004/949/original/Policies_for_Energy_Provider_Delivered_Energy_Efficiency_in_North_America_Faruqui_Weiss_101713.pdf?1382120963.

Faruqui, A., 2013. "The Global Tao of the Smart Grid", *The 3rd Guangdong, Hong Kong, Macau Power Industry Summit*, The Peninsula Hong Kong. Disponível em:

http://www.brattle.com/system/publications/pdfs/000/004/954/original/The_Global_Tao_of_the_Smart_Grid.pdf?1383853471.

Faruqui, A., 2014. "Price-Enabled Demand Response", *Thai Energy Regulatory Commission, OERC, And Utilities Delegation*, Boston. Disponível em:

http://www.brattle.com/system/publications/pdfs/000/005/048/original/Price-Enabled_Demand_Response.pdf?1406065753.

Faruqui, A., 2015. "The Many Futures of Demand Response and Distributed Generation", *Eastern Interconnection States Planning Council*, New Jersey. Disponível em:

http://www.brattle.com/system/publications/pdfs/000/005/124/original/The_many_futures_of_demand_response_and_distributed_generation.pdf?1425564993.

Faruqui, A. & Davis, W., 2013. "Dynamic Pricing 2.0 - The Grid-Integration of Renewables", *IEEE PES GM 2013 Meetings*, Vancouver.

Faruqui, A. & Mitarotonda, D., 2012. *Energy Efficiency And Demand Response in 2020– A Survey Of Expert Opinion*, Chicago. Disponível em:

http://www.brattle.com/system/publications/pdfs/000/004/697/original/Energy_Efficiency_and_Demand_Response_in_2020_Faruqui_Mitarotonda_Nov_2011.pdf.

Faruqui, A. & Palmer, J., 2011. *Dynamic Pricing and Its Discontents*, In: SSRN, Regulation, Vol. 34, No. 3, p. 16, Fall 2011, Chicago.

Faruqui, A. & Sergici, S., 2009. *Arcturus: International Evidence on Dynamic Pricing*, Cambridge. Disponível em: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2288116.

Faruqui, A. & Sergic, S., 2010. *Household Response to Dynamic Pricing of Electricity— A Survey of the Empirical Evidence*, Minnesota. Disponível em: http://www.hks.harvard.edu/hepg/Papers/2009/The%20Power%20of%20Experimentation%20_01-11-09_.pdf.

Ferreira, R. V., 2006. *Previsão de Demanda: Um Estudo de Caso para o Sistema Interligado Nacional*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Filho, J. A. A. D. A., 2010. *Introdução à Análise de Previsão de Demanda de Energia Elétrica Utilizada pela Empresa de Pesquisa Energética*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.

Gellings, C. W., 2009. *The smart grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response*. 1 ed. Florida, CRC Press.

Goldemberg, C., 2005. *A Evolução do Carro Elétrico*. 1 ed. São Paulo, PEA/EPUSP.

Greenpeace International, 2009. *[r]enewables - Infrastructure Needed to Save the Climate*. 1 ed. Berlim, Greenpeace International.

GridWise Alliance, 2011. *Paths to smart grid Interoperability*, Washington. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/files/Paths_Smart_Grid_Interoperability_Overview_d_Summary.pdf.

Gsänger, S. & Pitteloud, J.-D., 2015. *2015 Small Wind World Report Summary*, Bonn. Disponível em: http://small-wind.org/wp-content/uploads/2014/12/Summary_SWWR2015_online.pdf.

Hledik, R., 2009. "How Green Is the smart grid?". *The Electricity Journal*, Abril, pp. 29-41, San Diego.

Hollanda, J. B. d., 2011. *O futuro dos Carros Elétricos - Um artigo para eu ler daqui a 10 anos*, Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.inee.org.br/down_loads/veh/O_futuro_dos_Veiculos_Eletricos.pdf.

Hypescience, 2015. *Hypescience*. Disponível em: <http://hypescience.com/energia-solar-alemanha/>. Acesso em Junho 2015.

