

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MURILO LARROZA FONSECA

**FRAMEWORK PARA CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE
SISTEMAS DE GESTÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA
CONSUMIDORES DE BAIXA TENSÃO EM REDES
ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Porto Alegre

2011

MURILO LARROZA FONSECA

**FRAMEWORK PARA CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE
SISTEMAS DE GESTÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA
CONSUMIDORES DE BAIXA TENSÃO EM REDES
ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Controle e Automação

ORIENTADOR: Carlos Eduardo Pereira

CO-ORIENTADOR: Marcelo Götz

Porto Alegre

2011

MURILO LARROZA FONSECA

**FRAMEWORK PARA CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE
SISTEMAS DE GESTÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA
CONSUMIDORES DE BAIXA TENSÃO EM REDES
ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelos Orientadores e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Universidade de Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Co-Orientador: _____

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS.

Doutor pela Universidade de Paderborn – Paderborn, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João César Netto, UFRGS

Doutor pela Universidade Católica de Louvain – Louvain, Bélgica

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Prof. Dr. Walter Fetter Lages, UFRGS

Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos, Brasil

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, dezembro de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha futura esposa Andréa, por ter me incentivado a iniciar o mestrado.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por prover tudo o que é necessário.

À minha mãe, por todos os seus esforços que me permitiram uma vida com melhores oportunidades e pelo seu exemplo como pessoa e profissional, além de seu amor incondicional.

À Andréa, por sempre ter acreditado em mim e por estar sempre ao meu lado.

Ao meu pai e irmãos, pelos conselhos e convivência familiar, que permitiram que eu me tornasse uma pessoa melhor.

Ao professor Carlos Eduardo, por essa oportunidade e por partilhar parte de sua visão.

Ao professor Marcelo Götz, por estar sempre disponível a me ajudar, o que contribuiu significativamente com este trabalho.

Ao CNPq, pela provisão da bolsa de mestrado durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

Ao PPGEE, pela oportunidade de realização deste trabalho nesta área de pesquisa.

Ao Lucas e ao Victor, por terem fornecido o adaptador que permitiu a realização de alguns testes.

Aos colegas do LASCAR: Jovani, pela companhia e amizade no primeiro ano; Jean e Ivan, por estarem sempre disponíveis a ajudar e a conversar; Geison e Suenoni, pela companhia durante esse último ano.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas sugestões e críticas que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

RESUMO

As Redes Elétricas Inteligentes podem ser entendidas como o uso intensivo de tecnologias de informação e comunicação nas redes elétricas, permitindo um fluxo bidirecional de informações e eletricidade pela rede, de forma a obter uma infraestrutura capaz de automaticamente monitorar, proteger e otimizar a operação de seus elementos. A modernização da infraestrutura elétrica no sentido das Redes Elétricas Inteligentes é inevitável e trará profundas mudanças em todos os segmentos do sistema elétrico. Embora a tecnologia necessária para essa modernização já exista a um custo razoável, ainda restam várias questões que devem ser resolvidas. Indefinições em relação aos padrões a serem adotados, regulamentações, segurança, privacidade e vários aspectos tecnológicos dificultam uma implementação coerente, adiando essa modernização. Assim, este trabalho busca apresentar esse cenário em relação às Redes Elétricas Inteligentes, investigando as tendências e situação atual. Dentre essas tendências, há um grande interesse em definir e implementar mecanismos que incentivem uma maior conscientização dos consumidores em relação ao seu uso de energia, além de uma participação ativa dos mesmos no mercado de energia. Isso exigirá a utilização de ferramentas que possibilitem a redução de custos através do uso mais eficiente da energia. Assim, é também proposto um *framework* para a construção e análise dessas ferramentas que buscam auxiliar os consumidores nesse cenário em formação. O *framework* proposto foi construído utilizando uma abordagem por Sistemas Multiagentes e possibilita a construção, simulação e análise de diversos sistemas, em diferentes cenários, com variados tipos de equipamentos, tanto reais como virtuais, sob diferentes protocolos de comunicação e com a possibilidade de uso de diversos algoritmos para a operação conjunta dos equipamentos.

Palavras-chave: Rede Elétrica Inteligente, Gestão de Energia, Resposta à Demanda, Sistemas Multiagentes, Automação Residencial.

ABSTRACT

Smart Grids can be understood as the intensive use of information and communication technologies over the electricity networks, allowing a bidirectional flow of information and electricity through the network. It is a system that tries to optimize the supply and demand of energy through the integration of distributed generation and renewable energy resources, and through the active participation of consumers as well as an intense trade relationship between all the segments of the electricity sector. The modernization of the electrical infrastructure towards Smart Grids is inevitable and it will bring deep changes in all segments of the electrical system. Although the necessary technology for this modernization already exists at a reasonable cost, there are still several issues to be solved. Uncertainties regarding standards to be adopted, regulations, security, privacy and many technological aspects difficult a consistent implementation and, therefore, delay this modernization. Thus, this study aims to present the Smart Grid scenario, by the investigation of its current situation and tendencies. Among these tendencies, there is a great interest to define and implement mechanisms to encourage consumer to take care about their electrical energy use and to stimulate their active participation in the energy market. This will require tools that will help them to reduce costs through a more efficient use of energy. Therefore, this work proposes also a framework for the development and analysis of these tools that help consumers at this scenario under construction. The proposed framework is built using a Multiagent System approach which allows the construction, simulation and analysis of various systems in different scenarios. In addition, it allows the use of several types of equipments, both real and virtual, under different communication protocols and with the possible use of various algorithms for a joint operation of all Smart Grid equipments.

Keywords: Smart Grid, Energy Management, Demand Response, Multiagent Systems, Home Automation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contextualização.....	13
1.2 Motivação.....	16
1.3 Objetivos.....	17
1.4 Organização do Texto.....	18
2 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES.....	19
2.1 Conceituação.....	19
2.2 Características.....	21
2.3 Principais desafios.....	23
2.4 Principais segmentos das redes elétricas inteligentes.....	26
2.4.1 Infraestrutura avançada de medição.....	26
2.4.2 Resposta à demanda.....	30
2.4.3 Geração distribuída.....	35
2.4.4 Armazenamento de energia.....	40
2.4.5 Transportes elétricos.....	41
2.4.6 Informações situacionais de grandes áreas.....	42
2.4.7 Gestão da rede de distribuição.....	43
2.4.8 Segurança cibernética.....	43
2.5 Impactos nos segmentos do sistema elétrico.....	44
2.5.1 Consumidor.....	44
2.5.2 Distribuição	45
2.5.3 Transmissão	46
2.5.4 Geração e Armazenamento.....	46
2.5.5 Comercialização.....	47
2.5.6 Regulação.....	47
3 ESTADO ATUAL DE IMPLEMENTAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES.....	48
3.1 Estados Unidos da América.....	48
3.2 União Européia.....	52
3.2.1 Itália.....	55
3.2.2 Portugal.....	57
3.2.3 Espanha.....	59
3.2.4 França.....	60
3.3 Canadá.....	61
3.4 Austrália.....	63
3.5 Coréia do Sul.....	64
3.6 China.....	65
3.7 Brasil.....	65
3.7.1 ANEEL.....	66
3.7.2 Distribuidoras.....	75
3.7.3 Outras iniciativas.....	80
4 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE.....	82
4.1 Métodos para a tarifação de energia elétrica.....	82

4.2 Trabalhos relevantes.....	86
4.2.1 BEMI.....	86
4.2.2 ACme.....	90
4.2.3 PowerMatcher.....	91
4.2.4 MAHAS.....	96
4.2.5 Outros trabalhos.....	99
4.3 Discussão.....	102
5 PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO.....	104
5.1 Sistemas Multiagentes	105
5.2 Modelo Conceitual.....	114
5.2.1 Agente de Energia.....	117
5.2.2 Agente de Usuário.....	119
5.2.3 Agente de Descoberta.....	121
5.3 Implementação.....	122
5.3.1 JADE.....	123
5.3.2 Agente de Energia.....	128
5.3.3 Agente de Usuário.....	133
5.3.4 Agente de Descoberta.....	136
5.4 Discussão.....	139
6 VERIFICAÇÃO DA PROPOSTA.....	141
6.1.1 Interface de Usuário.....	141
6.2 Estudo de caso 1: operação de dispositivos reais	144
6.2.1 Adaptador.....	144
6.2.2 Construção de classes.....	145
6.2.3 Cenário de teste.....	146
6.2.4 Resultados do teste.....	147
6.2.5 Análise de resultados.....	150
6.3 Estudo de caso 2: operação de dispositivos virtuais	150
6.3.1 Interface de comunicação com equipamentos de configuração automática.....	150
6.3.2 Construção de um dispositivo virtual.....	154
6.3.3 Construção de classes.....	156
6.3.4 Cenário de teste.....	157
6.3.5 Resultados do teste.....	158
6.3.6 Análise de resultados.....	159
6.4 Estudo de caso 3: operação de dispositivos reais e virtuais	160
6.4.1 Construção de dispositivos virtuais.....	160
6.4.2 Construção de classes.....	161
6.4.3 Cenário de teste.....	161
6.4.4 Resultados.....	163
6.4.5 Análise de resultados.....	164
6.5 Discussão.....	165
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	167
7.1 Trabalhos futuros.....	169
REFERÊNCIAS.....	171

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - PERCENTUAL DE PERDAS COMERCIAIS.....	15
FIGURA 2 - REDE ELÉTRICA INTELIGENTE.....	16
FIGURA 3 - CONCEITO DE REDE ELÉTRICA INTELIGENTE.....	20
FIGURA 4 - ARQUITETURA PROVÁVEL DA AMI.....	28
FIGURA 5 - PERFIL DE CONSUMO MÉDIO.....	30
FIGURA 6 - PRINCÍPIO BÁSICO DE RESPOSTA À DEMANDA.....	31
FIGURA 7 - DIMINUIÇÃO DO PICO COM UM CUSTO DE ENERGIA VARIÁVEL.	33
FIGURA 8 - DIMINUIÇÃO DO PICO COM TARIFAS CPP.....	34
FIGURA 9 - DIMINUIÇÃO DO PICO COM TARIFAS CPP E COM USO DE TECNOLOGIA.....	34
FIGURA 10 - CONJUNTO DE RESIDÊNCIAS COM GERAÇÃO DE ENERGIA.....	36
FIGURA 11 - INVERSOR PARA CONEXÃO DIRETA À REDE DE ENERGIA.....	36
FIGURA 12 - CENTRAIS GERADORAS: MOURA EM PORTUGAL (42MWP) À ESQUERDA E TOLEDO NA ESPANHA (1MWP) À DIREITA.....	37
FIGURA 13 - PRODUÇÃO MUNDIAL DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	37
FIGURA 14 - EXEMPLO DE CENTRAL DE GERAÇÃO VIRTUAL.....	38
FIGURA 15 - EXEMPLO DE MICROREDE.....	39
FIGURA 16 - BATERIA NAS.....	41
FIGURA 17 - TENDÊNCIAS DO TRANSPORTE URBANO.....	42
FIGURA 18 - PROJEÇÃO DO MERCADO POR TECNOLOGIA.....	50
FIGURA 19 - MODELO CONCEITUAL DA REDE ELÉTRICA INTELIGENTE.....	51
FIGURA 20 - SISTEMA TELEGESTORE.....	56
FIGURA 21 - ARQUITETURA DO INOVGRID.....	58
FIGURA 22 - ARQUITETURA DO SISTEMA LINKY.....	60
FIGURA 23 - SOLUÇÃO DA HYDRO ONE.....	62
FIGURA 24 - GRUPOS DE CONSUMIDORES.....	69
FIGURA 25 - MODALIDADES DE TARIFAS PARA O GRUPO A.....	70
FIGURA 26 - DADOS MÉDIOS DE FORNECIMENTO EM DIAS ÚTEIS DE UMA DISTRIBUIDORA.....	71
FIGURA 27 - TARIFA BRANCA.....	72
FIGURA 28 - ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA CEMIG.....	77
FIGURA 29 - ARQUITETURA DO SISTEMA DA AES ELETROPAULO.....	78
FIGURA 30 - CENTRO DE INTELIGÊNCIA DE MEDIÇÃO.....	79
FIGURA 31 - POSSIBILIDADES DE TARIFAÇÃO.....	83
FIGURA 32 - EXEMPLO DE TARIFA IBR.....	83
FIGURA 33 - EXEMPLO DE TARIFA CPP.....	85
FIGURA 34 - EXEMPLO DE TARIFA RTP.....	86
FIGURA 35 - BEMI.....	87
FIGURA 36 - BEMI NA REDE ELÉTRICA INTELIGENTE.....	88
FIGURA 37 - SIMULAÇÃO BEMI.....	89
FIGURA 38 - (A) REDE ACME, (B) ACME NODE.....	90
FIGURA 39 - EXEMPLO DE FORMAÇÃO DO PREÇO DE EQUILÍBRIO.....	92

FIGURA 40 - POWERMATCHER.....	93
FIGURA 41 - TESTE DO POWERMATCHER.....	96
FIGURA 42 - MAHAS.....	97
FIGURA 43 - EXEMPLO DE PLANO DE CONSUMO.....	98
FIGURA 44 - MODELO CONCEITUAL: OPERAÇÃO.....	115
FIGURA 45 - MODELO CONCEITUAL: INSTANCIAMENTO.....	116
FIGURA 46 - ARQUITETURA DO AGENTE DE ENERGIA.....	118
FIGURA 47 - ARQUITETURA DO AGENTE DE USUÁRIO.....	120
FIGURA 48 - ARQUITETURA DO AGENTE DE DESCOBERTA.....	122
FIGURA 49 - RELAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS ELEMENTOS DA ARQUITETURA DO JADE.....	125
FIGURA 50 - DIAGRAMA DE CLASSES DO AGENTE DE ENERGIA.....	129
FIGURA 51 - DIAGRAMA DE CLASSES DO AGENTE DE USUÁRIO.....	133
FIGURA 52 - DIAGRAMA DE CLASSES DO AGENTE DE DESCOBERTA.....	137
FIGURA 53 - INTERFACE DESENVOLVIDA.....	142
FIGURA 54 - FORMAS DE INTERAÇÃO.....	143
FIGURA 55 - ADAPTADOR: (A) VISTA FRONTAL. (B) VISTA LATERAL.....	144
FIGURA 56 - CENÁRIO DE TESTE.....	147
FIGURA 57 - POTÊNCIA REQUERIDA POR UM COMPUTADOR.....	148
FIGURA 58 - ENERGIA CONSUMIDA POR UM COMPUTADOR.....	148
FIGURA 59 - POTÊNCIA REQUERIDA EM TESTE DE CONTROLE.....	149
FIGURA 60 - ENERGIA CONSUMIDA EM TESTE DE CONTROLE.....	149
FIGURA 61 - VERIFICAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPOSITIVO.....	156
FIGURA 62 - CENÁRIO DE TESTE.....	158
FIGURA 63 - POTÊNCIA REQUERIDA PELO EQUIPAMENTO VIRTUAL.....	158
FIGURA 64 - ENERGIA CONSUMIDA PELO EQUIPAMENTO VIRTUAL.....	159
FIGURA 65 - TARIFA TOU UTILIZADA.....	160
FIGURA 66 - ESTUDO DE CASO.....	162
FIGURA 67 - AGENDAMENTO DE OPERAÇÃO.....	163
FIGURA 68 - OPERAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	163
FIGURA 69 - POTÊNCIA DO EQUIPAMENTO REAL.....	164

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TARIFAS POR DISTRIBUIDORA.....	54
--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS

AMI: *Advanced Metering Infrastructure*

BT: Baixa Tensão

CC: Controladores de Cargas

CF: Controladores de Fontes

CGMR: Centro de Gerenciamento da Microrede

CPP: *Critical Peak Pricing*

DCR: Dispositivo de Conexão/Reconexão

DLC: *Distribution Line Carrier*

IBR : *Inclining Block Rate*

MME: Ministério de Minas e Energia

MT: Média Tensão

NIST: *National Institute of Standards and Technology*

PLC: *Power Line Communication*

PSTN: *Public Switched Telephone Network*

PTR: *Peak Time Rebate*

RTP: *Real Time Pricing*

SCA: Software de Controle do Adaptador

SMA: Sistema Multiagente

TOU: *Time Of Use*

VPP: *Variable Peak Pricing*

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As Tecnologias da Informação e da Comunicação estão cada vez mais presentes no cotidiano de cada ser humano, influenciando a forma como cada um se organiza, trabalha, se diverte e pensa. De simples instrumentos, passaram à mediadores entre a informação e as capacidades e necessidades de indivíduos e organizações, criando uma sociedade e uma economia em que a informação é um elemento central de toda a atividade humana (RIBEIRO; GOUVEIA; RURATO, 2003).

Ironicamente, toda essa estrutura moderna criada pelas Tecnologias da Informação e da Comunicação depende de uma estrutura elétrica que utiliza os mesmos conceitos há mais de 120 anos, quando foi criada, sendo ineficiente e muito vulnerável a falhas (PERRY, 2009).

Na maioria dos países, a geração de eletricidade ocorre apenas em grandes quantidades, em locais próximos às fontes de energia primárias e distantes dos centros de consumo, sendo necessário longas linhas de transmissão e diversos dispositivos para que a eletricidade chegue até os consumidores com a qualidade adequada.

Ainda, a medição do consumo ocorre por medidores eletromecânicos que são verificados mensalmente de forma manual. Falhas no fornecimento de energia somente são detectadas quando consumidores telefonam para as concessionárias, que enviam seus técnicos ao campo sem um conhecimento prévio do problema, aumentando o tempo para a resolução do mesmo.

Assim, as interrupções de fornecimento de energia são frequentes. Por exemplo, logo no início de 2011, ocorreu a interrupção do fornecimento de energia elétrica em oito estados do Nordeste devido a falha no sistema de controle e proteção do circuito eletrônico de uma subestação (NOTÍCIAS R7, 2011b), enquanto que em São Paulo 2,5 milhões de pessoas

ficaram sem energia elétrica devido a falha em um único transformador (NOTÍCIAS R7, 2011a).

Além disso, estima-se que no Brasil as perdas totais na rede de distribuição de energia, calculadas através da diferença entre a energia adquirida pelas distribuidoras e a efetivamente fornecida aos consumidores, representam em média 15% da energia adquirida pelas distribuidoras para o atendimento do seu mercado consumidor. Essas perdas abrangem as perdas técnicas, que são aquelas inerentes à transmissão da energia, já que pelas leis da física, parte da energia transmitida é inevitavelmente dissipada como calor e as perdas não técnicas, também chamadas de perdas comerciais, advindas de ligações clandestinas, fraudes nos medidores, inadimplências e erros nos processos de faturamento das distribuidoras. Estima-se que as perdas não técnicas geram um ônus anual de aproximadamente R\$ 5 bilhões (ARAUJO, 2007).

Nota-se ainda, que as perdas não técnicas variam significativamente de distribuidora para distribuidora (Figura 1), devido à diferenças na complexidade social (nível de pobreza, desigualdade social, escolaridade, grau de violência, nível de urbanização) de seus mercados, sendo que em algumas distribuidoras chegam a quase 30% da energia fornecida (INSTITUTO ACENDE BRASIL, 2010).

Nos países desenvolvidos a situação não é tão diferente, embora não possuam problemas de perdas não técnicas relevantes, ainda possuem problemas com blecautes de grandes proporções, que evidenciam que o sistema elétrico atual é intrinsecamente vulnerável a esse tipo de falha, o que é inaceitável em uma sociedade altamente dependente da continuidade e qualidade do suprimento de energia elétrica (POURBEIK; KUNDUR; TAYLOR, 2006). Há ainda um grande crescimento de demanda de energia elétrica e uma forte dependência de fontes geradoras que poluem ou trazem riscos ao meio ambiente e a sociedade.

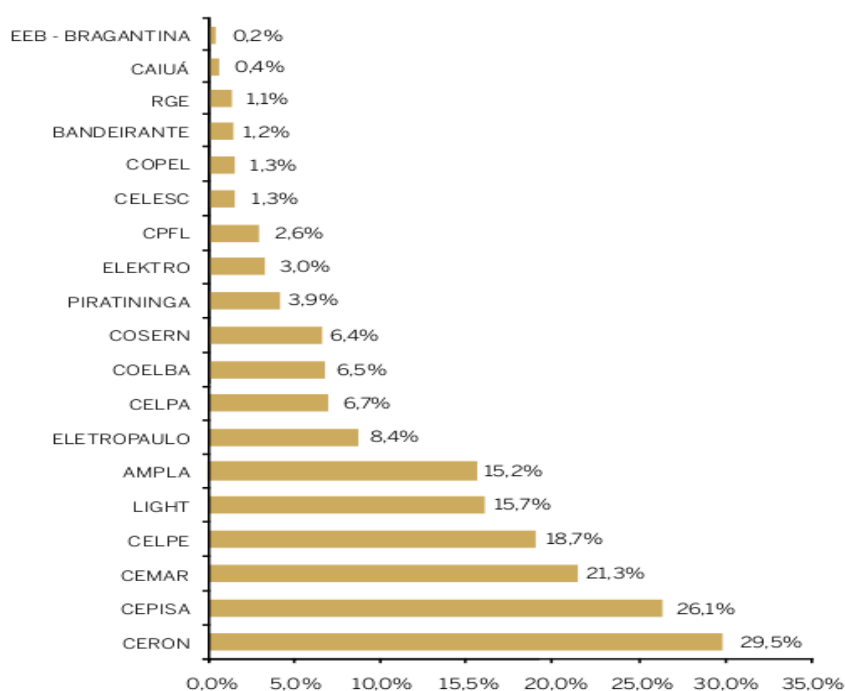


Figura 1 - Percentual de perdas comerciais.

Fonte: Instituto Acende Brasil (2010).

Ao longo dos anos, os sistemas de energia elétrica cresceram e evoluíram tecnologicamente, contudo, há cada vez mais dificuldades para esse tipo de crescimento baseado em grandes infraestruturas, ficando claro que é preciso uma completa reestruturação do setor elétrico e da forma como a sociedade lida com a energia.

Essa reestruturação é fundamental para o aumento da eficiência energética, para a transição para fontes de energia renováveis, para a redução de emissões de gases de efeito estufa e para construir uma economia sustentável, que torne possível a prosperidade de gerações futuras.

As tecnologias atuais permitem que essa reestruturação ocorra, levando a criação de uma rede de energia moderna, que melhore diversos fatores da rede de energia atual, aumentando sua eficiência, segurança e confiabilidade, além de permitir a integração em larga escala de fontes de energia distribuídas e renováveis, bem como a introdução de carros elétricos e diversas outras tecnologias e conceitos. Essa rede é denominada Rede Elétrica

Inteligente (Figura 2). Essa rede também é geralmente denominada de Rede Inteligente, do inglês *Smart Grid*, mas essa denominação pode abranger outros conceitos, não necessariamente a rede elétrica e por isso, nesse trabalho, será usado a denominação Rede Elétrica Inteligente.

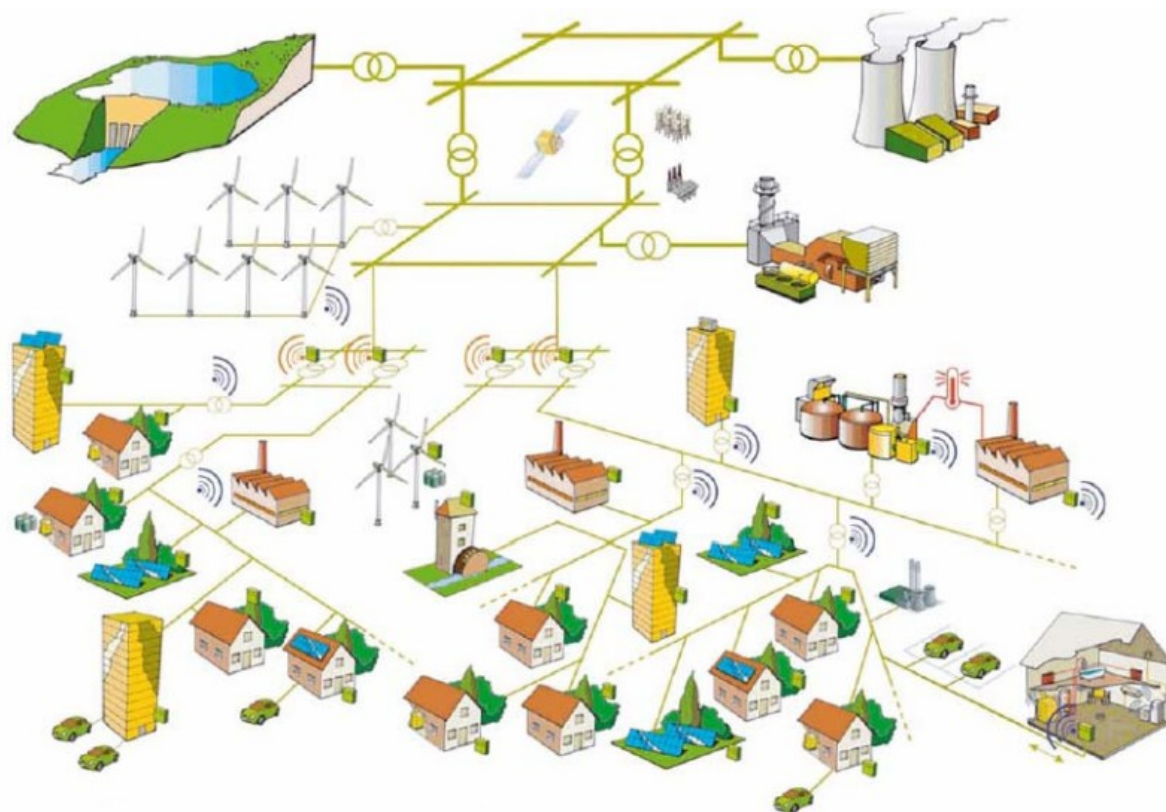


Figura 2 - Rede Elétrica Inteligente.

Fonte: Schomberg (2010).

1.2 MOTIVAÇÃO

Ao longo dos anos, os sistemas de energia elétrica deixaram de incorporar vários avanços tecnológicos que poderiam proporcionar uma maior confiabilidade e qualidade de suprimento e embora a tecnologia necessária para essa modernização já exista a um custo razoável, ainda restam várias questões que devem ser resolvidas.

Indefinições em relação aos padrões a serem adotados, regulamentações, segurança, privacidade e vários aspectos tecnológicos dificultam uma implementação coerente, adiando essa modernização.

Devido a esse cenário complexo, é necessário desenvolver pesquisas na área de energia que contribuam com propostas e discussões de soluções, que permitam a implementação mais econômica de sistemas elétricos, o aprofundamento dos sistemas de controle e de informação em sistemas elétricos, que produzam protótipos e sistemas para aplicações reais, que proponham padrões de comunicação, sistemas de informação, equipamentos, métodos e procedimentos.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho busca apresentar esse cenário em relação às Redes Elétricas Inteligentes, investigando as tendências e situação atual. Dentre essas tendências, há um grande interesse em definir e implementar mecanismos que incentivem uma maior conscientização dos consumidores em relação ao seu uso de energia, além de uma participação ativa dos mesmos no mercado de energia. Isso exigirá a utilização de ferramentas que possibilitem a redução de custos através do uso mais eficiente da energia.

Assim, é também proposto um *framework* para a construção e análise dessas ferramentas que buscam auxiliar os consumidores nesse cenário em formação. O *framework* proposto foi construído utilizando uma abordagem por Sistemas Multiagentes, devido ao fato dessa abordagem ter um grande potencial de uso nas Redes Elétricas Inteligentes, por buscar solucionar problemas com características similares aos que precisam ser resolvidos nessa rede. Dessa forma, o *framework* incorpora as características desses sistemas, sendo compatível com a tendência de utilização de Sistemas Multiagentes nas Redes Elétricas Inteligentes e até certo ponto, flexível para construção, simulação e avaliação de sistemas que utilizem outras abordagens.

Dentre as funcionalidades a serem disponibilizadas pelo *framework*, destacam-se: (i) a especificação de uma arquitetura genérica, que possa ser reusada em diferentes cenários; (ii) a

facilidade de criação de sistemas reais e de simuladores de sistemas virtuais, reais e mistos; (iii) a possibilidade de reutilização de projetos, otimizando o tempo de desenvolvimento de novas aplicações; (iv) a facilidade de integração de diferentes padrões para a comunicação com equipamentos; (v) a possibilidade de uso de diferentes algoritmos para a operação de equipamentos de forma individual e em conjunto.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Para um melhor entendimento dos leitores, o capítulo 2 apresenta os conceitos em relação à Rede Elétrica Inteligente, enquanto que o capítulo 3 apresenta o estado atual dessa modernização em diversos países. O capítulo 4 apresenta o estado da arte de sistemas que buscam auxiliar os consumidores nesse cenário em formação. O capítulo 5 apresenta a proposta da dissertação, abrangendo tanto o conceito como a implementação. O capítulo 6 apresenta alguns estudos de casos que utilizam os conceitos e implementações definidas no capítulo anterior. Por fim, são expostas as conclusões e os direcionamentos para a elaboração de trabalhos futuros que poderão ser realizados a partir dessa dissertação.

2 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Este capítulo tem por objetivo apresentar os principais conceitos em relação às Redes Elétricas Inteligentes.

2.1 CONCEITUAÇÃO

As Redes Elétricas Inteligentes podem ser entendidas como o uso intensivo de tecnologias de informação e comunicação nas redes elétricas existentes, permitindo um fluxo bidirecional de informações e eletricidade por essas redes, de forma a obter uma infraestrutura capaz de automaticamente monitorar, proteger e otimizar a operação de seus elementos.

A Rede Elétrica Inteligente pode ser considerada como uma forma de intensificação do controle nos elementos do sistema elétrico, com a finalidade de maximizar os benefícios esperados pelo consumidor, em que o conceito de rede contempla os elementos, as inter-relações e as regras, enquanto que o conceito de inteligência contempla as informações, referências, decisões e ações (MARTINI, 2010).

O termo Rede Elétrica Inteligente deve ser entendido mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico. Ela carrega a idéia da utilização intensiva de tecnologia de informação e comunicação na rede elétrica, através da possibilidade de comunicação do estado dos diversos componentes da rede, o que permitirá a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais eficiente que as atualmente em uso (FALCÃO, 2009).

A expressão Rede Elétrica Inteligente pode ser entendida como a sobreposição dos sistemas unificados de comunicação e controle, à infra-estrutura de energia elétrica existente, para prover a informação correta para a entidade correta (equipamentos de uso final, sistemas de controle de transmissão e distribuição, consumidores, etc.), no instante correto, para tomar a decisão correta. É um sistema que otimiza o suprimento de energia, minimizando perdas de

várias naturezas, é auto-recuperável, e possibilita o surgimento de uma nova geração de aplicações energeticamente eficientes (EPRI, 2008) (Figura 3).

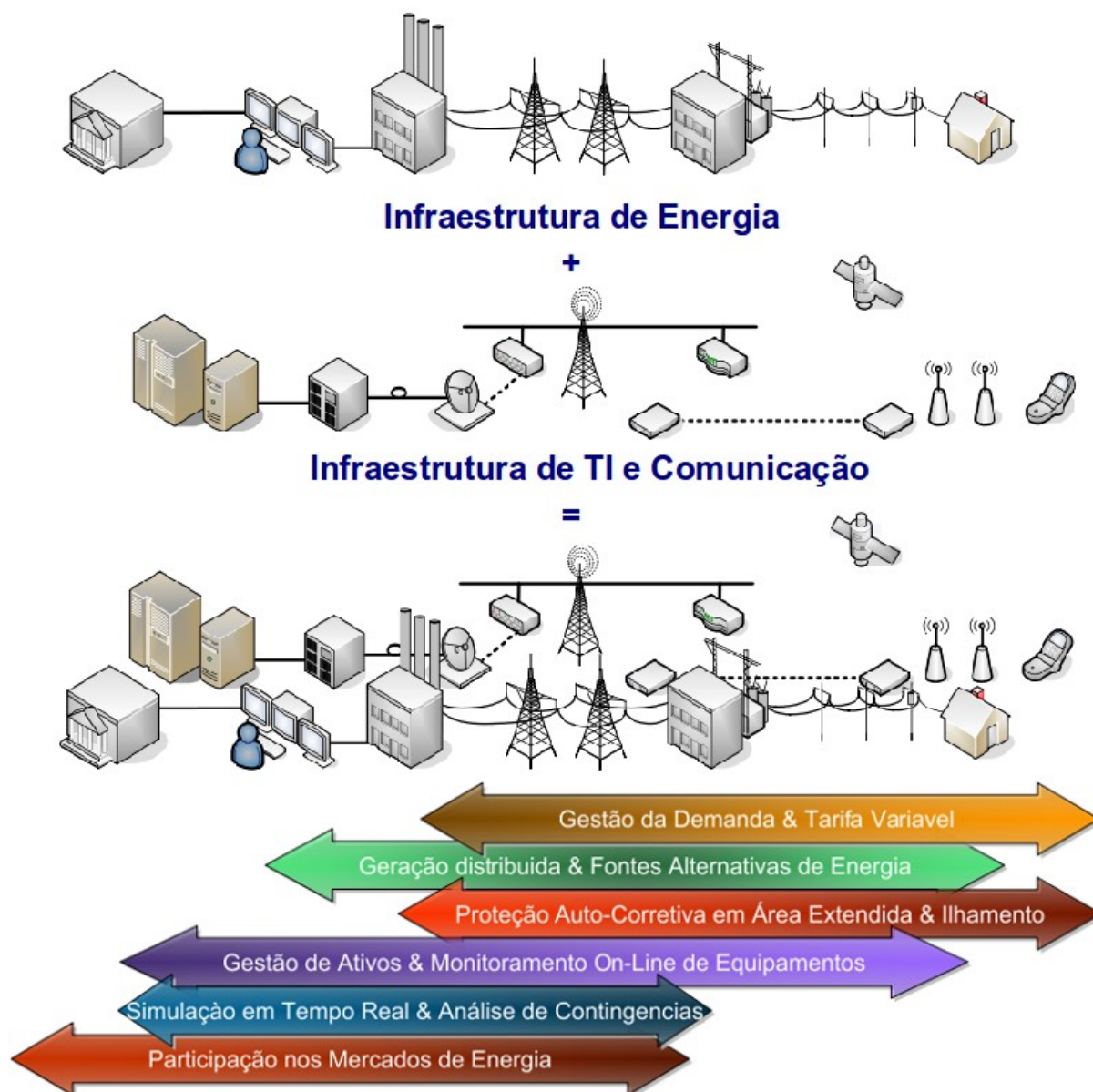


Figura 3 - Conceito de Rede Elétrica Inteligente.

Fonte: Mossé (2009).

O termo Rede Elétrica Inteligente abrange uma melhoria da rede elétrica para acomodar os desafios imediatos do futuro a curto prazo e fornece uma visão para um sistema de energia do futuro a longo prazo. O foco principal está no aumento da observabilidade e controlabilidade da rede elétrica, incluindo todos os seus elementos (IEC, 2010).

Esse conceito abrange a modernização do setor de energia (de forma a garantir uma infraestrutura elétrica confiável, segura, capaz de atender ao crescimento futuro da demanda por energia) e o cumprimento de cada um dos seguintes objetivos, que juntos caracterizam a Rede Elétrica Inteligente (US CONGRESS, 2011):

- aumentar o uso de informações digitais e tecnologias de controle, buscando melhorar a confiabilidade, segurança e eficiência das redes elétricas;
- permitir a otimização dinâmica de operações e recursos da rede com total segurança;
- implantar e integrar recursos distribuídos, incluindo os de geração de energia, aumentando o uso de energias renováveis;
- desenvolver e incorporar tecnologias de resposta à demanda e de eficiência energética;
- implantar tecnologias para a medição e comunicação em relação às operações e estado da rede, que otimizem as operações de aplicações e dispositivos;
- integração entre aparelhos inteligentes (*Smart Appliances*) e dispositivos atuais;
- implantação e integração de tecnologias de armazenamento de energia e de diminuição de picos de consumo, incluindo veículos híbridos e elétricos e tecnologias de armazenamento de energia;
- fornecimento de informações atualizadas e opções de controle aos consumidores;
- desenvolvimento de padrões para a comunicação e interoperabilidade de equipamentos conectados à rede;
- identificação e redução de barreiras excessivas e desnecessárias para a adoção de tecnologias, práticas e serviços em função das Redes Elétricas Inteligentes.

2.2 CARACTERÍSTICAS

Uma rede elétrica inteligente difere de uma rede elétrica comum devido as seguintes características (EPRI, 2009):

- Participação ativa de consumidores: os consumidores têm acesso a um número maior de informações, escolhas, incentivos e restrições, o que permite uma modificação da forma como usam e compram eletricidade, tendo um impacto direto nos processos de planejamento e operação da rede.
- Grande variedade de alternativas de geração e armazenamento de energia: várias fontes de energia de diferentes dimensões e tecnologias podem operar simultaneamente na rede de forma transparente.
- Mercado de energia altamente competitivo: há várias formas de comercialização de energia, voltadas ao consumidor final, que fazem o sistema progredir para um cenário de pregões contínuos. Um novo modelo de precificação de energia, composto por uma série de informações (quantidade de eletricidade fornecida, instante de início e fim de fornecimento, máximo de eletricidade que pode ser consumida por instante, preço por unidade de energia fornecida) é utilizado. Diferentes e inúmeras empresas concorrem nesse mercado, provendo diferentes tipos de serviços e fornecendo diversos dispositivos, que auxiliam os consumidores em suas escolhas em relação ao uso de eletricidade de forma eficiente e econômica.
- A energia é fornecida com a qualidade necessária para a sociedade digital: o fornecimento é confiável, com o mínimo de interrupções.
- Operação de forma eficiente: há uma grande utilização de recursos com baixo impacto ambiental. Os elementos da rede operam de forma integrada, buscando a maximização da eficiência operacional e redução de custos.
- Grande tolerância a ataques externos e desastres naturais: a rede resiste à ataques tanto na estrutura física como na cibernética. Sistemas de monitoramento alertam quando ameaças são detectadas e tecnologias de auto-teste são utilizadas para mitigar esses possíveis problemas.

- Antecipação e auto-recuperação em relação à falhas: há a capacidade automática de detectar, analisar, responder e restaurar falhas da rede. Os problemas podem ser isolados para análise e restauração com o mínimo ou mesmo sem intervenção humana. Há um monitoramento contínuo para antecipar problemas e permitir uma correção preventiva.

2.3 PRINCIPAIS DESAFIOS

As Redes Elétricas Inteligentes representam a mudança do paradigma que o setor de energia utilizou durante todo o seu desenvolvimento. Isso causará uma completa reestruturação do setor e da forma como a sociedade lida com a energia. Os principais desafios dessa modernização são (EPRI, 2009):

- Há um grande número de atores: essa modernização irá afetar cada pessoa e cada negócio existente, sendo que deverá haver um grande esforço para entender e listar as necessidades de todos e criar um sistema compatível com os interesses de cada nação.
- A rede é extremamente complexa: haverá diversos tipos de equipamentos e sistemas. Alguns necessitarão interagir com pessoas, enquanto que outros deverão responder automaticamente. Haverá pressões tanto de ordem financeira quanto ambientais.
- Processo de transição lento: é impossível que todos os equipamentos e sistemas sejam substituídos em um mesmo momento. Equipamentos de diferentes tecnologias deverão coexistir, incluindo equipamentos do passado, do presente e do futuro. Há um grande risco que esse processo gere desperdícios e que em alguns momentos declínios de confiabilidade, segurança e desempenho. Os vários sistemas possuem arquiteturas próprias, heterogêneas e que devem mudar à medida que a tecnologia evolui, gerando novos negócios e interações. Haverá uma constante integração de novas tecnologias e

modelos de negócios à infraestrutura da rede, sendo necessário que os sistemas interajam usando o mínimo de informações mútuas possíveis.

- Necessidade de garantias de segurança: cada aspecto da rede deve ser seguro. Procedimentos deverão ser definidos, além de questões em relação à privacidade de consumidores. Isso leva tempo para garantir que foi feito corretamente.
- Dificuldades para um consenso em relação aos padrões: padrões são definidos de acordo com o interesse de vários atores, uns mais influentes que os outros, que devem chegar a um consenso. Isso é demorado e os padrões devem ser substituídos ao longo da evolução do sistema.
- Desenvolvimento e suporte aos padrões: será necessário desenvolver novos padrões, sendo um trabalho demorado e desafiador, que deverá envolver a experiência e visão de um grande número de pessoas, para gerar resultados que atendam a necessidades mais amplas e variadas.
- Pesquisa e desenvolvimento: a Rede Elétrica Inteligente é um conceito em evolução, não sendo possível definir tudo o que é exatamente e o que poderá fazer. Exige constantes pesquisas para avaliar a evolução de benefícios e custos, além de antecipar e as necessidades em evolução e propor soluções.
- Regulamentação: regulamentações devem orientar de forma coordenada a evolução durante o período de transição. Para obter uma modernização nacional, governos devem coordenar todo o processo, buscando interagir com toda sociedade.
- Equipamentos Inteligentes: equipamentos devem ser robustos para lidar com futuras aplicações e operarem por muitos anos sem serem substituídos.
- Sistemas de comunicação: meios e protocolos de comunicação estão em diferentes estágios de maturidade. A rede deve ser robusta para acomodar novos meios a medida que eles emergem e ainda preservar a interoperabilidade e segurança de seus sistemas.

- Gestão de dados: abrange todos os aspectos de coleta, análise, armazenamento e fornecimento de dados para usuários e aplicações, incluindo questões de identificação de dados, validação, precisão, atualização, correlação temporal, consistência entre banco de dados. Novos modelos de dados e técnicas deverão ser criadas e aplicadas, a fim de lidar com a sincronização e reconciliação requerida entre diferentes bases de dados. O gerenciamento de dados é uma das tarefas mais difíceis para serem resolvidas pois deverá permitir a escalabilidade para um tamanho imenso de informações.
- Segurança cibernética: questões em relação à prevenção de danos, o uso não autorizado, a exploração e a restauração de informações eletrônicas e sistemas de comunicação e serviços para garantir confidencialidade, integridade e disponibilidade.
- Privacidade de dados e informações: a integridade precisa ser garantida ao longo da comunicação entre diferentes sistemas. Deve-se levar em consideração que diferentes atores terão permissões diferentes de acesso.
- Aplicações de software: os requisitos de aplicações estão ficando cada vez mais sofisticados devido à necessidade de resolver problemas complexos crescentes. Isso demanda dados mais precisos e relacionados com o tempo, de forma que resultados devem ser entregues mais rapidamente e precisamente. Aplicações de software são o núcleo de cada funcionalidade e nó das Redes Elétricas Inteligentes e abrangem desde algoritmos de controle de baixo nível até processos de transações em massa.

Embora o destino final dessa modernização não seja conhecido, muito do que é necessário ainda deve ser feito. O esforço nesse sentido é sem precedentes em alcance e amplitude e vai demandar níveis de cooperação sem precedentes para ser alcançado (MARTINI, 2010).

2.4 PRINCIPAIS SEGMENTOS DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

2.4.1 INFRAESTRUTURA AVANÇADA DE MEDIÇÃO

A infraestrutura avançada de medição, do inglês *Advanced Metering Infrastructure* (AMI), é o meio principal para que as distribuidoras interajam com os medidores de energia instalados nos consumidores. Ela inclui uma coleção completa e integrada de dispositivos, redes, sistemas de computadores, protocolos e processos organizacionais dedicados à distribuição de informações altamente precisas sobre eletricidade, gás, aquecimento e água para distribuidoras e para consumidores.

É constituída de *hardware* e *software* de comunicação e gerenciamento de dados, que criam uma rede bidirecional entre medidores e sistemas de negócios, permitindo a coleta e distribuição de informações a todas as partes interessadas.

É, portanto, um conceito amplo, que não deve ser confundido com conceitos mais restritos:

- *Automated Metering Reading* (AMR): sistema em que o medidor digital possui a capacidade de medição e registro dos consumos, além de comunicação remota (unidirecional) com o sistema de telemedição. Esse conceito foi lançado na década de 80 com foco em aperfeiçoar o processo de geração de fatura e economia de custos com os leituristas.
- *Automated Meter Management* (AMM): sistema para a gestão de grupos de medidores, em que cada medidor permite a comunicação bidirecional com o sistema de telemedição, tornando possível, de forma remota, a alteração de parâmetros, suspensão e religação do fornecimento.

- *Automated Meter Management with Multi-Utility* (AMM + MU): sistema com características do AMM e com integração com medidores de outros tipos de serviços (e.g., água, gás).

A AMI é considerada por muitos como a base fundamental das Redes Elétricas Inteligentes (NETL, 2008), pois: (i) provê o elo fundamental entre a rede e os consumidores, permitindo a participação dos mesmos de uma forma ativa; (ii) permite a monitoração e controle de opções de geração e armazenamento de energia dos consumidores; (iii) propicia um ambiente para as novas práticas do mercado, desde a gestão de cargas por contratos até os diferentes tipos de comercialização de energia; (iv) integra medidores com capacidade de monitoração de qualidade da energia, possibilitando detecção, diagnóstico e resolução de problemas mais rapidamente; (v) habilita um modelo de operação distribuído; (vi) torna possível a implementação de mecanismos de auto-recuperação para os elementos da rede; (vii) provê dados necessários a melhoria de manutenção e operações da rede.

A AMI será composta de tecnologias complementares que deverão coexistir com o sistema atual e permitir a inclusão de tecnologias futuras. Com base em implementações e projetos pilotos, a Figura 4 apresenta a arquitetura provável da AMI.