- Impinnisi, P. R., 2014. *Baterias para Veículos Elétricos e Híbridos, 2º Seminário Veículos Elétricos & Rede Elétrica*, Curitiba, Brasil.
- International Energy Agency - IEA, 2011. *Technology Roadmap - Smart Grids*, Paris. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/smartgrids_roadmap.pdf.
- International Energy Agency - IEA, 2015. *Global EV Outlook 2015*. International Energy Agency - IEA, 2015. *International Energy Agency*. Disponível em: <http://www.iea.org/topics/energyefficiency/>.
- International Renewable Energy Agency - IRENA, 2015. *International Renewable Energy Agency*. Disponível em: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/> Acesso em Agosto 2015.
- Itaipu Binacional, 2010. *Projeto VE - Ações e Resultados*, Curitiba.
- Jalal, I. et al., 2006. *Brazil : A Country Profile on Sustainable Energy Development*. 1 ed. Vienna, IAEA.
- Jarventausta, P., Repo, S. & Rautiainen, A., 2010. "Smart grid power system control in distributed generation environment". *Annual Reviews in Control*, Issue 34, pp. 277-286.
- Kagan, N., Gouvea, M. & Maia, F., 2013. *Redes Elétricas Inteligentes no Brasil - Análise de Custos e Benefícios de um Plano Nacional de Implantação*. 1 ed. Brasília, Synergia.
- Lima, C., 2014. "Geração Distribuída Baseada em Normas e Padrões Técnicos", *Seminário Micro e Minigeração Distribuída - Impactos da Resolução Normativa ANEEL RN 482/2012*, Brasília.
- Lucena, A., 2012. *Planejamento Energético - PEI - Modelos Energéticos. Notas de Aula*, Rio de Janeiro.
- Lucena, A., Clarke, L., Schaeffer, R. & Szklo, A., 2015. "Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy". *Energy Economics*.
- Lucena, A., Schaeffer, R. & Szklo, A., 2012. *Convergência e/ou Divergência entre os modelos Top-down vs. Bottom-up para Elaboração de Cenários de Longo Prazo - Notas de Aula*, Rio de Janeiro.
- Ministério de Minas e Energia – MME e Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2013. *Balanco Energético Nacional 2013*. 1 ed. Brasília.
- Ministério de Minas e Energia – MME e Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2015. *Balanco Energético Nacional 2015*. 1 ed. Brasília.
- Ministério de Minas e Energia - MME, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2014. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*. 1 ed. Brasília.

- Ministério de Minas e Energia - MME, 2007. *Plano Nacional de Energia 2030*. 1 ed. Brasília.
- Ministério de Minas e Energia - MME, 2015. *ProGD - Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica*, Brasília.
- Ministério de Minas e Energia, 2001. *Atlas Do Potencial Eólico Brasileiro*. 1 ed. Brasília.
- Ministério de Minas e Energia, 2022. *Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2022*. 1 ed. Brasília.
- Miranda, R., 2013. *Análise da Inserção de Geração Distribuída de Energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro*. Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Moshari, A., Yousefi, G. R., Ebrahimi, A. & Haghbin, S., 2010. "Demand-Side Behavior in the Smart Grid Environment", *Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, Gotemburgo, 2010.
- Munakata, T., 2008. *Fundamentals of the New Artificial Intelligence*. 2 ed, Londres, Springer.
- National Energy Regulator of South Africa - NERSA, 2012. *Inclining Block Rate and Residential Tariffs*, Washington. Disponível em: http://www.eskom.co.za/CustomerCare/TariffsAndCharges/Documents/Inclining_block_rate_tariffs_13.pdf.
- National Energy Technology Laboratory, 2011. *Environmental Impacts of smart grid*. Disponível em: www.netl.doe.gov . Acesso em Agosto 2011.
- National Renewable Energy Laboratory - NREL, 2014. *Smartgrid.gov*. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid. Acesso em Janeiro 2014.
- Neto, L. B., Coelho, P. H. G. & Amaral, J. L. M. d., 2006. "Minicurso de Sistema Especialista Nebuloso". *XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Curitiba.
- Nogueira, L. P. P. et al., 2014. Will thermal power plants with CCS play a role in Brazil's future electric power generation?. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 24(1), pp. 115-123.
- Notícias Automotivas, 2015. *Notícias Automotivas*. Disponível em: <http://www.noticiasautomotivas.com.br/senado-engaveta-projetos-de-incentivos-aos-carros-eletricos/>. Acesso em Julho 2015.
- Oklahoma Gas and Electric Company, 2013. *Demand Response Defers Investment in New Power Plants in Oklahoma*, Oklahoma. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/files/OGE_CBS_case_study.pdf

Pacific Northwest National Laboratory, 2012. *Evaluation of Representative smart grid Investment Grant Project Technologies: Distributed Generation*, PNNL-20792, Springfield.

Pratt, R., Balducci, P., Gerkenmeyer, C. & Katipamula, S., 2010. *The smart grid: An Estimation of the Energy and CO₂ Benefits*, PNNL-19112, Springfield.

República Federativa do Brasil, 2015. *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*, Brasília.

Presidência da República, 2004. *Decreto N° 5.163*, Brasília.

Ribeiro, C. L., 2011. *Aspectos Institucionais para a Smart Grid no Brasil : Riscos, oportunidades e desafios regulatórios*, Universidade de Brasília, Brasília.

Richardson, D. B., 2012. "Electric Vehicles and the Electric Grid: A Review of Modeling Approaches, Impacts, and Renewable Energy Integration". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Issue 19, pp. 247-254, New York.

Satchwell, A. & Hledik, R., 2013. "Analytical Frameworks to Incorporate Demand Response in Long-term Resource Planning". *Utilities Policy Journal*, pp. 73–81, Chicago.

Schaeffer, R. & Soares, B. B., 2010. "Penetração de Veículos Elétricos e Híbridos Plug-in no Sistema Energético Brasileiro", *Oficina de Trabalho sobre Veículos Elétricos – BNDES*, Rio de Janeiro.

Schey, S., Scoffield, D. & Smart, J., 2012. *A First Look at the Impact of Electric Vehicle Charging on the Electric Grid in The EV Project*, Los Angeles. Disponível em: <https://inlindigitallibrary.inl.gov/sti/5394115.pdf>

Schmitt, W. F., 2010. *Metodologia de Avaliação de Eficiência Energética em Veículos*. Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Shao, S. & Pipattanasomporn, M., 2013. "Grid Integration of Electric Vehicles and Demand Response with Customer Choice", *Smart Grid, IEEE Transactions on Volume:3 , Issue:1*, pp. 543 - 550, Boston.

Siebert, L. C., 2014. *Gerenciamento da Demanda: Interação Entre a Concessionária e os Clientes*. Dissertação de Mestrado, Curitiba, Brasil.

Silva, R. M., 2015. *Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios*. 1 ed. Brasília, Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado.

Simon, E. C., 2013. *Avaliação dos Impactos da Recarga de Veículos Elétricos em Sistemas de Distribuição*. Dissertação de Mestrado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, Brasil.

Sousa, A. S., 2009. *Tomada de Decisão Fuzzy e Busca Tabu Aplicadas ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Carlos, São Carlos, Brasil.

Sousa, H. W. A., 2013. *Utilização de Programas de Reação da Demanda como Alternativa à Necessidade de Geração Termelétrica Complementar para Garantia do Suprimento de Energia Elétrica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

Souza, Z. F. d., 2010. *A Importância da Reação da Demanda na Formação dos Preços de Curto Prazo em Mercados de Energia Elétrica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, Brasil.

Swisher, J. N., Jannuzzi, G. d. M. & Redlinger, R. Y., 1997. *Tools and Methods for Integrated Resource Planning - Improving Energy Efficiency and Protecting the Environment*. 1 ed. Roskilde, UNEP.

The Brattle Group, 2012. "Time-Varying and Dynamic Rate Design", *Global Power Best Practice Series*, Boston.

The Electric Power Research Institute, Inc., 2009. *EPRI smart grid Demonstration Initiative*, Palo Alto.

The International Energy Agency, 2013. *World Energy Outlook 2013*, Paris. Disponível em: <http://www.worldenergyoutlook.org/weo2013/>. Acesso em Setembro 2015.

U. S. Department of Energy, 2015. *Energy Efficiency*. Disponível em: <http://www.energy.gov/science-innovation/energy-efficiency>. Acesso em Setembro 2015.

U.S. Department of Energy smart grid Investment Grant, 2010. *Rate Design Treatments in Consumer Behavior Study Designs*, Washington. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/files/cbs_guidance_doc_4_rate_design.pdf

U.S. Department of Energy, 2013. *Demand Response Defers Investment in New Power Plants in Oklahoma*, Oklahoma. Disponível em: https://www.smartgrid.gov/document/demand_response_defers_investment_new_power_plants_oklahoma.html

U.S. Department of Energy, 2014. *Evaluating Electric Vehicle Charging Impacts and Customer Charging Behaviors*, Washington. Disponível em: <http://energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/SGIG-EvaluatingEVcharging-Dec2014.pdf>

U.S. Energy Information Administration, 2015. *Annual Energy Outlook 2015 With Projections to 2040*. 1 ed. Washington.