Está claro que a AMI utilizará diversos padrões de comunicação, sendo que as diferentes relações entre seus elementos, que definirão os tipos de padrões aplicáveis, são demonstrados na Figura 4 como interfaces de I1 até I6. Dentro das casas inteligentes (*Smart homes*) existirá um dispositivo central de AMI, que na Figura 4 é apresentado como o medidor de eletricidade, mas pode ser também um *gateway* residencial/coletor de dados. Esse dispositivo central poderá se comunicar com o sistema central da distribuidora diretamente através de I2, ou através de um concentrador de dados por I1, que agrega as informações de várias residências e as comunica ao sistema central da distribuidora através de I2', assim como recebe informações desse sistema e as envia para as casas inteligentes.

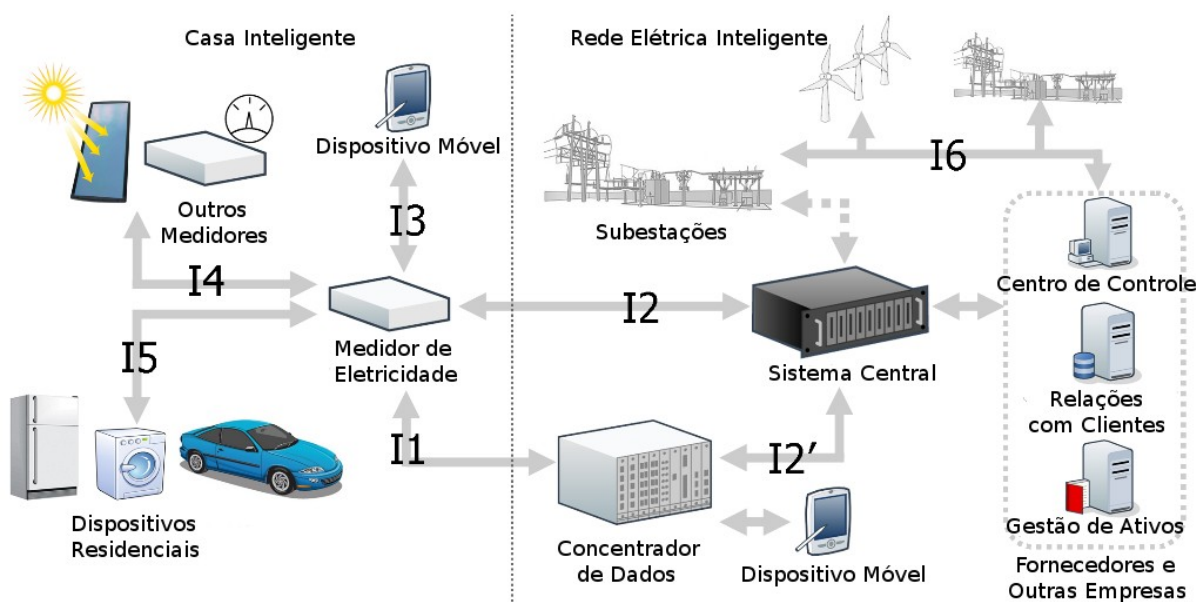


Figura 4 - Arquitetura provável da AMI.

Fonte: Adaptado de De Craemer e Deconinck (2010).

Em ambientes suburbanos, quando o transformador atende poucas casas, torna-se dispendioso a instalação de concentradores (que devem ser instalados juntos ao transformador), sendo mais vantajoso a comunicação dos medidores diretamente com a distribuidora. Nesse cenário também surgem soluções para a ligação de medidores por uma rede *mesh* por rádio frequência, sendo que alguns medidores fazem o papel de concentrador e se comunicam diretamente com a distribuidora.

Há possibilidade de comunicação com dispositivos móveis através de I3, tanto com o dispositivo central como com o concentrador. Essa possibilidade visa facilitar a instalação, configuração, manutenção de dispositivos e possivelmente inspeções contra fraudes.

Outros medidores (água, gás, calor) deverão se comunicar com esse dispositivo central através da interface I4. Algumas soluções apresentam a possibilidade de ter medidores de consumo/geração separados e se comunicando por I4, outras soluções apresentam esses medidores integrados. O dispositivo central ainda deverá se comunicar com outros dispositivos residenciais para automação residencial através de I5. Isso permitirá resposta a demanda e agendamento de carga. Possivelmente será através dessa interface que o usuário

visualizará informações da rede, através de equipamentos de visualização, como, por exemplo, um *display* portátil ou uma televisão digital.

O sistema central da distribuidora se comunica com empresas de distribuição e geração através da interface I6, podendo ainda disponibilizar seus dados também para empresas prestadoras de serviços do mercado de energia.

Para as várias interfaces apresentadas, diferentes padrões de comunicação são possíveis, de forma que as soluções para AMI irão diferir em cada nação, muito provavelmente em cada distribuidora e, em algumas situações, até mesmo dentro da mesma distribuidora em que uma solução híbrida será a mais provável.

Percebe-se ainda que há uma tendência para a implementação de protocolos públicos, que surge de órgãos reguladores, de concessionárias e de integradores. Muitas empresas que lançaram soluções privadas, como a ENEL (sistema *Telegestore*) e a Echelon-NES (sistema *Open Smart Grid Protocol* (OSGP)) já anunciaram que tornarão seus protocolos públicos.

Algumas distribuidoras sugerem que a comunicação seja constituída por um módulo separado que se encaixa no medidor, permitindo assim utilizar diferentes meios de comunicação de acordo com a necessidade da distribuidora. Também ressaltam que o envio de dados continuamente pode ser bastante custoso, sendo mais indicado criar uma forma de transferência de dados acumulados durante um tempo, necessitando de memória de massa.

Atualmente, há um grande esforço no desenvolvimento e implantação de medidores inteligentes, sendo que a integração entre diferentes tipos de medidores não deverá acontecer na primeira versão desses medidores. Aspectos de segurança deverão se tornar um dos principais assuntos nos próximos anos, pois definirão as tecnologias que serão utilizadas.

2.4.2 RESPOSTA À DEMANDA

A resposta à demanda é um mecanismo que busca o uso mais eficiente do sistema de energia, através de mudança do consumo de eletricidade de fontes consumidoras em resposta às condições de mercado e da confiabilidade da rede elétrica.

Atualmente, o sistema elétrico possui uma infraestrutura capaz de atender plenamente ao perfil de consumo de milhões de consumidores. Porém, o consumo ocorre de uma forma inconstante, havendo períodos de grande demanda e períodos de pouca demanda por energia, exigindo uma infraestrutura capaz de atender os picos de consumo, que fica ociosa nos outros períodos (Figura 5). Assim, o sistema seria melhor utilizado se o consumo fosse mais constante e os picos fossem reduzidos significativamente. O princípio mais básico nesse sentido consiste na tentativa de mudar o consumo de um período para outro com menor demanda, conforme demonstrado na Figura 6.

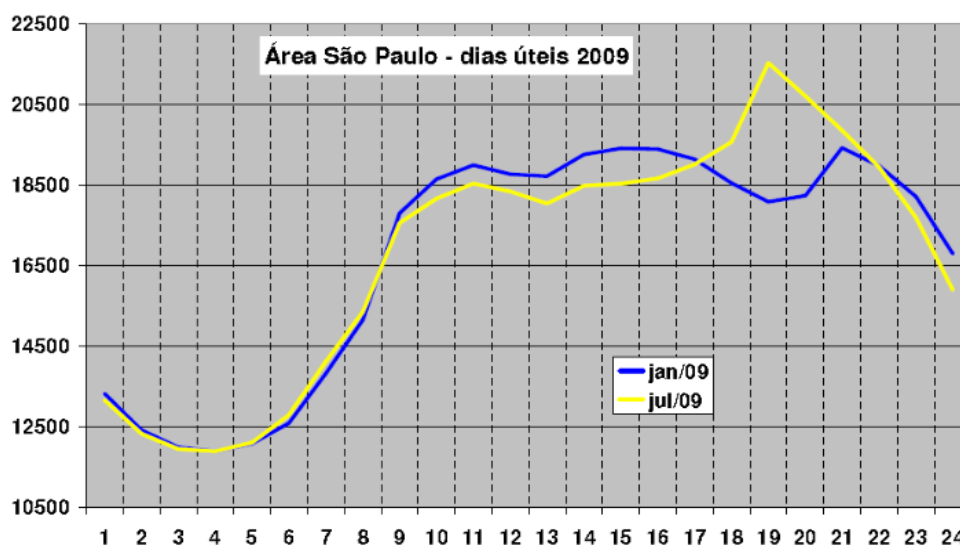


Figura 5 - Perfil de consumo médio.

Fonte: El Hage e Machado (2011).

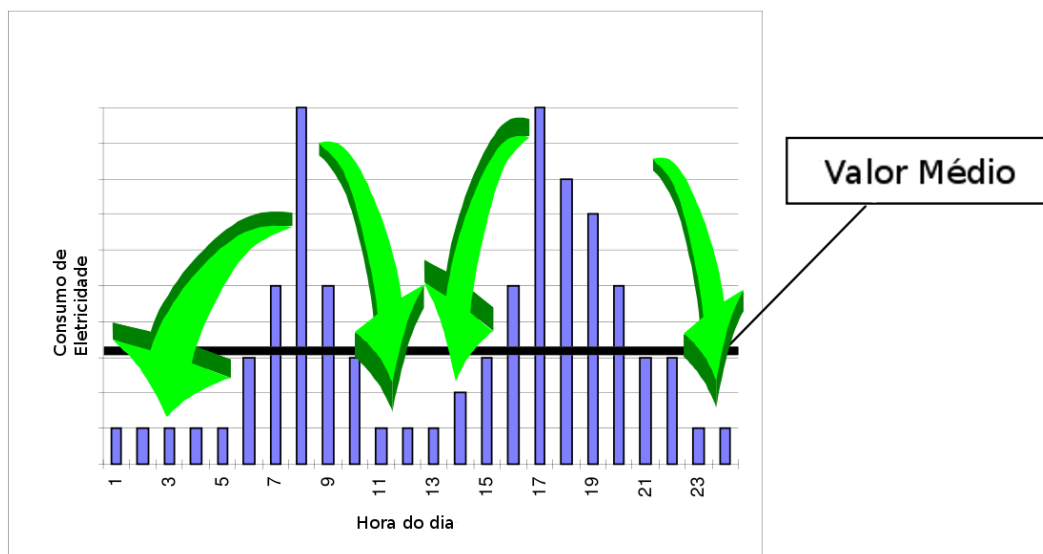


Figura 6 - Princípio básico de resposta à demanda.

Fonte: Adaptado de Ygge (1998).

Por exemplo, para a grande maioria de consumidores não há diferença se a máquina de lavar pratos funcionará às 8 horas da noite ou às 4 horas da madrugada, mas como os mesmos não recebem qualquer tipo de incentivo nesse sentido, acabam ligando o equipamento no horário que melhor lhes convém, muitas vezes no horário de pico.

Tradicionalmente, os mecanismos de resposta à demanda levam ao desligamento de determinadas cargas em períodos de alta demanda, enquanto que os operadores da rede elétrica podem apenas aumentar ou diminuir a geração de energia para atender a demanda necessária pela mesma. Com a Rede Elétrica Inteligente, esse conceito de resposta à demanda é expandido, criando-se a possibilidade de aumentar ou diminuir a demanda de energia.

Dessa forma, cargas, geradores e recursos de armazenamento de energia operam em conjunto alterando o paradigma tradicional, da geração seguir o consumo, para um paradigma em que a demanda é ajustada para acomodar as melhores possibilidades de geração de energia, buscando a melhor operação do sistema. Por exemplo, carros elétricos podem variar sua taxa de carregamento de energia de acordo com o perfil de geração de fontes de recursos renováveis (e.g., solar e eólica).

Ainda, a resposta à demanda é dividida basicamente em dois tipos: (i) controle direto; (ii) controle indireto (YGGE, 1998).

2.4.2.1 CONTROLE DIRETO

O controle direto é quando a distribuidora controla o consumo do consumidor conforme especificado em algum contrato firmado.

Em contratos baseados em compensação, os consumidores pagam por toda a eletricidade utilizada e as distribuidoras podem desligar alguns equipamentos específicos durante alguns períodos do dia, especificando quando e por quanto tempo tais equipamentos podem ser desligados, oferecendo ao consumidor como compensação algum desconto ou serviços adicionais.

Nos contratos baseados em serviços, a distribuidora se compromete a fornecer um determinado serviço através de uma determinada taxa, decidindo como e quando fornecer energia para prestar esse serviço. Por exemplo, uma distribuidora pode fornecer um serviço de gestão de temperatura em um edifício, em que se compromete a manter a temperatura dentro de uma certa faixa por uma taxa anual fixa e a pagar uma multa relacionada ao tempo em que a temperatura sair dessa faixa.

A vantagem do controle direto é que o conhecimento de gestão de energia é delegado à distribuidora, que pode encontrar soluções mais eficientes de operação por controlar o consumo de vários consumidores, o que resultará em melhores contratos para os mesmos.

2.4.2.2 CONTROLE INDIRETO

No controle indireto, o custo de energia varia ao longo do dia, levando o consumidor a decidir qual o melhor momento de utilizar energia elétrica.

Em casos em que o consumidor é atendido por apenas um fornecedor, possui um contrato indicando como a tarifa varia ao longo do dia. Os preços são anunciados com algum tempo de antecedência e o consumo é faturado com base nesses preços e o consumidor pode

consumir o quanto quiser de energia. Em casos em que o consumidor é atendido por mais de um fornecedor, o preço é definido pelas condições do mercado através de leis de oferta e demanda.

Uma pesquisa, que envolveu dados de 70 projetos com consumidores de baixa tensão, obteve que a tendência central de redução do pico do consumo de energia encontra-se entre 14% a 18%, quando os consumidores são submetidos a um custo de energia variável ao longo do dia (Figura 7).

Essa mesma pesquisa também analisou os dados de 17 projetos considerando uma precificação do tipo *Critical Peak Pricing* (CPP) que busca transmitir o custo verdadeiro de geração de energia elétrica aos clientes, fornecendo um sinal de preço que reflete com mais precisão os custos de energia durante uma pequena percentagem de horas do dia, mas nas horas mais críticas. A tendência central de redução do pico de consumo também foi de 14% a 18% (Figura 8) e quando há o envolvimento de tecnologias de assistência aos consumidores, a tendência central de redução foi de 34% a 38% (Figura 9), algo bastante significativo para o setor de eletricidade, indicando a importância de tais sistemas.

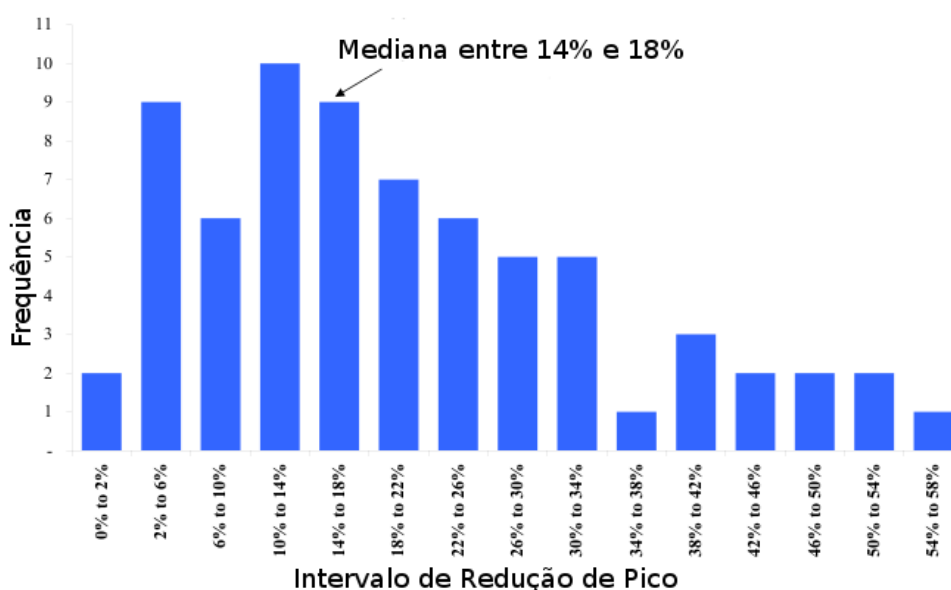


Figura 7 - Diminuição do pico com um custo de energia variável.

Fonte: Adaptado de Faruqui (2010a).

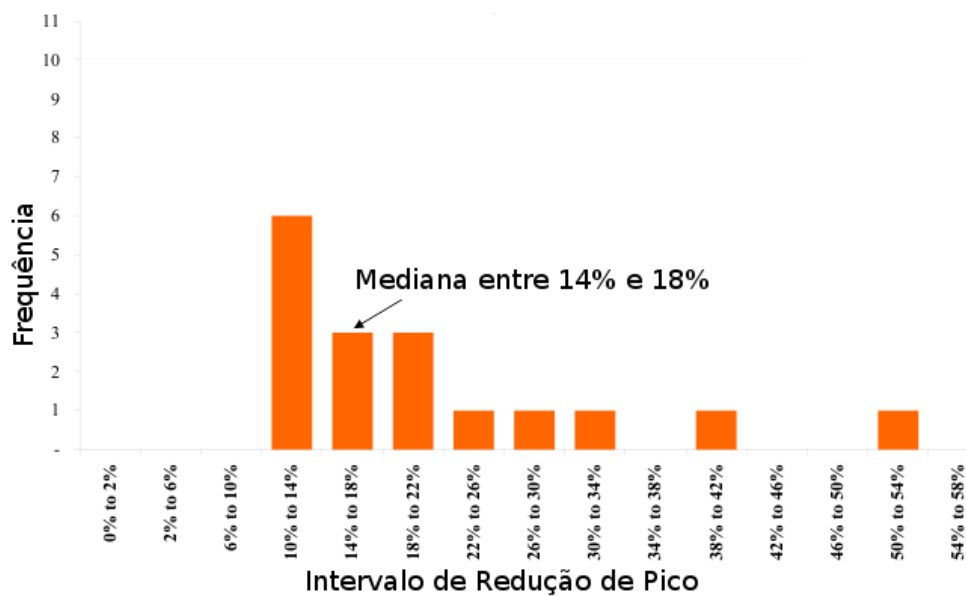


Figura 8 - Diminuição do pico com tarifas CPP.

Fonte: Adaptado de Faruqui (2010a).

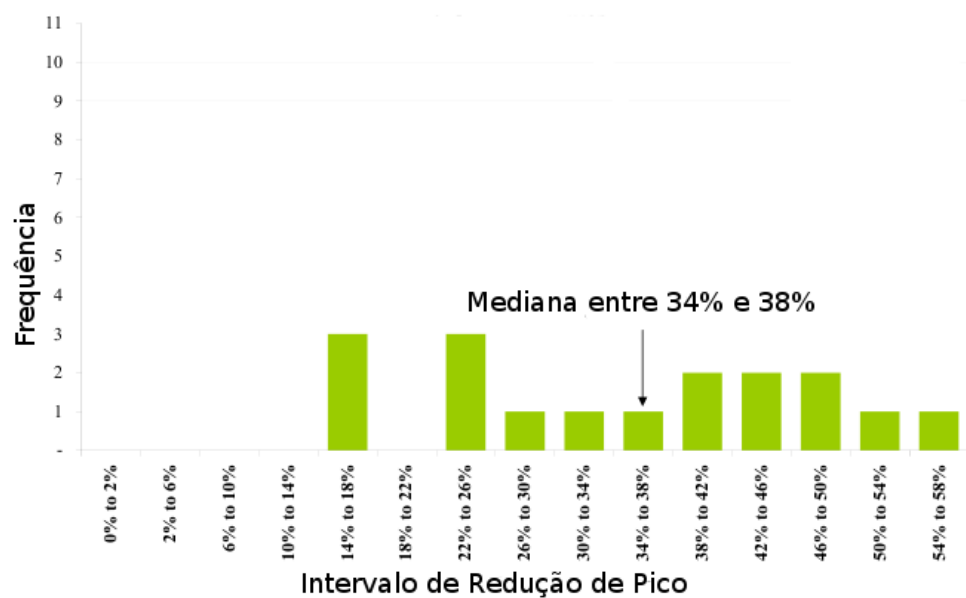


Figura 9 - Diminuição do pico com tarifas CPP e com uso de tecnologia.

Fonte: Adaptado de Faruqui (2010a).

2.4.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Geração distribuída é aquela localizada próxima aos centros de carga, conectada ao sistema de distribuição, não despachada pelo operador do sistema e formada por geradores de fontes renováveis, hidrelétricas com potência instalada inferior a 30 MW e cogeração com eficiência energética maior ou igual a 75% (LOPES, 2011).

Também abrange a microgeração, quando é formada por geradores de pequena capacidade (alguns kW) conectados à rede de distribuição de baixa tensão, em geral utilizando painéis solares fotovoltaicos e pequenos geradores eólicos.

Traz como vantagens: (i) postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; (ii) baixo impacto ambiental; (iii) menor tempo de implantação; (iv) redução no carregamento das redes; (v) redução de perdas; (vi) melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada; (vii) provimento de serviços auxiliares; (viii) aumento da confiabilidade do atendimento; (ix) diversificação da matriz energética.

Por outro lado, apresenta as seguintes dificuldades: (i) aumento da complexidade de operação da rede de distribuição, que passa a ter fluxo bidirecional de energia; (ii) necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes; (iii) controle do nível de tensão da rede no período de carga leve; (iv) alteração dos níveis de curto-circuito das redes; (v) aumento da distorção harmônica na rede; (vi) intermitência da geração, devido à dificuldade de previsão de disponibilidade do combustível (e.g., radiação solar, vento, água, biogás); (vii) alto custo de implantação; (viii) tempo de retorno elevado para o investimento.

A tendência é que a maioria das residências e estruturas prediais tenham alguma forma de geração de energia, sendo que em alguns lugares isso já é uma realidade (Figura 10). A tendência é que essas unidades forneçam o excedente de produção de energia à rede de distribuição de eletricidade, recebendo um retorno financeiro pela quantidade fornecida.



Figura 10 - Conjunto de residências com geração de energia.

Fonte: Lopes (2011).

Já é possível, inclusive encontrar dispositivos comerciais que sincronizam a energia gerada com a energia da rede, injetando a energia gerada diretamente na rede da residência e consequentemente na rede externa quando ocorre um excedente, eliminando a necessidade de baterias e demais componentes utilizados no passado (Figura 11).



Figura 11 - Inversor para conexão direta à rede de energia.

Fonte: Ecvv (2011).

Será também comum o surgimento de centrais geradoras a partir de painéis fotovoltaicos próximas a centros urbanos dedicadas exclusivamente a geração e venda de energia (Figura 12). Em alguns lugares da Europa, os consumidores já recebem incentivos para a aquisição de painéis fotovoltaicos, sendo que a produção mundial dos mesmos vem crescendo a um ritmo acelerando, conforme demonstrado na Figura 13.



Figura 12 - Centrais geradoras: Moura em Portugal (42MWp) à esquerda e Toledo na Espanha (1MWp) à direita.

Fonte: Zilles (2011).

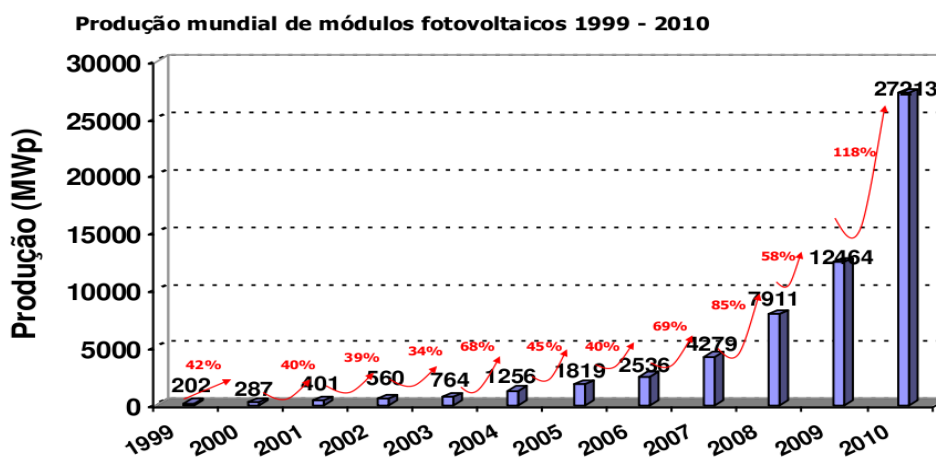


Figura 13 - Produção mundial de painéis fotovoltaicos.

Fonte: Zilles (2011).

Ainda, com a geração distribuída são introduzidos dois novos conceitos: (i) central de geração virtual (*Virtual Power Plants*); (ii) microrredes (*microgrids*).

2.4.3.1 CENTRAL DE GERAÇÃO VIRTUAL

Abrange o conceito em que vários geradores distribuídos e cargas controláveis em uma área de concessão cooperam, agindo como uma única unidade em relação ao mercado de energia, com o objetivo de maximizar os benefícios econômicos, já que a unidade criada, por

ter uma maior capacidade pode participar do mercado de forma mais agressiva, enquanto que as cargas podem ter acesso a melhores preços em função de sua cooperação com os geradores (Figura 14).

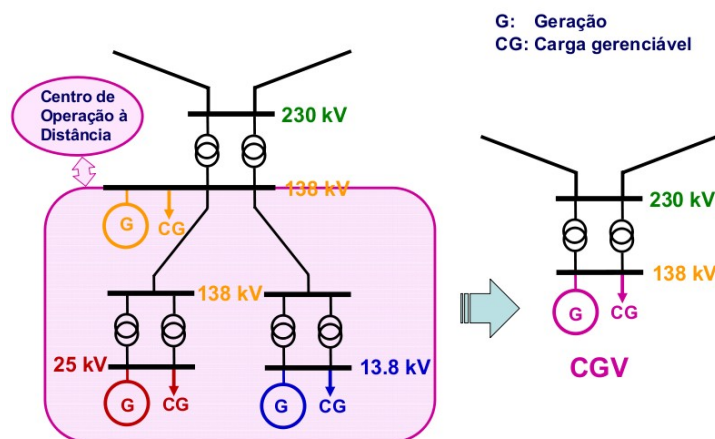


Figura 14 - Exemplo de central de geração virtual.

Fonte: Falcão (2010).

Inicialmente a cooperação se dará através de um centro de operações à distância, mas a tendência é que essa cooperação ocorra de forma automática com decisões tomadas entre os componentes da central de geração virtual.

2.4.3.2 MICROREDES

Representam uma forma mais eficiente, segura e gerenciável para a conexão de um grande número de geradores de pequeno e médio porte aos sistemas atuais. Abrange a integração de geradores distribuídos, elementos de armazenamento de energia e cargas controláveis que operam na rede de baixa tensão, podendo tanto operarem conectados à rede de energia, como operar de forma isolada, sendo vistos como um sistema (subsistema) elétrico independente (FALCÃO, 2009).

Este subsistema elétrico opera normalmente conectado a rede externa com um fluxo de energia positivo ou negativo entre os mesmos, correspondentes à compra ou venda de energia. Durante perturbações da rede, pode desconectar-se da mesma e continuar alimentando parcial

ou totalmente sua carga própria. Após o restabelecimento da condição normal de operação da distribuidora, conecta-se novamente à mesma, de forma suave e sem transtornos para os seus clientes.

Para atingir a característica de operação descrita acima, a microrede deve ser dotada de equipamentos e técnicas de controle que permitam alterações da configuração interna e externa, aumentos e reduções da energia adquirida da concessionária, controles de tensão e demais parâmetros de forma adequada, sem transtornos para os consumidores da microrede ou perturbações na rede da concessionária.

O sistema de controle é constituído por um Centro de Gerenciamento da Microrede (CGMR), Controladores de Fontes (CF) e Controladores de Cargas (CC). Além desses equipamentos, existe um Dispositivo de Conexão/Reconexão (DCR), o qual tem o papel de facilitar as atividades de ilhamento e reconexão da microrede ao sistema da concessionária (Figura 15).

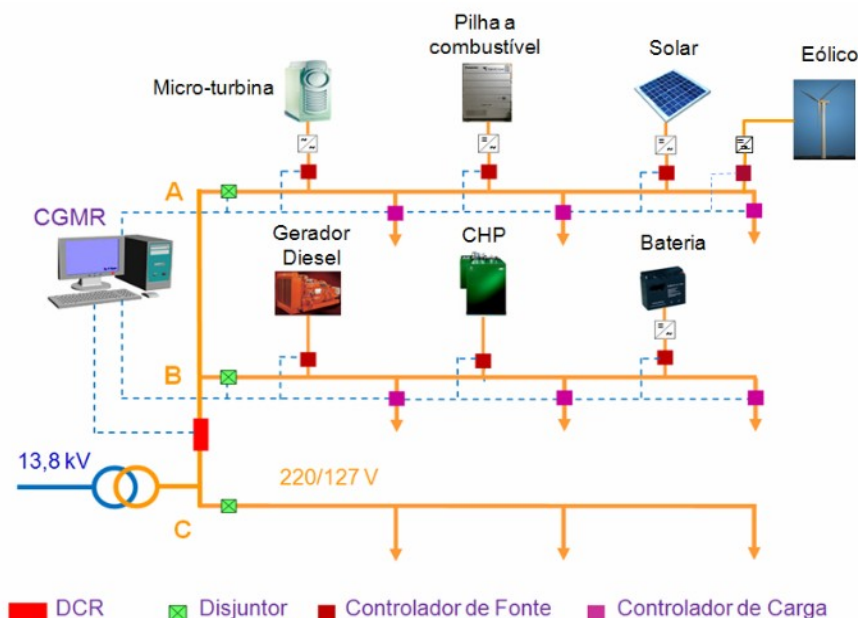


Figura 15 - Exemplo de microrede.

Fonte: Falcão (2010).

O CGMR atua no nível superior de controle da microrede, executando as seguintes funções: (i) gerenciar a energia comprada e vendida; (ii) realizar a previsão de carga em curto prazo; (iii) prover as referências de potência ativa e tensão terminal para os geradores da rede; (iv) realizar o despacho de potência ativa e controle de tensão; (v) garantir que as cargas sejam atendidas adequadamente; (vi) minimizar emissões e perdas; (vii) maximizar a eficiência operacional dos geradores da microrede; (viii) prover controle e lógica de ilhamento e restauração do suprimento durante perturbações na rede da concessionária.

Os CFs atuam nos conversores, ou diretamente nas fontes, para ajustar a potência ativa e o módulo da tensão terminal do gerador. Os CGs, por sua vez, atuam nas cargas através da conexão/desconexão de certos equipamentos em determinados períodos pré-estabelecidos ou, então, para aliviar uma condição de operação desfavorável da microrede.

As linhas pontilhadas da Figura 15, representam canais de comunicação entre o CGMR e os CFs, CCs e o DCR, mediante os quais o CGMR implementa o controle centralizado da rede.

Propostas de controle descentralizado de microredes existem e podem apresentar vantagens em relação à essa versão centralizada, permitindo que fontes sejam adicionadas à rede sem a necessidade de reconfigurar a estratégia de controle. Neste caso, o CGMR é utilizado apenas para conexão/desconexão da microrede à rede principal.

2.4.4 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

É uma área complementar à resposta a demanda e a geração de energia por fontes renováveis. Com a quantidade adequada e um controle otimizado, permite que a geração renovável seja transformada em uma geração despachável, além de tornar viável a reserva de energia para uso posterior em momentos de maior custo.

O mercado de eletricidade ainda possui uma forte restrição em relação ao armazenamento de energia, mas ao longo dos últimos anos algumas pesquisas estão levando a uma mudança dessa característica, através do desenvolvimento de diferentes mecanismos de armazenamento de grandes quantidades de energia. Por exemplo, em alguns lugares do Japão e Estados Unidos, estão sendo testados centros de armazenamento com baterias de Enxofre de Sódio (*Sodium Sulfur battery* - NaS), sendo que o maior centro da atualidade possui capacidade de armazenamento de cerca de 245MWh. (NETL, 2009).

Essas baterias são associadas criando módulos capazes de armazenar individualmente cerca de 360kWh, sendo que esses módulos são geralmente conectados entre si, aumentando a capacidade de armazenamento. Por exemplo, para uma capacidade de aproximadamente 7MWh, cria-se uma estrutura conforme a Figura 16.



Figura 16 - Bateria NaS.

Fonte: Adaptado de Ohara (2009).

2.4.5 TRANSPORTES ELÉTRICOS

Transportes elétricos incluem qualquer tipo de veículo que tenha conexão com a rede de energia para carregamento de energia ou operação, incluindo tanto veículos elétricos, como híbridos.

Apresentam um forte impacto nas redes de energia, tanto pelo elevado consumo introduzido pela larga escala de veículos, como pelas possibilidades de armazenamento e interação com a resposta à demanda, através do fornecimento de energia em horários de pico.

Atualmente, esses veículos para usuários ainda possuem um custo de aquisição bastante elevado, que deve ser reduzido ao longo dos anos. Por outro lado, já surgem algumas iniciativas como o de um sistema público de aluguel de carros elétricos que a cidade de Paris está implementando, em que os motoristas podem retirar um carro em qualquer uma das 700 estações previstas e devolvê-lo onde desejarem, revolucionando o transporte urbano de curtas distâncias. O veículo utilizado tem autonomia de 250 km e tempo de recarga de 4 horas (G1, 2010). Além disso, também estão surgindo outras iniciativas que propõem novos conceitos para carros urbanos, conforme o exemplo da Figura 17.

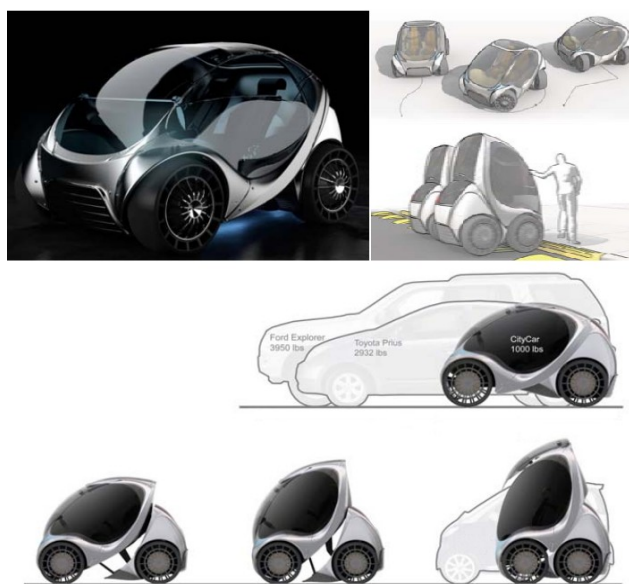


Figura 17 - Tendências do transporte urbano.

Fonte : Adaptado de Lark Junior (2009).

2.4.6 INFORMAÇÕES SITUACIONAIS DE GRANDES ÁREAS

Abrange o acompanhamento e exibição dos componentes do sistema de energia e desempenho das interconexões sobre grandes áreas geográficas em tempo real. Objetiva

compreender e otimizar a gestão dos componentes da rede elétrica, além de prever, prevenir ou responder a problemas antes que as interrupções possam surgir, através da monitoração e do entendimento de como cada componente pode afetar todo o sistema.

Inclui, por exemplo: (i) sistemas de análise de contingências, que analisam e simulam a capacidade da rede de resistir ao mau funcionamento de um componente; (ii) sistemas que avaliam o comportamento dos componentes buscando prevenir combinações de eventos que levem a situações de falta de energia; (iii) sistemas de monitoramento e análise do comportamento de operações de distribuição e fornecimento de sistemas de transmissão; (iv) sistemas de ajustes de parâmetros de energia para garantir a qualidade necessária.

2.4.7 GESTÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Abrange a maximização do desempenho dos componentes dos sistemas de distribuição e integração com sistemas de transmissão e operações. À medida que a rede é desenvolvida, um grande número de recursos de energia distribuída estarão disponíveis e a automatização dos sistemas de distribuição torna-se cada vez mais importante para o funcionamento eficiente e confiável do sistema.

Os benefícios esperados para a gestão da rede de distribuição incluem o aumento da confiabilidade, redução da carga de pico e melhores capacidades para a gestão distribuída de fontes de energia renováveis.

2.4.8 SEGURANÇA CIBERNÉTICA

Abrange medidas para garantir a confidencialidade, integridade e disponibilidade dos sistemas eletrônicos de comunicação e de informação e dos sistemas de controle necessários para a gestão, operação e proteção de informações de energia e estruturas de telecomunicações.

2.5 IMPACTOS NOS SEGMENTOS DO SISTEMA ELÉTRICO

Tradicionalmente, a sequência física natural para o fornecimento de energia inicia na geração em larga escala, passa pela transmissão a longas distâncias até a distribuição que se encarrega de fornecer a energia em condições adequadas aos consumidores.

Com as Redes Elétricas Inteligentes, essa sequência é drasticamente alterada e outras formas de relacionamento comercial surgem, criando um intenso relacionamento comercial entre os vários segmentos do setor elétrico. Por exemplo, será comum a operação de pequenas centrais geradoras, próximos aos centros de consumo, que comercializarão energia diretamente aos consumidores, ou ainda, consumidores que ao gerarem um excedente de energia, comercializarão a mesma aos seus vizinhos.

A Rede Elétrica Inteligente permitirá a criação de diferentes serviços, produtos e relacionamentos, muitos ainda inimagináveis, semelhante ao que ocorreu e ainda ocorre com a Internet. Assim, já é possível perceber os diferentes impactos que serão causados nos diferentes segmentos do setor elétrico devido as novas exigências que serão criadas.

2.5.1 CONSUMIDOR

O impacto no segmento de consumo será revolucionário. Atualmente, a grande maioria dos consumidores é ignorante em relação ao seu consumo de energia, pois recebe mensalmente apenas o montante do que foi consumido, sem possuir nenhuma outra informação, além de não possuir qualquer tipo de incentivo para diminuir seu consumo de energia ou adotar equipamentos energeticamente mais eficientes, o que gera um enorme desinteresse por esses aspectos.

Com a introdução de novos conceitos, os consumidores passarão de um comportamento passivo, para um comportamento ativo nos processos de geração, transmissão e consumo de energia, o que exigirá dos mesmos uma maior entendimento sobre o mercado

de energia. É claro que isso se dará de forma diferenciada para cada consumidor, de acordo com sua participação na rede, que abrange por exemplo o atendimento à requisições de diminuição de consumo, ou a possibilidade de geração de energia local e comercialização para a rede.

A demanda de energia dos consumidores poderá ser administrada, gerando benefícios tanto aos consumidores como aos distribuidores. Novos tipos de contratos e planos de fornecimento junto às distribuidoras surgirão. Novos equipamentos e sistemas de informação deverão ser desenvolvidos para administrar essas práticas e a forte interação e relacionamento dos consumidores com o mercado de energia.

Como cada equipamento passará a ser um elemento de uma rede de dados, além de um elemento de uma rede elétrica, os projetos de eletrodomésticos deverão ser refeitos, criando dispositivos inteligentes, capazes de monitorar e ajustar seu funcionamento de acordo com às necessidades dos usuários e a disponibilidade e custo da energia elétrica (MARTINI, 2010). Será comum as residências possuírem um dispositivo que deverá monitorar, controlar e coordenar as atividades dos equipamentos residenciais, buscando atender o perfil de consumo requerido pelos usuários (LUI; STIRLING; MARCY, 2010).

2.5.2 DISTRIBUIÇÃO

A medição eletrônica em tempo real aumentará a eficiência do sistema, a partir da diminuição de perdas não técnicas e a integração de tarifas variáveis e planos de fornecimento mais atraentes. A automação das redes de distribuição permitirá reduzir o impacto e tempo de interrupções, podendo ser determinado com maior precisão o indicador DIC (Duração Individual de Continuidade) e o indicador FIC (Frequência Individual de Continuidade).

Será necessário desenvolver sistemas de informação complexos para administrar as novas práticas de relacionamento com o consumidor. Será necessário adicionar processadores

independentes em cada um dos componentes da rede, além de sensores e meios de comunicação de informações aos outros componentes, fazendo com que a rede seja capaz de operar de forma independente, mas também seja capaz de cooperar com os demais componentes da rede.

A utilização de sistemas supervisórios que irão permitir a monitoração de todas as informações da rede serão comuns, o que permitirá tomar ações rápidas sobre eventuais problemas. Será comum que os componentes informem quando estão sob algum risco de mau funcionamento e os operadores ou até mesmo os componentes da rede encontrem soluções a fim de resolver a situação.

2.5.3 TRANSMISSÃO

A operação se tornará muito mais complexa, devido a introdução de várias unidades geradoras e de diferentes tipos e comportamentos, modificando a operação do sistema face às sazonalidades inerentes. Por outro lado, a distribuição de unidades geradoras próximas as unidades consumidoras, permitirá o ilhamento de regiões em situações de contingência.

Assim como na distribuição, a utilização de processadores em cada componente e de sistemas supervisórios será uma realidade comum.

2.5.4 GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO

Novas fontes de energia são cada vez mais viáveis economicamente, por exemplo, há alguns anos era difícil de imaginar que seria economicamente viável a realização de leilões de energia eólica no Brasil (O GLOBO, 2010).

Haverá um elevado percentual de geração distribuída. Será comum que residências e prédios tenham seus próprios meios de geração de energia, através de geração solar ou eólica (ZILLES, 2011), possibilitando inserir o excedente de energia na rede.

O armazenamento de energia será muito mais intenso, novas tecnologias deverão surgir tornando isso mais eficiente e economicamente mais atraente. Os carros elétricos causarão um profundo impacto nesse sentido, aproveitando as variações do preço de energia para fornecer energia à rede, ou consumir energia para armazenamento e posterior utilização.

2.5.5 COMERCIALIZAÇÃO

A comercialização se aproximará cada vez mais do consumidor final, focando em suas necessidades e preferências. Novas formas de comercialização aparecerão, com intervalos de contratação reduzidos. A tendência é de um cenário de pregões contínuos, criando a possibilidade de corretores de energia, que atuarão de forma semelhante aos administradores de ações na bolsa de valores (MARTINI, 2010).

Um grande volume de informações deverá estar disponível aos interessados, respeitando a segurança e privacidade dos envolvidos, criando oportunidades diversas no setor de Tecnologia da Informação.

2.5.6 REGULAÇÃO

O conceito de fiscalização será expandido para o de auditoria, havendo uma flexibilização nas práticas comerciais. Será necessário uma completa revisão técnica e tarifária (MARTINI, 2010).

3 ESTADO ATUAL DE IMPLEMENTAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

A implementação da Rede Elétrica Inteligente exige um esforço coordenado dos setores governamentais e privados de forma a garantir a integração das diversas partes desse sistema e uma evolução gradativa, com o mínimo de desperdícios. A atual situação de alguns países em relação à modernização de sua rede elétrica é descrita a seguir, de forma a evidenciar o atual esforço global nessa modernização.

3.1 ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

Em 2007, o congresso americano aprovou uma lei nacional (US CONGRESS, 2011) para o progresso do país no sentido de uma maior independência, eficiência e segurança energética. Essa lei abrange diversas diretrizes estratégicas e em relação às Redes Elétricas Inteligentes: (i) estabelece diretrizes para a modernização das empresas de transmissão e distribuição de energia elétrica; (ii) solicita relatórios que devem ser encaminhados ao congresso em relação à implementação de tecnologias e obstáculos à essa implementação; (iii) cria um comitê consultivo e uma força tarefa para auxiliar na implementação; (iv) estabelece meios para a condução de P&D, avaliação da redução de consumo e outros aspectos da implementação; (v) torna o NIST (*National Institute of Standards and Technology*) responsável por coordenar o desenvolvimento de um *framework* que inclua normas e padrões para a interoperabilidade de dispositivos e sistemas dessa rede; (vi) cria um programa que reembolsa 20% dos investimentos elegíveis; (vii) define que os estados devem incentivar distribuidoras para empregar novas tecnologias através de incentivos fiscais; (viii) requer um estudo sobre leis de propriedade privada sobre fios elétricos em relação ao direito público; (ix) requer a apresentação ao congresso de relatórios sobre os impactos potenciais dessa implementação na segurança da estrutura da rede elétrica e da capacidade operacional.

Em Outubro de 2009, o presidente Barack Obama anunciou que o governo disponibilizaria 3,4 bilhões de dólares em investimentos para a modernização das redes elétricas do país, o que estima-se que vai alavancar um adicional de 4,7 bilhões de dólares em compromissos de empresas, cidades e outros parceiros com planos de instalar tecnologias de Redes Elétricas Inteligentes, buscando eficiência energética, maximização desempenho e otimização de aplicações (WHITE HOUSE, 2011).

Isso impulsionou uma grande corrida industrial para o desenvolvimento e disponibilização de dispositivos, além de uma série de pesquisas e projetos nesse sentido. Algumas pesquisas indicam que a maioria dos consumidores estão dispostos ao uso antecipado de serviços e tecnologias da Rede Elétrica Inteligente devido aos seus benefícios, sendo que três em quatro disseram que mudariam hábitos para economizar energia se possuíssem apoio e ajuda tecnológica (NIST, 2010).

Já ao final de 2009, 135 projetos, em relação à Rede Elétrica Inteligente, foram identificados nos Estados Unidos, principalmente em relação à medidores inteligentes e gestão de energia residencial. As oportunidades não são apenas para comerciantes e produtores de energia, mas principalmente para os desenvolvedores e comerciantes dos equipamentos e sistemas que irão formar a infraestrutura da rede, sendo estimado um mercado, nos Estados Unidos da América, de cerca de 43 bilhões de dólares em 2014 (Figura 18).