Uchôa, J. Q., Panontim, S. M. & Nicoletti, M. d. C., 2012. *Elementos da Teoria de Evidência de Dempster-Shafer*, Universidade de São Carlos, São Carlos, Brasil.

Union of Concerned Scientists, 2012. *State of Charge - Electric Vehicles' Global Warming Emissions and Fuel-Cost Savings across the United States*, Cambridge.

Disponível em:

http://www.ucsusa.org/sites/default/files/legacy/assets/documents/clean_vehicles/electric-car-global-warming-emissions-report.pdf

Unsuhay-Vila, C., 2013. *Estudo e Previsão da Demanda de Energia Elétrica*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil.

Vaz, A., 2006. *Estudo da Funções de Pertinência Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos Fuzzy*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.

Velasco, M. M. B., 2010. *Lógica Fuzzy - Notas de Aula*, Rio de Janeiro.

Velloso, J. P. d. R., 2010. *Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil. 1 ed.* Rio de Janeiro, INAE.

Wills, W., 2013. *Modelagem dos Efeitos de Longo Prazo de Políticas de Mitigação de Emissão de Gases de Efeito Estufa na Economia do Brasil*. Dissertação de Mestrado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Wittmann, D., Bermann, C. & Wittmann, T. F., 2013. "Análise Crítica da Integração em Larga Escala de Veículos Elétricos no Brasil", *4º Integrating Cleaner Production Into Sustainability Strategies*, São Paulo.

World Meteorological Organization– WMM, 2015. *World Meteorological Organization – WMM*. Disponível em: https://www.wmo.int/pages/themes/weather/index_en.html. Acesso em Dezembro 2015.

Zadeh, L. A., 1965. "Fuzzy Sets". *Information and Control, Volume 8, Issue 3*, pp. 338-353, California.

Zilles, R., 2011. *Geração Distribuída e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Zimmermann, H.-J., 2001. *Fuzzy Set Theory — and Its Applications. 4 ed.*, New York .

ANEXO A - REGRAS *FUZZY*

A.1 - REGRAS – RESPOSTA DA DEMANDA

Sistema de Tarifação	Regulamentação & Incentivos	Tecnologia & Padrões	Projeto-Piloto	Impacto Demanda Máxima	Impacto Energia
Fraca	Fraca	Fraca	Pouco	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Fraca	Muito	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Médio	Pouco	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Médio	Muito	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Forte	Pouco	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Forte	Muito	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Fraca	Pouco	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Fraca	Muito	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Médio	Pouco	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Médio	Muito	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Forte	Pouco	Médio-Moderado	Fraco
Fraca	Forte	Forte	Muito	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Médio	Fraca	Fraca	Pouco	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Fraca	Muito	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Médio	Pouco	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Médio	Muito	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Forte	Pouco	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Forte	Muito	Fraco	Fraco
Médio	Forte	Fraca	Pouco	Médio-Moderado	Fraco
Médio	Forte	Fraca	Muito	Médio-Moderado	Fraco
Médio	Forte	Médio	Pouco	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Médio	Forte	Médio	Muito	Médio-Intenso	Médio-Moderado
Médio	Forte	Forte	Pouco	Médio-Intenso	Médio-Intenso
Médio	Forte	Forte	Muito	Forte	Médio-Intenso
Forte	Fraca	Fraca	Pouco	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Fraca	Muito	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Médio	Pouco	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Médio	Muito	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Forte	Pouco	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Forte	Muito	Médio-Moderado	Fraco
Forte	Forte	Fraca	Pouco	Médio-Moderado	Fraco
Forte	Forte	Fraca	Muito	Médio-Intenso	Médio-Moderado
Forte	Forte	Médio	Pouco	Médio-Intenso	Médio-Moderado
Forte	Forte	Médio	Muito	Forte	Médio-Intenso
Forte	Forte	Forte	Pouco	Forte	Médio-Intenso
Forte	Forte	Forte	Muito	Forte	Forte

A.2 - REGRAS – PEQUENA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Sistema de Tarifação	Tecnologias	Incentivos Governamentais	Impacto Demanda Máxima	Impacto Energia
Fraca	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Médio	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Forte	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Fraca	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Médio	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Forte	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Médio	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Médio	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Forte	Fraco	Médio-Moderado
Médio	Forte	Fraca	Fraco	Médio-Moderado
Médio	Forte	Médio	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Médio	Forte	Forte	Médio-Intenso	Médio-Intenso
Forte	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Médio	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Forte	Médio-Moderado	Médio-Intenso
Forte	Forte	Fraca	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Forte	Forte	Médio	Médio-Intenso	Médio-Intenso
Forte	Forte	Forte	Forte	Forte

A.3 - REGRAS – VEÍCULOS ELÉTRICOS

Sistema de Tarifação	Incentivos Governamentais	Tecnologias	Infraestrutura & Padronização	Impacto Demanda Máxima	Impacto Energia
Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Fraca	Média	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Fraca	Forte	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Médio	Fraca	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Médio	Média	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Fraca	Fraca	Médio	Forte	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Fraca	Fraca	Forte	Fraca	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Forte	Média	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Fraca	Fraca	Forte	Forte	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Fraca	Forte	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Fraca	Média	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Fraca	Forte	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Fraca	Forte	Médio	Fraca	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Fraca	Forte	Médio	Média	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Fraca	Forte	Médio	Forte	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Fraca	Forte	Forte	Fraca	Médio-Intenso	Médio-Intenso
Fraca	Forte	Forte	Média	Forte	Forte
Fraca	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte
Médio	Fraca	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Fraca	Média	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Fraca	Forte	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Médio	Fraca	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Médio	Média	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Médio	Forte	Fraco	Médio-Moderado
Médio	Fraca	Forte	Fraca	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Forte	Média	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Médio	Fraca	Forte	Forte	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Médio	Forte	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco

Sistema de Tarifação	Incentivos Governamentais	Tecnologias	Infraestrutura & Padronização	Impacto Demanda Máxima	Impacto Energia
Médio	Forte	Fraca	Média	Fraco	Fraco
Médio	Forte	Fraca	Forte	Fraco	Médio-Moderado
Médio	Forte	Médio	Fraca	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Médio	Forte	Médio	Média	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Médio	Forte	Médio	Forte	Médio-Moderado	Médio-Intenso
Médio	Forte	Forte	Fraca	Médio-Moderado	Médio-Intenso
Médio	Forte	Forte	Média	Médio-Intenso	Forte
Médio	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte
Forte	Fraca	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Fraca	Média	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Fraca	Forte	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Médio	Fraca	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Médio	Média	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Médio	Forte	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Forte	Fraca	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Forte	Média	Fraco	Médio-Moderado
Forte	Fraca	Forte	Forte	Fraco	Médio-Moderado
Forte	Forte	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Forte	Forte	Fraca	Média	Médio-Moderado	Fraco
Forte	Forte	Fraca	Forte	Médio-Moderado	Médio-Moderado
Forte	Forte	Médio	Fraca	Fraco	Fraco
Forte	Forte	Médio	Média	Fraco	Médio-Moderado
Forte	Forte	Médio	Forte	Médio-Moderado	Forte
Forte	Forte	Forte	Fraca	Médio-Moderado	Médio-Intenso
Forte	Forte	Forte	Média	Médio-Moderado	Forte
Forte	Forte	Forte	Forte	Médio-Intenso	Forte

A.4 - REGRAS – EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Sistema de Tarifação	Tecnologias	Incentivos Governamentais	Impacto Demanda Máxima	Impacto Energia
Fraca	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Médio	Fraco	Fraco
Fraca	Fraca	Forte	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Fraca	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Médio	Fraco	Fraco
Fraca	Forte	Forte	Fraco	Médio-Moderado
Médio	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Médio	Fraco	Fraco
Médio	Fraca	Forte	Fraco	Fraco
Médio	Forte	Fraca	Fraco	Médio-Moderado
Médio	Forte	Médio	Fraco	Médio-Moderado
Médio	Forte	Forte	Médio-Moderado	Médio-Intenso
Forte	Fraca	Fraca	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Médio	Fraco	Fraco
Forte	Fraca	Forte	Fraco	Médio-Intenso
Forte	Forte	Fraca	Médio-Moderado	Médio-Intenso
Forte	Forte	Médio	Médio-Intenso	Forte
Forte	Forte	Forte	Forte	Forte