O NIST estabeleceu um plano para acelerar a identificação de um conjunto inicial de normas existentes, requisitos aplicáveis, lacunas nas normas identificadas e prioridades para normalizações adicionais. Esse plano também busca estabelecer uma estrutura para o desenvolvimento contínuo das várias normas adicionais que serão necessárias, além da criação de um *framework* para testes de conformidade e certificação, buscando garantir a interoperabilidade e a segurança dos diversos dispositivos.

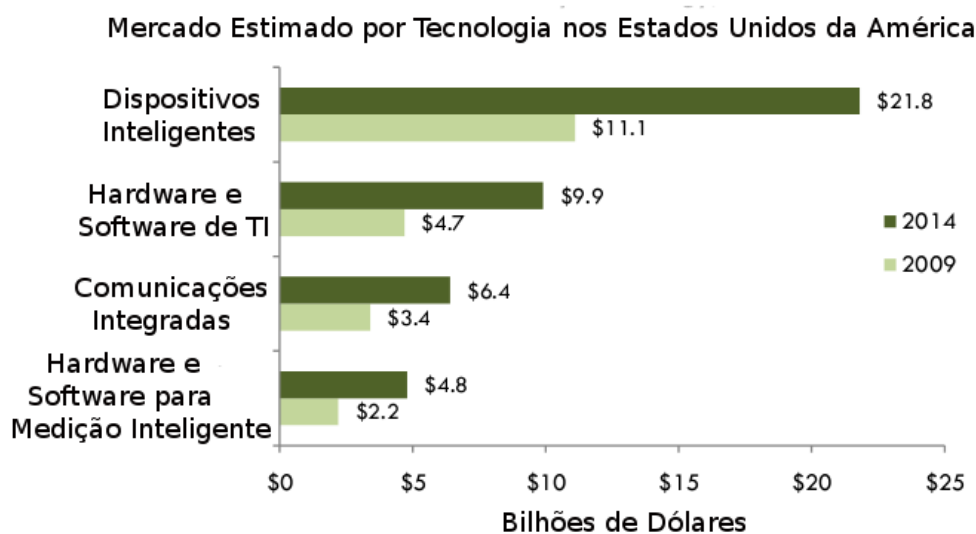


Figura 18 - Projeção do mercado por tecnologia.

Fonte: Adaptado de Zpryme (2009).

Na visão do NIST, as normas devem ser desenvolvidas e mantidas através de um consenso colaborativo e aberto à participação de todas as partes interessadas e afetadas e não ser dominada ou estar sob o controle de um grupo de organizações. Sem elas, as tecnologias desenvolvidas e implementadas podem tornar-se obsoletas prematuramente, ou serem aplicadas sem medidas necessárias de segurança. Ainda, a arquitetura da Rede Elétrica Inteligente será uma enorme combinação de sistemas e subsistemas desenvolvidos de forma independente com a máxima flexibilidade e independência possível, mas garantindo a interoperabilidade e confiabilidade.

Em janeiro de 2010, o NIST publicou um documento (NIST, 2010) que: (i) descreve um modelo conceitual das Redes Elétricas Inteligentes permitindo o projeto de uma arquitetura global (Figura 19); (ii) identifica 75 normas que já podem ser aplicadas; (iii) define prioridades e revisões necessárias para outras normas existentes necessárias para resolver algumas lacunas e garantir interoperabilidade, confiabilidade e segurança dos componentes da rede; (iv) apresenta os passos iniciais em direção a uma estratégia de

segurança e avaliação de riscos; (v) apresenta planos de ação com cronogramas agressivos em que organizações de definição de padrões devem abordar as lacunas identificadas.

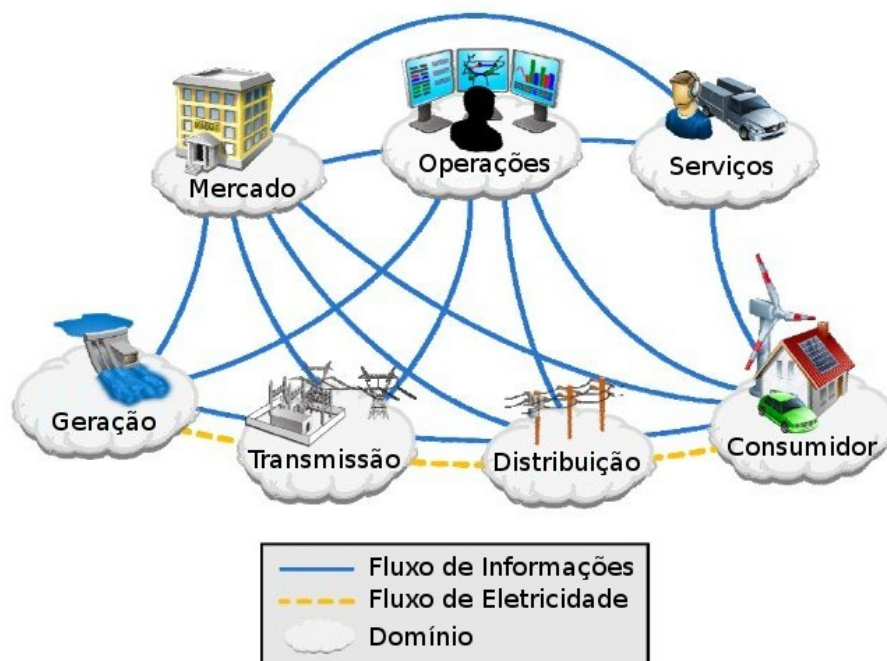


Figura 19 - Modelo conceitual da Rede Elétrica Inteligente.

Fonte: Adaptado de NIST (2010).

Esse documento foi o primeiro resultado apresentado pelo NIST e foi concebido com as opiniões de mais de 1500 pessoas, representando centenas de organizações, em três eventos que ocorreram em 2009, além de mais 30 dias em que um manuscrito com os primeiros resultados ficou disponível para discussão pública.

Ainda, esse documento relata que há uma grande expectativa que o *Internet Protocol* (IP) sirva como um elemento fundamental para as redes de comunicação da Rede Elétrica Inteligente, devido a maturidade e disponibilidade de ferramentas e aplicativos, a sua utilização generalizada e em grande escala e a flexibilidade de desenvolvimento de aplicativos de maneira independente da infraestrutura de comunicação. Adicionalmente, aponta que a interface do cliente com a rede deve evitar gastos indevidos e complexidade desnecessárias para o consumidor, possuindo uma instalação automática e auto-configurável, não exigindo qualquer experiência técnica por parte dos consumidores para sua operação.

Em agosto de 2010, o NIST publicou três guias relacionados com a segurança cibernética, denominados *Guidelines for Smart Grid Cyber Security*. O primeiro descreve a abordagem, incluindo o processo de avaliação de risco, utilizado para identificar requisitos de segurança. Também apresenta uma arquitetura de alto nível e uma discussão sobre questões técnicas de criptografia. O segundo se concentra em questões de privacidade de consumidores, oferecendo recomendações baseadas em princípios de privacidade amplamente aceitos. O terceiro é uma compilação de análises de apoio e referências utilizadas para desenvolver os requisitos de segurança, ferramentas e recursos apresentados nos outros dois volumes.

3.2 UNIÃO EUROPÉIA

Em 2005 foi criado o grupo de desenvolvimento de tecnologias para redes elétricas do futuro (*European Technology Platform for Electricity Networks of the Future*), uma iniciativa que visa impulsionar o domínio da União Européia em relação às Redes Elétricas Inteligentes. O escopo inicial busca aumentar a eficiência de distribuição, além da eliminação de obstáculos para a integração em larga escala de fontes de energia renováveis e distribuídas.

Em abril de 2006, esse grupo divulgou o documento *Vision and Strategy for European Electricity Networks of the Future* (SMARTGRIDS ETP, 2006), onde foram definidos os objetivos e estratégias para o desenvolvimento da Rede Elétrica Inteligente européia. Esse documento apresentou as necessidades e exigências para as redes de transmissão e distribuição de forma a conduzir os efeitos da liberalização do mercado e acomodar novas tecnologias de geração, buscando cumprir os seguintes objetivos: (i) desenvolver uma visão compartilhada de futuro que incentive o envolvimento de múltiplas partes interessadas; (ii) identificar as necessidades de pesquisa e prover o suporte para um aumento no esforço de pesquisas públicas e privadas sobre redes de eletricidade; (iii) alinhar os projetos de pesquisa

e desenvolvimento de tecnologias em curso, assim como novos programas europeus, nacionais e regionais. Esse documento ainda apresenta as seguintes exigências para a nova rede:

- flexibilidade para cumprir necessidades dos clientes e ao mesmo tempo responder às mudanças e desafios;
- acesso a todos os usuários da rede, especialmente para fontes renováveis de energia e alta eficiência de geração local com zero ou baixas emissões de carbono;
- economia através da inovação, gestão eficiente da energia, regulamentação e igualdade da concorrência.

Em 2007, esse grupo publicou o documento *Strategic Research Agenda* (SMARTGRIDS ETP, 2007), em que foi descrito as principais áreas, técnicas e não técnicas, a serem investigadas, sendo um documento estratégico, que visa o alinhamento dos programas de pesquisa e desenvolvimento e serve como um guia primário para diversos trabalhos nessa área. Em 2010, publicou o documento *Strategic Deployment Document for Europe's electricity networks of the future* (SMARTGRIDS ETP 2010), descrevendo as prioridades para pesquisa e desenvolvimento e um cronograma para a implantação da nova rede, além de descrever os benefícios que essa inovação vai apresentar a todos os interessados. Esse documento destaca seis prioridades que devem ser cumpridas até 2020: (i) otimizar a rede de operação; (ii) otimizar a infraestrutura da rede; (iii) integrar geração intermitente em larga escala; (iv) desenvolver tecnologias de informação e comunicação para a rede; (v) desenvolver redes de distribuição ativas; (iv) tratar do novo mercado, incluindo usuários e aspectos de eficiência energética.

Na União Européia, o sistema elétrico de cada nação tem uma posição única em termos de idade, estrutura e funcionalidade, sendo que a implantação em cada um trará desafios e exigências diferentes, tornando esse roteiro apenas uma orientação, sendo

necessário um planejamento mais detalhado para o cumprimento de cada uma das prioridades apresentadas. Embora esse esforço de coordenação seja mais lento, devido a sua complexidade inerente, quando comparado com o dos Estados Unidos, já há em vários países elementos básicos da Rede Elétrica Inteligente.

Por exemplo, no Reino Unido, os consumidores podem escolher diferentes distribuidoras para o fornecimento de eletricidade, cada uma com um determinado plano e preços característicos (Tabela 1). As tarifas consistem de um valor anual fixo, com um valor variável adicional (Taxa1) de acordo com o consumo em kWh e em alguns casos com um outro valor variável (Taxa2) aplicado apenas quando o consumo ultrapassa um determinado valor anual (Limite). Enquanto que em vários outros países a medição eletrônica de energia já é uma realidade, como será apresentado a seguir.

Tabela 1 - Tarifas por distribuidora.

Fornecedor	Forma de Pagamento:									Limite (kWh)
	Crédito			Débito			Pré-Pagamento			
	Fixo	Taxa1	Taxa2	Fixo	Taxa1	Taxa2	Fixo	Taxa1	Taxa2	
MEB	2159	6.72	-	2159	6.72	-	3734	6.72	-	-
British Gas	0	10.57	5.65	0	9.01	5.65	0	10.28	6.17	900
Eastern TXU Energi	2848	6.38	6.28	1856	6.38	6.28	3713	6.72	-	2392
East Midland	3541	5.99	-	2491	5.99	-	5116	5.99	-	-
Independent Energy	4982	5.46	-	4026	5.46	-	4497	7.77	-	-
London Electricity	3048	5.86	-	3048	5.86	-	9202	7.80	-	-
Northern Electric+Gas	0	9.14	5.68	0	8.19	5.68	3990	6.52	-	1092
Norweb Energi	4922	5.30	-	4637	5.21	-	3734	6.72	-	-
Seeboard	0	11.97	5.34	0	10.82	5.34	4112	6.72	-	728
Scottish Hydro	1873	6.08	-	1873	6.08	-	3990	6.52	-	-
Scottish Power	5408	5.26	-	4883	5.01	-	3734	6.72	-	-
Southern	3116	6.29	-	3053	6.16	-	3990	6.52	-	-
SWALEC	1966	5.67	-	1886	5.44	-	3734	6.71	-	-
SWEB	3045	5.86	-	3045	5.86	-	4523	7.39	-	-
Utility Link	3595	7.25	-	3595	7.25	-	7388	7.68	-	-
Yorkshire	5561	5.76	-	5561	5.76	-	8669	5.76	-	-

Fonte: Adaptado de Wilson e Price (2011).

3.2.1 ITÁLIA

A Enel (principal distribuidora do país) foi a pioneira no mundo em um plano de substituição em massa de medidores de energia em unidades de baixa tensão. Posteriormente, a AEEG, Autoridade Reguladora de Energia Elétrica e Gás (*Autorità per L'Energia Elettrica e il Gás*), decidiu pela substituição obrigatória de acordo com exigências funcionais mínimas estabelecidas, sendo que a completa substituição de medidores deve ser concluída até final de 2011 (segundo determinações do regulador). A AEEG ainda estuda a possibilidade de uma segunda geração de medidores inteligentes, que se integrariam com sistemas de medição de gás.

A prioridade da regulamentação foi massificar a medição eletrônica ao menor custo possível e como a determinação ocorreu após a aplicação da Enel, a exigência de um protocolo público implicaria substituir os medidores. Assim, na resolução não foi determinado a necessidade de protocolos públicos, sendo utilizado principalmente o sistema *Telegestore* (Figura 20).

O *Telegestore* é uma referência em tecnologia de medição remota, pois mais de 35 milhões de medidores através de 350 mil concentradores são geridos por esse sistema. Opera por uma rede pública de telecomunicações (GSM/GPRS, satélites e PSTN (*Public Switched Telephone Network*)) através de concentradores instalados em cada subestação de média tensão (um concentrador por transformador). Cada concentrador pode se comunicar com o sistema central da *Telegestore* pela rede pública através de TCP/IP e se comunicar com os medidores através de uma rede local DLC (*Distribution Line Carrier*). Na impossibilidade de acessar um medidor diretamente, poderá acessá-lo através de outros medidores (BOTTE; CANNATELLI; ROGAI, 2005).

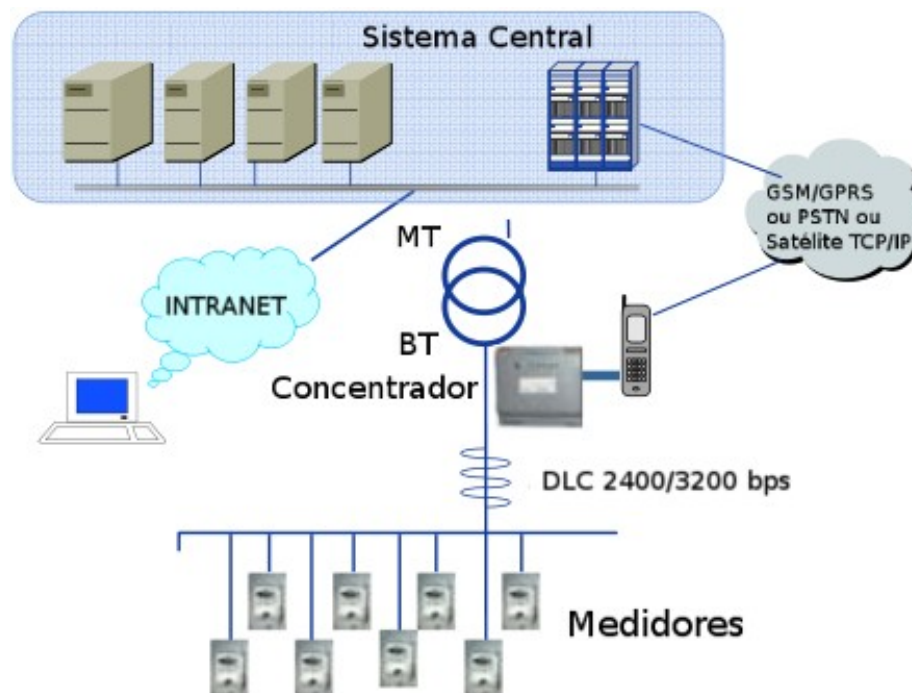


Figura 20 - Sistema Telegestore.

Fonte: Adaptado de Petroni, Cotti e Bono (2009).

Esse sistema permite leitura remota de medidores, tanto por requisição como por agendamento, alteração remota de parâmetros contratuais, desligamento remoto e autorização do disjuntor local para religamento pelo cliente (por razões de segurança), sincronização de relógio dos nós da rede, gestão de alarmes de todos os nós da rede, atualização remota de *firmware* dos componentes de campo, detecção e prevenção de fraudes, suporte para os contratos pré-pagos, monitoramento da qualidade do fornecimento de serviço por cada cliente, balanços energéticos (comparação entre a energia fornecida por cada transformador de média tensão (MT) para baixa tensão (BT) e a energia total entregue aos clientes), disponibilidade, para uso do cliente, de informações sobre consumo de energia e questões técnico-comerciais.

Recentemente, a Enel anunciou que planeja deixar seu sistema aberto ao mercado, sendo que no final de 2010, a Endesa, concessionária da Espanha, iniciou um plano de

substituição de 13 milhões de medidores que deverá ocorrer ao longo de cinco anos e utilizará esse sistema (IDC ENERGY INSIGHTS, 2009).

3.2.2 PORTUGAL

Em novembro de 2006, os governos de Portugal e Espanha firmaram o Plano de compatibilização regulatória, pactuando um acordo sobre a necessidade de assegurar a plena compatibilidade regulatória entre os mercados de energia elétrica desses países, a fim de permitir o funcionamento do Mercado Ibérico de Energia Elétrica – MIBEL.

Em março de 2007, os governos de Espanha e Portugal decidiram pela introdução de medidores inteligentes como forma de melhorar o funcionamento de um mercado elétrico ibérico verdadeiramente integrado, prevendo a aprovação pelos dois governos de um calendário harmonizado de substituição dos medidores por outros que permitam a telemetria. Em seguida, o ERSE (Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos), órgão regulador, publicou sua proposta de um projeto piloto seguido de implantação de medição eletrônica entre 2010 e 2015 (ANEEL 2009).

Portugal apresenta como características um conjunto 6 milhões de consumidores que são atendidos por uma única concessionária de distribuição, a EDP – Energias de Portugal. O país tem um projeto piloto na cidade de Évora, que é a primeira metrópole portuguesa a implementar a Rede Elétrica Inteligente, objetivando constituir um exemplo de sustentabilidade para todo o País. A solução tecnológica da EDP para a Rede Elétrica Inteligente é denominada *InovGrid*, sendo dividida em três níveis (Figura 21):

- Nível baixo: o medidor é substituído por um *gateway* residencial inteligente (*Energy Box*), que realiza a medição, gerencia as cargas internas da unidade consumidora (automação residencial, além de controle de demanda e de microgeração) e faz a

suspensão e religação remota de fornecimento. Pode ainda ter seu *firmware* atualizado remotamente.

- Nível intermediário: possui um componente central de inteligência (*Distribution Transformer Controller*), alojado nas subestações MT/BT, que é responsável por gerenciar a comunicação com os *energy boxes*, gerir a energia distribuída e fornecer serviços (controle de estação de transformadores e detecção de falhas).
- Nível superior: composto pelos sistemas de informação centrais, que abrange a administração central, dados de energia e sistemas SCADA/DMS. Esses sistemas são responsáveis pelo apoio a atividades de operação e controle de distribuição, ordem de expedição, coleta de dados, balanceamento de energia, alarmes e monitoramento de rede.

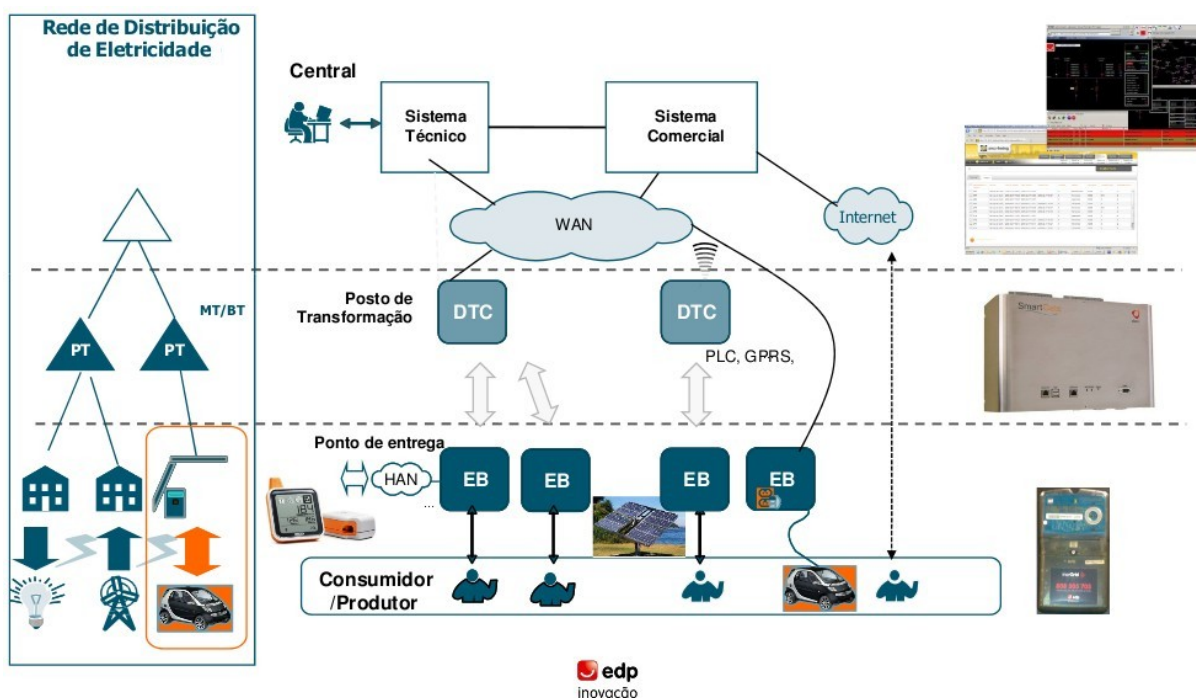


Figura 21 - Arquitetura do InovGrid.

Fonte: Adaptado de Gomes e Carrapatoso (2009).

3.2.3 ESPANHA

Em 2007, juntamente com Portugal, houve a decisão do governo de substituição de medidores de energia na Espanha, sendo que todos os medidores deverão ser trocados até o fim de 2018. Possui um cenário de 24 milhões de consumidores atendidos por inúmeras distribuidoras, sendo que a Endesa e a Iberdrola possuem 75% do mercado (ANEEL 2009).

A Endesa irá utilizar o sistema *Telegestore*, com um concentrador em cada centro de transformadores de baixa tensão, que irão gerir os medidores automaticamente e remotamente. A Iberdrola irá utilizar os padrões Prime PLC com DLMS/COSEM e está desenvolvendo um projeto piloto para validação das tecnologias (GREENTECH GRID, 2009).

O Prime PLC é uma especificação aberta e não proprietária que define as camadas inferiores de uma rede de comunicação por PLC (*Power Line Communication*) em banda estreita na parte de baixa tensão da rede elétrica, sendo voltada principalmente para medição eletrônica. Permite transmissões até 130 kbps, utilizando TCP/IP, modulação OFDM, com conexão mestre-escravo. Seu desenvolvimento iniciou no fim de 2007, sendo considerado um padrão imaturo pois ainda existem questões em relação aos testes de conformidade e não existem resultados de testes em operações no mundo real. Esse padrão não é interoperável com o IEC 61334-5 (Tecnologia PLC de banda estreita), de forma que ambos não podem coexistir no mesmo segmento de rede (PRIME ALLIANCE, 2010).

O DLMS/COSEM é um padrão internacional aberto para a comunicação de medidores eletrônicos. Foi desenvolvido no final da década de 1990 por concessionárias e fabricantes com o objetivo de proporcionar um meio para a troca de dados em um padrão interoperável, independente de fabricante e do tipo de energia medida, além de permitir uma série de padrões de comunicação nas camadas inferiores da rede. As funcionalidades dos medidores são mapeados para objetos COSEM (*Companion Specification for Energy Metering*), e o

DLMS (*Device Language Message Specification*) especifica os serviços e protocolos para fazer as mensagens que irão ser transportadas pelos canais de comunicação. É bastante flexível e escalável, havendo apenas alguns elementos obrigatórios que devem ser implementados, permitindo a construção de medidores simples ou complexos (DLMS UA, 2010).

3.2.4 FRANÇA

A ERDF (*Électricité Réseau Distribution France*) iniciou o projeto *Linky* (*Linky project*), em que a fase inicial foi realizada com a implantação de 300 mil medidores e as fases seguintes envolvem a substituição de 35 milhões de medidores até o fim de 2017.

Sua solução (Figura 22) utiliza PLC (IEC 61334) com interface DLMS/COSEM e Euridis (IEC 62056-31) para comunicação entre concentrador (cliente) e medidores (servidor). O concentrador é instalado em subestações MT/BT. A ERDF fornece as especificações técnicas utilizadas, que foram publicadas para demonstrar que o sistema é realmente público (ERDF, 2010).

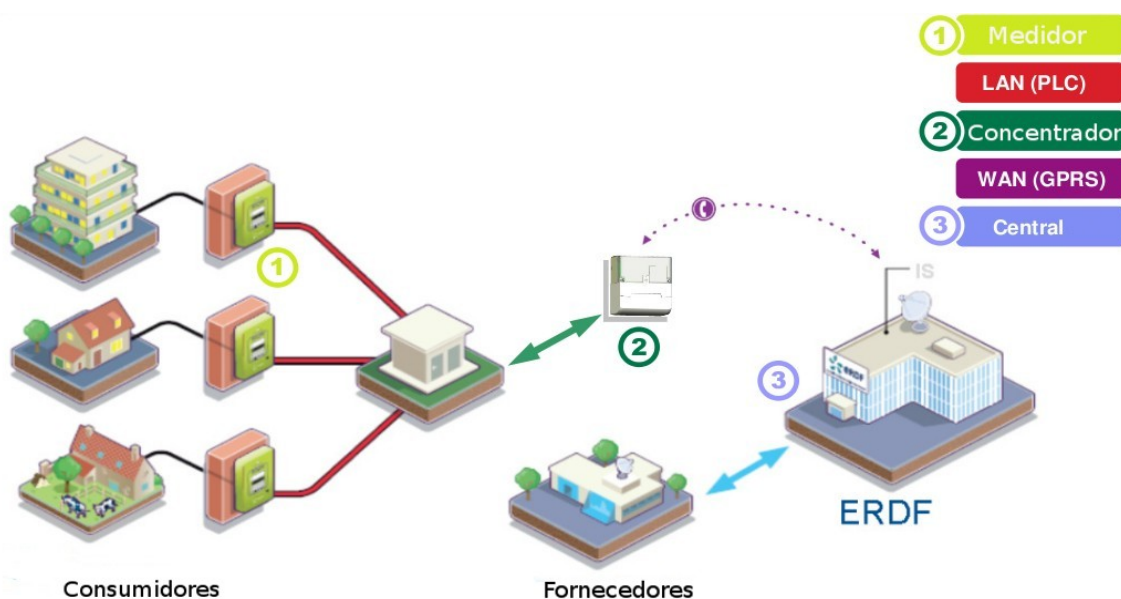


Figura 22 - Arquitetura do sistema Linky.

Fonte: Adaptado de Hirsch (2009).

Euridis (IEC 62056-31) é uma interface padronizada para leitura remota de medidores e controle de carga. Cria uma rede local, através de par-trançado, em que todos os medidores são conectados no barramento e através de um *gateway*, para PLC nesse caso, os mesmos são acessados por outros sistemas. É uma solução de baixo custo, que permite leitura e escrita com segurança e confiabilidade. Sua rede chega a distância de até 500 metros ou até 100 dispositivos, possuindo uma taxa de transmissão de 1200 Baud (EURIDIS, 2010).

3.3 CANADÁ

A implementação no Canadá dependerá de cada província, pois o sistema elétrico está sob jurisdição provincial. A partir de 2004, devido às dificuldades ocorridas em 2003 no atendimento energético da região de Ontário, o regulador da província (*Ontario Energy Board* - OEB) desenvolveu um plano que envolve a instalação de medidores inteligentes para todos os consumidores da província (ANEEL, 2009).

A Hydro One é uma concessionária de transmissão e distribuição da província que atende cerca de 1,3 milhões de consumidores e entre 2006 e 2008 substituiu mais 600 mil medidores de energia. Utiliza uma solução em mesh baseada no IEEE 802.15.4 para conexão de medidores e WiMAX ou GSM para comunicação com a distribuidora através do concentrador (Figura 23).

O Padrão IEEE 802.15.4 especifica a camada física e o MAC para *low-rate wireless personal area networks* (LR-WPAN). Foca em baixo custo e curta distância, atingindo entre 10 e 75 metros com 250 kbps, operando ainda em 20, 40 e 100 kbps. Tem suporte para tempo real, com o armazenamento de *slots* de tempo e anticolisão (CSMA/CA).

O WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) é uma tecnologia de acesso de banda larga sem fio (BWA – *Broadband Wireless Access*) baseada na série de padrões IEEE 802.16 com foco em WMAN (*Wireless Metropolitan Area*). É constituída de

estações base, que são dispositivos eletrônicos para ambientes fechados, e uma torre WiMAX. As velocidades de transmissão chegam até 75 Mbps e possui um alcance entre 5 e 7 quilômetros sem linha de visão direta, a até 50 quilômetros com linha de visão direta e antenas omni-direcionais. Se apresenta como uma tecnologia escalável, suportando um grande número de dispositivos e um grande número de mensagens, podendo cobrir grandes áreas geográficas em diferentes demografias, mas ainda é uma tecnologia emergente que está começando a ser aplicada em diversas áreas onde seu potencial começa a ser visualizado e seus custos começam a ser diminuídos.

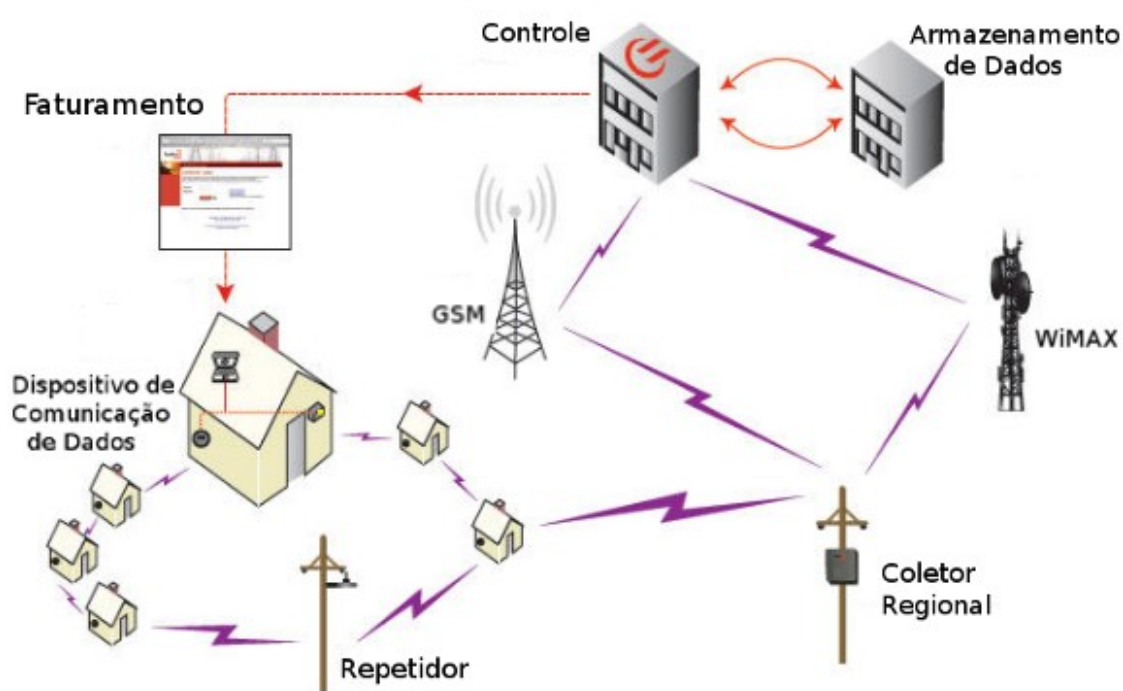


Figura 23 - Solução da Hydro One.

Fonte: Adaptado de Stevens (2010).

Além dessa iniciativa de substituição de medidores, em fevereiro de 2009, o estado de Ontario declarou o *Green Energy and Green Economy Act* (RENEWABLE ENERGY WORLD, 2009), que abrange uma série de políticas que buscam criar uma economia sustentável.

3.4 AUSTRÁLIA

O governo está comprometido com o desenvolvimento de programas e iniciativas para que os consumidores reduzam seu consumo e suas emissões. Entre essas iniciativas está o programa *Smart Grid, Smart City* (DEWHA, 2009), que prevê o desenvolvimento de um projeto piloto na cidade de Newcastle que sirva de modelo para o desenvolvimentos das Redes Elétricas Inteligentes no restante do país.

Esse projeto objetiva: (i) otimizar os benefícios sociais, priorizando aplicações; (ii) realizar uma implantação em escala comercial que teste casos de negócios e as principais tecnologias; (iii) investigar as possíveis interações e colaborações com outros programas do governo e projetos de infraestruturas; (iv) construir uma consciência dos benefícios e obter opiniões dos consumidores; (v) identificar e superar possíveis barreiras; (vi) demonstrar a adoção das tecnologias; (vii) desenvolver uma solução inovadora que possa servir como um caso de referência global.

A região de implementação inclui áreas urbanas, suburbanas e rurais, com diversidades geográficas, de redes, climáticas e características dos clientes. O sistema desenvolvido foca principalmente nos segmentos de distribuição e consumo, embora transmissão e geração também sejam afetadas.

Mostradores residenciais devem permitir aos consumidores controlarem a sua utilização de eletricidade, através da programação e gestão de equipamentos inteligentes, como condicionadores de ar ou aquecimento. Aplicações de detecção de falhas também serão testadas e o monitoramento automático buscará gerenciar interrupções e identificar componentes que necessitem de manutenção.

Há ainda o projeto *Smart Grid Austrália* (SGA, 2011), desenvolvido por uma aliança apartidária e sem fins lucrativos dedicada a modernização do sistema elétrico. Esse projeto visa a educação, informação e a liderança em debates para garantir que consumidores, o

governo e empresas entendam as soluções, benefícios e possibilidades da Rede Elétrica Inteligente, já tendo realizado alguns eventos e divulgado alguns documentos.

3.5 CORÉIA DO SUL

Em 2009 foi criado o *Korea Smart Grid Institute*, com o objetivo de gerenciar as iniciativas em relação à Rede Elétrica Inteligente do país.

O instituto desenvolveu um plano de implementação da rede que abrange cinco setores da área de energia (KSGL, 2010). O primeiro setor visa construir uma rede de energia capaz de permitir vários tipos de interconexões entre fontes de consumo e fontes de geração de energia. O segundo objetiva incentivar a economia de energia de consumidores através de informações em tempo real e a criação de eletrodomésticos inteligentes, que operem em resposta ao custo da energia. O terceiro definirá uma infra-estrutura que permitirá que veículos elétricos sejam recarregados em qualquer lugar, além de usá-los para armazenamento e uso de energia nos horários de pico. O quarto pretende implementar a geração distribuída em larga escala, explorando o conceito de microrredes. Por fim, o quinto trata dos serviços de eletricidade, modelos de negócios e precificação dinâmica.

Esse plano também prevê a implementação de um local de testes na ilha Jeju (185 km²), que será o maior cenário de testes nesse sentido do mundo e permitirá o uso e avaliação de diferentes tecnologias, proporcionando diversos resultados de pesquisa e desenvolvimento, bem como a criação de variados modelos de negócios. Além disso, diversos outros projetos que visam a criação de sistemas para gestão de energia, automação e controle de subestações, adoção da tecnologia de PLC e equipamentos de monitoramento da rede estão em desenvolvimento nesse instituto.

3.6 CHINA

O consumo de eletricidade da China tem crescido a um ritmo sem precedentes, devido ao rápido crescimento do país, o que exige do país investimentos agressivos no fornecimento de eletricidade, a fim de atender a demanda industrial e garantir o crescimento econômico (LI, 2009).

Devido às características desse país, o foco não está na integração de energias renováveis distribuídas em larga escala, mas sim na transferência mais eficiente de grandes quantidades de energia, focando principalmente na transmissão de energia e posteriormente e de forma gradual, na distribuição e consumo. Em maio de 2009, o país anunciou um plano dividido em três fases para o desenvolvimento de sua Rede Elétrica Inteligente:

- Planejamento e testes: estabelecer um plano de desenvolvimento, criar normas técnicas e operacionais, desenvolver tecnologias e equipamentos, realizar testes e avaliações.
- Construção e desenvolvimento: construir as redes urbanas e rurais, estabelecendo a estrutura básica para o funcionamento e interação do sistema.
- Revisão e atualização: completar a rede com tecnologias e equipamentos mais avançados.

3.7 BRASIL

Devido a sua matriz energética ser proveniente principalmente de recursos hídricos, a situação do Brasil é bastante diferente de outros países, que possuem uma alta dependência de combustíveis fósseis para geração de energia e necessitam tanto diminuir sua emissão de carbono, como sua dependência de petróleo estrangeiro.

Ainda, a demanda por energia no país cresce a um ritmo controlável e o foco está em principalmente diminuir as perdas comerciais do setor e acompanhar o desenvolvimento

tecnológico de outros países para não gerar uma dependência tecnológica no futuro. As principais iniciativas serão descritas a seguir.

3.7.1 ANEEL

A ANEEL, agência reguladora do país, acredita que é necessário sua intervenção para coordenar esse processo de migração tecnológica, que é inevitável, devido a modernização que já vem ocorrendo em diversos outros países, através de regulamentações tarifárias, no combate às perdas, na melhor qualidade do serviço prestado e na necessidade de preparar a rede de energia para o futuro.

Por exemplo, mesmo sem a regulamentação específica para o uso da medição eletrônica, as distribuidoras, por opção estratégica empresarial, podem usar essa tecnologia assumindo a iniciativa da implantação. Porém, iniciativas isoladas tendem a ser limitadas, pois tentam solucionar problemas pontuais e trazem apenas benefícios parciais aos consumidores, além de que os custos desses sistemas são relativamente mais altos, limitando seu uso. Além disso, essas iniciativas possuem um risco muito alto por não serem amparadas por uma regulamentação específica. Por exemplo, a partir de 2006, a Ampla, distribuidora do Rio de Janeiro, iniciou alguns testes com o serviço pré-pago de energia, como uma medida para reduzir a inadimplência de consumidores de baixa renda, que teriam uma maneira mais flexível de comprar energia, adequando seu consumo à sua renda, semelhante ao que acontece com alguns planos da telefonia celular. Porém, alguns consumidores entraram na justiça quando tiveram seu fornecimento interrompido, sendo apoiados por órgãos de defesa do consumidor (LEITE, 2011).

Assim, a agência busca identificar as necessidades para promover o desenvolvimento sustentável das Redes Elétricas Inteligentes no Brasil. Esse processo iniciou em Setembro de 2008, através de um seminário internacional sobre medição eletrônica, que objetivou

estimular a discussão sobre a implantação de medição eletrônica em unidades consumidoras de baixa tensão.

Em 2009, a agência realizou duas missões técnicas, uma para visitar Portugal, Espanha e Itália e outra para visitar os Estados Unidos, com o objetivo de conhecer e acompanhar as experiências desses países na implantação de medição inteligente. A agência também participou de diversas reuniões com fabricantes de medidores e sua associação, provedores de tecnologia, distribuidoras, INMETRO e demais agentes envolvidos no tema, com o objetivo de discutir aspectos relacionados à implantação dessa tecnologia no país.

Em 2009, a agência realizou a consulta pública 015/2009, em relação à definição do novo padrão do medidor eletrônico de eletricidade para unidades consumidoras do Grupo B. Essa consulta teve o objetivo de orientar discussões a respeito de tópicos específicos sobre esse tema. Em 2010, foi realizada a audiência pública 043/2010, que teve o objetivo de definir as funcionalidades mínimas desse novo padrão do medidor. Também realizou a consulta pública 011/2010, que objetivou obter subsídios e informações adicionais sobre a alteração da metodologia de definição da estrutura tarifária aplicada ao setor de distribuição referentes aos sinais de preço e tarifação em baixa tensão e a audiência pública 120/2010 objetivando obter subsídios e informações adicionais referentes à alteração da Estrutura Tarifária aplicada ao setor de distribuição de energia elétrica no Brasil.

A ANEEL também realizou em 2010 a consulta pública 015/2010, objetivando apresentar os principais instrumentos regulatórios utilizados no Brasil e em outros países para incentivar a geração distribuída de pequeno porte, a partir de fontes renováveis de energia, conectada na rede de distribuição e receber contribuições dos agentes interessados e sociedade em geral sobre as questões que o regulador deve enfrentar para reduzir as barreiras existentes. A seguir é descrito algumas questões que estão sendo tratadas pela ANEEL.

3.7.1.1 ESTRUTURAÇÃO TARIFÁRIA

Para o caso particular da distribuição de energia elétrica, define-se estrutura tarifária como o mecanismo de diferenciação de preços cobrados pelo uso das redes distribuição aos diferentes tipos de consumidores ou mercados existentes em uma área de concessão deste serviço, independentemente da receita requerida da empresa distribuidora (EL HAGE; FERRAZ; DELGADO, 2011).

Atualmente, a estrutura tarifária está dividida em vertical e horizontal. Vertical diferencia os preços pelos níveis de tensão, porque a energia chega até os centros urbanos em um nível elevado de tensão, sendo necessário adequar a energia ao nível exigido e há uma série de custos associados à essa adequação, de forma que aqueles que necessitam de um nível de tensão mais baixo, pagam mais. Horizontal diferencia o custo da energia em períodos diários (ponta e fora de ponta) e sazonais (seco e úmido), porque em períodos de alta demanda é necessário expandir o sistema, enquanto que em horários de baixa demanda é necessário apenas operá-lo e em períodos de seca, há a diminuição da quantidade de água dos reservatórios e a necessidade de complementação por geração térmica, que é mais cara.

Assim, as tarifas de energia elétrica estão estruturadas em dois grandes grupos de consumidores, o grupo A e o grupo B (ANEEL, 2005), demonstrados na Figura 24.

As tarifas do grupo A são para consumidores atendidos pela rede de alta e média tensão de 2,3 a 230 kV, sendo divididos de acordo com a tensão de fornecimento: (i) A1 para o nível acima de 230kV; (ii) A2 para o nível entre 88 a 138kV; (ii) A3 para o nível de 69kV; (ii) A3a para o nível entre 30 a 44kV; (ii) A4 para o nível entre 2,3 a 25kV; (ii) AS para o sistema subterrâneo.

As tarifas do grupo B são para consumidores atendidos em tensão inferior a 2,3kV, sendo divididos em: (i) B1 para a classe residencial e subclasse residencial de baixa renda; (ii)

B2 para a classe rural; (iii) B3 para outras classes (industrial, comercial, serviços, serviço e poder público); (iv) B4 para iluminação pública.

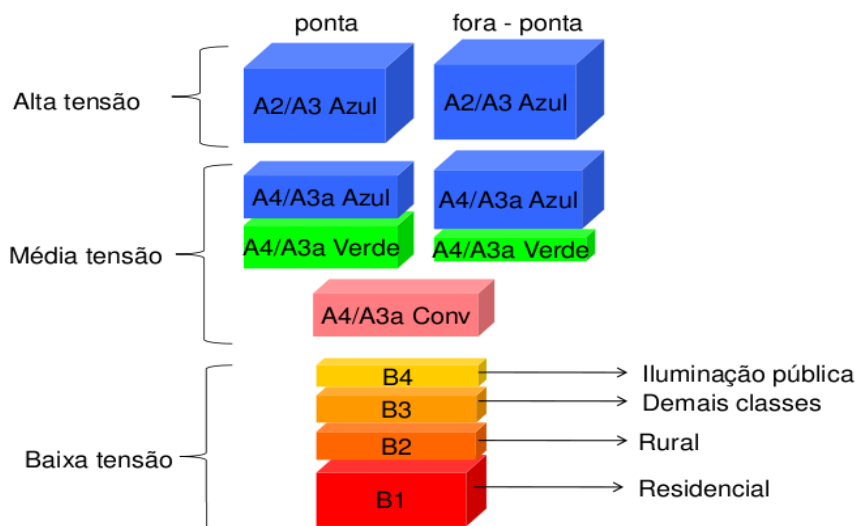


Figura 24 - Grupos de consumidores.

Fonte: El Hage e Machado (2011).

As tarifas para o grupo B são estabelecidas somente para o componente de consumo de energia, em reais por megawatt-hora, considerando que o custo de demanda de potência já está incorporado ao custo de fornecimento. Já as tarifas para o grupo A são construídas em duas modalidades (Figura 25):

- Convencional: aplicação de tarifas independentemente da hora de utilização do dia e dos períodos do ano. Apresenta um valor para a demanda de potência (demanda máxima verificada ao longo do mês) em reais por quilowatt e outro para o consumo de energia em reais por megawatt-hora. O consumidor atendido em alta tensão pode optar por essa modalidade se atendido em tensão abaixo de 69kV e com contrato de potência inferior a 300kW.
- Horo-sazonal: aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e demanda de potência de acordo com a hora de utilização do dia e o período do ano. Para as horas do dia são estabelecidos dois períodos, denominados postos tarifários. O

posto de ponta corresponde ao período de maior consumo, que ocorre entre as 18 e 21 horas do dia, enquanto que o posto fora de ponta compreende as demais horas do dia e as 24 horas dos sábados, domingos e feriados. Para os períodos do ano, são estabelecidos dois períodos. O período seco é quando a incidência de chuvas é menor, enquanto que o período úmido é quando é maior o volume de chuvas, compreendendo o período entre os meses de Dezembro a Abril. Essa modalidade possui ainda dois tipos de tarifas:

- Tarifa horo-sazonal azul: obrigatório para consumidores com tensão de fornecimento igual ou superior a 69kV. A tarifa é composta de um valor referente ao consumo de energia, levando em consideração posto e período do ano e um valor horário (ponta e fora de ponta) para a demanda de potência.
- Tarifa horo-sazonal verde: a tarifa é composta de um valor referente ao consumo de energia, levando em consideração posto e período do ano e um valor único de demanda de potência.