ANEXO B – TABELA DE ESTUDOS – RESPOSTA DA DEMANDA

B.1 – IMPACTO NA DEMANDA MÁXIMA

Projeto	Tipo	Ano de Análise	Impacto na demanda máxima (%)
SCE Save Power Days - PTR	Projeto-Piloto	2012	1,7
Holanda - Previsão - SenterNovem	Previsão		2,5
Ontário - TOU Rates - Ontario Energy Board Smart Price Pilot	Projeto-Piloto	2007	3
FERC Staff Report - TOU	Projeto-Piloto	2013	3,71
Demand Bidding Program - Load Impacts - SG&E	Projeto-Piloto	2012	4,6
Ministério de Minas e Energia - MME	Previsão		5
Washington (Seattle Suburbs) - Puget Sound Energy – PSE – TOU	Projeto-Piloto	2001	5
Califórnia - Estados Unidos - Puget Sound Energy	Projeto-Piloto	2006	5
Ontário - TOU Rates - Hydro One	Projeto-Piloto	2007	5,7
Califórnia - CPP - 2011	Projeto-Piloto	2011	5,7
Critical Peak Pricing - TOU	Projeto-Piloto	2013	5,75
Califórnia - CPP - 2013	Projeto-Piloto	2013	5,8
Califórnia - CPP - 2011	Projeto-Piloto	2011	5,9
Igrid Project	Previsão		6
Coreia do Sul - Task Force	Previsão		6
FERC Staff Report - PTR	Projeto-Piloto	2013	6,1
SDGE - PTR	Projeto-Piloto	2012	6,2
Califórnia - CPP	Projeto-Piloto	2013	6,9
SDGE Peak Time Rebate - PTR	Projeto-Piloto	2013	7,2
Demand Bidding Program - Load Impacts -SCE	Projeto-Piloto	2012	8,1
Ontário - Hydro One	Projeto-Piloto	2008	8,5
FERC Staff Report - VPP	Projeto-Piloto	2013	8,6
Irlanda - CER	Projeto-Piloto	2011	8,8
Regulador inglês - MME	Previsão		10
Regulador português - MME	Previsão		10
Peak Load Impacts – 2050 - LA	Previsão		10
Irlanda do Norte - Ofgem	Projeto-Piloto	2006	10
Reino Unido - EDRP	Projeto-Piloto	2011	10
Relatório Internacional - Office of Markets, Tariffs and Rates	Projeto-Piloto	2001	11,4
Ontário - Energy Board Smart Price Pilot	Projeto-Piloto	2013	11,9

Projeto	Tipo	Ano de Análise	Impacto na demanda máxima (%)
AmerenUE - Critical Peak Pricing and TOU Pilot	Projeto-Piloto	2006	11,9
Anaheim - Critical Peak Pricing Experiment	Projeto-Piloto	2006	12
Brasil - Copel	Projeto-Piloto	1998	13,9
DOE	Previsão		15
Relatório - The Brattle Group	Projeto-Piloto	2015	15
Brasil - CPFL	Projeto-Piloto	1990	15,6
Compilação de estudos internacionais - 2011 - ESMIG	Projeto-Piloto	2011	16
PSE&G - Residential Pilot Program	Projeto-Piloto	2014	18
Brasil - Cemig	Projeto-Piloto	2001	18
PG&E - SmartRate Program	Projeto-Piloto	2012	19
FERC	Previsão		19
Michigan - Consumidores Residenciais	Projeto-Piloto	2012	19,4
EPRI	Projeto-Piloto	2009	19,5
Federal Energy Regulatory Commission - USA - A National Assessment Of Demand Response Potential	Previsão		20
Washington	Projeto-Piloto	2006	20
SDGE - Summer Saver	Projeto-Piloto	2013	20,8
PGE - Smart Rate	Projeto-Piloto	2012	21
PGE - SmartAC Presentation	Projeto-Piloto	2013	22
Connecticut - Dynamic Pricing in a Moderate Climate: The Evidence from Connecticut	Projeto-Piloto	2010	23,3
American Council for an Energy-Efficient Economy - ACEEE	Previsão		23,3
Time-of-use rates for rate-regulated utilities in Minnesota	Projeto-Piloto	2013	24
New South Wales - Australia	Projeto-Piloto	2014	24
Peak Load Impacts – 2050 - China	Previsão		24,5
Peak Load Impacts – 2050 - Pacífico	Previsão		25
SGIG	Previsão		25
SGIG Progress Report - 2013	Projeto-Piloto	2013	25
IESO - Ontário - Canadá	Projeto-Piloto	2013	25,4
New Jersey - GPU Pilot - TOU Price	Projeto-Piloto	1997	25,8
New Jersey - PSE&G Residential Pilot Program	Projeto-Piloto	2008	26
Califórnia - Statewide Pricing Pilot	Projeto-Piloto	2005	27,53
Washington - The Olympic Peninsula Project - Pacific Northwest GridWise	Projeto-Piloto	2007	29,7
Peak Load Impacts – 2050 - Europa	Previsão		30