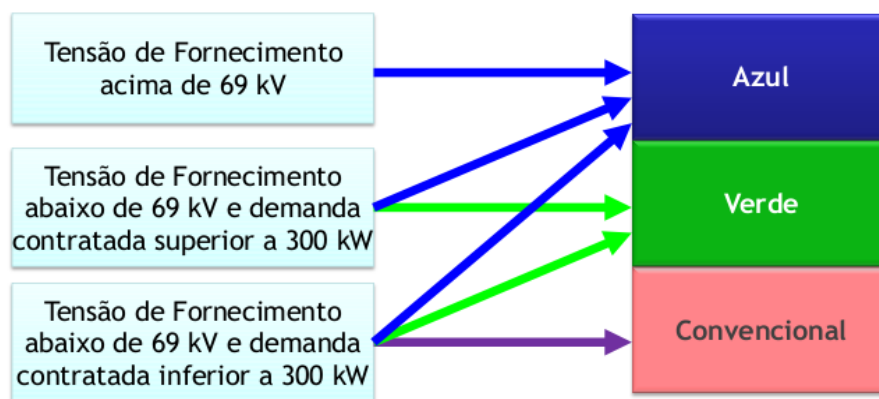


Figura 25 - Modalidades de tarifas para o grupo A.

Fonte: El Hage e Machado (2011).

Na chamada pública 008/2008 a ANEEL indicou a necessidade de atualização da estrutura tarifária vigente no país. A atual base metodológica foi concebida nos anos 80,

estando desatualizada e possuindo incentivos que levam os consumidores a um comportamento que não parece minimizar custos e otimizar a utilização do sistema.

Por exemplo, os consumidores do grupo A alteram seu consumo de energia no horário de ponta, seja desligando equipamentos ou conectando os mesmos a geradores próprios. Por outro lado, os consumidores do grupo B, por não receberem qualquer tipo de incentivo, geram uma alta demanda de energia no horário de ponta, o que tem um impacto significativo no sistema como um todo, conforme mostra a Figura 26, referente aos dados médios de fornecimento em dias úteis de uma distribuidora. Assim, ao longo desses últimos anos a agência vem estudando uma nova estrutura tarifária para o país.

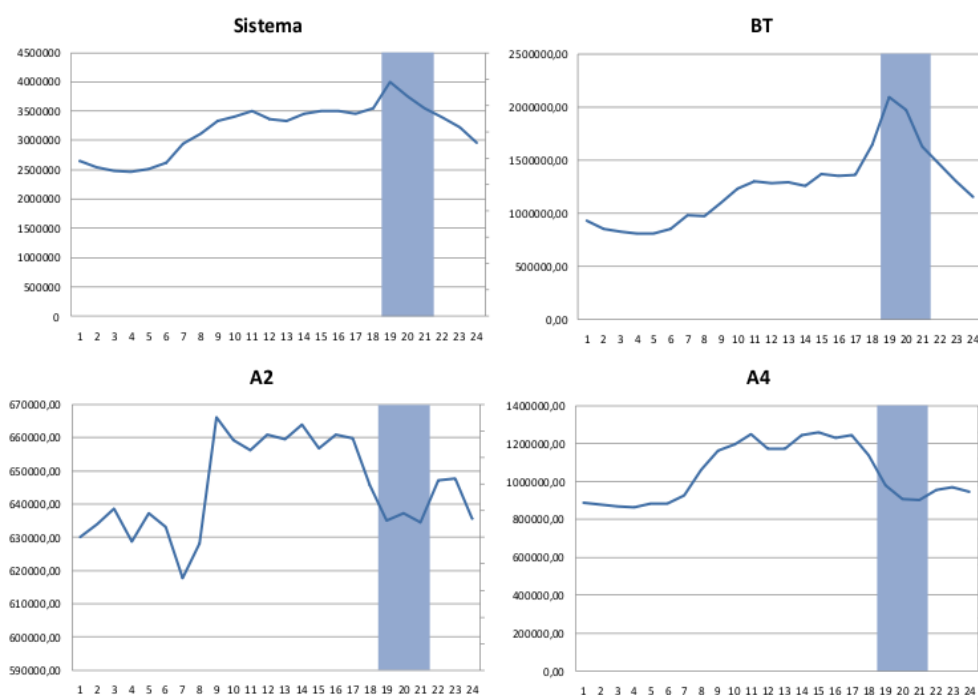


Figura 26 - Dados médios de fornecimento em dias úteis de uma distribuidora.

Fonte: El Hage e Machado (2011).

Na audiência pública 120/2010 a ANEEL propôs algumas mudanças na estrutura tarifária atual, sendo que uma das principais mudanças é a introdução de uma tarifa horária aplicada ao grupo B, denominada tarifa Branca (Figura 27), com as seguintes características:

- modalidade com três preços distintos (ponta, com duração de 3 horas, intermediário, com duração de 2 horas e fora de ponta);
- relação ponta/fora de ponta de 5;
- relação intermediário/fora de ponta de 3;
- relação tarifa fora de ponta/convencional (Kz) a ser estabelecida em revisão tarifária futura;
- opcional para B1 com mais de 200kWh/mês e obrigatória para B1 com mais de 500kWh/mês;
- opcional para B3, mas obrigatória para B3 com mais de 2000kWh/mês;
- horário de pico no período entre 18h às 21h, podendo ser alterado por cada distribuidora desde que aprovado pela ANEEL;
- implantação de acordo com o plano de substituição de medidores.

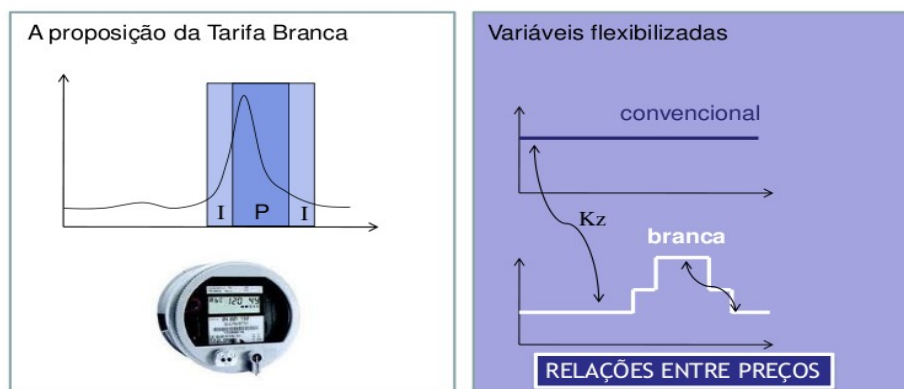


Figura 27 - Tarifa Branca.

Fonte: El Hage e Machado (2011).

Há ainda uma forte tendência da implantação de energia pré-paga, similar ao que acontece com a telefonia móvel, com o objetivo de: (i) reduzir a inadimplência; (ii) aumentar a eficiência energética (gerenciamento do próprio consumidor); (iii) reduzir perdas comerciais; (iv) oferecer uma nova opção para todos os consumidores (por exemplo, para casas de veraneio). Porém, ainda restam uma série de desafios nesse sentido e esse aspecto tarifário deverá ser tratado futuramente.

3.7.1.2 MEDIÇÃO ELETRÔNICA

A proposta de resolução da ANEEL propôs definir um conjunto mínimo de funcionalidades exigidas, como grandezas medidas, funcionalidades mínimas, comunicação do medidor e informações ao consumidor, sendo que poderão ser implementadas funcionalidades mais complexas a critério dos fabricantes.

Ainda, os novos equipamentos deverão apurar a tensão de fornecimento, energia elétrica ativa e reativa indutiva consumidas, além de registrar o número e o tempo das interrupções para cálculo dos indicadores individuais de qualidade (DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora), além de apuração de duração de transgressão de tensão (DRP – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária, DRC – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica).

Ainda, deve haver capacidade de aplicação de tarifas diferenciais, no mínimo, em 4 postos horários, devendo ser programáveis o início e o fim de cada posto. O novo medidor também deverá permitir a comunicação remota entre medidor e distribuidora para monitoramento e controle remoto dos parâmetros associados às grandezas medidas e funcionalidades complementares do sistema de medição, além de capacidade remota de suspensão e religação de fornecimento.

Os equipamentos devem ter a capacidade para comunicação bidirecional, sendo que o meio de comunicação escolhido fica a critério da distribuidora. A ANEEL tem a expectativa que a regulamentação defina que os protocolos adotados sejam somente públicos. A proposta também abrange a possibilidade que o aparelho possibilite a visualização pelo consumidor do montante de energia consumida e informações sobre continuidade do fornecimento. A

informação deve estar disponível através de mostrador no medidor ou em outro dispositivo na unidade consumidora caso a medição seja centralizada.

A resolução se aplica ao atendimento de unidades consumidoras do Grupo B, classificadas no subgrupo B1 Residencial (excluindo o grupo de baixa renda) e no subgrupo B3 Comercial e Industrial. Isso representa um universo de aproximadamente 41 milhões de unidades consumidoras, sendo que para os outros subgrupos (B1 Residencial Baixa Renda e B2 Rural) a implementação desses medidores ficam a critério da distribuidora.

A ANEEL considera que o custos em funções de adequações nos padrões de medição não deverão ser repassados aos consumidores. Ressalta ainda, que as perdas associadas ao funcionamento do sistema de medição, decorrentes do consumo do medidor e sistema de comunicação deverão ser consideradas como perdas técnicas da distribuidora. Recomenda que recursos provenientes de programas de pesquisa e desenvolvimento e eficiência energética sejam utilizados em estudos e na implantação do sistema de telemedição.

Ainda, a possível diminuição do valor de vida útil dos medidores (definição de taxas de depreciação de medidores, concentradores e comparador/fiscal) e condições de pré-pagamento serão tratados em processos futuros. A ANEEL também estuda a possibilidade do medidor registrar a energia gerada, de demanda ativa e reativa, além necessidade da adoção de um protocolo único de comunicação. Após a definição do padrão do novo medidor de energia, a ANEEL deve iniciar a discussão para o plano de substituição de medidores.

3.7.1.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Há um entendimento por parte da ANEEL que a geração distribuída de pequeno porte deve ser caracterizada por meio da potência instalada, fonte primária de energia, nível de tensão e a localização da planta.

O PRODIST no módulo 3 trata de questões relativas ao uso e conexão à rede de distribuição, enquanto que o módulo 5 trata de requisitos para a medição. Em ambos os

módulos deve ser incluído seções para tratar do acesso de geradores de pequeno porte, de forma a padronizar a conexão e aceso e servir de referência para que as distribuidoras elaborem normas técnicas.

Ainda não existem requisitos mínimos para a conexão de geradores de pequeno porte, sendo necessário que a ANEEL defina critérios para garantir a qualidade da energia, a segurança das pessoas e equipamentos. Além disso, é necessário criar procedimentos para a avaliação dos projetos e instalações desses geradores, que deverão ainda ser classificados com base em parâmetros de tensão, potência, fonte.

Atualmente, há sérios problemas em relação à forma de contabilização e comercialização da energia produzida por geradores de pequeno porte. A dificuldade reside principalmente na adoção das mesmas regras para usinas de portes diferentes, o que resulta em prejuízo para as plantas de menor porte.

Na prática, a principal barreira no país reside na falta de regulamentos específicos para geração distribuída, com tratamento de questões sobre conexão, medição, contratação de energia. Alguns desses regulamentos podem ser tratados dentro de resoluções e procedimentos emitidos pela ANEEL, mas diversas outras questões só podem ser tratadas pelo MME, por tratarem de políticas públicas que deverão ser tratadas pelo ministério (LOPES, 2011).

3.7.2 DISTRIBUIDORAS

Paralelamente, várias distribuidoras estão desenvolvendo projetos que visam a implementação de funcionalidades da Rede Elétrica Inteligente, principalmente aspectos relacionados à medição eletrônica. A seguir é apresentado algumas dessas iniciativas.

3.7.2.1 Copel

A Copel está desenvolvendo o projeto Cidade do Futuro, em Fazenda Rio Grande, Paraná, objetivando: (i) criar um modelo para avaliação detalhada dos benefícios e retorno de investimento da Rede Elétrica Inteligente; (ii) aplicar imediatamente as novas tecnologias; (iii) criar um campo de testes para equipamentos e soluções de fornecedores; (iv) criar um local para a geração e aplicação de pesquisas e desenvolvimentos com recursos da Copel (PARIS, 2010).

A distribuidora detectou um conjunto de 100 tecnologias aplicáveis, sendo que 18 estão em teste nesse projeto, dessas, 6 são apenas para a comunicação da última milha. Paralelamente a distribuidora já implementou mais de 16000 km de fibras ópticas, que atendem 228 cidades, o que formará a estrutura de comunicação da rede da distribuidora. Ainda, prepara a cidade de Curitiba para ser a primeira capital do país com táxis elétricos.

3.7.2.2 CEMIG

A CEMIG está desenvolvendo um projeto piloto denominado Cidades do Futuro, na cidade de Sete Lagoas em Minas Gerais, buscando: (i) validar, em escala adequada e representativa, os produtos, serviços e soluções inovadoras aderentes à Rede Elétrica Inteligente; (ii) analisar a viabilidade técnica e econômica da cadeia de valor dessa rede; (iii) provar o conceito visando a elaboração de um modelo de referência para a implantação da rede; (iv) criar uma massa crítica envolvendo os diversos agentes do setor.

O projeto possui as seguintes áreas de atuação: (i) AMI; (ii) automação de redes; (iii) automação de sistemas de energia; (iv) telecomunicações; (v) integração de sistemas; (vi) geração distribuída, microgeração, *home area networks*, veículos elétricos; (vii) métricas, comunicação e relacionamento com partes interessadas. O estado atual de desenvolvimento do projeto é demonstrado na Figura 28.



Figura 28 - Estágio de desenvolvimento do projeto da CEMIG.

Fonte: Souza (2011).

3.7.2.3 AES Eletropaulo

A AES Eletropaulo está desenvolvendo um projeto piloto no bairro Ipiranga em São Paulo, junto a um alimentador de 13,8kV com uma extensão de 4,38 km e cerca de 1800 clientes, integrando soluções de automação, auto-recuperação, detecção de falhas, controle de carga e medição remota. A arquitetura do sistema é demonstrada na Figura 29.

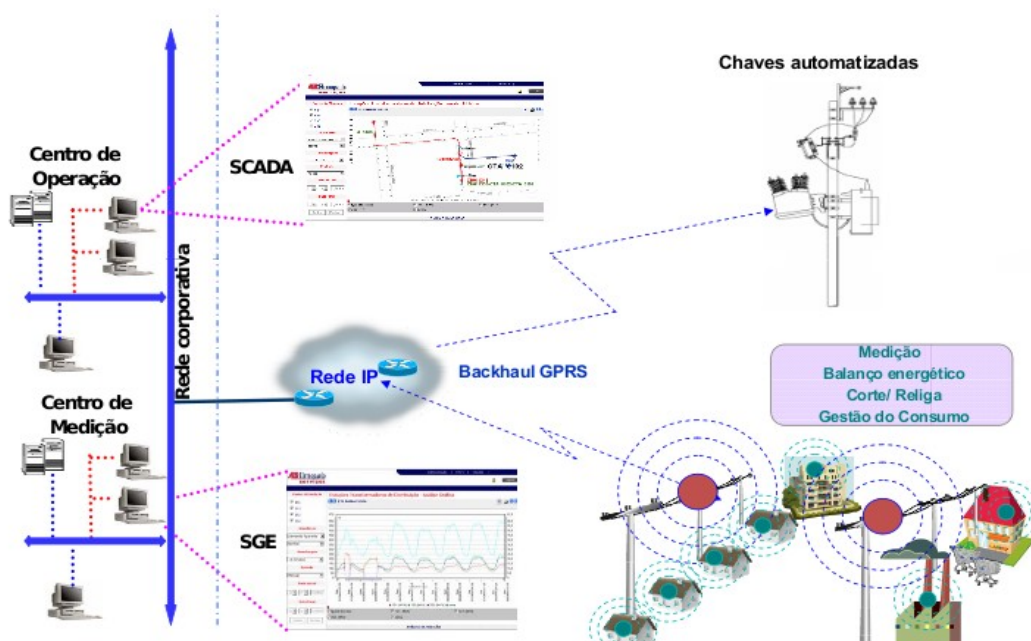


Figura 29 - Arquitetura do sistema da AES Eletropaulo.

Fonte: Erven (2010).

3.7.2.4 Empresas de Distribuição da Eletrobrás

A Eletrobrás abrange as empresas: (i) Amazonas Energia; (ii) Distribuição Roraima; (iii) Distribuição Alagoas; (iv) Distribuição Piauí; (v) Distribuição Rondônia; (vi) Distribuição Acre.

Possui níveis elevados de perdas não técnicas, além de grandes restrições em relação à manutenção do sistema, principalmente devido ao tempo de deslocamento necessário em algumas regiões do norte do país, necessitando do aprimoramento dos métodos, procedimentos e instrumentos dedicados à monitoração, controle e faturamento.

Possui iniciativas de modernização de sua rede, buscando acrescentar as seguintes funcionalidades: (i) atuação remota de medição, corte e religação; (ii) aplicação de tarifas horo-sazonais na BT e tarifa de pré-pagamento; (iii) análise do diagrama fasorial; (iv) balanço energético e detecção de irregularidades; (v) funções de qualidade de energia; (vi) controle e gestão de forma centralizada no Centro de Inteligência de Medição (Figura 30).

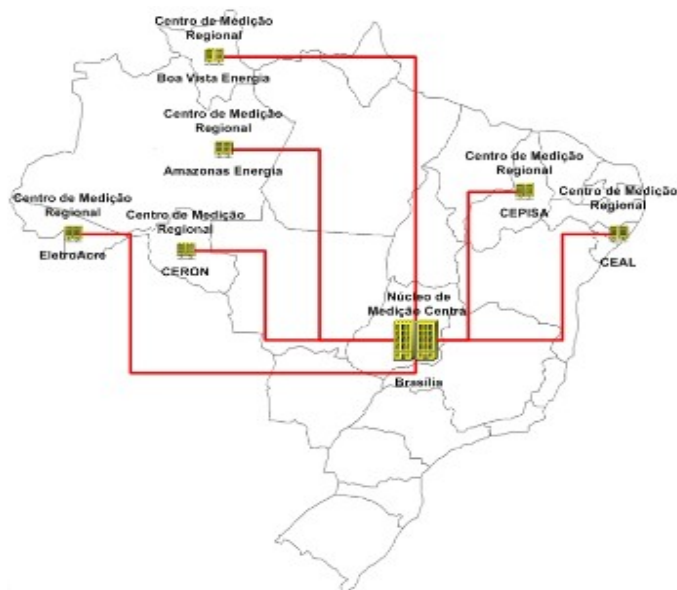


Figura 30 - Centro de Inteligência de Medição.

Fonte: Arruda (2010).

3.7.2.5 AMPLA

A Resolução Autorizativa ANEEL 391 – Dez/2005 , autorizou a Ampla a implantar um sistema de pré-pagamento em caráter experimental. Este sistema permite que o cliente compre a energia antecipadamente, sendo exigido uma primeira habilitação de R\$ 15,00 e as demais compras podem ser feitas com o valor mínimo de R\$ 10,00, sendo que o produto é vendido “porta a porta” pela equipe de Recuperação de Mercado.

O projeto espera diminuir o número de clientes inadimplentes (a grande massa de clientes desse sistema já tiveram histórico de furto com a empresa e são inadimplentes em potencial). Para “recarregar” os créditos, o cliente tem que ir a uma agência para retirar o boleto e efetuar o pagamento em um banco ou nos pontos de arrecadação da Ampla. O produto foi disponibilizado inicialmente no município de São Gonçalo-RJ e desde sua implantação até outubro de 2006 teve a adesão de 244 clientes.

Os resultados iniciais (LEITE, 2011), mostram que a falta de informação do sistema gerou uma série de dúvidas e inseguranças: (i) receio por parte dos consumidores, de terem a

energia cortada e não terem dinheiro para comprar mais créditos; (ii) dificuldade de previsão de um maior uso em situações pontuais, como festas ou uso de equipamentos específicos; (iii) ocorrência de cortes equivocados por parte da distribuidora; (iv) dificuldades dos clientes para uso do produto e do equipamento que fornece informações do sistema. Os resultados ainda mostram que o valor de compra mensal é em média de R\$ 32,00, sendo que a quantidade média de compras é de 1,2 vezes.

Ainda, o projeto enfrentou inúmeras críticas e resistências principalmente dos órgãos de defesa do consumidor que enxergavam o projeto como um meio da distribuidora efetuar com muita facilidade a suspensão imediata de um serviço público essencial para população.

As principais conclusões do projeto ressaltam que: (i) há a necessidade de uma legislação específica para o tema do pré-pago; (ii) há a necessidade de blindar o medidor de forma a evitar irregularidades na medição; (iii) existe uma ausência de um incentivo de preço que estimule o consumidor a aderir ao pré-pagamento.

3.7.3 OUTRAS INICIATIVAS

3.7.3.1 ANATEL

A ANATEL, agência reguladora do setor de telecomunicações regulamentou em 2009 o uso de PLC para comunicações. Dessa forma as distribuidoras podem utilizar a tecnologia para atividades relacionadas à distribuição de energia elétrica, como a incorporação dos serviços de telemedição, corte e religamento à distância, supervisão do fornecimento e da qualidade da energia, controle das perdas técnicas e comerciais e monitoramento remoto das redes elétricas.

3.7.3.2 MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

O Ministério de Minas e Energia criou um grupo de trabalho (portaria MME 440/2010), com o objetivo de analisar e identificar ações necessárias para subsidiar o estabelecimento de políticas públicas para a implantação de um Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente. Esse grupo conta com a participação do MME, EPE, CEPEL, ONS e ANEEL e deve abordar aspectos em relação ao estado da arte de programas de Rede Elétricas Inteligentes, proposta de adequação de regulamentos no âmbito da distribuição, identificação de fontes de recursos para financiamento e incentivos à produção de equipamentos no país e regulamentação de novas possibilidades de atuação de agentes do setor.

3.7.3.3 FINEP

Em relação ao armazenamento de energia, em 2010, na seleção pública MCT/FINEP/FNDCT - Subvenção Econômica à Inovação – 01/2010, um fabricante nacional de baterias automotivas submeteu, e foi classificado para a etapa final (homologação), um projeto de pesquisa para o desenvolvimento nacional de baterias para veículos automotores elétricos e/ou híbridos. O investimento necessário nessa pesquisa é de aproximadamente 29 milhões de reais, sendo que 19 milhões são a contrapartida da empresa (FINEP, 2011).

4 ANÁLISE DO ESTADO DA ARTE

Conforme demonstrado nos capítulos anteriores, a medição eletrônica é uma das principais ferramentas que permitirão a implementação das várias funcionalidades da Rede Elétrica Inteligente, já sendo uma realidade em alguns países, enquanto que em outros existe um grande esforço para que isso se torne rapidamente uma realidade.

Com sua implementação, mecanismos que incentivem uma maior conscientização dos consumidores em relação ao seu uso de energia e permitam sua participação ativa no mercado de energia logo se tornarão realidade. Nesse sentido, há uma forte tendência de modificação na estrutura tarifária, através da introdução de outras opções aos consumidores, e a exigência de ferramentas que facilitem o seu acesso e permitam uma fácil interação com a Rede Elétrica Inteligente.

Assim, a seguir são apresentados os diferentes métodos utilizados para tarifação e alguns trabalhos relevantes que propõem ferramentas de auxílio aos consumidores nesse cenário. A análise dessas diferentes abordagens e dos diferentes cenários de tarifação permitiu a construção do *framework* proposto.

4.1 MÉTODOS PARA A TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Diferentes métodos podem ser utilizados para definir a tarifação de energia elétrica, cada qual com uma diferente relação de ganhos e riscos para os consumidores (Figura 31):

- Tarifa fixa: tarifa fixa independente da quantidade e período de uso.
- *Inclining Block Rate* (IBR): o valor da tarifa possui um valor fixo, sendo alterado para outro a partir de um determinado limite de consumo de energia. Por exemplo, a distribuidora BC Hydro (British Columbia/Canadá) cobra dos consumidores de baixa tensão um valor de C\$ 0.0667 por kWh pelos primeiros 1350kWh e C\$ 0.0962 por

kWh pelos kWh adicionais, considerando um período bimestral para faturamento (Figura 32).

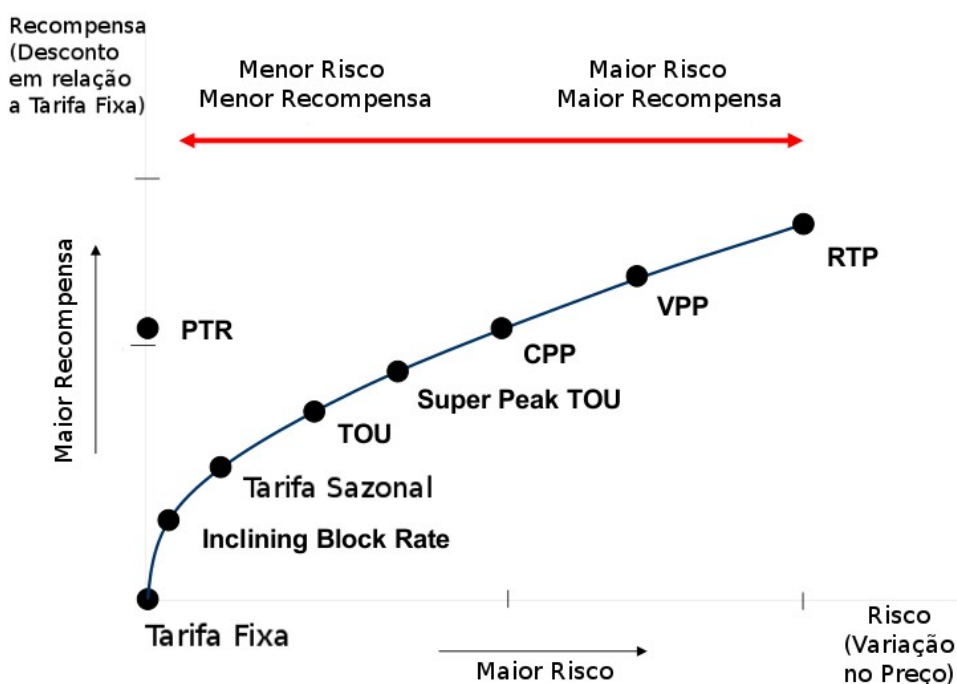


Figura 31 - Possibilidades de tarifação.

Fonte: Adaptado de Faruqi (2010a).

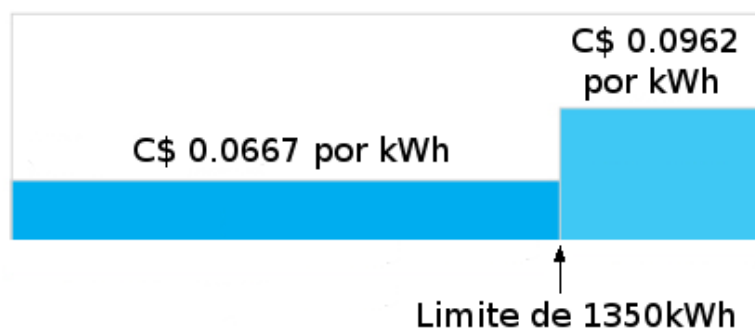


Figura 32 - Exemplo de tarifa IBR.

Fonte: Adaptado de BC Hydro (2011).

- Tarifa sazonal: o valor da tarifa muda de acordo com a época do ano, devido principalmente à diferenças climáticas, que alteram a demanda de energia, sendo que em alguns países há também alteração nos custos de geração.

- *Time Of Use (TOU)*: o valor da tarifa assume diferentes valores em diferentes períodos do dia. A tabela de preços em função dos períodos é fixa, sendo conhecida por todos com antecedência. Esse modelo é o que será utilizado na Tarifa Branca proposta pela ANEEL, conforme visto no capítulo anterior, na seção 3.7.1.1.
- *Peak Time Rebate (PTR)*: é estimado um valor de referência para o consumo de cada consumidor e caso o consumo no horário de ponta for menor que o valor de referência, os mesmos recebem um pagamento de incentivo. Geralmente é aplicada em apenas alguns dias específicos do ano, sendo que nos outros dias é utilizado um outro modelo. A distribuidora We Energies (Wisconsin/U.S.) implementa essa tarifa, calculando o valor de referência de acordo com a média no horário de pico das três semanas anteriores, pagando US\$ 0,47 para cada kWh abaixo da referência, sendo que o valor financeiro recebido pelos consumidores pode ser utilizado em qualquer operação financeira que aceite cartões de crédito. Geralmente o horário de pico abrange 4 horas do dia, sendo que essa tarifa é utilizada no máximo 25 vezes durante o verão, comunicando os clientes no dia anterior a aplicação dessa tarifa (WE ENERGIES, 2011).
- *Super Peak TOU*: durante algum período do ano, a tarifa assume um valor mais elevado do que o usual nos horários de pico, sendo utilizada geralmente durante o verão, quando o consumo é maior.
- *Critical Peak Pricing (CPP)*: a tarifa assume um valor bem elevado para algumas horas do dia em alguns dias específicos do ano (Figura 33). Os preços tendem a ser de 3 a 10 vezes maiores nesses períodos e os consumidores são avisados geralmente com um dia de antecedência. É tipicamente combinada com a tarifa TOU, que é aplicada nos outros dias do ano. A distribuidora Southern California Edison (California/U.S.) implementa esse tipo de tarifa, sendo aplicada entre 9 e 15 dias do ano, com duração

de 4 horas e geralmente no verão, quando o consumo aumenta significativamente (SCE, 2011).

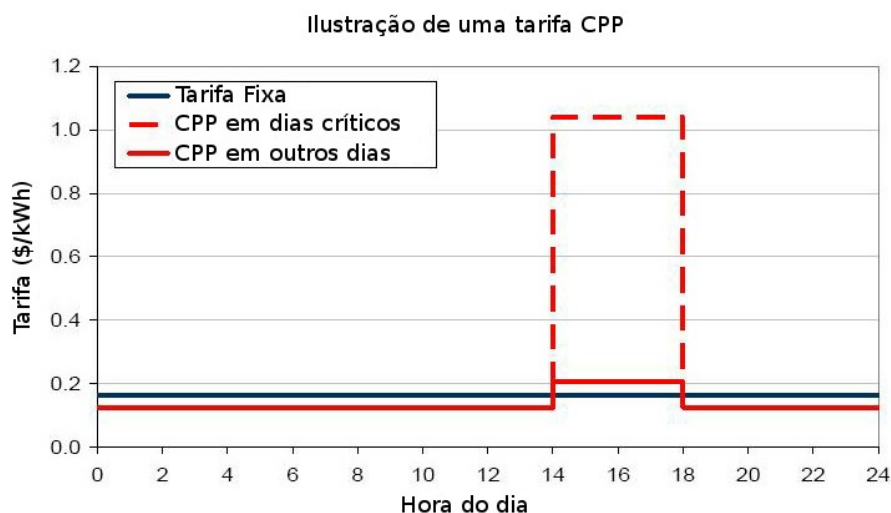


Figura 33 - Exemplo de tarifa CPP.

Fonte: Adaptado de Hledik (2008).

- *Variable Peak Pricing* (VPP): o valor da tarifa é alterado diariamente, sendo divulgado aos consumidores com um dia de antecedência. As distribuidoras Connecticut Light & Power (Connecticut/U.S.) (CL&P, 2011) e a United Illuminating (Connecticut/U.S.) (UI, 2011) já oferecem esse tipo de tarifa para seus consumidores.
- *Real Time Pricing* (RTP): o valor da tarifa varia continuamente, mudando de valor várias vezes em um mesmo dia, geralmente sendo comunicada com antecedência de no máximo uma hora. A Figura 34, embora seja apenas ilustrativa, demonstra que tanto o preço aumenta no horário de maior consumo, como também o seu valor médio ao longo do dia é maior que uma tarifa convencional.

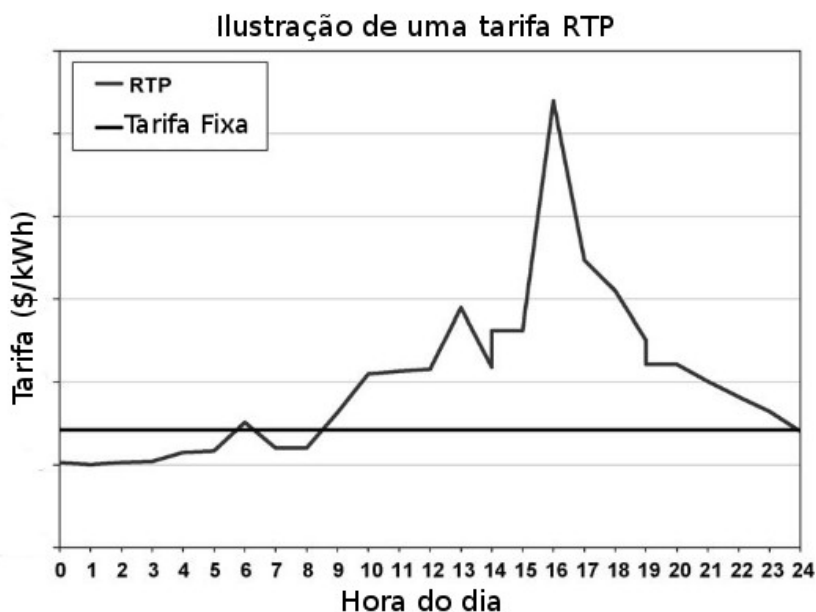


Figura 34 - Exemplo de tarifa RTP.

Fonte: Adaptado de Faruqi (2010b).

4.2 TRABALHOS RELEVANTES

A seguir, serão descritos alguns trabalhos relevantes que apresentam diferentes abordagens para sistemas de auxílio a participação de consumidores na Rede Elétrica Inteligente. Inicialmente será apresentado quatro trabalhos de forma detalhada, por representarem bem as diferentes opções de abordagens desses sistemas e posteriormente será apresentado, de forma resumida, os demais trabalhos que utilizam uma dessas opções com algumas variações.

4.2.1 BEMI

O BEMI (*Bidirectional Energy Management Interface*) é uma abordagem para gestão de energia em Baixa Tensão, em que um controlador recebe informações de uma central de controle, usualmente a tabela de preços da tarifa, calcula um agendamento de operação para cada equipamento, usando um algoritmo específico para cada tipo de dispositivo, e realiza o controle dos mesmos (Figura 35).

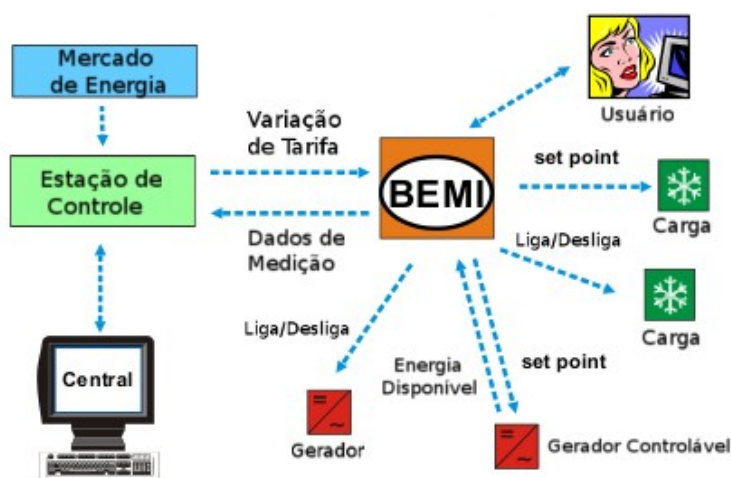


Figura 35 - BEMI.

Fonte: Adaptado de Nestle, Bendel e Ringelstein (2007).

Os algoritmos buscam maneiras de operar os dispositivos de forma a economizar o custo com energia e consideram as preferências dos usuários, os parâmetros dos dispositivos e as informações recebidas pela estação central.

A estação central é denominada *Pool-BEMI*, sendo responsável por agrupar as informações (dados de medição e informações do ponto de conexão) de um grande número de BEMIs e fazer a interface com a distribuidora. Pode ainda, atuar como fornecedor de energia, comercializando a energia excedente de sua rede para outras redes de energia (Figura 36).

Assim, embora a comunicação com o restante da rede seja centralizada no *Pool-BEMI*, a decisão de operação é tomada por cada BEMI, de forma que essa abordagem busca a otimização de todo o sistema através das decisões locais, baseadas na tabela de preços da tarifa. Porém em relação à operação dos equipamentos residenciais, a decisão ocorre de forma centralizada em cada BEMI.

Ainda, os usuários podem interagir com o controlador BEMI através de um dispositivo móvel, podendo configurar os parâmetros do sistema e receber informações do perfil de tarifas, custo de energia e agendamento de operação de cada dispositivo controlável.

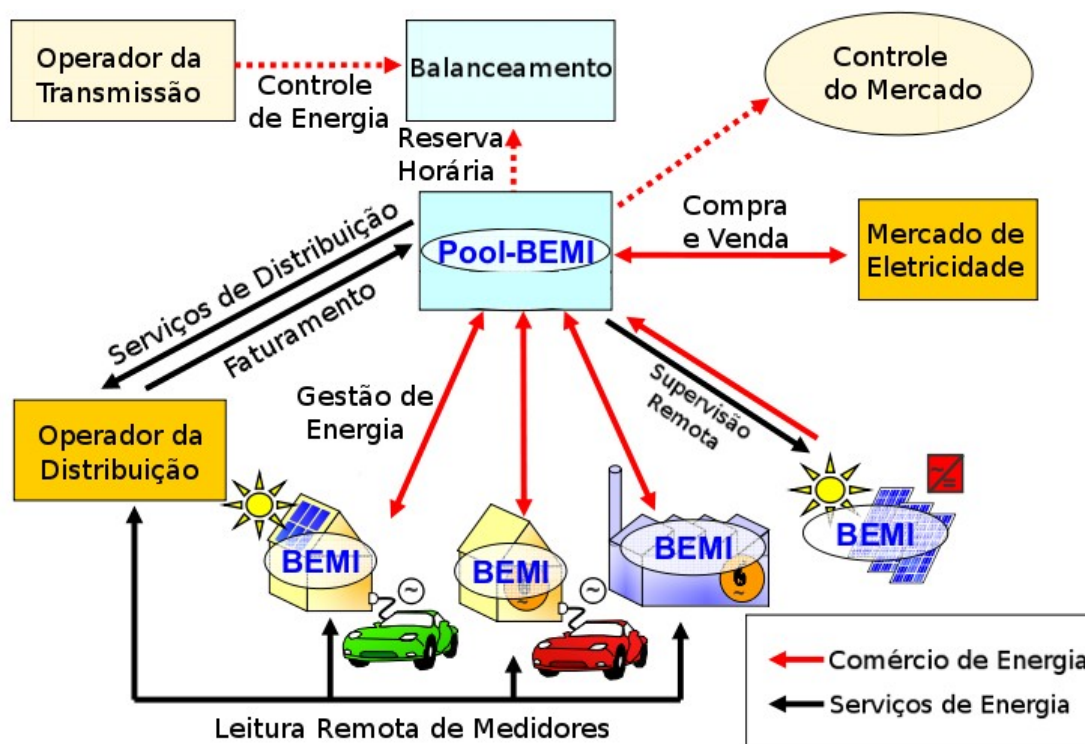


Figura 36 - BEMI na Rede Elétrica Inteligente.

Fonte: Adaptado de Ringelstein e Nestle (2009).

A Figura 37 demonstra uma simulação de 1000 residências utilizando esse sistema, considerando: (i) equipamentos que devem manter um estado dentro de um certo limite (SOC – *State of Charge*) e equipamentos que podem adiar o início de operação (FPS – *Fixed Program Schedule*); (ii) aproximações estatísticas do comportamento de usuários; (iii) 50% do consumo residencial sendo devido à cargas gerenciáveis.

Na Figura 37, as figuras superiores demonstram como variou a tarifa no período, as do meio a potência utilizada pelas 1000 residências e as inferiores a potência utilizada por uma única residência. A simulação à esquerda considera uma tarifa constante (linha azul) e demonstra que a operação usual (linha cinza) é similar a do uso do BEMI (linha preta). A simulação à direita considera uma tarifa variável e demonstra que a atuação de cada BEMI permitiu uma diminuição do gasto de energia total da rede que atende as 1000 residências e da residência específica apresentada, em relação ao comportamento usual, devido ao deslocamento de operação dos equipamentos para os períodos de baixo custo de energia.

Testes reais com esse sistema estão sendo realizados com 100 casas na cidade de Mannheim, na Alemanha. Nesse cenário, os consumidores recebem o perfil de tarifas do dia seguinte e configuram os parâmetros do sistema de acordo com suas necessidades. A implantação desse cenário é recente e resultados ainda não foram divulgados (KOK *et al.*, 2011).

Ainda, através do projeto *Model City Mannheim* (MOMA, 2011), é previsto a construção de um cenário de testes com mais de 3000 consumidores que utilizarão esse sistema para a formação e avaliação de um mercado de eletricidade dinâmico.

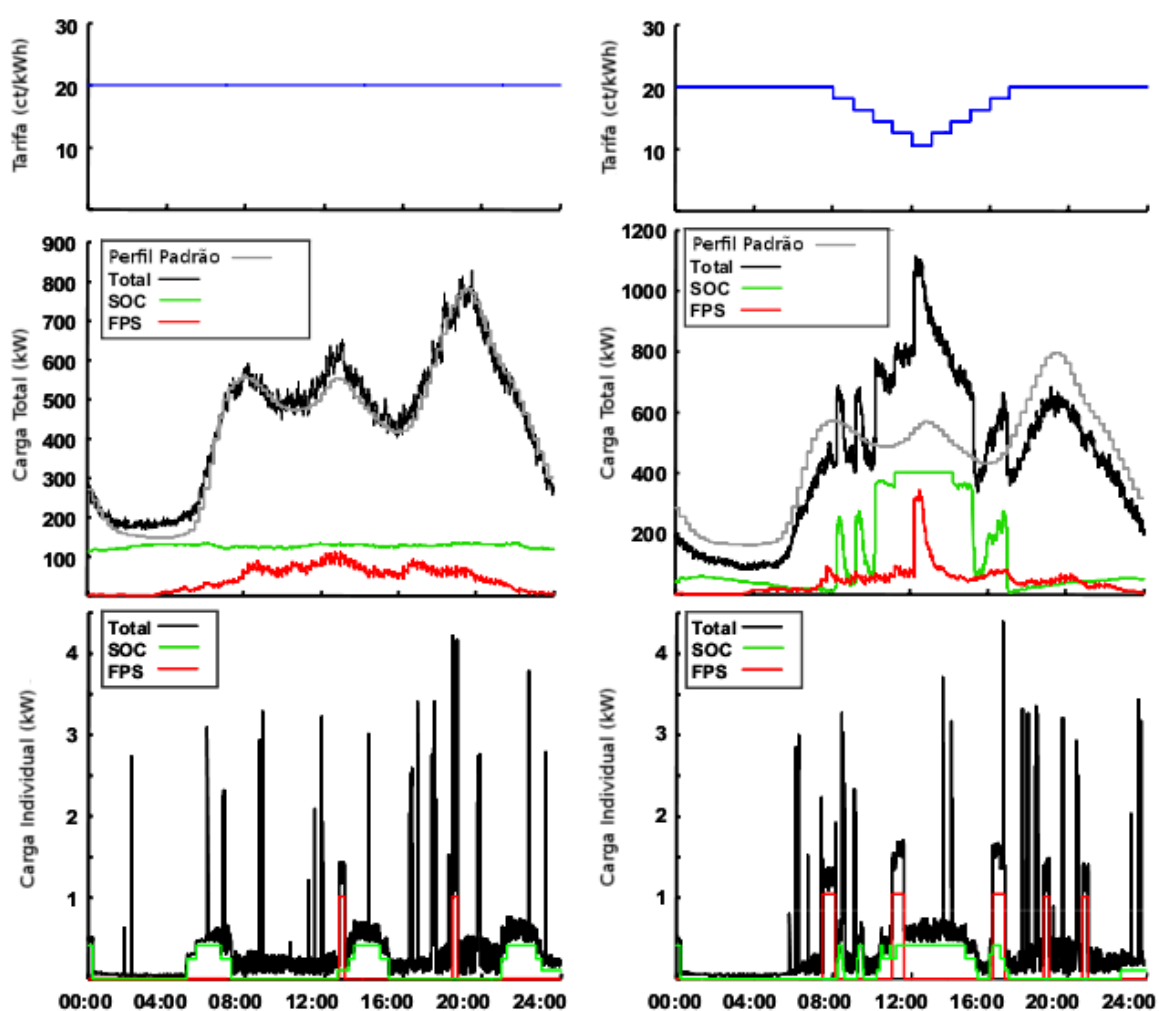


Figura 37 - Simulação BEMI.

Fonte: Adaptado de Ringelstein e Nestle (2009).

4.2.2 AC_{ME}

O AC_{ME} é uma rede de sensores e atuadores sem fio, dedicada a monitoração e controle de energia em ambientes residenciais e prediais. A rede é formada por três dispositivos (Figura 38a): (i) Nó AC_{ME}, que possui funcionalidades de comunicação, medição e controle, em que os equipamentos são conectados (Figura 38b); (ii) um *gateway*, conectado à internet, que permite o acesso da rede formada pelos nós por uma rede externa; (iii) Aplicação AC_{ME}, que é um programa que usa a rede para fornecer serviços de gestão de energia.

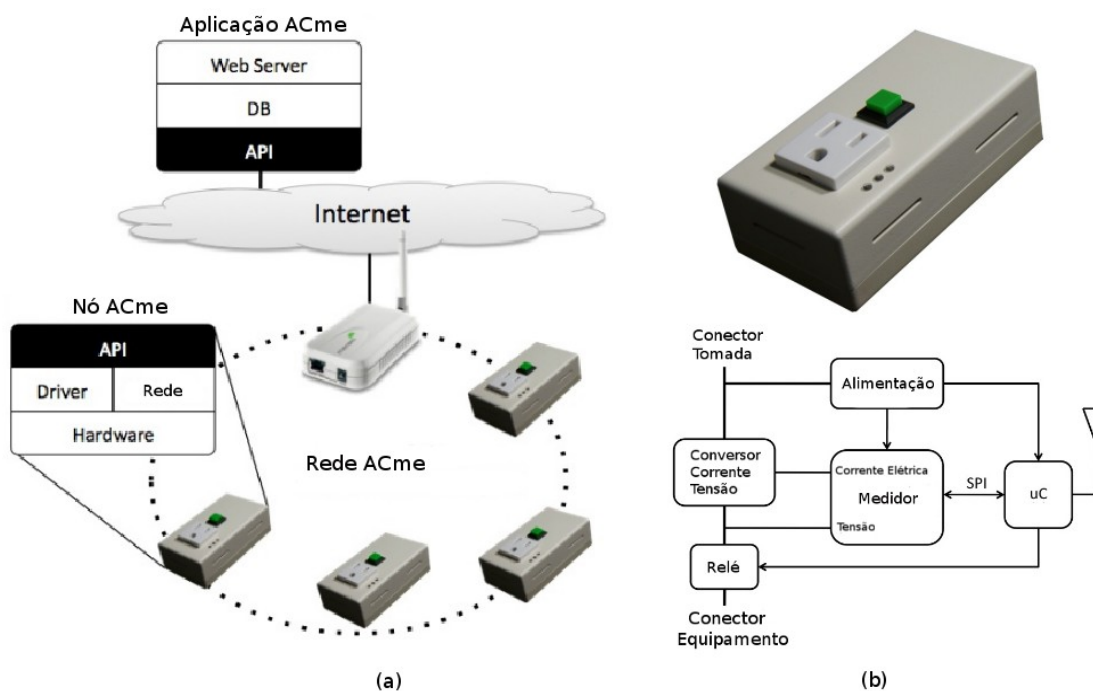


Figura 38 - (a) Rede AC_{ME}, (b) AC_{ME} Node.

Fonte: Adaptado de Jiang *et al.* (2009).

A principal aplicação desses adaptadores está na monitoração de parâmetros de energia elétrica e disponibilização de dados para realizar análises mais facilmente. Embora esse sistema permita o controle dos equipamentos através de uma atuação liga/desliga, no trabalho desenvolvido por Jiang (2010), foi dado uma maior ênfase a monitoração do

consumo de vários dispositivos em ambientes prediais. Trabalhos futuros prevêem a atuação em dispositivos de forma a diminuir o consumo dos mesmos.

4.2.3 *PowerMatcher*

O *PowerMatcher* é uma abordagem de controle distribuído baseado em mercado para a correspondência de oferta e demanda de energia em infraestruturas com elevada percentagem de geração distribuída.

Nesse caso, o mercado pode ser visto como um mecanismo, que utiliza teorias da área de microeconomia, para a tomada de decisões distribuídas sobre a alocação de recursos escassos, enquanto que o controle, é realizado através da competição por recursos pelos vários elementos participantes do mercado, que utilizam esses recursos para a realização de controles locais.

Akkermans, Schreinemakers e Kok (2011) demonstraram que a solução baseada em mercado é idêntica a de um otimizador centralizado omnisciente, o que torna esse tipo de controle bastante interessante, já que não é necessário concentrar toda a informação em um mesmo local para cálculo da solução ótima, que maximize as funções de utilidade de todos os elementos do mercado.

Dessa forma, a solução ótima é encontrada: (i) ao se comunicar informações uniformes do mercado (como ofertas com relação de volume e preço); (ii) ao se executar um algoritmo que objetiva encontrar a melhor distribuição em um espaço multidimensional definido pelas preferências de todos os elementos; (iii) ao se comunicar para cada elemento o preço de equilíbrio do mercado, encontrado pelo algoritmo da etapa anterior, que é usado como sinal de controle.

Por exemplo, a Figura 39 demonstra esse mecanismo em um mercado com 4 elementos, sendo dois produtores (d_1 , d_3) e dois consumidores (d_2 , d_4). Tanto d_2 como d_4

necessitam de energia para operarem, sendo que a partir de um determinado preço vão diminuindo seu consumo até pararem de operar completamente, enquanto que d_1 e d_3 são capazes de fornecer energia para a rede, sendo que a partir de um determinado preço iniciam o fornecimento até atingirem sua máxima capacidade de fornecimento.

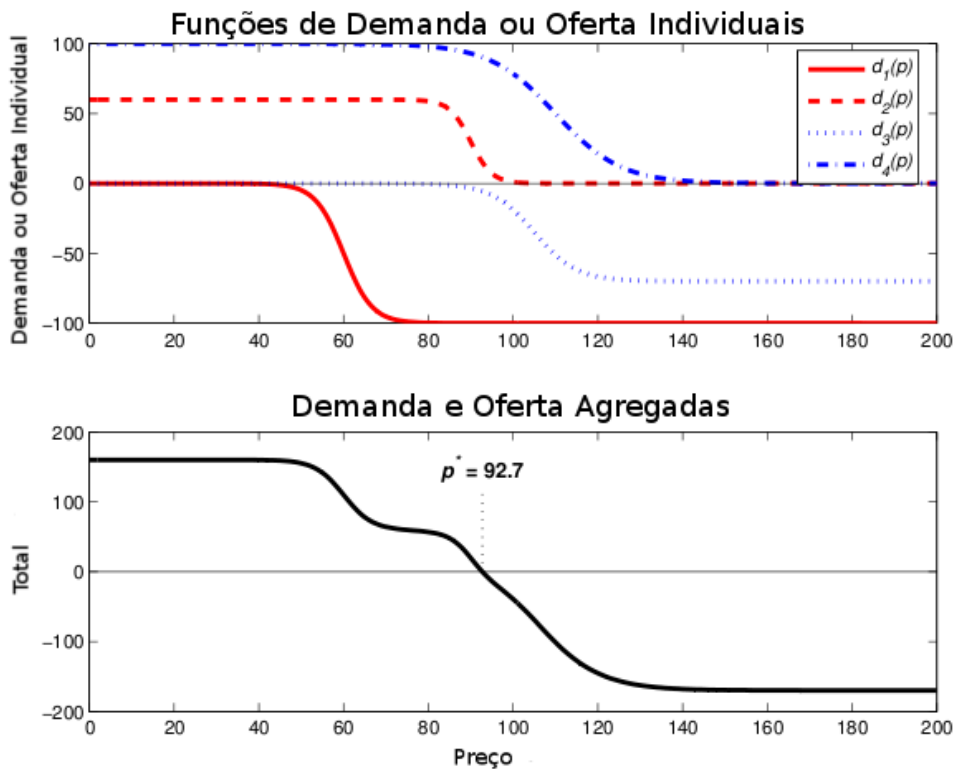


Figura 39 - Exemplo de formação do preço de equilíbrio.

Fonte: Adaptado de Kok *et al.* (2008).

Esses dispositivos comunicam suas funções de demanda/oferta para um elemento central e o preço de equilíbrio é encontrado ao se resolver a seguinte equação:

$$\sum_{a=1}^N d_a(p^*) = 0$$

Onde N é o número de elementos do mercado e $d_a(p)$ é a função de demanda ou oferta do elemento a . Após esse cálculo, o preço de equilíbrio ($p^* = 92,7$, Figura 39) é comunicado para cada um dos elementos do mercado, que decide como vai operar baseado em sua função de demanda/oferta. Nessa exemplo, os elementos d_1 e d_4 estão operando com capacidade total, enquanto que os elementos d_2 e d_3 não estão operando.

Assim, o *PowerMatcher* explora a possibilidade de alteração da operação de dispositivos para atingir o equilíbrio entre oferta e demanda, utilizando uma abordagem por Sistemas Multiagentes, em que cada dispositivo é operado por um agente de dispositivo, que busca vender ou comprar energia no mercado e operar o dispositivo associado de uma forma otimizada sob o ponto de vista econômico. Um agente central é responsável por reunir as informações de vários agentes de dispositivos e definir e informar o preço de equilíbrio que funcionará como sinal de controle para a operação individual de cada dispositivo.

Nessa abordagem, o mercado de energia elétrica é implementado em uma topologia em árvore, existindo diferentes agentes (Figura 40):

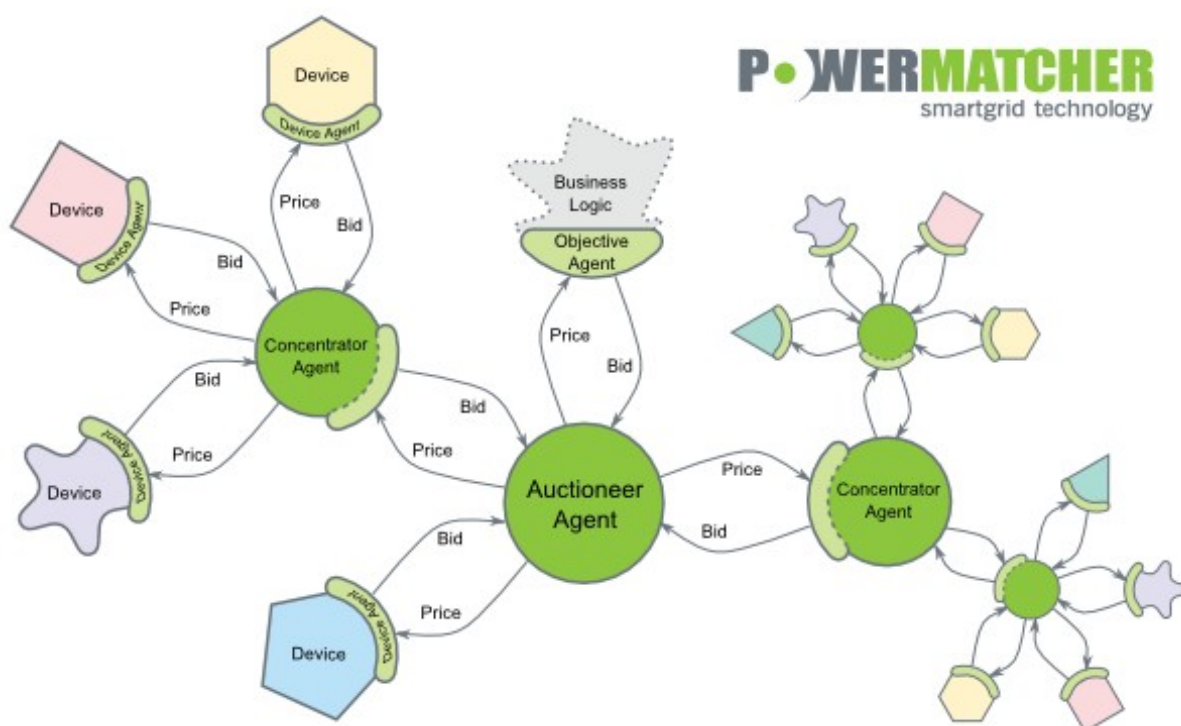


Figura 40 - PowerMatcher.

Fonte: Powermatcher (2011).

- Agente de dispositivo (*Device agent*): representa um dispositivo. Busca operar os processos associados ao dispositivo de uma forma econômica. Comunica sua função de oferta/demanda de energia ao mercado, recebe um preço de equilíbrio e opera de acordo com a informação que comunicou, sendo obrigado a cumpri-la.

- Comercializador (*Auctioneer agent*): realiza o processo de definição do preço de equilíbrio. Recebe as informações de oferta/demanda de energia de todos os elementos que estão conectados à ele, calcula o preço de equilíbrio e comunica o preço aos elementos sempre que considerar que houve uma variação significativa no mercado.
- Concentrador (*Concentrator agent*): representa um grupo de agentes de dispositivos. Concentra as informações dos agentes que representa formando uma única função de oferta/demanda, comunica a mesma ao nível superior da rede e ao receber o preço de equilíbrio comunica para cada elemento que representa. Pelo nível superior é visto como um Agente de dispositivo e pelos elementos que representa como um comercializador.
- Agente objetivo (*Objective agent*): dá um propósito ao grupo que representa. Quando não existe, o grupo busca um equilíbrio entre demanda e oferta de energia. Quando está presente cria ofertas para alcançar determinados objetivos. Permite, por exemplo, a formação de uma central de geração virtual, conforme visto no capítulo 2, na seção 2.4.3.1.

Ainda, os agentes de dispositivos podem ser divididos de acordo com o tipo de equipamentos que controlam (KOK; WARMER; KAMPHUIS, 2005):

- Dispositivos com operação aleatória: dispositivos de geração em que o fornecimento de energia à rede é de forma aleatória (e.g., solar e eólica). Como o valor de energia não pode ser controlado, o agente deve aceitar qualquer preço de mercado.
- Dispositivos com operação adiável: dispositivos em que o início de operação pode ser adiado (e.g., Lavadora de roupas). A demanda ou oferta total de energia é sempre fixa.
- Dispositivos com retenção de recursos: dispositivos que produzem recursos (exceto eletricidade) que podem ser retidos. Por exemplo, dispositivos de aquecimento e resfriamento que possuem o objetivo de manter a temperatura entre dois limites.

Podem trocar o controle liga/desliga por um controle orientado ao mercado, operando em momentos mais atrativos economicamente e ainda cumprindo os limites requeridos.

- Dispositivos de armazenamento de energia: dispositivos de armazenamento de eletricidade conectados à rede através de uma conexão bidirecional. Operam de acordo com a variação de preço da tarifa de eletricidade, adquirindo energia em momentos de baixo custo e fornecendo energia em momentos de alto custo.
- Dispositivos de controle livre: dispositivos que são controláveis dentro de certos limites (e.g., gerador a diesel).
- Dispositivos de usuários: dispositivos que operam como resultado direto da ação de usuários (e.g., televisão, computador). Sua operação é aleatória e sem flexibilidade, sendo que o agente compra energia a qualquer preço para operar o dispositivo.

Um teste de operação desse sistema foi realizado em 5 casas na Holanda, cada uma com um *micro-CHP*, que é um dispositivo que gera calor e eletricidade simultaneamente de uma mesma fonte de energia. O principal objetivo desse dispositivo é a geração de calor e para isso há também a geração de eletricidade em menor proporção, mas que cobre os investimentos nesse tipo de equipamento (MICROCHAP, 2011). O objetivo dos agentes que operavam os equipamentos era o de produzir eletricidade em períodos de alto custo, mas sem infringir o conforto térmico dos usuários, ajustado através de um termostato no equipamento.

Na Figura 41, a linha verde mostra a curva de demanda total das casas, sendo possível identificar 4 picos. Os *micro-CHPs* entraram em operação (linha azul) nesses momentos, enquanto que a linha vermelha mostra o consumo da rede externa. Todos os picos foram reduzidos, sendo que no segundo pico a redução foi de 30%.

Ainda, um cenário de testes com essa abordagem está sendo implementado na cidade de Hoogkerk, na Holanda, envolvendo consumidores submetidos a tarifas RTP com variação entre 5 e 15 minutos (KOK *et al.*, 2011).

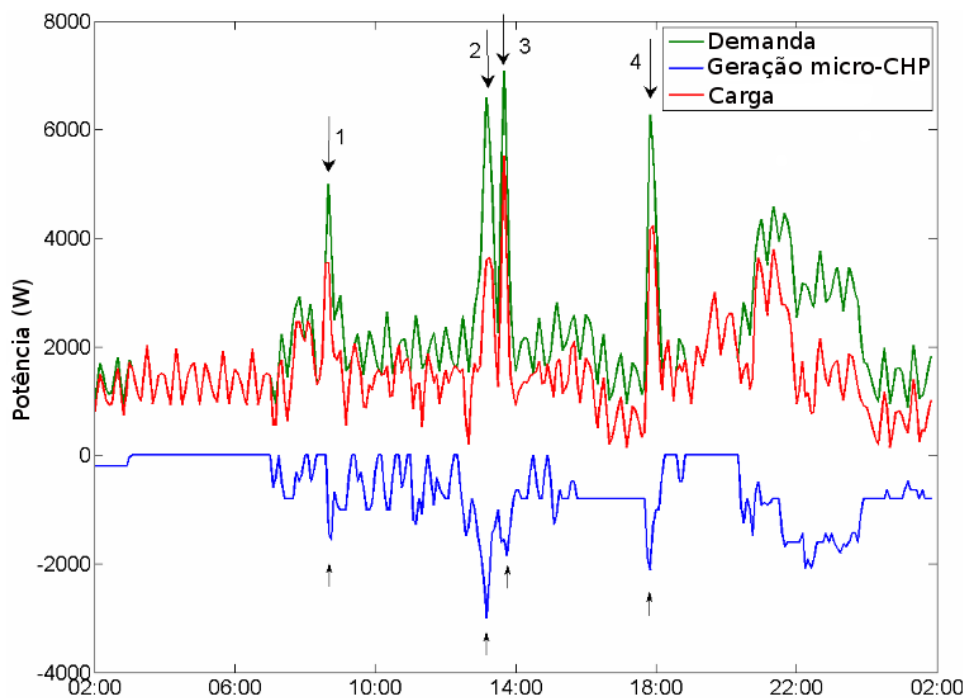


Figura 41 - Teste do PowerMatcher.

Fonte: Adaptado de Roossien *et al.* (2008).

4.2.4 MAHAS

O MAHAS (*Multi-Agent Home Automation System*) é uma abordagem dedicada à gestão de energia que adapta o consumo de dispositivos de acordo com critérios de custo e de conforto dos usuários.

Utiliza uma abordagem por Sistemas Multiagentes em que cada equipamento é controlado por um agente, que interage com os outros agentes para encontrar uma solução de operação, através da coordenação da operação de todos os dispositivos do local. A estrutura do sistema é demonstrada na Figura 42, sendo que o algoritmo de controle é dividido em um mecanismo antecipativo e um mecanismo reativo.

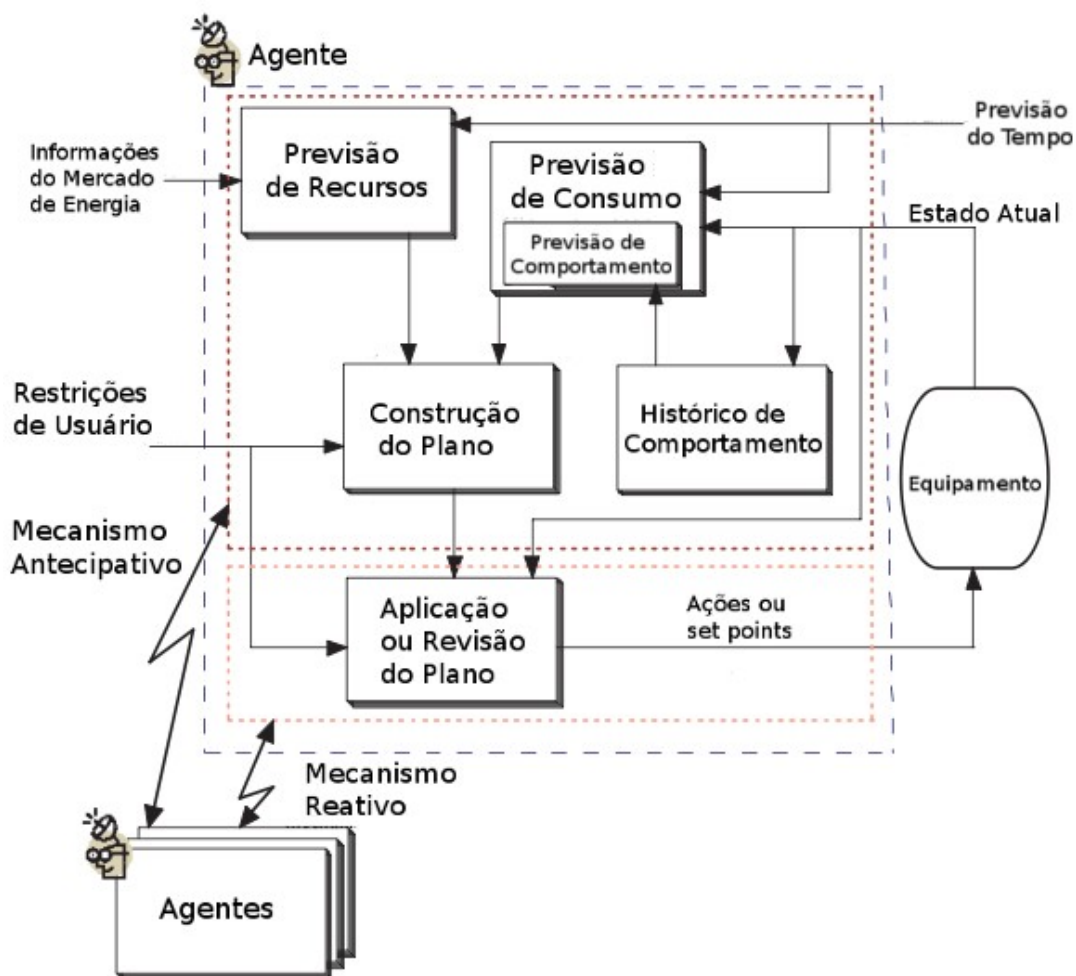


Figura 42 - MAHAS.

Fonte: Adaptado de Abras (2006).

O mecanismo antecipativo busca definir como será a operação do equipamento ao longo do tempo, com base em previsões de recursos e de consumo. Para isso, utiliza algoritmos que buscam prever o comportamento do usuário através da interação com o equipamento que controla. Basicamente, calcula a energia que estará disponível, de acordo com informações da rede elétrica e condições climáticas, e a energia que será necessária para a operação do equipamento, de acordo com o histórico de comportamento do usuário. Com esses dois dados e levando em consideração restrições impostas pelo usuário, constrói um plano de operação para o equipamento em conjunto com os outros agentes. Também monitora

o equipamento para aprendizado sobre o comportamento do usuário e para alterar o plano caso necessário.

O mecanismo reativo é um mecanismo que aplica o plano no equipamento, ajustando a operação do mesmo, e realiza pequenos ajustes no plano, através da interação com outros agentes. Esses ajustes tem um impacto pequeno no plano, pois são ajustes com um período muito menor do que o período de aplicação do plano.

A Figura 43, demonstra um plano obtido para alguns dispositivos utilizando essa abordagem, em que o total de consumo combinado (linha 1 do gráfico) não ultrapassa o limite disponível de energia (linha 6 do gráfico).

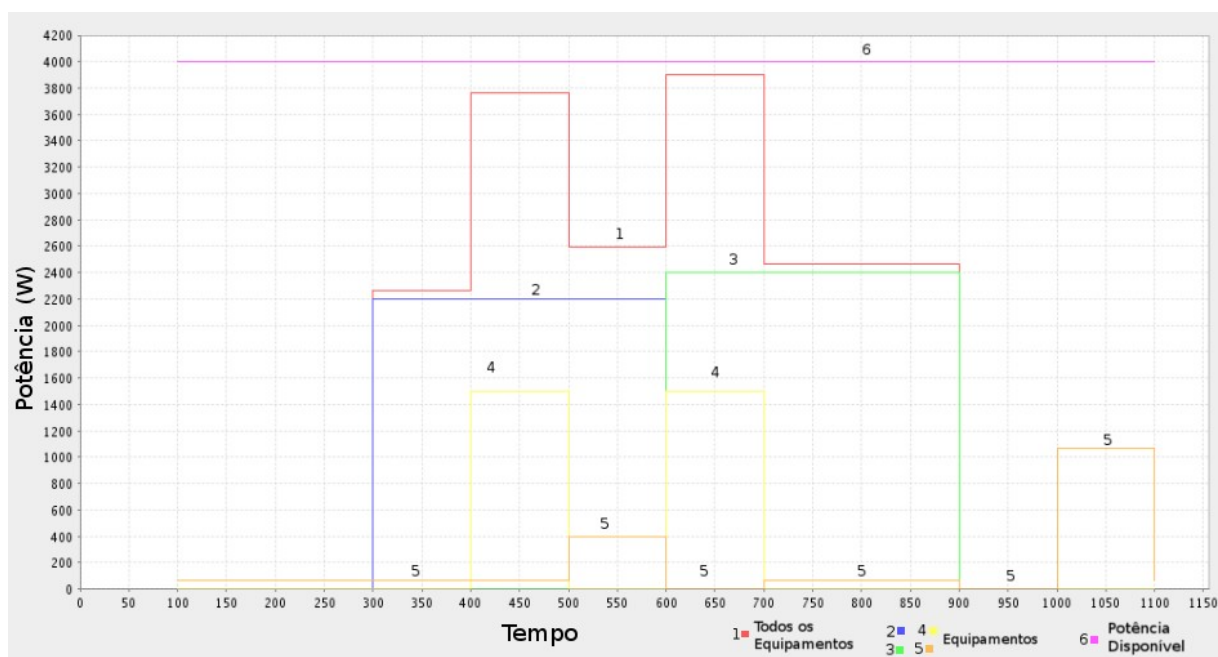


Figura 43 - Exemplo de plano de consumo.

Fonte: Adaptado de Abras (2009).

Assim, essa abordagem busca a definição da operação dos diversos equipamentos através da interação entre os agentes que os controlam, que devem obter um plano de operação sem a existência de um elemento central.

4.2.5 OUTROS TRABALHOS

Lui, Stirling e Marcy (2010) propõem o uso de um controlador residencial que deve monitorar, controlar e coordenar a operação dos dispositivos residenciais, se comunicando com o medidor de energia para obter informações da Rede Elétrica Inteligente e com uma central de serviços externa, que é disponibilizada por uma empresa de serviços, para obter parâmetros de controle. Essa central de serviços é responsável por facilitar a interação e controle do usuário em relação ao consumo de sua residência e ajustar os parâmetros do controlador com base no perfil do usuário, estratégias de gestão de energia e informações da Rede Elétrica Inteligente.

Trompos *et al.* (2008) apresentam uma arquitetura para implementação de serviços de gestão de energia, através de um controlador residencial, que possui interfaces para os dispositivos e serviços que permitem ao usuário realizar a programação do limite de consumo dos equipamentos e acompanhar o gasto de energia dos mesmos.

Ju *et al.* (2011) propõem um sistema de gestão de energia elétrica que opera através de uma rede PLC, sendo constituído de: (i) adaptadores, no formato de tomadas em que os dispositivos são conectados, que armazenam o consumo de energia e estado do equipamento conectado, além de permitir a alteração do estado (liga ou desliga) do equipamento conectado; (ii) um gestor de energia, que agrega as informações do consumo da residência (através de informações do medidor de energia e dos adaptadores) e controla os dispositivos de acordo com as configurações dos usuários; (iii) uma interface de usuário, que permite a visualização de dados de consumo, a configuração do controle de equipamentos e o fácil desligamento de todos os equipamentos que operam em *stand-by*.

Son *et al.* (2010) também propõem um sistema que opera através da rede PLC, com configuração remota através da internet e gestão de energia através do agendamento de operação de dispositivos e da previsão de geração de energia.

Abe, Mineno e Mizuno (2010) propõem um sistema de monitoração de energia residencial baseado em uma rede de sensores sem fio, que utilizam o padrão de comunicação ZigBee. Basicamente, cada nó possui sensores para medição de parâmetros do ambiente (luz, temperatura e presença) e permite a conexão dos equipamentos (através de uma tomada) ou a conexão dos fios de alimentação que saem de um disjuntor, para a medição de parâmetros de energia elétrica (potência, corrente e tensão). Um sistema central armazena os dados, permitindo a visualização dos mesmos e análise para identificação de possíveis reduções de consumo.

Li *et al.* (2011) propõem um sistema de gestão de energia que se comunica com diferentes dispositivos residenciais para monitoração, planejamento e controle de operações, através de diferentes protocolos de comunicação, oferecendo ainda suporte à QoS (Qualidade de Serviço). Esse sistema também possui uma interface para a Rede Elétrica Inteligente para obter o preço da tarifa e sinais de controle, além de informar dados de consumo do local.

Suhara e Nishi (2011) propõem um sistema de gestão de energia elétrica que atua junto ao quadro de disjuntores do local e consegue correlacionar dados de consumo com dados de outros sensores (temperatura, luminosidade) para efetuar o controle. Para isso, é necessário a utilização de um quadro de disjuntores inteligente, que alimenta cada dispositivo individualmente e possui funcionalidades de medição e comunicação do valor da energia de saída de cada disjuntor. Um módulo de atuação, que agrega essas informações de medição, é conectado na saída da alimentação de cada disjuntor, onde realiza a atuação, através do controle (liga/desliga) do fluxo de energia. Ainda, é capaz de se comunicar com sensores no ambiente através de ZigBee ou rádio frequência. Um módulo central se comunica por WiFi com o módulo de atuação, para armazenamento de dados e envio de configurações. O trabalho também apresenta também um algoritmo para a previsão de consumo dos equipamentos.

Cirrincione *et al.* (2009) apresentam um sistema que utiliza uma abordagem por Sistemas Multiagentes, em que os dispositivos consumidores, geradores e armazenadores são controlados por agentes que interagem de forma a obter a melhor operação do ponto de vista econômico. Ainda, apresenta parâmetros fundamentais para a operação de tais dispositivos e modelos simplificados que representam a operação real de baterias, geradores eólicos e geradores solares, permitindo uma melhor simulação e avaliação da proposta.

Du e Lu (2011) propõem um algoritmo para agendamento de dispositivos de controle de temperatura, buscando um equilíbrio entre o preço da eletricidade e o conforto dos usuários. O algoritmo é dividido em um mecanismo que planeja a operação do equipamento para o dia seguinte e outro mecanismo que ajusta o planejamento durante a operação do equipamento, devido ao surgimento de variações que não poderiam ser previstas.

Hubert e Grijalva (2011) propõem um algoritmo para o agendamento da operação de dispositivos residenciais, que utiliza estimativas de geração de energia, informações em relação aos preços de energia elétrica do dia seguinte e informações dos equipamentos não controláveis com base em um histórico de operação.

Wei *et al.* (2010) apresentam um algoritmo que busca operar dispositivos de armazenamento na Rede Elétrica Inteligente de forma mais econômica. O algoritmo implementa técnicas de aprendizado para encontrar a melhor estratégia que maximize a operação de todos os dispositivos de armazenamento na rede. Para isso, considera que cada dispositivo conhece totalmente as informações sobre custos e estratégias dos outros dispositivos, de forma que sua decisão é a melhor considerando também a decisão dos outros.

Gudi *et al.* (2010) propõem um simulador para testes e investigação sobre os ganhos de gestão de energia através da operação de equipamentos de um modo mais econômico. O usuário entra com dados do equipamento (nome, prioridade, consumo, duração da operação) e a tabela de tarifas para o dia. Posteriormente, um algoritmo de otimização por enxame de

partículas (*Particle Swarm Optimization*), que é uma técnica de computação estocástica baseada em populações, é executado, definindo o momento em que os dispositivos vão operar. No final da simulação os resultados de consumo são apresentados.

Ainda, já é possível encontrar uma série de dispositivos comerciais que buscam demonstrar o consumo de equipamentos e conseqüentemente auxiliar os consumidores em reduzir seu consumo de energia. O TED (TED, 2010) é um dispositivo que é conectado na entrada do quadro de disjuntores e realiza o monitoramento contínuo de todo o consumo de eletricidade da residência, comunicando o mesmo, através de comunicação por PLC, à um *gateway* no interior da residência para armazenamento e disponibilização de dados. O *Kill A Watt* (P3 INTERNATIONAL, 2010) é um adaptador que mostra em um *display* a tensão, corrente, potência, frequência e fator de potência da rede, além de acumular o consumo em kWh do equipamento conectado a ele. O *SmartPlug* (DIGI, 2010) é um adaptador que é capaz de medir o consumo do equipamento conectado à ele e enviar esse dado, além de receber comandos para ligar ou desligar o equipamento, através do padrão de comunicação ZigBee.

4.3 DISCUSSÃO

De acordo com os trabalhos descritos, ou um controlador central irá controlar cada dispositivo, podendo haver a utilização de adaptadores que permitam isso, ou os dispositivos possuirão uma inteligência própria e irão interagir, de diferentes maneiras, com a rede e com outros dispositivos, buscando uma operação mais eficiente e econômica. Além disso, diferentes tipos de tarifas de energia são possíveis de serem aplicadas, criando diferentes cenários em que esses sistemas podem operar.

Como foi demonstrado, embora os conceitos que esses sistemas utilizem sejam similares, é possível criar diversos e diferentes mecanismos para a operação dos equipamentos, através da utilização de diferentes algoritmos que permitam uma operação

mais econômica, de diferentes estratégias de interação com a rede e com outros dispositivos, além de diversos padrões de comunicação com equipamentos e demais sistemas. Além disso, essas diversas propostas apresentam resultados em que diminuem o gasto com a energia elétrica, através da operação dos equipamentos considerando diversos aspectos.

Assim, é necessário construir tais sistemas que permitam a gestão de energia de consumidores de baixa tensão e também criar mecanismos que permitam a avaliação desses diferentes sistemas sob condições similares. Isso exige métodos e ferramentas que facilitem o desenvolvimento de tais sistema e que evidenciem as diferenças das diversas propostas através de comparações.

Dessa forma, com base nessa análise, nas diversas propostas de sistemas e nas tendências do setor de energia, esse trabalho propõe um *framework* que objetiva facilitar a criação, simulação, análise e comparação de diferentes sistemas e abordagens, submetidos a diferentes cenários de tarifação. Esse *framework* será descrito com detalhes nos próximos capítulos.

5 PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO

Conforme foi apresentado nos capítulos anteriores, devido às tendências em relação à Rede Elétrica Inteligente, é necessário desenvolver soluções que facilitem a interação de consumidores com a rede elétrica. Além disso, é também necessário desenvolver ferramentas que possibilitem a avaliação dessas soluções propostas.

Dessa forma, a principal contribuição desse trabalho está na especificação de um *framework* que possibilita a construção, simulação e análise de diferentes sistemas de gestão de energia elétrica para consumidores de baixa tensão na Rede Elétrica Inteligente. A proposta oferece mecanismos que permitem a utilização de diferentes equipamentos, tanto virtuais como reais, com diferentes protocolos de comunicação. Também possibilita a utilização de diferentes algoritmos para a otimização de parâmetros desejados, que podem estar relacionados tanto com os equipamentos de forma individual, como com o sistema de forma global. Além disso, permite a análise e comparações de diferentes propostas, em diferentes cenários de tarifação, bem como a concepção de sistemas heterogêneos que permitam utilizar de forma mais eficiente as características de cada equipamento.

Um *framework* pode ser considerado como um conjunto de classes cooperantes para a construção de projetos reutilizáveis (GAMMA *et al.*, 2000). Sua utilização se justifica por ele implementar uma arquitetura que pode ser utilizada de modo a tornar o desenvolvimento de sistemas computacionais mais rápidos e produtivos, facilitando a captura de decisões de projetos que são comuns ao domínio de uma aplicação e permitindo uma redução do tempo utilizado com o desenvolvimento de novas soluções. Assim, sua principal contribuição é a definição de sua arquitetura, projetada para suportar todas as aplicações de um determinado domínio, de maneira flexível e extensível.

Nota-se que o setor de eletricidade progride no sentido que a rede elétrica será uma rede de redes, onde um grande número de dispositivos distribuídos e heterogêneos

influenciam uns aos outros. Paralelamente, a evolução tecnológica progride no sentido de que a maioria dos objetos existentes estejam conectados em rede, possuindo uma inteligência própria, podendo ser identificados, se comunicarem e tomarem decisões por si mesmo, um conceito denominado Internet das Coisas (TAN e WANG, 2010).

Considerando que cada vez mais a inteligência é distribuída entre os diferentes elementos do sistema, que deverão interagir buscando soluções de operação, a abordagem por Sistemas Multiagentes surge como uma das principais possíveis soluções para prover mecanismos que tornem esses sistemas com alto grau de heterogeneidade, inteligência distribuída e conectividade possível. Assim, a abordagem por Sistemas Multiagentes é apresentada brevemente a seguir, já que o *framework* proposto foi construído com base nela. Posteriormente, também é apresentado o modelo conceitual do *framework* e a implementação do mesmo.

5.1 SISTEMAS MULTIAGENTES

Existem diversas definições para o termo agente, o que representa a grande dificuldade em definir a noção de agente, porém é possível notar algumas propriedades fundamentais nessas definições (McARTHUR *et al.*, 2007):

- Noção de ambiente: o agente está situado em um ambiente e possui a capacidade de interagir com ele, de forma que parte do ambiente é observável e/ou alterável pelo agente. O ambiente é simplesmente tudo o que é externo ao agente, podendo ser físico, quando o agente interage através de sensores e atuadores, ou virtual (e.g., sistemas, outros agentes, recursos computacionais), quando o agente interage através de chamadas de sistemas, invocações de programas, comunicação de mensagens.
- Noção de autonomia: o agente possui a capacidade de agir de forma autônoma em resposta a mudanças do ambiente. Isso significa que o agente tem a habilidade de

decidir, por sua própria vontade, que ações irá tomar baseado nas observações do ambiente.

Do ponto de vista da engenharia, uma definição baseada nessas propriedades ainda é bastante vaga, pois por exemplo, um relé de proteção pode ser considerado um agente, por estar situado em um ambiente (o sistema elétrico) e por reagir a mudanças do ambiente (alterações na tensão e corrente).

Assim, para diferenciar os agentes de outros sistemas, é preciso também diferenciar o conceito de agentes e agentes inteligentes, expandindo o conceito de autonomia para o conceito de autonomia flexível:

- **Reatividade:** o agente inteligente é capaz de perceber e reagir a mudanças em seu ambiente, decidindo por ações baseadas nessas mudanças e nos objetivos aos quais foi projetado para atingir.
- **Pró-atividade:** o agente inteligente tem um comportamento orientado a objetivos, de forma que mudam dinamicamente, por iniciativa própria, seu comportamento de acordo com seus objetivos, não agindo simplesmente em resposta ao ambiente.
- **Habilidade social:** os agentes inteligentes são capazes de interagir com outras entidades, através de interações complexas para atingir seus objetivos, que não envolvem apenas a troca de dados como ocorre com outros sistemas.

Assim, é assumido um equilíbrio entre a reatividade e a pró-atividade. O agente inteligente busca um objetivo sistematicamente através da execução de ações e deve perceber as alterações que podem ocorrer no ambiente, de forma a não continuar executando ações quando fica claro que elas não vão ter êxito ou quando o objetivo não é mais válido. Porém, esse agente não deve estar continuamente reagindo a alterações no ambiente, de forma que consiga ter foco em um objetivo por tempo suficiente para atingir o mesmo.

Além disso, a habilidade social considera que a maioria dos objetivos só serão alcançados através da interação com outras entidades, que geralmente não compartilham dos mesmos objetivos do agente. Essa interação exige mecanismos complexos que levem o agente a entender os objetivos dos outros e persuadi-los para que cooperem consigo.

Uma definição mais formal, apresentada por Rabelo (2010), define um agente inteligente como um sistema computacional situado em um ambiente, que é capaz de agir com autonomia flexível, visando atingir os objetivos para o qual foi projetado. O termo situado significa que o agente recebe informações vindas do ambiente ao qual está localizado e pode executar ações contextualizadas que modifiquem esse ambiente. O termo autonomia significa que o agente deve ter a possibilidade de agir sem a intervenção direta de usuários ou de outras entidades e que deve poder controlar totalmente suas ações e seu estado interno. O termo flexível abrange a forma como o agente deve agir para atingir seus objetivos e envolve as capacidades de receptividade (perceber o ambiente e responder adequadamente), pró-atividade (agir por iniciativa própria aproveitando oportunidades), sociabilidade (interagir com outras entidades do ambiente para a obtenção de maiores informações, através do compartilhamento do conhecimento e da colaboração para atingir objetivos de interesse comum).

Uma questão importante para entender o conceito de agente, é a de diferenciação de agentes inteligentes para objetos (criados a partir do paradigma de Programação Orientada a Objetos). Os objetos possuem controle sobre seu estado, mas não possuem controle sobre seu comportamento, pois ao disponibilizar um determinado método, o mesmo ficará disponível para a execução, em qualquer momento, por outros objetos. Por outro lado, os agentes inteligentes além do controle de seu estado, possuem controle de seu comportamento, já que ao receber uma solicitação para executar uma ação, o agente pode tomar a decisão de realizar ou não a ação solicitada. Além disso, o modelo padrão de Orientação a Objetos, não possui

qualquer referência em relação à pró-atividade, reatividade e comportamento social. Ainda, cada agente inteligente tem sua própria *thread* de controle, enquanto que os objetos normalmente partilham de uma mesma *thread* de controle (WOOLDRIDGE, 1999).

Esse conceito teve início na área de Inteligência Artificial, mais especificamente na área de Inteligência Artificial Distribuída, devido à crescente complexidade de sistemas computacionais, que necessitam trabalhar com um grande e crescente número de outros sistemas diferentes e distantes, com variados tipos e níveis de interação.

A Inteligência Artificial é uma área da Ciência da Computação, orientada ao entendimento, construção e validação de sistemas inteligentes, isto é, que exibem, de alguma forma, características associadas ao que chamamos de inteligência (RICH e KNIGHT, 1990).

A Inteligência Artificial Distribuída é o ramo da Inteligência Artificial que está relacionado com a solução cooperativa de problemas, dentro de um certo ambiente, por intermédio de processadores distribuídos. Abrange tanto a resolução de problemas distribuídos, como a resolução distribuída de problemas e baseia-se na ideia de que a agilidade, flexibilidade, inteligência e desempenho de sistemas podem ser sensivelmente melhorados: (i) ao construir sistemas descentralizados aos invés de centralizados; (ii) ao obter soluções emergentes adaptativas, fruto de interações, ao invés de previamente planejadas; (iii) ao executar algoritmos de forma concorrente ao invés de sequencial (RABELO, 2010).

Na verdade, qualquer computação que possa ser executada de forma distribuída, pode também ser computada de maneira centralizada com pelo menos o mesmo grau de eficiência, sendo que soluções centralizadas são geralmente mais eficientes que soluções distribuídas. Porém em algumas situações, é mais fácil entender e desenvolver sistemas através de uma solução distribuída, especialmente quando o problema é distribuído. A distribuição pode levar a algoritmos que ainda não foram descobertos em abordagens centralizadas. Ainda, há situações em que a abordagem centralizada é impossível, porque os sistemas e dados

pertencem a organizações independentes, que querem manter a informação privada e segura por razões de competitividade (HUHNS e STEPHENS, 1999).

Por definição, os agentes inteligentes formam uma sociedade, constituindo um Sistema Multiagente (SMA), que é uma aplicação composta por um conjunto de processos autônomos, distribuídos e inteligentes, que cooperam entre si para a solução de problemas complexos, que estão além das suas capacidades individuais (RABELO, 2010).

Nesses sistemas, os agentes podem ser homogêneos ou heterogêneos, sendo que cada um terá uma certa influência no ambiente, geralmente distinta, e irão interagir, de forma assíncrona, para atingir seus objetivos. Podem trabalhar em conjunto, para atingir um ou mais objetivos gerais ou para atingir objetivos individuais, que podem no entanto estarem relacionados. Ainda, normalmente, o SMA provê uma infraestrutura que especifica protocolos de interação e comunicação, sendo tipicamente aberto, não possuindo um projetista central.

Dependendo da aplicação, essa abordagem pode apresentar como vantagens:

- tolerância a falhas, já que uma falha local não implica uma falha global;
- rapidez, devido ao paralelismo através da execução de diferentes tarefas por diferentes agentes;
- escalabilidade, através da variação do número de agentes;
- flexibilidade, através da interconexão de múltiplos sistemas com arquiteturas distintas;
- reusabilidade, já que um mesmo agente pode ser utilizado em diferentes ambientes;
- diminuição da comunicação, devido ao processamento poder estar localizado junto às fontes de informação;
- facilidade no desenvolvimento de sistemas, devido à modularidade resultante da decomposição do problema global em vários subproblemas.

As potencialidades de um SMA são evidenciadas quando o domínio de aplicação ou problema apresenta as seguintes características e requisitos:

- é intrinsecamente distribuído;
- requer a junção de diferentes domínios de conhecimento para a sua solução;
- requer a junção de diferentes resolvedores integrados em um mesmo ambiente e com variados protocolos de comunicação;
- utiliza diferentes níveis de autonomia e descentralização de resultados e decisões;
- é dinâmico;
- é extremamente conflitante em função das muitas e variadas restrições, requerendo variados níveis de cooperação e negociação.