Projeto	Tipo	Ano de Análise	Impacto na demanda máxima (%)
Cleveland - CBS - PTR Rate	Projeto-Piloto	2012	30
SGIG Progress Report - 2013	Projeto-Piloto	2013	30
PCDC - PowerCentsDC - CPP - CPR	Projeto-Piloto	2010	34
Minnesota - CPP	Projeto-Piloto	2013	37
Smart Grid Investment Grant - CPP - Progress Report - 2013	Projeto-Piloto	2013	37
Marblehead Municipal Light Department	Projeto-Piloto	2013	39,3
Time Varying Dynamic Rate Design - Relatório	Projeto-Piloto	2012	45
OG&E S - Smart Study	Projeto-Piloto	2011	49,09
California - CPP Rate Plan	Projeto-Piloto		51
Colorado- Xcel Energy TOU Pilot	Projeto-Piloto		54,22
ARCTURUS - Banco de Dados de Projetos-Pilotos	Projeto-Piloto		57

B.2 – IMPACTO EM ENERGIA

Projeto	Tipo	Ano de Análise	Impacto na energia (%)
Igrid Project	Previsão		0,2
Connecticut -Dynamic Pricing in a Moderate Climate: The Evidence from Connecticut	Projeto-Piloto	2010	0,2
American Council for an Energy-Efficient Economy - ACEEE	Previsão		0,4
Michigan - Consumidores Residenciais	Projeto-Piloto	2012	0,8
Ministério de Minas e Energia - MME	Previsão		1
SGIG	Previsão		1,7
Relatório - SEE Action	Projeto-Piloto	2014	2
Holanda - SenterNovem	Previsão		2
AmerenUE - Critical Peak Pricing and TOU Pilot	Projeto-Piloto	2006	2,43
American Council for an Energy-Efficient Economy - ACEEE	Previsão		2,5
Irlanda - CER	Projeto-Piloto	2006	2,5
Reino Unido - DECC	Projeto-Piloto	2011	2,8
Illinois- Energy Smart Pricing Plan	Projeto-Piloto	2006	3
Coreia do Sul - Task Force	Previsão		3
Irlanda do Norte - Ofgem	Previsão		3,5
Évora - Portugal	Projeto-Piloto	2012	3,9
American Council for an Energy-Efficient Economy - ACEEE	Previsão		4,2
Washington (Seattle Suburbs) - Puget Sound Energy – PSE – TOU	Projeto-Piloto	2001	5
Ontário - Energy Board Smart Price Pilot	Projeto-Piloto	2013	6
Alemanha - Kema	Projeto-Piloto	2009	6
American Council for an Energy-Efficient Economy - ACEEE	Previsão		6,3
New Jersey - GPU Pilot - TOU Price	Projeto-Piloto	1997	6,9
Ontário - TOU Rates	Projeto-Piloto	2013	7,4
Ontário - Hydro One	Projeto-Piloto	2008	7,6
Compilação de estudos internacionais - 2011 - ESMIG	Projeto-Piloto	2011	8,7
Guia - União Europeia	Previsão		10
Itália - JRC	Projeto-Piloto	2011	10
Noruega - Estudo	Projeto-Piloto	1989	10
Estados Unidos - EPRI	Previsão		12
Marblehead Municipal Light Department	Projeto-Piloto	2013	12,1

Projeto	Tipo	Ano de Análise	Impacto na energia (%)
Espanha - GAD	Projeto-Piloto	2011	15
University of Oxford - Environmental Change Institute	Previsão		15
Compilação de estudos internacionais - ACEEE	Projeto-Piloto	2012	19,5
Washington - The Olympic Peninsula Project - Pacific Northwest GridWise	Projeto-Piloto	2007	21
Missouri - Ameren UE Critical Peak Pricing Pilot	Projeto-Piloto	2006	23,5
Relatório Internacional - DOE - CPP	Projeto-Piloto	2012	24,2