No SMA, cada agente se comunica buscando atingir melhores resultados para si mesmo ou para a sociedade a que pertence, de forma que existe quatro tipos de dependências básicas entre agentes (WOOLDRIDGE, 2002): (i) independência, quando não existe qualquer tipo de dependência entre os agentes; (ii) unilateral, quando um agente depende do outro mas a relação inversa não se verifica; (iii) dependência recíproca, quando um agente depende do outro para um dado objetivo e o outro agente depende do primeiro para um outro objetivo, não necessariamente o mesmo objetivo; (iv) mútua, quando há uma dependência recíproca para o mesmo objetivo.

Dessa forma, uma questão essencial de um SMA é como manter a coerência global sem um controle global explícito. Nesse caso, deve haver uma coordenação, em que os agentes serão capazes de determinar os objetivos que são partilhados com outros, determinar tarefas em comum e evitar conflitos desnecessários. Sua necessidade surge porque (JENNINGS, 1996):

- Existe dependências nas ações dos agentes: as ações necessárias para atingir os objetivos dos agentes individuais estão relacionadas. Isto pode acontecer devido à

decisões locais de agentes terem impactos nas decisões de outros agentes ou devido à possibilidade de existência de interações destrutivas entre os vários agentes.

- Existe a necessidade que o conjunto de agentes respeite restrições globais: estas restrições podem situar-se a nível de custos, tempo, recursos. Se os agentes agissem individualmente não conseguiriam respeitar essas restrições, devem coordenar suas atividades para respeitá-las.
- Nenhum agente individualmente tem recursos, informações ou capacidade suficiente para executar a tarefa ou resolver o problema completo: grande parte dos problemas necessitam de conhecimentos distintos para serem resolvidos, que só podem ser conseguidos por diferentes agentes. No entanto, os conhecimentos distintos dos vários agentes tem de ser combinados de forma a produzir o resultado desejado. Os diversos agentes podem também possuir informações distintas, por exemplo, devido à possuírem sensores distintos ou estarem geograficamente em locais distintos. Podem ainda ter as capacidades de posicionamento diferentes, podendo posicionar-se em zonas distintas. Desta forma, as suas capacidades de percepção e ação sobre o meio serão distintas.

Mesmo quando os agentes individuais possam trabalhar de forma independente dos restantes, a coordenação pode aumentar a eficiência do sistema, devido à (NWANA; LEE; JENNINGS, 1996):

- Prevenção da anarquia e o caos: a coordenação é necessária porque, devido à descentralização dos sistemas multiagentes, a anarquia pode se estabelecer facilmente. Cada agente possui uma visão e conhecimento parcial do ambiente, além de objetivos que podem entrar em conflito com os dos outros agentes. No entanto, podem interagir com os outros mas, como em qualquer sociedade, estas interações podem provocar grande confusão, desordem e desorganização, conduzindo a anarquia. Assim, como

nenhum agente possui uma visão global e autoridade sobre o sistema, é necessário que os agentes coordenem as suas atividades voluntariamente com os restantes.

- Maior eficiência através da divisão de tarefas ou troca de informações: os agentes podem trocar as tarefas que lhes são atribuídas de forma individual por novas tarefas que substituam as anteriores e possam ser executadas de forma mais eficiente por um conjunto de agentes, ou poderão trocar informações ou permitir a utilização de seus recursos computacionais pelos outros, de forma a aumentar a eficiência de uma tarefa executada pelos demais.

Assim, como é necessário mais do que a capacidade de comunicação para que o sistema tenha um comportamento global coerente, surge duas dificuldades básicas dessa abordagem (WOOLDRIDGE, 2002):

- os agentes são muitas vezes implementados por projetistas distintos com objetivos distintos, podendo não partilhar de objetivos comuns, devendo negociar ou argumentar com os outros agentes de forma a persuadi-los a cooperarem;
- como os agentes efetuam suas decisões em tempo de execução, também tem de serem capazes de coordenar, dinamicamente, suas atividades com os outros agentes presentes no ambiente.

Essas dificuldades levaram à propostas de diferentes metodologias de coordenação por parte dos diversos pesquisadores dessa área, no entanto existe uma grande dificuldade em estabelecer uma teoria de coordenação unanimemente aceita. Porém é possível distinguir duas grandes abordagens na construção da coordenação de SMA: (i) sistemas compostos por agentes cooperativos ou não antagonistas; (ii) sistemas compostos por agentes competitivos ou egoístas. No primeiro caso, os agentes comportam-se de forma a incrementar a utilidade (medida de satisfação) global do sistema e não a sua utilidade pessoal, existindo uma preocupação com o aumento do desempenho do sistema global e não do desempenho

individual dos agentes. No segundo caso, cada agente tem sua própria motivação e geralmente não estão interessados no bem da comunidade, mas sim em obter um máximo de sua utilidade individual.

Em casos que os agentes são cooperativos, possuindo objetivos ou problemas similares, as metodologias objetivam manter a coerência global dos agentes, sem violar sua autonomia, geralmente permitindo que grupos de agentes executem tarefas através de decisões conjuntas sobre quais agentes devem executar uma determinada tarefa e quando e a quem devem comunicar os resultados e conhecimento em cada instante. Em casos que os agentes são competitivos, as metodologias buscam maximizar o ganho de cada agente, através de capacidades de negociação e argumentação, sem que exista uma terceira parte a ditar os termos, baseado no fato que é típico que esses agentes partilhem alguns objetivos e exista alguma margem para que se possa atingir acordos que sejam mutuamente benéficos (REIS, 2003).

É óbvio que a abordagem por SMA é adequada para um conjunto de problemas com características particulares, não sendo adequada para a resolução de todos os problemas, mas de acordo com o que foi apresentado sobre a Rede Elétrica Inteligente nos capítulos anteriores, fica claro a enorme potencialidade e probabilidade de uso dessa abordagem para prover as funcionalidades necessárias da modernização do setor elétrico, tendo em vista que os problemas que essa abordagem busca resolver, possuem características similares as características da Rede Elétrica Inteligente.

Porém, há ainda muitos problemas por serem resolvidos e amadurecidos em relação aos SMA, como (RABELO, 2010): (i) mecanismos e protocolos de coordenação; (ii) interoperabilidade semântica entre agentes e sistemas heterogêneos; (iii) técnicas de raciocínio com informação parcial (incompleta e imprecisa) e eventualmente incorreta; (iv) mecanismos de cooperação para suportar o convívio de agentes altruístas e egoístas em um

mesmo ambiente; (v) estratégias de manutenção de convergência de resultados; (vi) planejamento de ações coordenadas em ambientes não cooperativos; (vii) modelagem e manutenção do conhecimento em sistemas com aprendizagem; (viii) gestão e manutenção da reputação dessa abordagem, pois ainda há muito descrédito pelas metodologias não terem ainda uma sólida validação em casos reais, além de que os métodos de verificação formal ainda são incipientes.

Apesar disso tudo, nesse trabalho foi considerado adequado a construção através dessa abordagem do *framework* proposto, principalmente pelas características do SMA, que são incorporadas ao *framework*, e potencialidades de uso de sistemas baseados nessa abordagem na Rede Elétrica Inteligente, de forma que o *framework* proposto seja compatível com essa tendência e até certo ponto, flexível para construção, simulação e avaliação de outras abordagens.

5.2 MODELO CONCEITUAL

A ideia norteadora dessa abordagem (Figura 44) é que cada dispositivo seja representado por um agente inteligente, denominado de Agente de Energia, que deve interagir com outros Agentes de Energia, para prover as funcionalidades do dispositivo para a rede e/ou definir como o dispositivo vai operar de acordo com parâmetros definidos pelo desenvolvedor do Agente de Energia. Na abordagem proposta, cada dispositivo é representado por um único agente e cada agente pode representar um único dispositivo.

Há também um agente denominado Agente de Usuário, que permite a interação do Usuário com o SMA em tempo de execução, podendo visualizar dados e configurar equipamentos caso essas funcionalidades estejam implementadas nos Agentes de Energia.

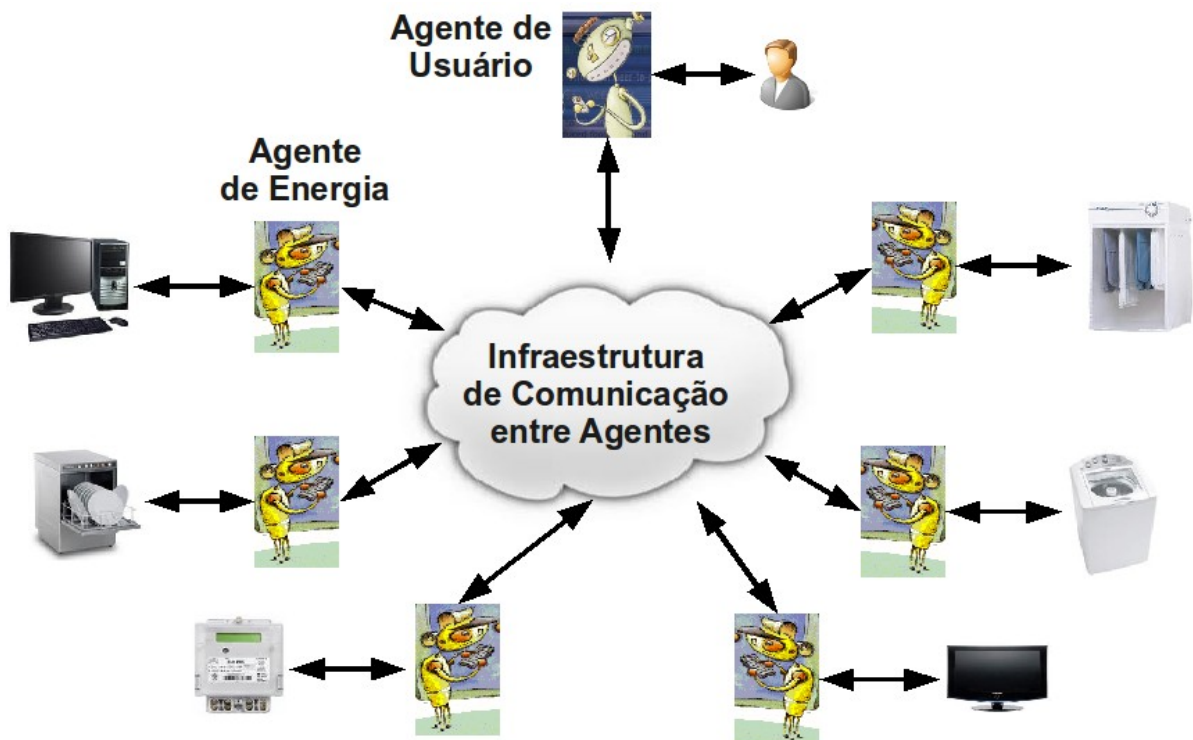


Figura 44 - Modelo conceitual: Operação.

A instanciação dos Agentes de Energia pode ser realizada tanto de forma estática como dinâmica (Figura 45):

- Modo estático: usado geralmente para permitir que o SMA encontre dispositivos que utilizam um protocolo de comunicação em que é necessário uma configuração manual para o estabelecimento de serviços funcionais em rede. Assim, o usuário realiza essa configuração através do Agente de Usuário, que instancia um Agente de Energia capaz de representar o dispositivo com base nos parâmetros configurados.
- Modo dinâmico: usado para permitir que o SMA encontre dispositivos que utilizam um protocolo de comunicação que permite sua descoberta e estabelecimento de serviços funcionais de rede de forma dinâmica. Nesse caso, é utilizado um agente denominado Agente de Descoberta, que identifica quando cada novo dispositivo entra na rede, instanciando automaticamente um Agente de Energia para representá-lo. A utilização desse agente se justifica, pois o conceito utilizado no *framework* proposto é

que cada dispositivo seja controlado por um único agente e por questões de flexibilidade e simplicidade considerou-se mais adequado a especialização da descoberta de dispositivos por um tipo de agente, enquanto outro tipo de agente se especializa na utilização do dispositivo que controla. Assim, o usuário deve configurar no Agente de Usuário quais os tipos de protocolos de comunicação (que permitem a descoberta dinâmica) que vai utilizar no sistema e o Agente de Usuário se encarrega de instanciar um Agente de Descoberta para cada protocolo de comunicação requerido pelo usuário, de forma que um único Agente de Descoberta será responsável pela descoberta de todos os dispositivos que utilizam o mesmo protocolo de comunicação.

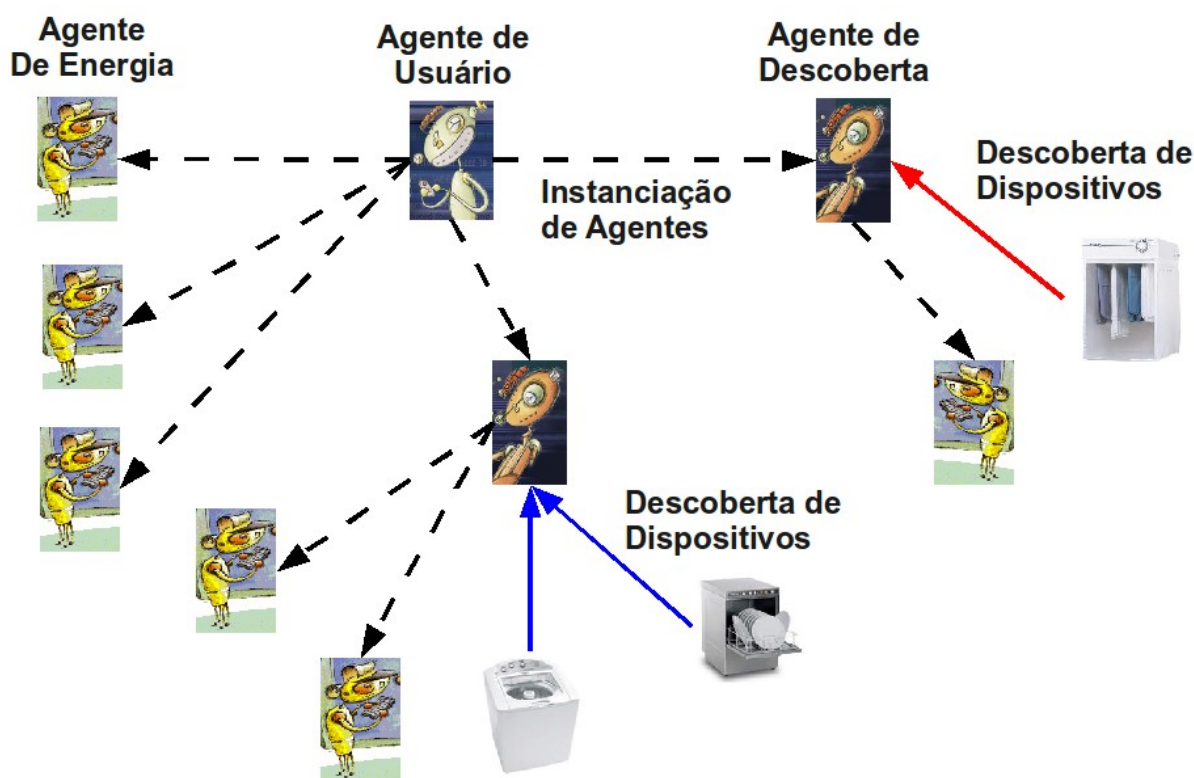


Figura 45 - Modelo conceitual: Instanciação.

Com base no exposto acima, a arquitetura interna de cada um desses agentes será demonstrada e explicada nas próximas seções.

5.2.1 AGENTE DE ENERGIA

Os Agentes de Energia são a parte principal do *framework* proposto, sendo responsáveis pela representação dos equipamentos no SMA, possibilitando tanto o fornecimento de funcionalidades desses equipamentos, como o controle dos mesmos.

Para permitir a flexibilidade necessária, esse agente utiliza três bibliotecas:

- Biblioteca de Interfaces: local onde são armazenadas as interfaces de comunicação previamente desenvolvidas, de forma que o agente possa se comunicar com qualquer dispositivo que utilize um protocolo de comunicação implementado por alguma dessas interfaces. Geralmente fornecem meios para que o agente envie e receba mensagens através de um determinado protocolo de comunicação, fornecendo uma interface padrão ao agente, independente do protocolo utilizado.
- Biblioteca de Dispositivos: local onde são armazenados os modelos, previamente desenvolvidos, de cada equipamento que o agente pode representar, de forma a permitir a operação de cada dispositivo com base em suas características e funcionalidades, que são disponibilizadas ao agente através de uma interface padrão, independente do tipo de equipamento.
- Biblioteca de Algoritmos: local onde são armazenados os algoritmos previamente desenvolvidos para a operação do equipamento, como por exemplo a monitoração do consumo do mesmo ou a minimização do gasto de energia do equipamento.

Com base nos argumentos recebidos ao ser instanciado, o Agente de Energia consulta essas bibliotecas e recebe a interface que utilizará para se comunicar com o equipamento, o tipo de equipamento que vai representar e o algoritmo que vai utilizar nesse equipamento, de forma que seus componentes se dividem em (Figura 46):

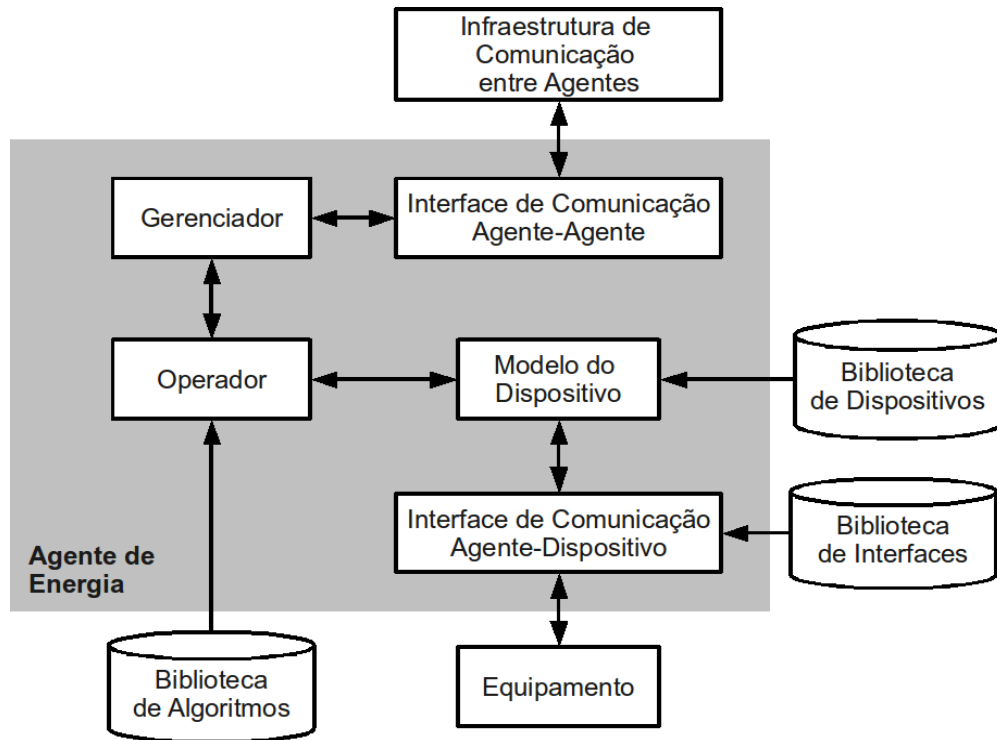


Figura 46 - Arquitetura do Agente de Energia.

- Interface de Comunicação Agente-Dispositivo: é construído a partir da Biblioteca de Interfaces quando o agente é criado, sendo utilizado para que o agente possa se comunicar diretamente com o equipamento que representa através de um determinado protocolo de comunicação.
- Modelo do Dispositivo: é construído a partir da Biblioteca de Dispositivos quando o agente é criado, sendo utilizado para que agente possa operar o equipamento que representa corretamente, utilizando suas funcionalidades específicas.
- Interface de Comunicação Agente-Agente: é utilizado para que o agente possa se comunicar diretamente com outros agentes. Nesse *framework*, é admitido que os agentes interagem através de um mesmo protocolo para a troca e representação de informações.
- Operador: é construído a partir da Biblioteca de Algoritmos quando o agente é criado, sendo responsável por executar um algoritmo para a operação do equipamento de acordo com critérios estabelecidos pelo desenvolvedor.

- Gerenciador: é responsável pela operação do agente, permitindo a execução do algoritmo do Operador, a descoberta de outros agentes e a interação do agente com o SMA.

Sua operação consiste basicamente em executar o algoritmo do Operador, que pode tanto se comunicar com outros agentes como se comunicar diretamente com o equipamento que o agente representa.

5.2.2 AGENTE DE USUÁRIO

O Agente de Usuário é responsável por permitir a interação de usuários com o SMA, podendo possibilitar, por exemplo, a configuração dos equipamentos e visualização de seus dados, devendo ser instanciado ao se criar o SMA, pois é responsável pela criação de outros agentes.

As opções de interação do usuário com o SMA são armazenadas em uma biblioteca denominada de Biblioteca de Interfaces de Usuário. Essa biblioteca armazena as interfaces de usuário previamente desenvolvidas, de forma que diferentes formas de visualização e interação com o SMA possam ser efetuadas pelos usuários, de acordo com critérios do desenvolvedor.

Com base nos argumentos recebidos ao ser instanciado, o Agente de Usuário consulta essa biblioteca e recebe a interface de usuário que utilizará, de forma que seus componentes se dividem em (Figura 47):

- Interface de Usuário: é construído a partir da Biblioteca de Interfaces de Usuário quando o agente é criado, sendo utilizado para que o usuário possa interagir com o SMA através de uma determinada interface.
- Gerenciador: é responsável pela operação do agente, permitindo a interação do usuário com o SMA e a criação de outros agentes.

- Instanciador de Agentes: é responsável por instanciar outros agentes com base nas configurações e comandos do usuário.
- Interface de Comunicação Agente-Agente: é utilizado para que o agente possa se comunicar diretamente com outros agentes. Nesse *framework*, é admitido que os agentes interagem através de um mesmo protocolo para a troca e representação de informações.

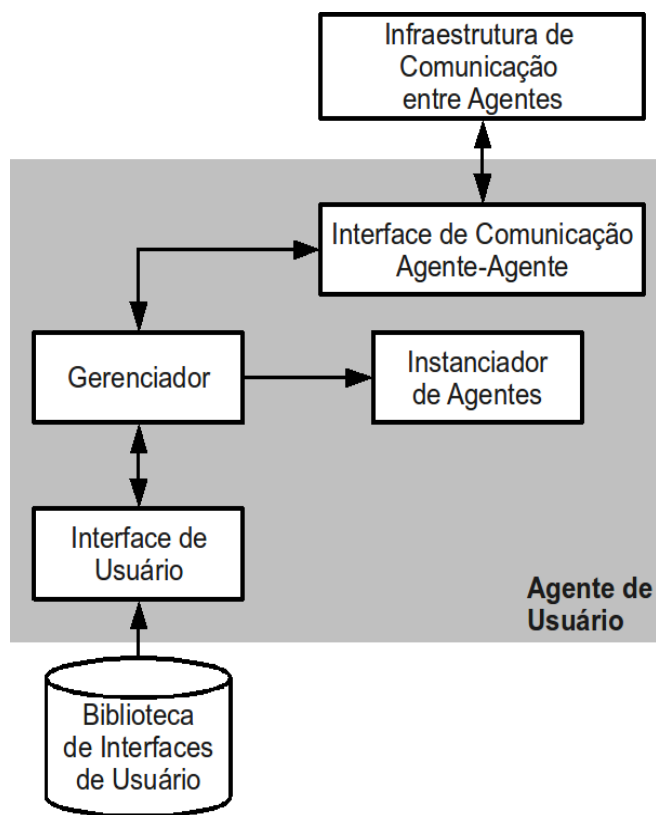


Figura 47 - Arquitetura do Agente de Usuário.

Sua operação consiste basicamente em verificar se os agentes do sistema ainda estão ativos, encontrar novos agentes criados pelo Agente de Descoberta e verificar se o usuário requereu alguma interação com o SMA, tratando essas requisições quando estiver dentro de seu escopo ou enviando-as para outros agentes que deverão tratar as mesmas.

5.2.3 AGENTE DE DESCOBERTA

O Agente de Descoberta é responsável por encontrar dispositivos que permitam sua descoberta na rede e o estabelecimento de serviços de rede funcionais de forma automática, devendo implementar o mesmo protocolo que esses dispositivos utilizam e instanciar Agentes de Energia à medida que encontra novos dispositivos na rede. Esse agente utiliza duas bibliotecas:

- Biblioteca de Interfaces: local onde são armazenadas as interfaces de comunicação previamente desenvolvidas, de forma que o agente possa encontrar qualquer dispositivo que utilize um protocolo de comunicação implementado por alguma dessas interfaces, que apresentam suas funcionalidades em um formato padrão, independente do tipo de protocolo implementado.
- Biblioteca de Dispositivos: local onde são armazenados dados que caracterizam os equipamentos previamente cadastrados no sistema, de forma a permitir a criação de Agentes de Energia apenas para equipamentos conhecidos pelo usuário.

Com base nos argumentos recebidos ao ser instanciado, o Agente de Descoberta consulta a Biblioteca de Interfaces e recebe a interface de descoberta que utilizará, de forma que seus componentes se dividem em (Figura 48):

- Descoberta de Dispositivos: é construído a partir da Biblioteca de Interfaces quando o agente é criado, implementando um mecanismo que permita que o agente descubra dinamicamente equipamentos na rede de acordo com um protocolo específico.
- Gerenciador: é responsável pela operação do agente, com base em um algoritmo previamente definido que permite a descoberta de dispositivos e a instanciação de Agentes de Energia.
- Instanciador de Agentes: é responsável por instanciar Agentes de Energia à medida que o agente descobre equipamentos na rede.

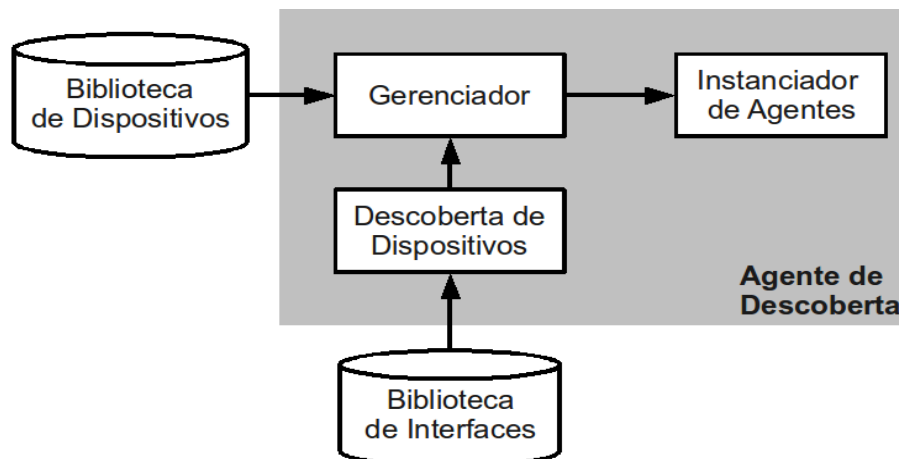


Figura 48 - Arquitetura do Agente de Descoberta.

Sua operação consiste basicamente em realizar uma busca na rede por dispositivos, quando é instanciado, criando um Agente de Energia para representar cada equipamento à medida que os encontra e, posteriormente, quando detectar a entrada na rede de um novo dispositivo, deve também criar automaticamente um Agente de Energia para representá-lo.

5.3 IMPLEMENTAÇÃO

Nessa seção é apresentada uma implementação possível dos componentes de software que fazem parte da arquitetura do *framework* proposto. As tecnologias utilizadas foram escolhidas com base nos requisitos do *framework*, recursos oferecidos por essas tecnologias e familiaridade do desenvolvedor com elas.

Os agentes foram implementados através do framework JADE (*Java Agent Development Framework*) (JADE, 2011) voltado ao desenvolvimento de SMAs, que será apresentado brevemente na próxima seção, enquanto que as seções seguintes apresentam os agentes desenvolvidos de acordo com o que foi previamente apresentado nesse capítulo.

5.3.1 JADE

O JADE é um framework *open source*, implementado de acordo com as especificações propostas pela FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) (FIPA, 2011) e com uma série de outras funcionalidades que vão além dessas especificações, além de possuir um forte suporte de organizações e uma grande comunidade de usuários, o que faz com que o JADE seja considerado um dos principais *frameworks* de agentes compatível com a FIPA (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007).

A FIPA é uma associação internacional sem fins lucrativos que tem a missão de promover tecnologias e especificações de interoperabilidade que facilitem e promovam a interligação de sistemas de agentes inteligentes nos setores industrial e comercial.

O JADE foi implementado em linguagem JAVA, devido a características próprias da linguagem, particularmente pela facilidade de programação orientada a objetos em ambientes distribuídos heterogêneos, tendo sido desenvolvido tanto pacotes JAVA com funcionalidades prontas para o uso, quanto interfaces abstratas para serem adaptadas conforme as funcionalidades requeridas para determinada aplicação de agentes (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007).

Assim, o JADE oferece tanto uma API (*Application Programming Interface*) para o desenvolvimento de agentes em JAVA, como uma plataforma distribuída de agentes em conformidade com as especificações da FIPA, apresentando as seguintes características e funcionalidades:

- plataforma distribuída de agentes;
- ferramentas de depuração;
- suporte à execução de múltiplas, paralelas e concorrentes atividades de agentes;
- ambiente de agentes que obedece aos padrões FIPA;
- mecanismos de transporte de mensagens;

- biblioteca de protocolos FIPA;
- serviços de nomes (*Naming Service*) em conformidade aos padrões FIPA;
- mecanismo que permite que aplicações externas carreguem agentes autônomos JADE;
- multiplataforma;
- modularidade;
- escalabilidade e flexibilidade para a integração de novas funcionalidades além de modificações nas existentes.

O JADE é constituído de contêineres (Figura 49), que provêm todo o suporte necessário para a execução dos agentes, através de uma camada homogênea que encapsula a complexidade e a diversidade de características de baixo nível, como *hardware*, sistemas operacionais, tipos de redes. Diferentes agentes podem existir no mesmo contêiner, sendo que vários contêineres podem existir na mesma plataforma, cada um executado em uma JVM (*Java Virtual Machine*) diferente, que se comunicam através de RMI (*Remote Method Invocation*). Ainda, o JADE provê mecanismos para a comunicação entre agentes de diferentes plataformas.

Em cada plataforma, é necessário um contêiner principal, que representa o ponto de início da plataforma, de forma que outros contêineres devem se associar a ele. É responsável pelo armazenamento dos registros de todos os agentes da plataforma (através do GADT – *Global Agent Descriptor Table*) e de todos os contêineres associados à plataforma (através do CT - *Container table*), e pela hospedagem dos agentes AMS (*Agent Management System*), DF (*Directory Facility*). O LADT (*Local Agent Descriptor Table*) armazena os agentes criados no contêiner, para agilizar a busca por agentes no mesmo contêiner.

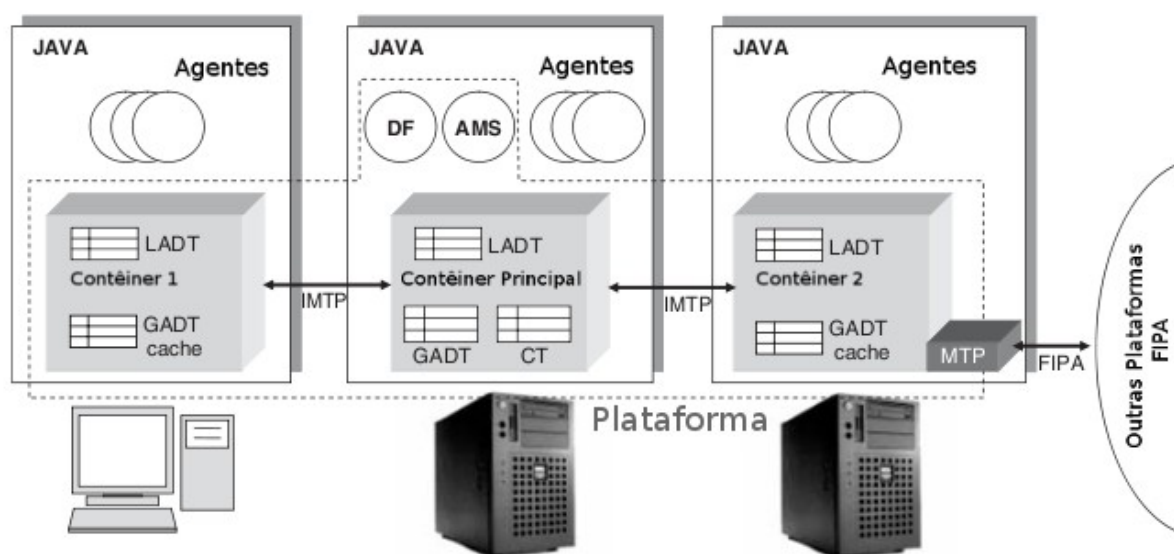


Figura 49 - Relação entre os principais elementos da arquitetura do JADE.

Fonte: Adaptado de Bellifemine, Caire e Greenwood (2007).

O AMS é o agente responsável por gerenciar toda a plataforma, incluindo o ciclo de vida dos agentes e a identificação única de cada um deles. A FIPA estabelece que cada agente deve ter um identificador único (*Agent Identifier – AID*), formando no mínimo pelo nome e endereço do agente, de forma que quando um agente é criado, se registra automaticamente no AMS para obter um AID válido. No JADE, esse identificador é constituído por um nome globalmente único que deve obedecer à estrutura $\langle localname \rangle @ \langle hostname \rangle : \langle port \rangle / JADE$.

O DF fornece meios para que os agentes registrem seus serviços e que os mesmos sejam descobertos pelos demais, de forma que registros, exclusão, modificações e buscas de serviços podem ser feitas a qualquer momento por qualquer agente.

Os agentes são construídos a partir da herança da classe *jade.core.Agent*, que facilita o desenvolvimento dos mesmos através da disponibilização de métodos necessários para realizar as interações básicas com a plataforma e que permitem implementar o comportamento personalizado do agente.

Cada funcionalidade de um agente deve ser implementada como um ou mais comportamentos, através de classes do pacote *jade.core.behaviours*, instanciando-as e adicionando-as ao agente através de um método da classe *jade.core.Agent*. O pacote

jade.core.behaviours contém comportamentos específicos para a maioria das tarefas comuns na programação de agentes. Por exemplo:

- a classe *jade.core.behaviours.CyclicBehaviour* define um comportamento simples que deve ser executado de modo contínuo, se repetindo como se estivesse em um laço infinito;
- a classe *jade.core.behaviours.TickerBehaviour* define um comportamento que precisa ser executado periodicamente para realizar tarefas específicas, em uma determinada frequência de repetições;
- a classe *jade.core.behaviours.OneShotBehaviour* define um comportamento que deve ser executado uma única vez.

O pacote *jade.core.behaviours* ainda possui várias outras classes de comportamentos prontas para uso pelo desenvolvedor, bastando adicioná-las ao agente e adequá-las de acordo com a necessidade específica requerida, como demonstrado por Bellifemine, Caire e Greenwood (2007).

Em relação à comunicação, o JADE é fundamentado em três características principais (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007):

- considerando que agentes são entidades fracamente acopladas, o grau de dependência entre eles é minimizado porque cada um pode escolher, de forma flexível, os destinatários das suas mensagens, além de poder decidir que mensagens quer interpretar ou descartar, também podendo, por exemplo, controlar o seu ciclo de execução para aguardar respostas a mensagens que enviou;
- a comunicação é considerada apenas mais um tipo de ação que pode ser executada pelo agente, de forma que os agentes podem tanto realizar ações físicas quanto ações comunicativas. Dessa forma, também podem planejar a comunicação, definindo claramente os efeitos e pré-condições associados a cada comunicação possível;

- a comunicação traz consigo um significado semântico. Quando um agente é objeto de uma ação comunicativa recebendo uma mensagem, ele deve ser capaz de compreender o significado desta ação e qual a intenção comunicativa do agente que enviou a mensagem. Por isso a necessidade de uma semântica universal e a necessidade de um padrão de comunicação.

Na especificação FIPA, há a definição de uma linguagem de comunicação de agentes, chamada de *Agent Communication Language (ACL)*, baseada na teoria dos atos de fala e nessas três características descritas acima. Por exemplo, uma mensagem do tipo *inform*, indica a comunicação de informações, já uma mensagem do tipo *request*, indica um pedido a um dado agente para executar uma dada ação, enquanto que uma mensagem do tipo *refuse*, indica a recusa de executar uma determinada ação. Outros tipos de mensagens podem ser consultadas em Bellifemine, Caire e Greenwood (2007).

No JADE, os agentes se comunicam enviando mensagens individuais uns para os outros através do envio de mensagens FIPA-ACL de modo assíncrono. Os agentes interpretam as mensagens como atos de fala e não como chamadas do sistema. Ainda, o JADE codifica as mensagens trocadas pelos agentes de forma transparente para o desenvolvedor e define que mensagens FIPA-ACL são transportadas na plataforma, mas não define nenhum padrão para o conteúdo das mensagens, que ficam sob a responsabilidade do desenvolvedor.

A classe *jade.lang.acl.ACLMessage* provê mecanismos para a comunicação de mensagens na especificação FIPA-ACL, de forma que para enviar mensagens a outros, o agente deve instanciar um objeto dessa classe, preencher a mensagem com as informações necessárias em cada campo correspondente e chamar o método de envio de mensagem da classe *jade.core.Agent*. As mensagens recebidas são armazenadas em um repositório de mensagens recebidas do agente destinatário, que é notificado ao receber uma nova mensagem,

mas que pode escolher quando e se processará a mensagem, devendo criar um objeto da classe *jade.lang.acl.ACLMessage* e executar o método de retirada de mensagens do seu repositório provido pela classe *jade.core.Agent*. O JADE ainda possibilita que o conteúdo das mensagens seja tanto textual, como por objetos JAVA do tipo *java.io.Serializable*. Porém, a FIPA estabelece que todas as trocas de mensagens entre agentes devem estar baseadas em texto, devendo o desenvolvedor estar atento a isso.

Ainda, o JADE apresenta uma série de outras ferramentas, como um console gráfico para gerenciamento e controle da plataforma e ferramentas de depuração que permitem a visualização de mensagens comunicadas entre agentes e outras funcionalidades que buscam facilitar o desenvolvimento de SMAs.

5.3.2 AGENTE DE ENERGIA

O diagrama de classes referente ao Agente de Energia, responsável pela representação dos equipamentos, é demonstrado, de forma resumida, na Figura 50. O Agente de Energia herda a classe *jade.core.Agent*, que disponibiliza os métodos necessários para realizar as interações básicas com a plataforma JADE e que permite implementar o comportamento personalizado do agente.

Esse agente possui um operador, que implementa o algoritmo responsável pela operação do equipamento. Esse operador possui um modelo do dispositivo que o agente representa, que encapsula as características e funcionalidades disponibilizadas pelo equipamento específico e fornece uma interface padrão para a interação com o equipamento. Esse modelo possui uma interface para a comunicação entre o agente e o dispositivo, que implementa um determinado protocolo de comunicação e fornece uma interface padrão para a interação com o equipamento.

Essas classes (Operador, Modelo do Dispositivo e Interface de Comunicação Agente-Dispositivo) são classes abstratas, que definem um comportamento geral e servem de modelo para outras classes que sejam construídas a partir delas e que devem implementar o comportamento mais específico. Esse agente também usa uma base de dados para instanciar um objeto que implemente o operador específico, que deve possuir um objeto que implemente o modelo específico do dispositivo, que também deve possuir um objeto que implemente o protocolo específico de comunicação com o mesmo. Além disso, o agente utiliza alguns pacotes do JADE que fornecem funcionalidades que serão descritas ao final dessa seção.

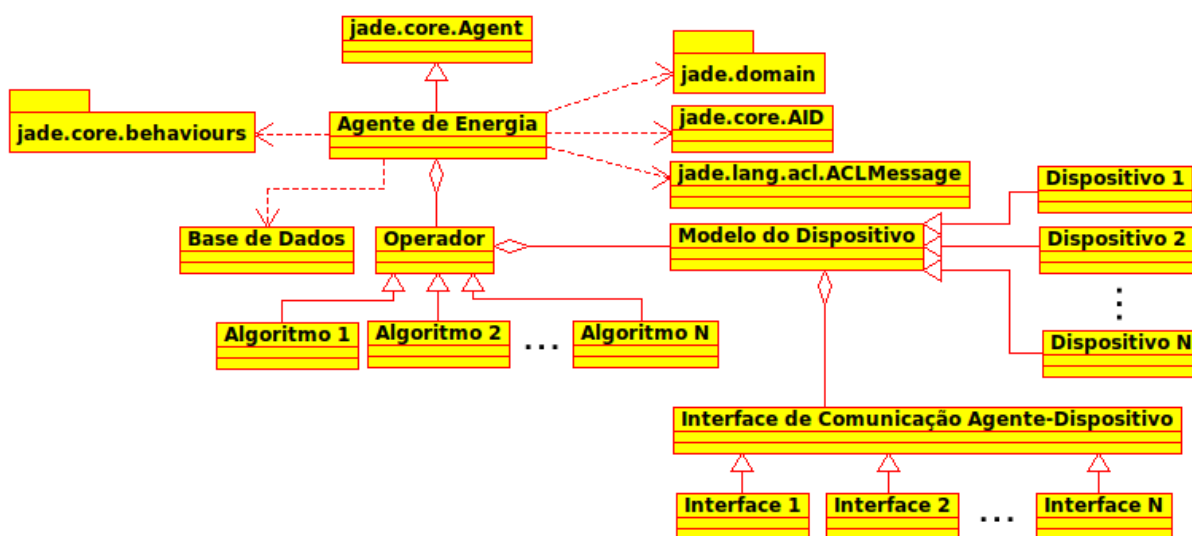


Figura 50 - Diagrama de classes do Agente de Energia.

Esse agente ao ser criado deve receber como parâmetros informações que possibilitem identificar o dispositivo que deve representar, o protocolo de comunicação e o algoritmo que deverá utilizar com esse dispositivo. Essas informações são utilizadas para instanciar os objetos específicos, através de um método da classe Base de Dados, que herdam as classes abstratas Operador, Modelo do Dispositivo e Interface de Comunicação Agente-Dispositivo.

O agente interage com o objeto que implementa o algoritmo de operação específico, através de um método definido pela classe abstrata Operador, que é herdado por esse objeto e é executado continuamente pelo agente. Esse método recebe um argumento textual que ou é

nulo ou contém dados em relação à uma mensagem (e.g., conteúdo da mensagem, remetente) recebida de algum outro agente e retorna um argumento que ou é nulo ou contém dados para o envio de uma mensagem (e.g., conteúdo da mensagem, destinatários) para outros agentes.

Assim, vários tipos de algoritmos podem ser implementados dessa forma, desde que tenham uma classe que herde a classe Operador e que sobrescreva esse método em sua implementação, podendo incluir em seu algoritmo o recebimento e envio de mensagens de operadores implementados pelos outros Agentes de Energia e da interface implementada pelo Agente de Usuário. Dessa forma, as ações que o agente vai executar, em relação ao dispositivo que encapsula e ao SMA, são decididas pelo seu operador, com base no algoritmo utilizado.

O operador instanciado interage com um objeto que modela o dispositivo específico, através de métodos definidos pela classe abstrata Modelo do Dispositivo e que são herdados por esse objeto. Essa classe define os diferentes métodos possíveis de utilização, de acordo com as funcionalidades disponibilizadas pelos diferentes modelos de dispositivos implementados.

Assim, diferentes dispositivos podem ser implementados dessa forma, bastando que herdem a classe Modelo do Dispositivo e que sobrescrevam os métodos que julgarem necessário alterar ou utilizar. Por exemplo, se um dispositivo aceita um comando para ligar, um método que permita enviar esse comando ao dispositivo deve estar declarado na classe abstrata Modelo do Dispositivo e implementada na classe específica que modela esse equipamento. Um algoritmo que ligue o equipamento, deve apenas executar esse método do objeto que implementa a classe que modela o equipamento específico.

Dessa forma, o algoritmo utilizado pelo operador pode considerar em sua implementação tanto as operações necessárias sob o ponto de vista do equipamento

individual, como também as operações necessárias considerando o SMA, através das interações com os outros agentes.

O objeto que modela o dispositivo específico, interage com o equipamento através de outro objeto, que herda um método definido pela classe abstrata Interface de Comunicação Agente-Dispositivo, que modela uma interface de comunicação específica para comunicação com o dispositivo. Esse método executa uma comunicação com o dispositivo, recebendo argumentos que indicam o que deve ser comunicado e retornando argumentos que indicam a resposta, se existente, do dispositivo. Dessa forma, diferentes protocolos de comunicação podem ser implementados, bastando que herdem a classe Interface de Comunicação Agente-Dispositivo e que sobrescrevam esse método.

Assim, por exemplo, um Agente de Energia representa uma máquina de lavar roupas e se comunica com ela através de um determinado protocolo, enquanto que outro Agente de Energia representa outra máquina de lavar roupas, mas que utiliza um protocolo diferente da primeira máquina. Através do objeto instanciado a partir da classe Interface de Comunicação Agente-Dispositivo os dois agentes terão a sua disposição os mesmos métodos de envio e recebimento de mensagens, mas que estarão implementados de acordo com o protocolo utilizado por cada uma das máquinas.

No caso em que um Agente de Energia represente uma máquina de lavar roupas de uma marca e outro Agente de Energia represente uma máquina de lavar roupas de outra marca, embora os dois dispositivos possuam funcionalidades similares (e.g., ligar, desligar) e possam utilizar o mesmo protocolo de comunicação, geralmente necessitam de comandos específicos para executar o mesmo serviço. Assim, cada agente possuirá um objeto instanciado a partir da classe Modelo do Dispositivo que fornece os métodos para interagir com o equipamento, mas que foram implementados de maneira diferente e específica de acordo com a marca do equipamento que modelam.

Por fim, o algoritmo que um Agente de Energia utiliza para operar o seu equipamento também pode ser diferente do algoritmo utilizado por outro Agente de Energia. Para isso, cada agente utiliza um objeto instanciado a partir da classe *Operador* que implementa um algoritmo específico de acordo com os argumentos recebidos pelo agente ao ser instanciado. Por exemplo, pode possuir um algoritmo de monitoração e informação do consumo de energia do equipamento que o agente representa, ou então executar algum algoritmo que busque minimizar algum parâmetro, como o valor pago por energia consumida pelo equipamento. O objeto instanciado a partir da classe *Operador* pode ainda interagir com outros objetos instanciados dessa classe mas que estão em outros Agentes de Energia, de acordo com a coordenação implementada, que pode ser de diferentes tipos conforme visto na seção 5.1.

Nesses exemplos foram apresentados separadamente diferentes possibilidades em relação à comunicação, tipo de equipamento e algoritmos de operação, mas na prática, essas diferentes opções são combinadas, gerando uma grande variedade de possibilidades para a concepção do Agente de Energia, de uma forma bastante flexível e de fácil utilização.

Ainda, esse agente possui um comportamento do tipo *jade.core.behaviours.CyclicBehaviour*, que executa continuamente o algoritmo de operação do equipamento, fornecendo as mensagens recebidas do SMA para o mesmo e enviando mensagens do mesmo para o SMA. Essa comunicação ocorre através de métodos das classes *jade.core.AID*, que fornece meios para identificar unicamente cada agente, e *jade.lang.acl.ACLMESSAGE*, que fornece meios para enviar e receber mensagens utilizando a linguagem FIPA-ACL.

O agente também implementa um comportamento do tipo *jade.core.behaviours.TickerBehaviour*, sendo responsável por identificar a entrada de Agentes de Energia no SMA, que se registram no DF (*Directory Facility*) ao serem instanciados. Esse

comportamento verifica periodicamente no DF se algum agente entrou no sistema através de funcionalidades providas pelo pacote *jade.domain* e atualiza uma lista interna de agentes ativos.

5.3.3 AGENTE DE USUÁRIO

O diagrama de classes referente ao Agente de Usuário, responsável por permitir a interação de usuários com o sistema, é demonstrado de forma resumida na Figura 51. O Agente de Usuário herda a classe *jade.core.Agent*, que disponibiliza os métodos necessários para realizar as interações básicas com a plataforma JADE e que permite implementar o comportamento personalizado do agente.

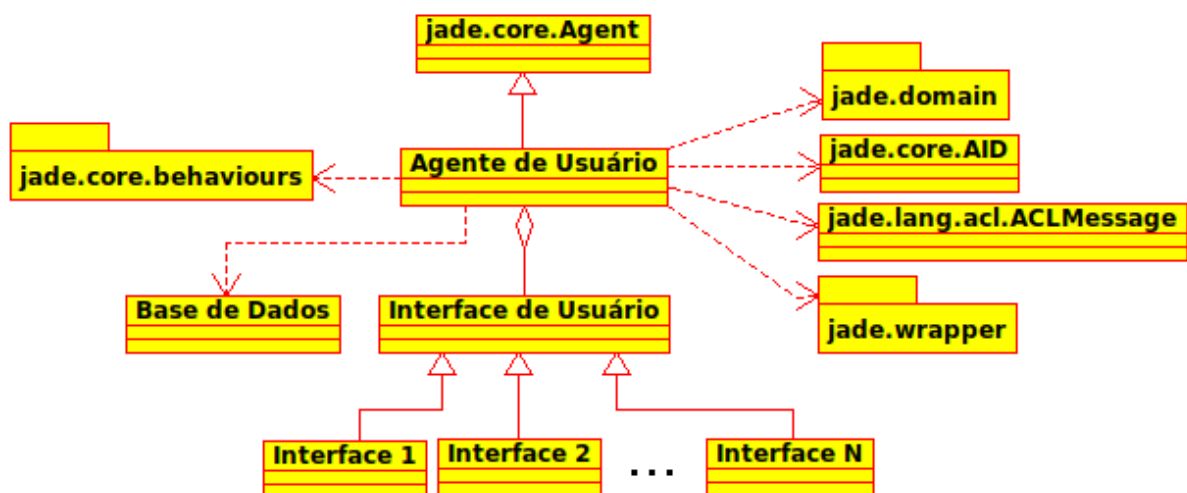


Figura 51 - Diagrama de classes do Agente de Usuário.

Esse agente possui uma interface com o usuário, que permite a interação do usuário com o SMA. Essa classe (Interface de Usuário) é uma classe abstrata, que define um comportamento geral e serve de modelo para outras classes que sejam construídas a partir dela e que devem implementar o comportamento mais específico. Esse agente também usa uma base da dados para instanciar um objeto que implemente a interface de usuário

específica. Além disso, o agente utiliza alguns pacotes do JADE que fornecem funcionalidades que serão descritas ao final dessa seção.

Esse agente, ao ser criado, deve receber como parâmetro uma informação que possibilite identificar qual interface de usuário que deve disponibilizar. Essa informação é utilizada para instanciar, através de um método da classe Base de Dados, um objeto que herda a classe Interface de Usuário e que implementa uma interface com usuário específica.

Assim, a interface de usuário pode ser de diferentes tipos, apresentando características de acordo com o dispositivo que irá ser utilizado para a interação ou de acordo com outros critérios do desenvolvedor. Para isso, basta construir uma classe que implemente uma interface específica e que herde a classe abstrata Interface de Usuário, que disponibiliza métodos para a interação do usuário com cada Agente de Energia e que também permitem a configuração do SMA.

Então, por exemplo, se o usuário quiser habilitar a descoberta dinâmica de dispositivos que utilizam uma determinada tecnologia, deve executar algum comando na Interface de Usuário que permita essa opção. Assim, o Agente de Usuário instancia automaticamente o Agente de Descoberta para aquela tecnologia de comunicação requerida. Porém, se o usuário quiser criar um Agente de Energia para representar um equipamento específico, deve executar algum comando na Interface de Usuário que permita fornecer os dados necessários para a instanciação do agente, como, por exemplo, a configuração manual requerida para a comunicação, tipo de equipamento e operador requerido, de forma que o Agente de Usuário instancia automaticamente um Agente de Energia capaz de representar o equipamento e operar no SMA.

Se usuário quiser interagir com um determinado dispositivo, pode requerer, através de sua interface com o Agente de Usuário, que o Agente de Energia desse dispositivo forneça as opções de interação possíveis. Nessa caso, o Agente de Usuário envia uma mensagem ao

Agente de Energia específico com a requisição do usuário. O Agente de Energia verifica que opções possui e envia uma mensagem para o Agente de Usuário com suas opções, que são demonstradas para o usuário na Interface de Usuário disponibilizada.

O usuário pode requerer a execução de alguma daquelas opções, como por exemplo, receber informações do equipamento, dados de consumo ou enviar configurações. Então o processo se repete, o Agente de Usuário envia uma mensagem para o Agente de Energia, que executa o comando do usuário e envia uma mensagem ao Agente de Usuário, que disponibiliza a resposta do Agente de Energia para o usuário.

Assim, é possível que cada Agente de Energia disponibilize comandos específicos de interação, de acordo com o dispositivo que representa, enquanto que o Agente de Usuário disponibiliza esses comandos através de sua interface de visualização e interação provida ao usuário, servindo como um meio de interação do usuário com o SMA, separando a interface da implementação.

Esse agente executa um comportamento do tipo *jade.core.behaviours.TickerBehaviour*, sendo responsável por identificar, de forma dinâmica, a entrada e saída de Agentes de Energia no SMA. Esse comportamento verifica periodicamente no DF (*Directory Facility*) se algum agente entrou no sistema, através de funcionalidades providas pelo pacote *jade.domain* e atualiza uma lista interna de agentes ativos e executa um método do objeto que implementa a interface de usuário informando sobre a adição do agente.

O agente também executa um comportamento do tipo *jade.core.behaviours.CyclicBehaviour*, que espera por mensagens dos agentes e executa um método específico do objeto que implementa a interface do usuário, passando-as como argumento, assim que são recebidas, de forma que esse objeto é responsável por tratar as mensagens, geralmente mostrando-as ao usuário.

Além disso, o agente implementa um comportamento do tipo *jade.core.behaviours.TickerBehaviour*, que verifica periodicamente se o objeto que implementa a interface de usuário possui alguma requisição do usuário para ser tratada, através de um método disponibilizado pelo mesmo. Se o usuário requereu alguma interação com o SMA de forma geral, o Agente de Usuário verifica qual foi o comando e o executa, mas se o usuário requereu alguma interação com o SMA para um agente específico, o comando do usuário é transmitido em uma mensagem para esse agente, que deve tratar da mesma.

Esse agente se comunica com outros agentes através de métodos das classes *jade.core.AID*, que fornece meios para identificar unicamente cada agente, e *jade.lang.acl.ACLMESSAGE*, que fornece meios para enviar e receber mensagens utilizando a linguagem FIPA-ACL. Além disso, cria agentes através de funcionalidades providas pelo pacote *jade.wrapper*.

5.3.4 AGENTE DE DESCOBERTA

O diagrama de classes referente ao Agente de Descoberta, responsável por descobrir dispositivos que permitam sua descoberta e o estabelecimento de serviços de rede funcionais de forma automática, é demonstrado de forma resumida na Figura 52. O Agente de Descoberta herda a classe *jade.core.Agent*, que disponibiliza os métodos necessários para realizar as interações básicas com a plataforma JADE e que permite implementar o comportamento personalizado do agente.

Esse agente descobre dinamicamente equipamentos na rede através da classe Descoberta de Dispositivos, que permite a descoberta e o estabelecimento de serviços de rede funcionais de forma automática com os equipamentos. Essa classe é uma classe abstrata, que define um comportamento geral e serve de modelo para outras classes que sejam construídas a

partir dela e que devem implementar o comportamento mais específico. Esse agente também usa uma base de dados para instanciar um objeto que implemente um mecanismo de descoberta específico e para verificar se os equipamentos encontrados estão cadastrados no sistema. Além disso, o agente utiliza alguns pacotes do JADE que fornecem funcionalidades que serão descritas ao final dessa seção.

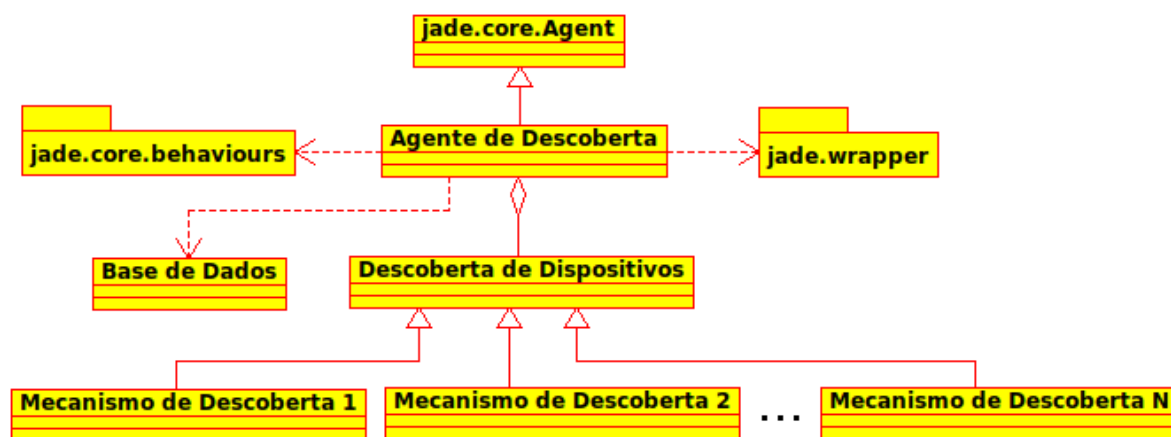


Figura 52 - Diagrama de classes do Agente de Descoberta.

Esse agente ao ser criado, deve receber como parâmetro uma informação que possibilite identificar qual mecanismo, que permita a descoberta dinâmica de dispositivos em rede, que deve utilizar. Essa informação é utilizada para instanciar, através de um método da classe Base de Dados, um objeto que herda a classe Descoberta de Dispositivos. Esse objeto implementa um mecanismo específico que apresenta as funcionalidades requeridas para a descoberta de dispositivos em uma determinada tecnologia que permite a conexão de dispositivos em rede de forma automática.

Assim, diferentes mecanismos de descoberta de dispositivos podem ser implementados, cada um referente a uma determinada tecnologia, bastando construir uma classe que implemente o mecanismo de descoberta requerido e que herde a classe abstrata Descoberta de Dispositivos, que possui um método para a procura de dispositivos e outro que fornece dados dos dispositivos encontrados.

Por exemplo, o JINI (FREIRE, 2011), que permite que dispositivos criem uma rede de comunicação dinâmica e compartilhem serviços nesta rede, utiliza um repositório para que os dispositivos registrem seus serviços e procurem pelos serviços disponíveis, sendo que esse repositório poderia ser implementado através da classe Descoberta de Dispositivos. Ao ser criado, o agente realizaria uma busca por equipamentos disponíveis e criaria um Agente de Energia para cada um, passando como argumento a referência ao dispositivo encapsulado. Quando um novo dispositivo entrasse na rede, informaria ao agente de sua presença, que imediatamente criaria um Agente de Energia para encapsular o dispositivo.

O UPnP (UPNP, 2011), que também permite que os dispositivos estabeleçam serviços funcionais de rede dinamicamente, permite que os serviços disponibilizados sejam encontrados diretamente por clientes que queiram utilizá-los. Assim a esse agente poderia implementar um desses clientes, mas com apenas o protocolo de descoberta, sendo que o Agente de Energia criado para controlar o dispositivo teria o restante do protocolo, o que permitiria a utilização dos serviços do dispositivo, mas ignoraria a entrada de novos dispositivos na rede.

Assim, para permitir a modularidade e flexibilidade de utilização de diversos protocolos de descoberta dinâmica no *framework* proposto, alguns ajustes e redundâncias são necessárias, já que é a maioria desses protocolos permitem que os serviços utilizados estejam disponíveis para qualquer entidade que queira utilizá-los, enquanto que na abordagem proposta os serviços devem ser utilizados unicamente pelo Agente de Energia que representa o dispositivo. Dessa forma, para alguns protocolos será necessário que o Agente de Descoberta ignore, ou não implemente, a parte do protocolo que lide com a utilização dos serviços e que o Agente de Energia também ignore ou não utilize a parte do protocolo que lide com a descoberta de dispositivos, ou ainda que o Agente de Energia realize uma nova busca de dispositivos ao ser instanciado, mas encapsule apenas aquele que recebeu como

referência do Agente de Descoberta e ignore os outros. Cabe ao desenvolvedor, com base em seu conhecimento em relação ao protocolo que deseja implementar no sistema, identificar as variações necessárias e o que vai implementar em cada agente.

Ainda, esse agente executa um comportamento do tipo *jade.core.behaviours.OneShotBehaviour*, quando é instanciado, executando o método que realiza uma busca na rede por dispositivos, do objeto que implementa o mecanismo de descoberta utilizado.

O agente também executa um comportamento do tipo *jade.core.behaviours.TickerBehaviour*, que verifica periodicamente se um novo dispositivo foi encontrado, através do método que fornece dados dos dispositivos encontrados, do objeto que implementa o mecanismo de descoberta. Sempre que um novo dispositivo é encontrado, o agente verifica, através de um método da classe Base de Dados, se aquele dispositivo está cadastrado no sistema. Em caso positivo, instancia um Agente de Energia, através de funcionalidades providas pelo pacote *jade.wrapper*, que possuirá como nome a referência ao dispositivo (e.g., nome e endereço) e receberá como argumentos dados para conseguir encontrar o dispositivo, estabelecer a comunicação com o mesmo e operá-lo. Em caso negativo, o dispositivo é simplesmente ignorado.

5.4 DISCUSSÃO

O *framework* proposto implementa uma arquitetura que pode ser utilizada para a construção, simulação e análise de sistemas de gestão de energia. O mesmo foi construído através de uma abordagem por Sistemas Multiagentes, que busca resolver problemas que possuem características similares aos da Rede Elétrica Inteligente. Dessa forma, é possível utilizar diversos trabalhos que propõem soluções utilizando Sistemas Multiagentes e aplicá-

los mais facilmente no cenário da Rede Elétrica Inteligente com o objetivo de gerar soluções nessa área.

O *framework* implementa mecanismos de criação, identificação, descoberta e execução de agentes, além de permitir a comunicação entre os mesmos, devido ao uso do JADE. Além disso, define classes e formas de interação entre elas que capturam algumas decisões de projetos de sistemas de gestão de energia, facilitando o desenvolvimento de aplicações futuras. Através dessas classes, permite o uso de uma série de protocolos para a comunicação com equipamentos, além da utilização de diferentes tipos de equipamentos, algoritmos para a operação dos mesmos e formas de interação do usuário com os sistemas construídos.

6 VERIFICAÇÃO DA PROPOSTA

Este capítulo apresenta alguns testes realizados com *framework* proposto, que utilizam os conceitos e as implementações definidas no capítulo anterior. Para que o usuário possa interagir com o SMA nesses estudos de caso, foi necessário desenvolver uma Interface de Usuário que será apresentada a seguir. Posteriormente, os diferentes estudos de caso serão demonstrados.

6.1.1 INTERFACE DE USUÁRIO

Para permitir a operação do sistema pelo usuário, foi desenvolvida uma interface de usuário, que executa em um computador, para uso com o Agente de Usuário do *framework* proposto e que herda a classe Interface de Usuário, sobrescrevendo seus métodos para a interação adequada do usuário. A Figura 53 demonstra a tela principal dessa interface. O usuário interage com o SMA através de opções na barra superior e com cada Agente de Energia no diretório de dispositivos (Dispositivos) no campo à esquerda ao lado da figura da interface. Nessa figura, a interface apresenta três Agentes de Energia (MáquinaDeLavarRoupas, Computador, MedidorDeEnergia), cada um com as opções que disponibiliza para a interação do usuário.

Esse diretório de dispositivos é atualizado em tempo de execução, à medida que Agentes de Energia são criados ou encontrados pelo Agente de Usuário. Basicamente, apresenta no segundo nível o endereço de cada Agente de Energia e no terceiro nível as opções de interação que cada Agente de Energia oferece, de acordo com o Modelo do Dispositivo e do Operador que utiliza. Quando o Agente de Usuário cria ou encontra um Agente de Energia no sistema, automaticamente executa um método da Interface de Usuário informando a adição de um agente no SMA. A Interface do Usuário então requisita um envio de uma mensagem para esse agente, requerendo as opções que o mesmo disponibiliza para a

interação do usuário. O Agente de Usuário envia essa mensagem e ao receber a resposta encaminha a mesma para a Interface de Usuário, que organiza as opções fornecidas pelo Agente de Energia no terceiro nível desse diretório de dispositivos.

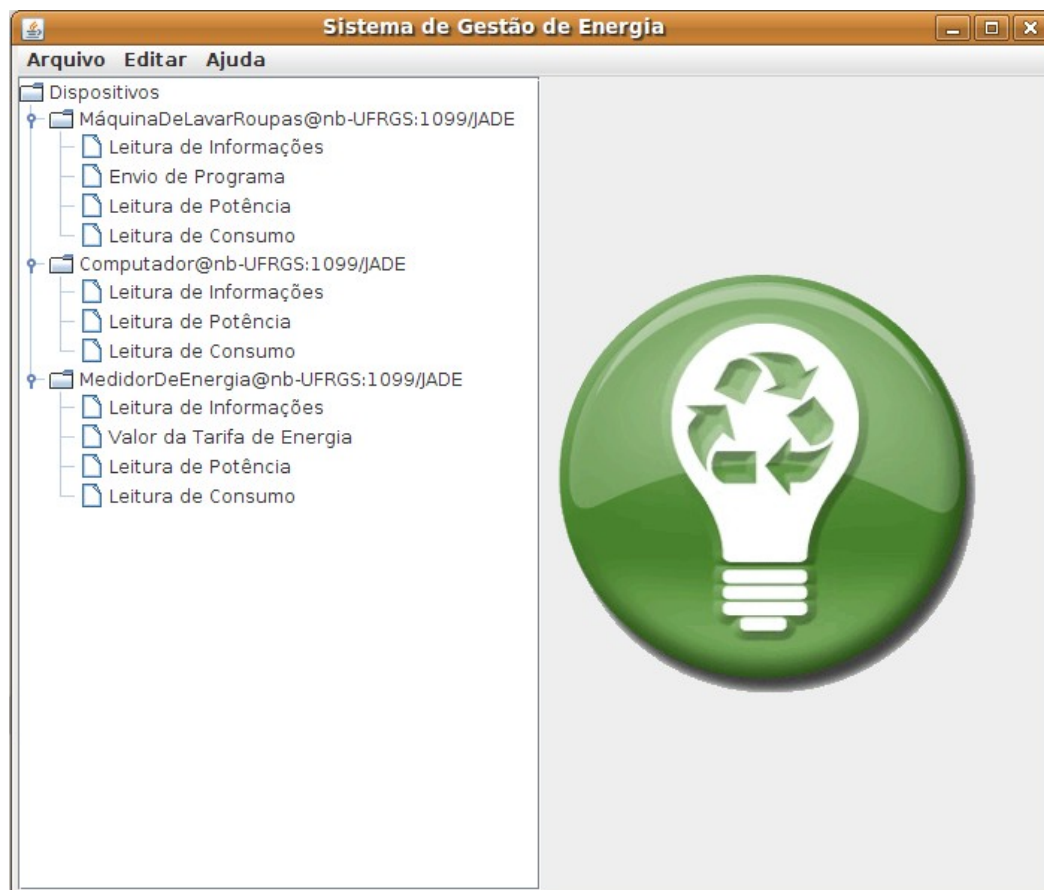


Figura 53 - Interface desenvolvida.

O usuário pode interagir com o Agente de Energia ao clicar com o mouse em qualquer um desses itens no terceiro nível do diretório de dispositivos. Ao fazer isso, a Interface de Usuário detecta essa requisição e posteriormente o Agente de Usuário envia uma mensagem com a requisição do usuário ao Agente de Energia específico, que quando recebe a mesma, executa a requisição requerida e envia uma resposta ao Agente de Usuário, que deve repassar a mesma à Interface de Usuário. Por exemplo, na Figura 53, uma máquina de lavar roupas fornece opções de:

- **Leitura de Informações:** quando o usuário clica nesse item, uma mensagem é enviada ao agente que representa esse dispositivo, que retorna com uma mensagem contendo as informações do dispositivo, que são demonstradas ao usuário (Figura 54a).
- **Envio de Programa:** quando o usuário clica nesse item, uma mensagem é enviada ao agente que representa o dispositivo, que retorna com uma mensagem contendo as opções de programação do dispositivo, que são demonstradas ao usuário (Figura 54b). O usuário pode então escolher as opções (Programa e Tempo Limite para Finalização) e ao clicar no botão OK, uma mensagem é enviada ao Agente de Energia com a configuração do usuário para aquele equipamento.
- **Leitura de Potência:** quando o usuário clica nesse item, uma mensagem é enviada ao agente que representa o dispositivo, que retorna com uma mensagem contendo um histórico em relação à potência medida, que é demonstrada em um gráfico para a fácil análise pelo usuário.
- **Leitura de Consumo:** ocorre o mesmo processo da leitura de potência, só que a mensagem retornada contém o histórico em relação energia consumida.

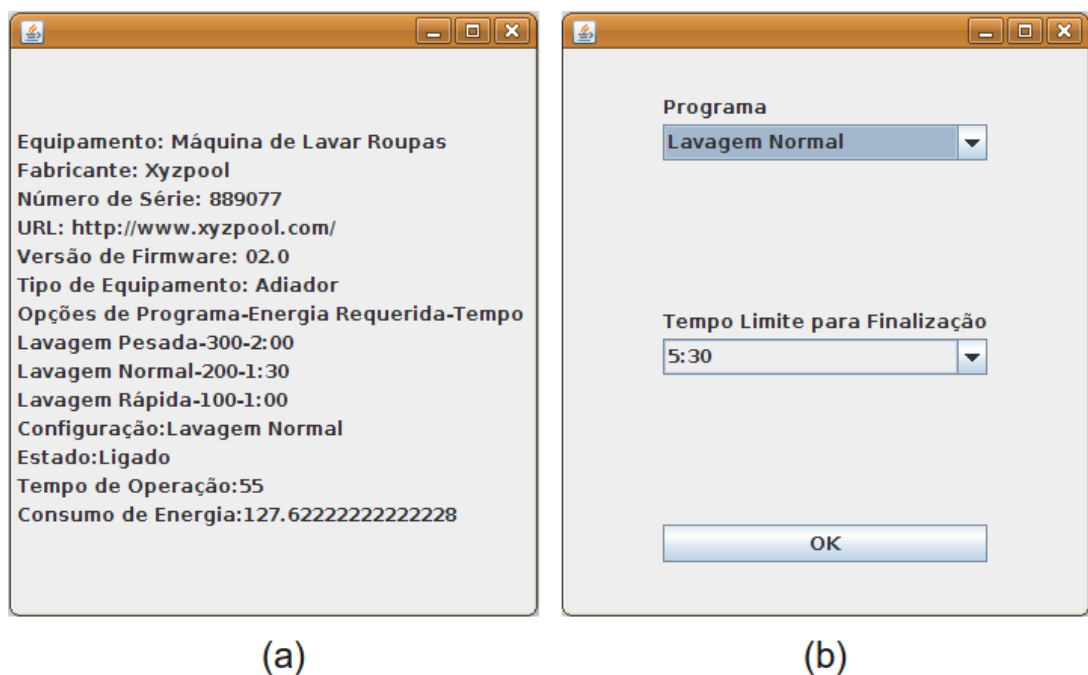


Figura 54 - Formas de interação.

Assim, essa interface permite que as diferentes informações de cada Agente de Energia sejam demonstradas ao usuário, que pode interagir com cada um desses agentes de um modo bastante fácil.

6.2 ESTUDO DE CASO 1: OPERAÇÃO DE DISPOSITIVOS REAIS

Este estudo de caso demonstra como é possível, utilizando o *framework* proposto, monitorar e controlar o consumo de diferentes equipamentos reais através de um adaptador que permite a medição do consumo e o controle liga/desliga de equipamentos conectados à ele.

6.2.1 ADAPTADOR

O adaptador utilizado (Figura 55) deve ser conectado a uma tomada e oferece uma entrada para a conexão de dispositivos, de forma que é capaz de medir a tensão e a corrente requerida pelo dispositivo e conseqüentemente a potência e a energia consumida pelo mesmo. Opcionalmente, é possível controlar o dispositivo através de um relé que deve ser adaptado entre o dispositivo e a entrada para conexão de dispositivos do adaptador.

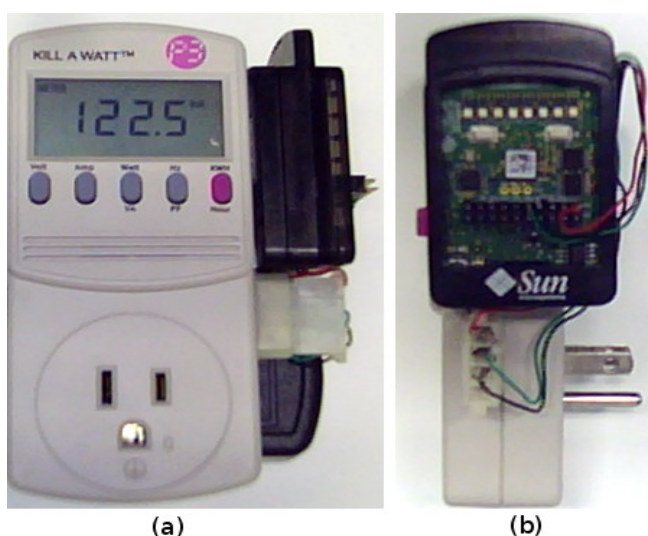


Figura 55 - Adaptador: (a) Vista Frontal. (b) Vista Lateral.

Esse adaptador se comunica através do padrão 6lowPAN (IPv6 *over Low power Wireless Personal Area Networks*), que é um padrão que otimiza o IPv6 para uso em comunicações sem fio com baixo consumo de energia e com baixa largura de banda, utilizando nas camadas inferiores o padrão IEEE 802.15.4.

O adaptador mede continuamente a tensão e corrente requeridas pelo equipamento e calcula o valor da potência e da energia consumida no período, atualizando o valor de uma variável que armazena o valor total da energia consumida pelo dispositivo. Ao receber um comando de leitura, envia o valor mais atual que possui em relação à tensão, corrente e potência, além do valor total da energia consumida pelo dispositivo. Ao receber um comando de controle, altera o estado de uma porta de I/O, usada para controlar o acionamento do relé.

Um software de controle do adaptador (SCA), que executa em um computador, é responsável por enviar comandos e realizar leituras nesse adaptador. Para isso, é conectado em uma porta USB do computador um dispositivo que recebe comandos e os transmite para a rede sem fio. Esse sistema opera em uma abordagem cliente-servidor, em que o software aplicativo no computador, a cada trinta segundos, envia uma mensagem de leitura de dados para o adaptador e armazena as informações recebidas em um banco de dados, podendo ainda enviar também uma mensagem de controle ou verificação de estado, caso tenha recebido alguma requisição para isso. O SCA aceita requisições HTTP para o envio de informações de eletricidade (tensão, corrente, potencia e energia consumida) e para o controle do equipamento (liga, desliga), além da verificação do estado (ligado, desligado).

6.2.2 CONSTRUÇÃO DE CLASSES

O adaptador opera através de um protocolo de comunicação que deve ser configurado de forma manual, de forma que não é necessário a utilização de um Agente de Descoberta,

sendo necessário apenas a criação de classes que serão utilizadas pelo Agente de Energia que deverá representar o adaptador no SMA.

Dessa forma, foi desenvolvido uma classe que herda a Interface de Comunicação Agente-Dispositivo e é responsável por enviar e receber mensagens por HTTP, sobrescrevendo o método de comunicação da classe que herdou.

Uma classe que herda o Modelo do Dispositivo também foi desenvolvida, sobrescrevendo os métodos de ligar, desligar, obter informações do dispositivo, obter o histórico da potência e obter o histórico da energia consumida. Essa classe se encarrega de enviar a requisição e retornar a resposta do SCA, quando um desses seus métodos são executados.

Uma classe que herde o Operador também foi desenvolvida para a operação do equipamento. Essa classe tem o objetivo de monitorar e controlar a operação do equipamento de acordo com critérios definidos pelo usuário. Para monitorar, duas vezes por minuto realiza a leitura da potência utilizada e a energia consumida pelo equipamento e armazena essas informações em uma variável juntamente com o instante em que fez a leitura. Para o controle, deve receber do usuário o instante que deve ligar e o instante que deve desligar o dispositivo, devendo monitorar a hora do sistema em que está executando e executar os métodos de ligar e desligar o dispositivo da classe que herda o Modelo do Dispositivo no momento apropriado. Ao alterar o estado do dispositivo, deve também monitorar se o dispositivo realmente alterou seu estado, pois o adaptador pode não receber a mensagem de controle do SCA, sendo necessário reenviar a requisição.

6.2.3 CENÁRIO DE TESTE

O cenário desse estudo de caso é demonstrado na Figura 56. No adaptador é conectado um equipamento real e através do SCA é possível interagir com o adaptador, comandando a

operação do equipamento e monitorando seu consumo. No mesmo computador em que o SCA é executado, o SMA deve ser criado, de forma que o Agente de Energia possa operar o equipamento através do adaptador utilizando as classes desenvolvidas na seção 6.2.2.

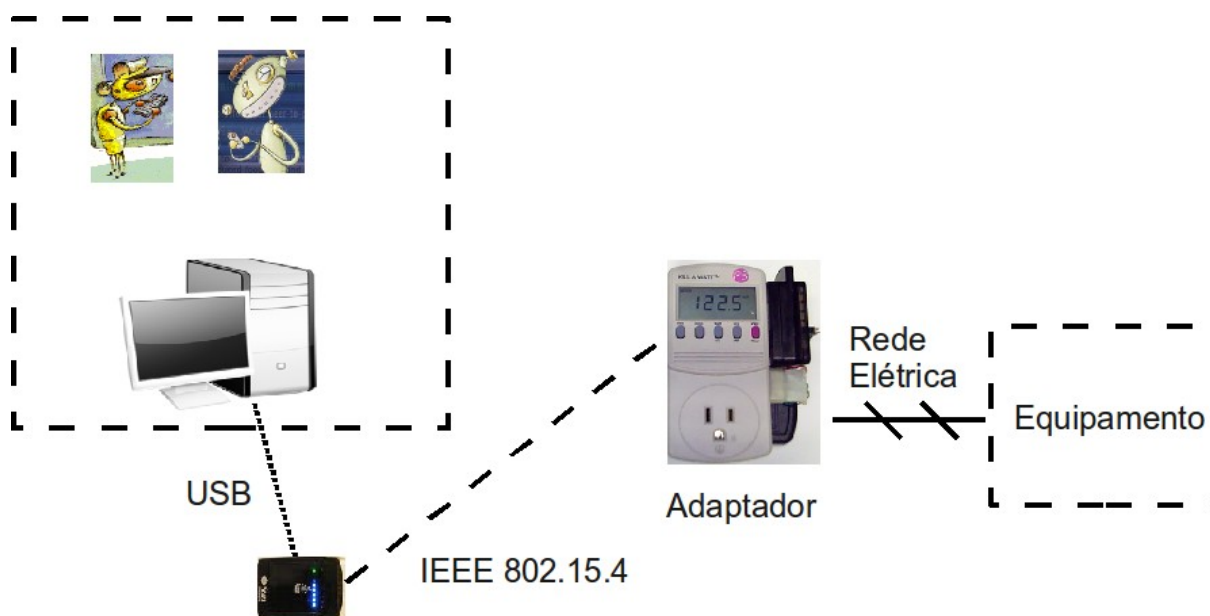


Figura 56 - Cenário de teste.

6.2.4 RESULTADOS DO TESTE

A Figura 57 demonstra a potência requerida pela operação de uma CPU de um computador durante o período de uma hora. Nos 27 minutos iniciais e 10 minutos finais apenas ficou ligado, enquanto que no restante do tempo o consumo de energia aumentou devido a execução de programas que exigiam um grande processamento, como um programa de simulação matemática e um anti-vírus. A figura 58 demonstra a energia consumida no período considerado.

Neste teste o usuário não configurou o período que gostaria que o equipamento desligasse, o Agente de Energia apenas monitorou a operação do equipamento.

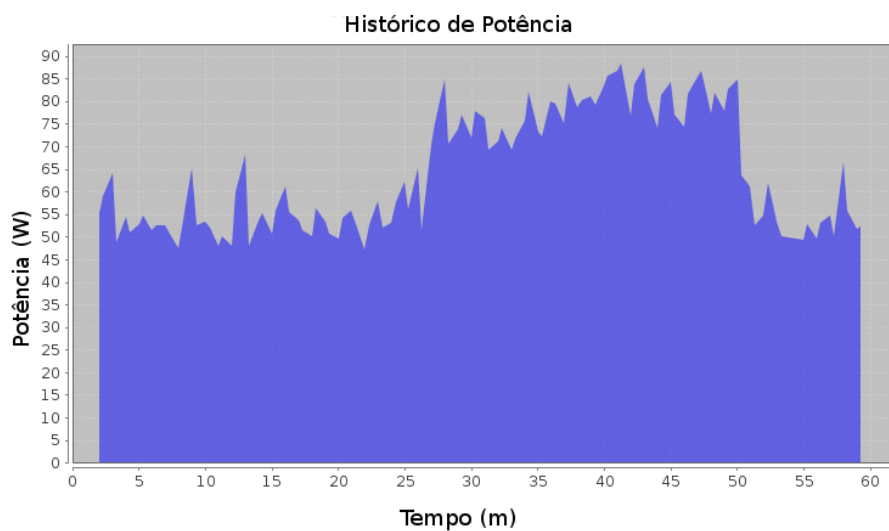


Figura 57 - Potência requerida por um computador.

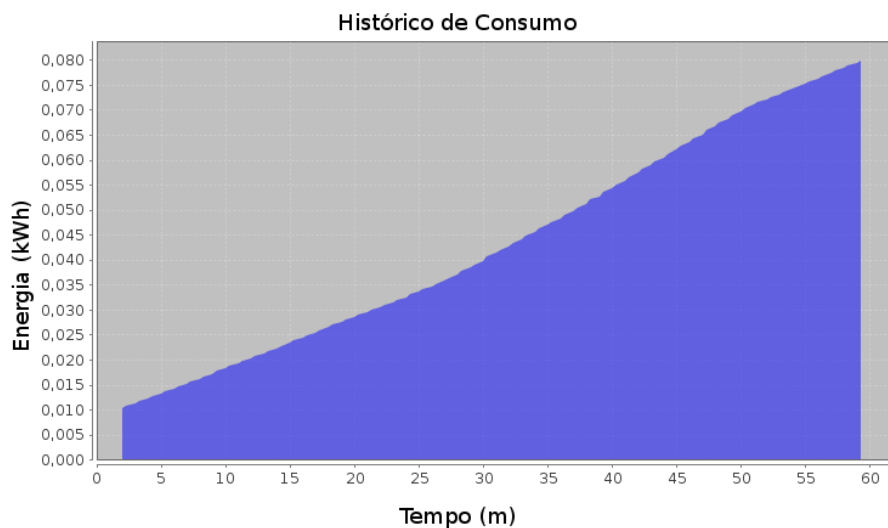


Figura 58 - Energia consumida por um computador.

Para o segundo teste, foi conectado no adaptador uma lâmpada de 60W, que simula um dispositivo em que é possível efetuar um controle do tipo liga/desliga de acordo com a configuração do usuário.

A Figura 59 demonstra a potência medida em cada leitura durante o período de teste, enquanto que a Figura 60 demonstra o consumo de energia do equipamento durante o teste. Nesse teste o usuário requereu que, a cada hora, o equipamento fosse ligado no instante de 20

minutos e desligasse no instante de 40 minutos e o Agente de Energia teve que cumprir essas solicitações. Nota-se que quando o equipamento está desligado, ainda ocorre o consumo de um pouco de energia, devido a utilização do adaptador e ocorre um atraso entre o comando do Agente de Energia e a alteração do estado do adaptador.

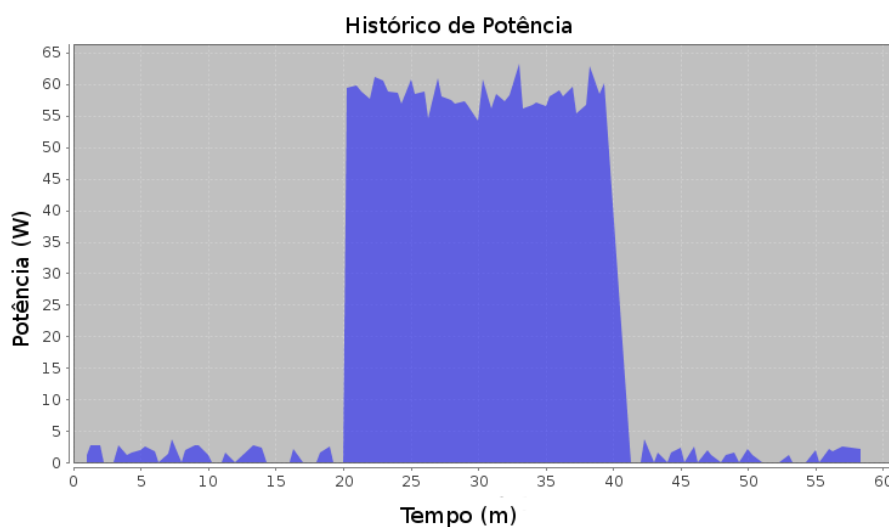


Figura 59 - Potência requerida em teste de controle.

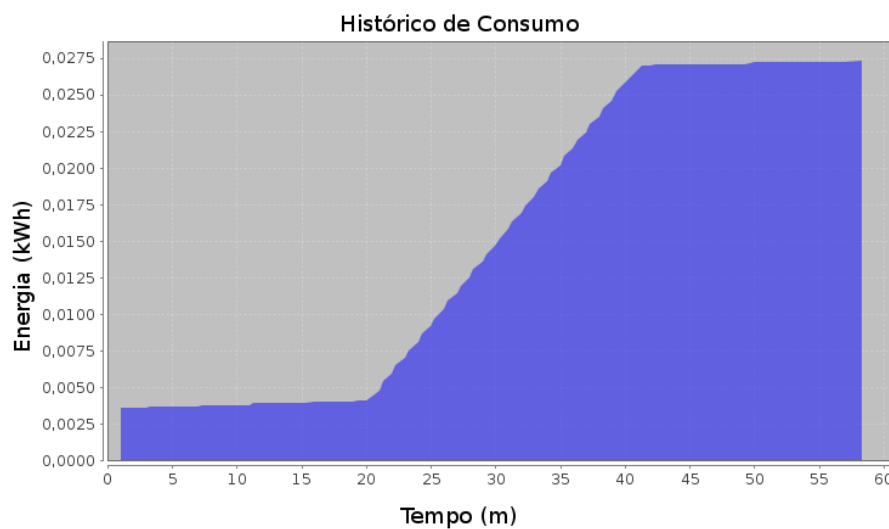


Figura 60 - Energia consumida em teste de controle.

6.2.5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Esse estudo de caso demonstrou a integração de um adaptador no *framework* proposto. Para isso foi necessário construir apenas três classes, uma para efetuar a comunicação com o SCA, outra para modelar as funcionalidades disponibilizadas pelo adaptador e outra que implementa um algoritmo que permite a operação do equipamento de acordo com critérios definidos pelo usuário.

Com essas classes e o *framework* proposto foi possível monitorar e controlar o consumo de diferentes equipamentos reais e gerar gráficos que permitiram a posterior análise da operação do equipamento.

6.3 ESTUDO DE CASO 2: OPERAÇÃO DE DISPOSITIVOS VIRTUAIS

Este estudo de caso demonstra como é possível, utilizando o *framework* proposto, construir e simular a operação de equipamentos virtuais que utilizam um padrão de comunicação que permite a descoberta e o estabelecimento de serviços funcionais de rede de forma automática.

6.3.1 INTERFACE DE COMUNICAÇÃO COM EQUIPAMENTOS DE CONFIGURAÇÃO AUTOMÁTICA

Como uma opção para a comunicação com dispositivos que permitem sua descoberta e configuração de forma automática, foi implementado o padrão DPWS (*Devices Profile for Web Services*), que define um conjunto mínimo de regras para a execução segura de *Web Services* em dispositivos com recursos limitados (MILAGAIA, 2009).

Conforme a OASIS (*Organization for the Advancement of Structured Information Standards*), um serviço consiste em “um mecanismo para habilitar o acesso a uma ou mais capacidades, onde o acesso é provido utilizando uma interface descrita e executado de forma consistente com as restrições e política, como especificadas pela descrição do serviço”

(OASIS, 2011). Dessa forma, essa abordagem busca facilitar a interoperabilidade de diferentes sistemas por meio de um conjunto de interfaces, que não necessitam de detalhes técnicos para troca de informações, permitindo a utilização de competências distribuídas que estão sob controle de diferentes domínios proprietários.

A implementação mais comum de serviços é através de *Web Services*, que, segundo a W3C (*World Wide Web Consortium*), é um padrão de meios de interoperação de diferentes aplicações de software, que podem ser executados em diversas plataformas diferentes, tendo uma interface descrita em um formato processável por máquina (especificamente a *Web Service Description Language (WSDL)*). Outros sistemas interagem como o *Web Service* de uma maneira ditada pela sua descrição utilizando mensagens do tipo *Simple Object Access Protocol (SOAP)*, tipicamente transportada através de *Hypertext Transfer Protocol (HTTP)* com serialização de *Extensible Markup Language (XML)* em conjunto com outros padrões relacionados à rede. Assim, um *Web Service* é uma noção abstrata, que representa a capacidade de realização de tarefas coerentes, através da solicitação de outros sistemas por padrões usados na Internet. Precisa ser implementado por uma entidade concreta, mas a funcionalidade que representa não é atrelada a essa entidade que o disponibiliza.

Para que os serviços disponibilizados possam ser solicitados, a mecânica como as mensagens são trocadas é documentada pela descrição do serviço, ou *Web Service Description (WSD)*, escrita em WSDL. A WSD pode conter a semântica do serviço, que descreve o comportamento esperado em relação às mensagens enviadas. É o significado e a finalidade do serviço.

O DPWS foi padronizado em 2009 pela OASIS apresentando especificações restritas ao mínimo necessário para que dispositivos com recursos limitados e conectados em rede descubram uns aos outros automaticamente e estabeleçam serviços de rede funcionais. O modo de operação geralmente consiste na descoberta de dispositivos relevantes na rede, busca

da descrição de seus serviços, invocação dos mesmos e o registro para notificação de eventos (ZEEB; BOBEK; GOLATOWSKI, 2007). Ainda, permite que a comunicação ocorra em uma camada de alto nível e independente de tecnologia, permitindo a utilização de diversos padrões de comunicação nas camadas inferiores.

Para isso, o DPWS implementa alguns protocolos (MILAGAIA, 2009): (i) WS-Addressing, que fornece um identificador único para cada entidade DPWS e estruturas de endereçamento que permitem que o conteúdo das mensagens possa ser transmitido por qualquer protocolo de transporte; (ii) WS-Discovery, usado para a descoberta automática de dispositivos e serviços na rede. Cada dispositivo anuncia quando entra e sai da rede e qualquer dispositivo pode, a qualquer momento, realizar uma busca por dispositivos ou serviços disponíveis na rede; (iii) WS-Eventing, que define mecanismos para que os dispositivos anunciem mudanças através de mensagens assíncronas. Basicamente, dispositivos se registram em um serviço de notificação de um determinado dispositivo e recebem mensagens quando algum evento relacionado ao serviços ocorre; (iv) WS-Policy, que define as capacidades, características e requisitos para que clientes utilizem os serviços disponibilizados, devido ao fato que os mesmos são disponibilizados independente de plataforma, linguagem de programação e protocolo de transporte, sendo necessário definir formas como os recursos podem ser utilizados para atender a performance requerida; (v) WS-Security, que provê mecanismos opcionais para integridade, confidencialidade e autenticidade das mensagens; (vi) WS-MetadataExchange/WS-Transfer, que permitem a definição e a aquisição de metadados (Dados sobre outros dados) de serviços, que definem, por exemplo, como interagir com o serviço descrito.

Assim, normalmente quando um cliente necessita utilizar um serviço, deve enviar uma mensagem para a rede com parâmetros que indicam o tipo de serviço que procura. Dispositivos que possuem esse serviço respondem à essa mensagem e então o cliente requisita

os metadados desses dispositivos e dos seus serviços, que vão conter informações como o nome do fabricante, número de série, serviços disponíveis, formas de utilização dos serviços. Tendo as possíveis formas de interação com o dispositivo, o cliente escolhe qual serviço quer utilizar e invoca a operação do mesmo.

Algumas implementações de DPWS, feitas em diferentes linguagens de programação, já foram desenvolvidas e disponibilizadas para uso em WS4D (2011). Dentre as possibilidades de implementação, optou-se por utilizar o JMEDS (*Java Multi Edition DPWS Stack*) (JMEDS, 2011), que é um *framework* de DPWS, desenvolvido em java, o que facilita a integração com o *framework* proposto nesse trabalho. A arquitetura e os componentes que permitem a utilização desse framework são descritos com detalhes em JMEDS (2011), sendo que a seguir é apresentado, de forma resumida, apenas o que foi utilizado na sua implementação no *framework* proposto.

O JMEDS apresenta um classe *org.ws4d.java.client.DefaultClient*, que oferece mecanismos de busca de dispositivos e serviços, além da utilização destes últimos. Para isso é necessário sobrescrever seus métodos: (i) *deviceFound*, que é executado toda vez que um dispositivo responde a uma mensagem de busca na rede por dispositivos específicos; (ii) *serviceFound*, que é executado toda vez que um dispositivo responde a uma mensagem de busca na rede por serviços específicos; (iii) *helloReceived*, que é executado toda vez que o cliente recebe uma mensagem de *Hello* de um dispositivo, ou seja, toda vez que um dispositivo entra na rede. Além disso, para procurar dispositivos ou serviços é necessário definir o que se procura através de alguns parâmetros e realizar uma busca através do método *searchDevice* (para a busca de dispositivos) ou *searchService* (para a busca de serviços), da classe *org.ws4d.java.client.SearchManager*, que é utilizada por essa classe.

A classe *org.ws4d.java.service.Device* serve para armazenar referências e informações do dispositivo encontrado e a classe *org.ws4d.java.service.Service* serve para armazenar informações e referências para cada um dos serviços oferecidos.

Cada serviço oferecido pode conter diferentes operações para execução. Por exemplo, um medidor de energia pode ter um serviço de fornecer dados que possui três operações: (i) fornecer o valor da tarifa; (ii) fornecer o valor de consumo atual; (iii) fornecer o valor de consumo total. Quando o dispositivo é encontrado, é possível buscar uma referência para seu serviço e posteriormente verificar que operações são implementadas nesse serviço. Os metadados das operações indicarão, por exemplo, o nome da operação, parâmetros de entrada e saída. Com base nesses metadados é possível localizar uma operação requerida e executar a mesma através de métodos da classe *org.ws4d.java.service.Operation*, que fazem o dispositivo realizar o serviço.

Para a construção de dispositivos que implementem o DPWS é necessário o uso das classes *org.ws4d.java.service.DefaultDevice*, *org.ws4d.java.service.DefaultService* e *org.ws4d.java.DPWSFramework*, que fornecem meios para implementar e executar o DPWS em um dispositivo local, através de meios para a configuração de metadados, adição de serviços e operações, além da execução do *framework* DPWS, que oferece todas as funcionalidades necessárias para a operação do DPWS pelo dispositivo.

6.3.2 CONSTRUÇÃO DE UM DISPOSITIVO VIRTUAL

Foi construída uma classe que simula uma máquina de lavar roupas e que deve ser encapsulada por um Agente de Energia. Essa classe define diferentes modos de operação, com diferentes valores de duração e potência requerida para operar. Ainda, possui um método que permite o recebimento do programa que deve executar e outros métodos para iniciar, pausar ou cancelar a operação configurada pelo mesmo. Possui ainda, métodos que permitem

a verificação do consumo de energia, estado de operação, programa que deve executar e opções de programas.

Foi construído uma classe que implementa um servidor DPWS, através de classes *org.ws4d.java.service.DefaultDevice*, *org.ws4d.java.service.DefaultService* e *org.ws4d.java.DPWSFramework*. Nessa classe, foi necessário configurar algumas informações do dispositivo (e.g., nome, nome do fabricante, número de série) e criar os serviços, que quando são invocados executam o método específico da classe máquina de lavar roupas que implementa a funcionalidade oferecida pelo serviço.

Para testar se esse dispositivo foi construído da forma correta, foi utilizado o *software* DPWS Explorer (WS4D, 2011) que é uma aplicação gráfica que permite a descoberta e utilização de serviços disponibilizados através do DPWS. A Figura 61 demonstra a tela inicial do DPWS Explorer após ter encontrado o dispositivo desenvolvido.

À esquerda, é possível visualizar o dispositivo que foi descoberto e o serviço que oferece (ServiçosMáquinaDeLavarRoupas), que pode ser de dois tipos diferentes (EnviarDados e ReceberComandos). O primeiro oferece operações que permitem a verificação da configuração do dispositivo, energia consumida, estado de operação, opções de programas e potência utilizada. O segundo oferece operações que permitem cancelar um programa/operação, enviar a opção que define o programa que deve ser executado, iniciar esse programa e pausar a operação. Ainda, cada uma dessas operações foram executadas através do DPWS Explorer, para testar se o dispositivo estava de fato provendo as funcionalidades requeridas através do DPWS.

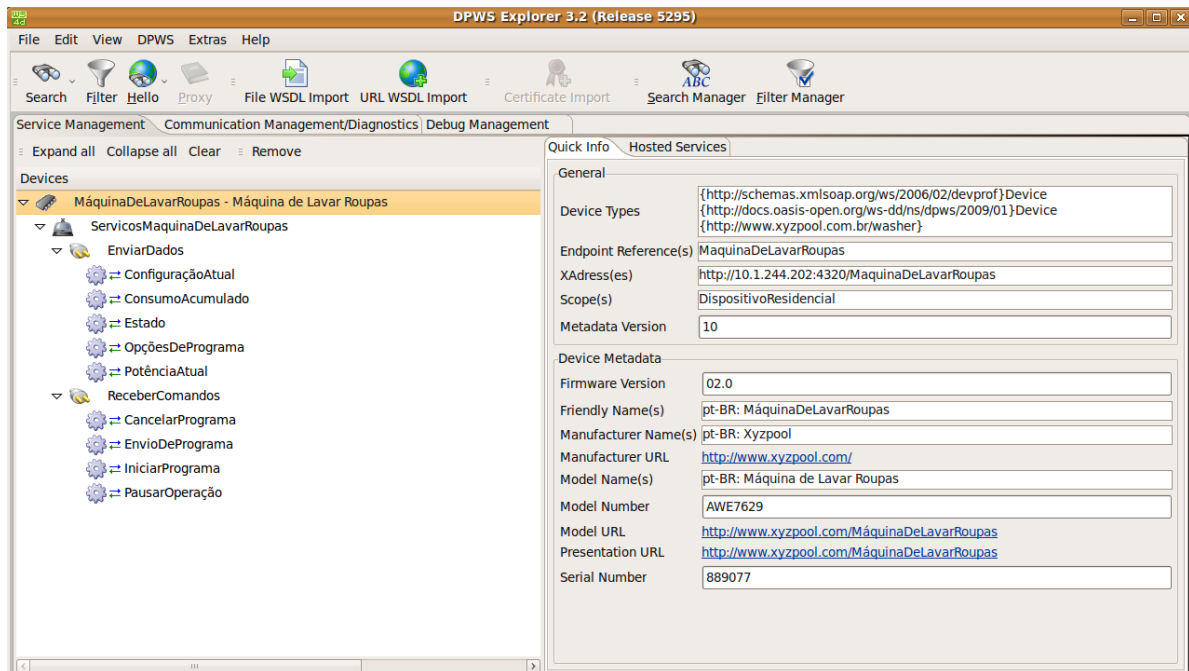


Figura 61 - Verificação da implementação do dispositivo.

6.3.3 CONSTRUÇÃO DE CLASSES

No conceito do *framework* proposto, um Agente de Descoberta deve descobrir todos os dispositivos que implementam o DPWS e criar um Agente de Energia para cada dispositivo encontrado e cadastrado no sistema.

Assim, foi criada uma classe que herda a classe Descoberta de Dispositivos e que utiliza a classe *org.ws4d.java.client.DefaultClient* apenas para procura de dispositivos, sendo utilizada pelo Agente de Descoberta. Ao ser instanciada executa o método *searchDevice* com parâmetros nulos, pois o único critério de busca é a implementação do DPWS. O método *deviceFound* é sobrescrito de forma a permitir que a classe armazene as referências (nome do dispositivo, modelo do dispositivo, nome do fabricante, número de série) quando esse método for executado (toda vez que a classe recebe uma mensagem de um dispositivo em resposta a mensagem de busca). Após enviar a mensagem de busca por dispositivos, essa classe habilita o recebimento de mensagens de *Hello*, através do método *registerHelloListening* e sobrescreve o método *helloReceived* para chamar o método *deviceFound*.

O Agente de Descoberta verifica de forma periódica se novos dispositivos entraram na rede através de um método oferecido pela classe criada, e em caso positivo, verifica se estão cadastrados no sistema, e em caso positivo, instancia um Agente de Energia para cada dispositivo, passando como argumentos informações do dispositivo e que a comunicação deve ser por DPWS. Com esses argumentos, o Agente de Energia instancia todas as classes que necessita para operar e encapsular o dispositivo.

Uma classe que herda a Interface de Comunicação Agente-Dispositivo do Agente de Energia também foi construída, utilizando a classe *org.ws4d.java.client.DefaultClient*, que é utilizada para encontrar e operar o dispositivo. Ao ser instanciada, realiza uma busca pelo dispositivo específico e em seguida obtém seus metadados, sendo criada instâncias das classes que permitem o armazenamento de referências para o dispositivo, seus serviços e operações.

Assim, quando essa classe recebe uma requisição para enviar uma mensagem ao dispositivo, busca em todos os serviços oferecidos, uma operação que possua o nome do parâmetro recebido e a invoca, passando os argumentos recebidos, quando existentes e retornando os parâmetros recebidos, também quando existentes.

Uma classe que herda o Modelo do Dispositivo também foi desenvolvida para permitir a operação com o dispositivo virtual criado na seção 6.3.2.

6.3.4 CENÁRIO DE TESTE

O cenário desse estudo de caso é demonstrado na Figura 62. Em um computador é criado manualmente um dispositivo virtual que se comunica por DPWS, através das classes desenvolvidas na seção 6.3.2.

Em um outro computador o SMA é executado, sendo que o usuário deve criar o Agente de Descoberta, que deve automaticamente encontrar o dispositivo DPWS e criar um

Agente de Energia capaz de operá-lo. Esses dois agentes utilizam as classes desenvolvidas na seção 6.3.3. O Agente de Energia utiliza o algoritmo de monitoração e controle utilizado no estudo de caso 1 para operar o equipamento.

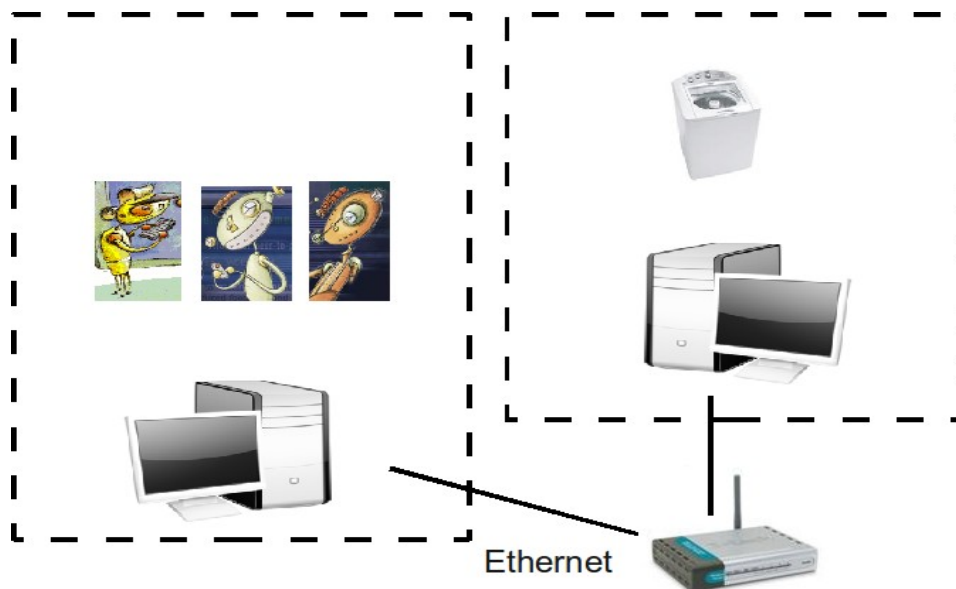


Figura 62 - Cenário de teste.

6.3.5 RESULTADOS DO TESTE

A Figura 63 demonstra a potência medida em cada leitura durante o período de teste, enquanto que a Figura 64 demonstra o consumo de energia do equipamento durante o teste.

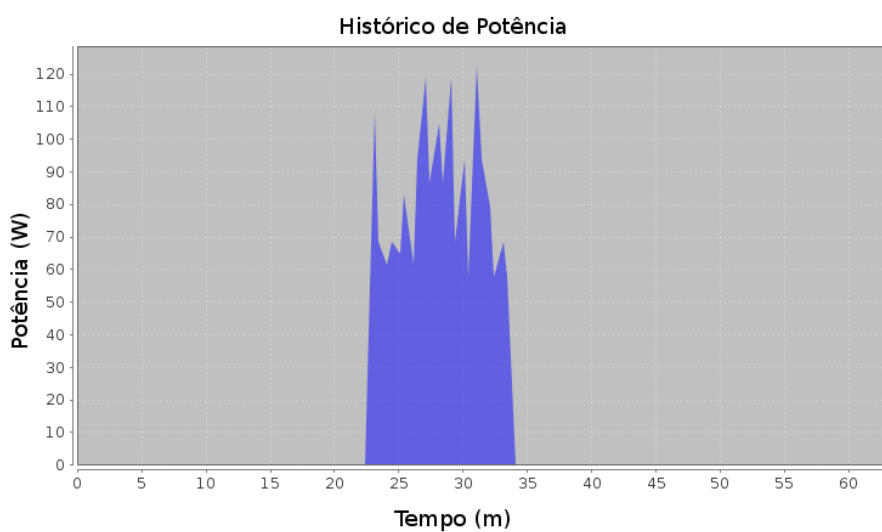


Figura 63 - Potência requerida pelo equipamento virtual.

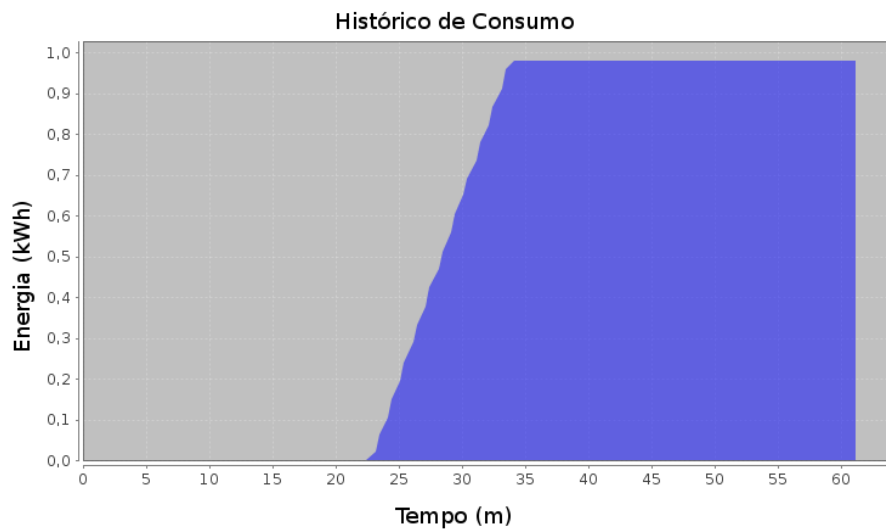


Figura 64 - Energia consumida pelo equipamento virtual.

6.3.6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Esse estudo de caso demonstrou a integração de um protocolo de comunicação que permite o estabelecimento de serviços funcionais de rede de forma automática no *framework* proposto. Para isso foi necessário construir apenas duas classes, uma para efetuar a comunicação por DPWS pelo Agente de Descoberta e outra para efetuar a comunicação por DPWS pelo Agente de Energia.

Para realizar esse teste ainda foi necessário a construção de um equipamento virtual que utiliza o DPWS e uma classe para modelar suas funcionalidades disponibilizadas que deve ser usada pelo Agente de Energia. O mesmo algoritmo de operação do estudo de caso 1 foi utilizado nesse estudo de caso.

Com essas classes e o *framework* proposto foi possível monitorar e controlar o consumo de um equipamento virtual, que permite o estabelecimentos de serviços funcionais de rede de forma automática, e gerar gráficos que permitiram a posterior análise da operação do mesmo.

6.4 ESTUDO DE CASO 3: OPERAÇÃO DE DISPOSITIVOS REAIS E VIRTUAIS

Este estudo de caso demonstra como é possível, utilizando o *framework* proposto, construir e simular a operação conjunta de equipamentos virtuais e reais.

6.4.1 CONSTRUÇÃO DE DISPOSITIVOS VIRTUAIS

Foi construído uma classe que simula um medidor de energia, capaz de fornecer informações em relação ao valor da tarifa quando requisitado através do padrão DPWS. Conforme visto no capítulo 4, diferentes tipos de tarifas são possíveis de serem aplicadas, de forma que para utilizá-las, basta alterar essa classe.

Nesse teste, considerou-se a utilização de uma tarifa TOU, que varia como demonstrado na Figura 65, sendo conhecida antecipadamente. A variação da tarifa ocorre dentro de um período de uma hora para diminuir o tempo de realização desse teste, pois o tempo é incrementado de forma natural, já que foi utilizado equipamentos reais através do adaptador.

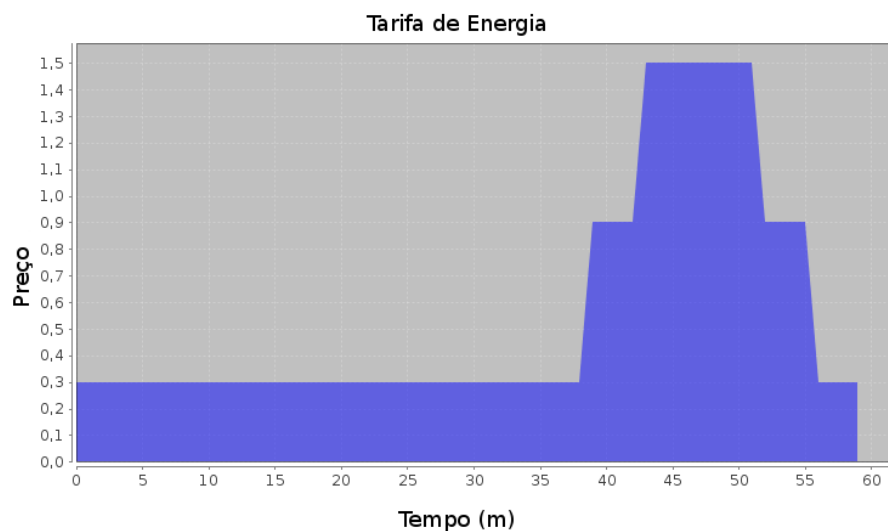


Figura 65 - Tarifa TOU utilizada.

6.4.2 CONSTRUÇÃO DE CLASSES

Uma classe que herda o Operador foi desenvolvida com o objetivo de realizar o agendamento da operação de equipamentos, atuando como um agendador central. Para isso, recebe requisições que indicam opções de operação e escolhe uma dessas opções considerando as escolhas que já realizou para outros equipamentos. O algoritmo busca uma melhor distribuição da operação de todos os equipamentos ao longo do período. Posteriormente, informa a opção escolhida ao agente que fez a requisição.

Uma outra classe que herda o Operador foi desenvolvida para a operação dos equipamentos. Essa classe tem o objetivo de monitorar e controlar a operação do equipamento de acordo com critérios definidos pelo usuário. Para isso, ao ser criado envia mensagens para a rede em busca do agente com a função de agendador e do agente que representa um medidor de energia, que oferece os preços da tarifa. Ao agente do medidor requer os preços de energia para o período. Com esses preços calcula suas opções de operação e submete elas ao agente agendador. Ao receber o período que deve operar, fica monitorando a hora do sistema em que está executando e executa os métodos de ligar e desligar o dispositivo da classe que herda o Modelo do Dispositivo, no momento apropriado para atender as exigências do usuário.

Foi também desenvolvida uma classe que modela o Medidor de Energia virtual desenvolvido na seção 6.4.1.

6.4.3 CENÁRIO DE TESTE

O cenário desse estudo de caso é demonstrado na Figura 66. Em um computador são criados manualmente 5 dispositivos virtuais que se comunicam por DPWS, através das classes desenvolvidas na seção 6.3.2. Em outro computador também são criados 5 dispositivos virtuais que se comunicam por DPWS. O adaptador apresentado na seção 6.2.1 é utilizado estando conectado a uma lâmpada de 60W.

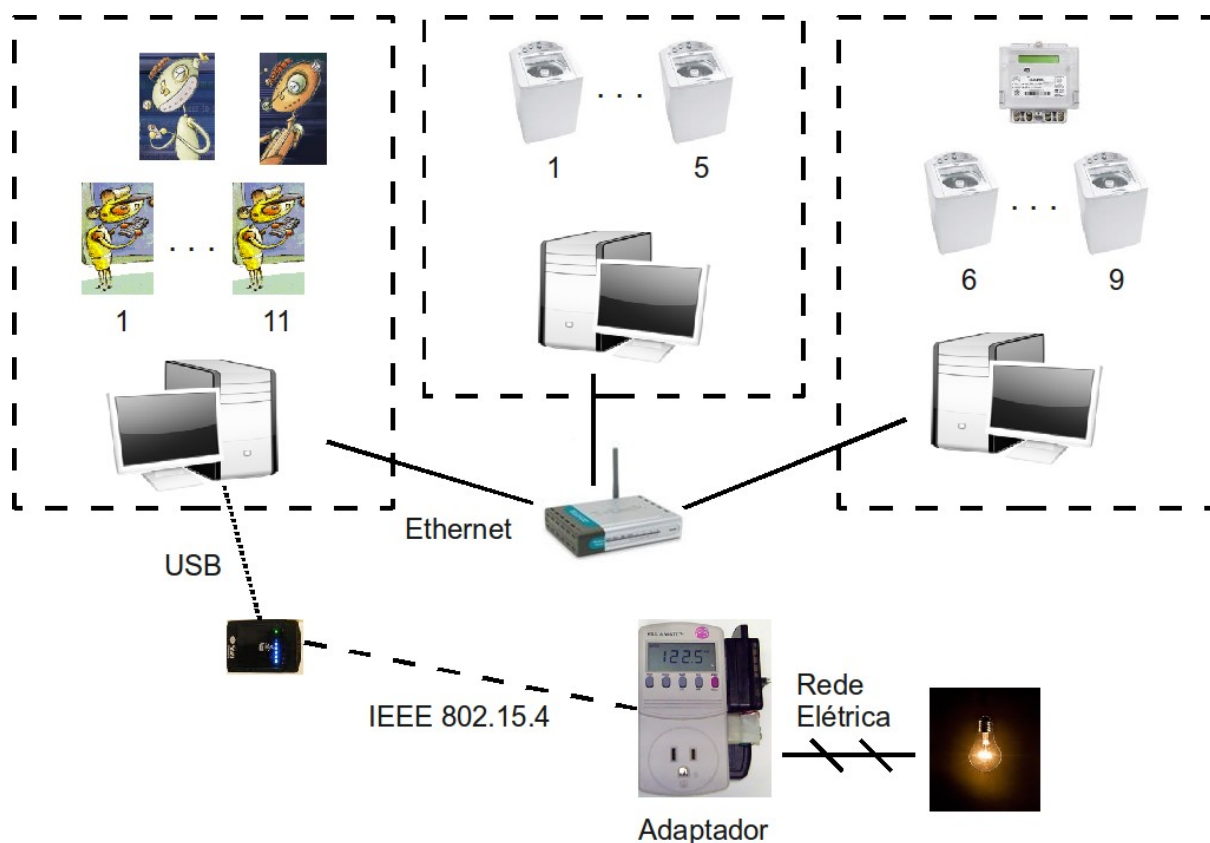


Figura 66 - Estudo de Caso.

Em um outro computador o SMA é executado, sendo que o usuário deve criar o Agente de Descoberta, que deve automaticamente encontrar os dispositivos DPWS e criar um Agente de Energia para cada dispositivo. O usuário também deve criar o Agente que vai representar o adaptador.

Nesse cenário, os Agentes de Energia recebem do usuário uma configuração que indica a necessidade de iniciar a operação do equipamento e o instante limite para que a mesma seja finalizada. Os Agentes de Energia buscam pelos valores de tarifa do período, decidem suas opções de operação, submetem elas ao agendador (que nesse teste é o próprio agente do medidor de energia), recebem o instante de início de operação e ligam o aparelho naquele instante.

6.4.4 RESULTADOS

A Figura 67 demonstra o resultado do agendamento para um teste, enquanto que a Figura 68 mostra a potência requerida pelos dispositivos no período. Já a Figura 69 demonstra a potência desenvolvida pelo equipamento controlado pelo adaptador.

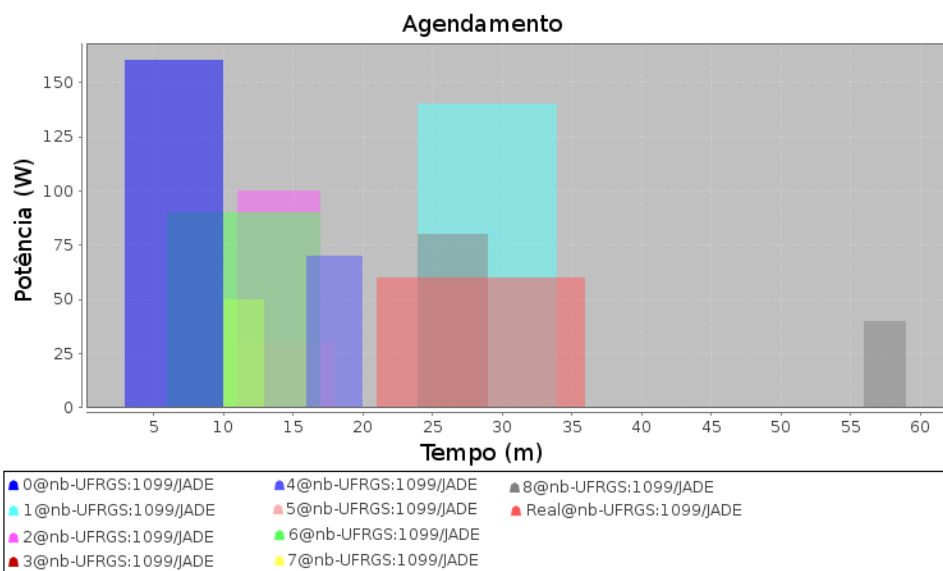


Figura 67 - Agendamento de Operação.

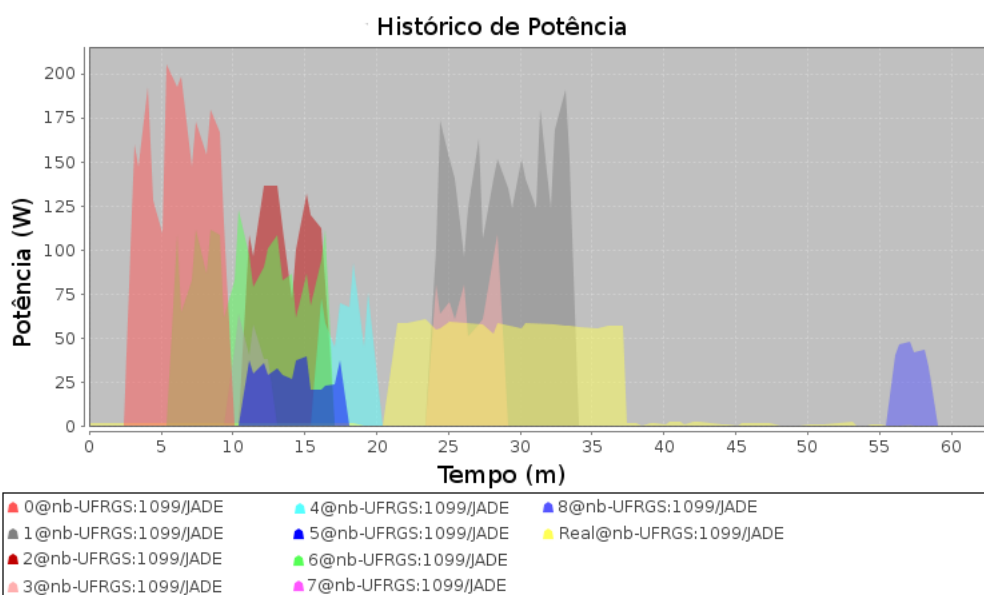


Figura 68 - Operação dos Equipamentos.

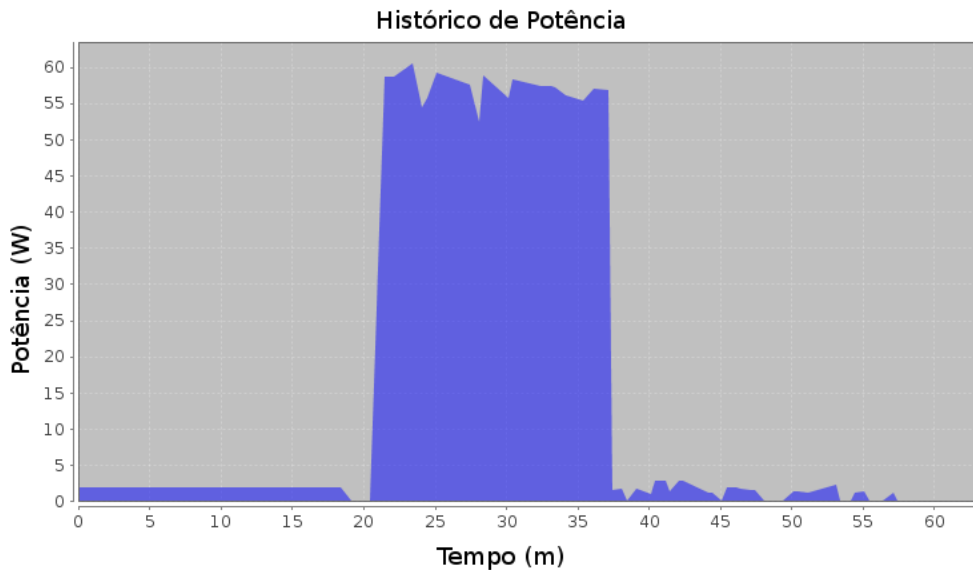


Figura 69 - Potência do equipamento real.

Toda vez que o agendador recebe uma requisição para agendamento escolhe uma das opções recebidas, considerando as escolhas que já realizou para outros equipamentos, buscando efetuar uma distribuição das operações ao longo do período de uma hora. Porém, o agendador trata essas requisições em ordem de recebimento e não realiza um novo agendamento para agentes que já definiu o intervalo de operação, de forma que o resultado encontrado pode ser melhorado caso esse reagendamento seja implementado no algoritmo.

6.4.5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Este estudo de caso demonstra como é possível, utilizando o *framework* proposto, simular a operação conjunta de diferentes equipamentos reais e virtuais que devem operar em conjunto. Nesse estudo de caso, os equipamentos estão submetidos a uma tarifa de energia TOU e buscam operar quando a tarifa é mais barata, além de tentarem ter uma distribuição da operação ao longo do tempo mais uniforme. Nesse teste, os equipamentos possuíam flexibilidade para evitar os períodos de maior custo de energia e por isso todas as operações ocorreram no período de menor custo da tarifa de energia elétrica.

Para a realização desse teste foi necessário a construção de uma classe que simulasse o medidor de energia e uma classe que permitisse a modelagem desse medidor e utilização no Agente de Energia.

Também foi necessário criar duas classes para a operação do sistema. Uma que busca definir as opções de operação de um equipamento individual com base nas configurações do usuário, características do equipamento e custos da energia e outra que busca distribuir a operação dos equipamentos ao longo do período, diminuindo a ocorrência de picos de consumo.

Assim, outros tipos de tarifa, horários para operação mais restritos, ou outros critérios para a operação dos equipamentos também podem ser testados de maneira similar.

6.5 DISCUSSÃO

Esse capítulo apresentou alguns testes realizados com o *framework* proposto. Inicialmente foi demonstrado como é possível integrar ao mesmo um adaptador que permite a monitoração e controle de equipamentos reais. De forma semelhante, outros tipos de adaptadores ou mesmo equipamentos reais que permitam a monitoração ou controle de consumo podem ser integrados ao *framework*.

Posteriormente foi demonstrado a integração ao *framework* de um protocolo de comunicação que permite o estabelecimento de serviços funcionais de rede de forma automática. Outros protocolos com essa funcionalidade também podem ser integrados de forma semelhante.

Por fim, foi demonstrado um teste com um equipamento real e equipamentos virtuais que devem operar em conjunto buscando atender a um critério. Foi descrito a implementação de dois algoritmos simples, um que permite que os equipamentos identifiquem os períodos de menor custo de energia e gerem opções de operação de acordo com suas características e

outro algoritmo que busca escolher um período de operação para cada equipamento com base nas opções que recebe e decisões anteriores. De forma semelhante, outros algoritmos de operação poderiam ser integrados ao *framework* e seus resultados analisados e comparados. Ainda, esses algoritmos poderiam abranger a otimização de algum parâmetro, como o custo de energia pago pelo consumidor.

Com esses testes foi possível verificar algumas potencialidades de uso do *framework*, porém as vantagens da utilização de agentes inteligentes em sua construção não foram evidenciadas nesses testes. Assim, outros testes devem ser desenvolvidos e divulgados futuramente, abrangendo essas potencialidades, principalmente com a distribuição dos agentes pelo sistema e a inclusão de diferentes mecanismos de coordenação, como descritos brevemente na seção 5.1.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A modernização do setor elétrico no sentido das Redes Elétricas Inteligentes é inevitável e embora a tecnologia para isso já exista a um custo razoável, diversas questões precisam ser resolvidas para que essa modernização tenha uma implementação coerente, sustentável e benéfica para toda a sociedade.

Este trabalho apresentou esse cenário em formação e a situação atual de diversos países em relação à essa modernização. Nota-se que em vários lugares já há um grande esforço para a implementação de algumas das funcionalidades das Redes Elétricas Inteligentes, tanto por parte de empresas como parte do governo, que busca regulamentar essa modernização. Atualmente, há um grande esforço na substituição de medidores de energia por medidores inteligentes (*Smart Meters*) que fazem parte da infraestrutura básica de AMI e permitirão que mecanismos de resposta à demanda sejam utilizados em consumidores de baixa tensão. Em alguns lugares já há a utilização desses mecanismos, sendo baseados em diferentes tipos de tarifas e devendo evoluir no sentido de tarifas RTP, o que exigirá cada vez mais sistemas automáticos de gestão de energia.

Dessa forma, o tema escolhido para a realização desta dissertação é de grande relevância, pois é uma realidade recente em países desenvolvidos e um assunto muito novo em nível de Brasil. Assim, este trabalho contribui de forma significativa para o esclarecimento desse tema, através de seus primeiros capítulos, servindo como um guia para trabalhos futuros nessa área.

Além disso, percebe-se que o setor de consumo sofrerá o maior impacto dessa modernização, pois os consumidores deverão alterar seu comportamento atual para obter o melhor proveito dessa modernização. Para isso, necessitarão de sistemas automáticos de auxílio, de forma que diversos trabalhos já propõem diferentes abordagens para esses sistemas, cada um apresentando resultados de diminuição do gasto com energia elétrica do

consumidor. Porém, não basta apenas demonstrar que houve uma redução do gasto com energia, é preciso também comparar essas diversas abordagens, demonstrando vantagens, desvantagens e resultados em cenários similares.

Assim, este trabalho também propõe um *framework* para a construção e análise de sistemas de gestão de energia elétrica em baixa tensão nas Redes Elétricas Inteligentes. Para tanto, foram analisadas diferentes abordagens de sistemas de gestão de energia, considerando os diferentes tipos de tarifação, e foi construído um conjunto de classes que permitem a fácil construção de diversos tipos de sistemas de gestão de energia, além da análise dos mesmos através de simulações e testes. Para isso, utilizou-se a abordagem de Sistemas Multiagentes, devido ao fato dessa abordagem buscar solucionar problemas com características similares aos que precisam ser resolvidos na Rede Elétrica Inteligente.

Dessa forma, o *framework* proposto apresenta diversas características, como a possibilidade de construção e simulação de diversos sistemas, em diferentes cenários, com variados tipos de equipamentos, tanto reais como virtuais, sob diferentes padrões de comunicação. Além disso, permite a construção e simulação de sistemas com diferentes algoritmos para a operação dos equipamentos, permitindo tanto a utilização de diferentes algoritmos para equipamentos individuais, como também diferentes algoritmos para a operação de todos os equipamentos de forma global.

Para isso, foram apresentados três tipos de agentes que fornecem toda a infraestrutura necessária para a construção e análise desses sistemas, de uma forma flexível, modular e reaproveitável em diversos projetos. Além disso, diferentes estudos de caso foram realizados para a demonstração das possibilidades de utilização desse *framework*, tanto com dispositivos reais e virtuais, sob dois diferentes protocolos de comunicação e com diferentes algoritmos para a operação dos equipamentos.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- integração de uma maior quantidade de padrões de comunicação;
- migração dos agentes para dispositivos reais, diminuindo o tráfego de rede;
- desenvolvimento de uma interface agente-dispositivo que permita a comunicação direta do agente com o adaptador utilizado no estudo de caso 6.1, retirando a necessidade de uso do software aplicativo que atua como um *gateway*;
- modelagem de diversos outros equipamentos, incluindo equipamentos de armazenamento e geração de energia;
- introdução de diferentes algoritmos para operação, tanto no nível individual como no nível global, considerando diferentes parâmetros que devem ser otimizados;
- geração de resultados comparativos de diferentes abordagens propostas por outros trabalhos;
- criação de uma interface de usuário que permita a interação com o sistema a partir de dispositivos móveis e o acesso remoto ao mesmo;
- analisar aspectos de segurança e de privacidade de informação nesses sistemas;
- integrar classes que permitam a utilização de diferentes banco de dados;
- integrar mecanismos que possibilitem o uso de diferentes abordagens de inteligência artificial;
- modelar o comportamento de usuários através de métodos estatísticos para simular configurações de equipamentos mais realistas;
- explorar diferentes abordagens de coordenação de agentes comparando seus resultados em diferentes cenários;

- expandir o *framework* para níveis superiores além do interior da residência, possibilitando a simulação e análise de resultados considerando diversas residências, microredes e centrais de geração virtual;
- construir uma plataforma de testes e validação de sistemas e dispositivos a partir do *framework* proposto, que permita verificar se novos sistemas e dispositivos atendem a critérios pré-estabelecidos, principalmente em relação à interoperabilidade, permitindo testes e validação dos mesmos antes da integração com sistemas reais;
- construir um sistema SCADA a partir do *framework* proposto, que permita a monitoração e controle de vários sistemas de gestão de energia distribuídos.

REFERÊNCIAS

- ABE, K.; MINENO, H.; MIZUNO, T. Development and evaluation of smart tap type home energy management system using sensor networks. In: IEEE CONSUMER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2011, Las Vegas. **Proceedings . . .** Las Vegas: IEEE, 2011. p.1050-1054.
- ABRAS, S. **Système domotique multi-agents pour la gestion de l'énergie dans l'habitat**. 2009. 166f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2009.
- ABRAS, S. et al. A multi-agent home automation system for power management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN CONTROL, AUTOMATION, AND ROBOTICS, 3., 2006, Setubal. **Proceedings . . .** Setubal: Springer, 2006. p. 3-8.
- AKKERMANS, H.; SCHREINEMAKERS, J.; KOK, K. **Microeconomic distributed control: theory and application of multi-agent electronic markets**. Disponível em: <http://www.see.asso.fr/clubs_techniques/se/xmedia/Club_Tech_SE-2001-2008/2004/CRIS-Grenoble-10-04/S8/s8-a1.pdf>. Acesso em: 20 maio 2011.
- ANEEL. **Implantação de medição eletrônica em baixa tensão**: documento anexo à nota técnica nº 0013/2009-SRD/ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica%20n%2000132009-SRDANEEL.zip>. Acesso em: 20 dez. 2009.
- _____. Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica. **Cadernos Temáticos ANEEL**, Brasília, n.4, p.30, 2005.
- ARAUJO, A. C. M. **Perdas e inadimplência na atividade de distribuição de energia elétrica no Brasil**. 2007. 124f. Tese (Doutorado Ciências e Planejamento Energético) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- ARRUDA, L. **Digitalização e gestão inteligente da medição como ferramenta de controle de perdas e proteção da receita**. Disponível em: <http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2010/Luiz_Fernando_Arruda.pdf>. Acesso em: 5 set. 2010.
- BC HYDRO. **Residential rates**. Disponível em: <http://www.bchydro.com/youraccount/content/residential_rates.jsp>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. **Developing multi-agent systems with JADE**. Chichester: John Wiley & Sons, 2007.
- BOTTE, B; CANNATELLI, V; ROGAI, S. The telegestore project in Enel's metering system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 18., 2005, Turin. **Proceedings...** Turin: IEEE, 2005. p. 1- 4.

CIRRINCIONE, M. et al. Intelligent energy management system. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL INFORMATICS, 7., 2009, Cardiff. **Proceedings . . .** Cardiff: IEEE, 2009. p. 232 - 237.

CL&P. **Variable Peak Pricing (VPP)**. Disponível em: <http://www.cl-p.com/FAQ/Variable_Peak_Pricing_%28VPP%29/?MenuID=4294985585>. Acesso em: 10 jun. 2011.

DE CRAEMER, K.; DECONINK, G. Analysis of state-of-the-art smart metering communication standards. In: YOUNG RESEARCHERS SYMPOSIUM, 5., 2010, Leuven. **Proceedings . . .** Leuven: [s. n.], 2010. p. 1 - 6.

DEWHA. **Smart Grid, smart city: a new direction for a new energy era**. Disponível em: <<http://www.ret.gov.au/energy/Documents/smart-grid/smartgrid-newdirection.pdf>>. Acesso em : 10 dez. 2009.

DIGI. **Digi XBee Smart Plug™ ZB**. Disponível em: <<http://www.digi.com/products/wireless-modems-peripherals/wireless-range-extenders-peripherals/xbee-smart-plug-zb#overview>>. Acesso em: 5 dez. 2010.

DLMS UA. **DLMS/COSEM Architecture and Protocols**. Disponível em: <http://dlms.com/documents/Excerpt_GB7.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2010.

DU, P.; LU, N. Appliance commitment for household load scheduling . **IEEE Transactions on Smart Grid**, New York, v. 2, n. 2, p. 411 - 419 , Apr. 2011.

ECVV. **Grid tie inverter 250W**. Disponível em: <<http://www.ecvv.com/product/3039201.html>>. Acesso em: 5 abr. 2011.

EL HAGE, F, S.; FERRAZ, L. P. C.; DELGADO, M. A. P. **A estrutura tarifária de energia elétrica: teoria e aplicação**. Rio de Janeiro: Synergia, 2011.

EL HAGE, F, S.; MACHADO, M. M. **Estrutura tarifária de energia elétrica: conceitos, práticas e tendências de modernização - metodologia para estabelecimento de estrutura tarifária para o serviço de distribuição de energia elétrica**. Porto Alegre: [s. n.], 2011. 397 slides, color.

EPRI. **Report to NIST on the Smart Grid interoperability standards roadmap**. Disponível em: <http://www.nist.gov/smartgrid/upload/Report_to_NIST_August10_2.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2009.

_____. **The green grid: energy savings and carbon emissions reductions enabled by a smart grid**. Disponível em: <http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/SGNR_2009_EPRI_Green_Grid_June_2008.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2008.

ERDF. **Documentation**. Disponível em: <http://www.erdfdistribution.fr/EN_Documentation>. Acesso em: 15 dez. 2010.

ERVEN, R. V. S. **AES Eletropaulo: Projeto Smart Grid**. Disponível em: <http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2010/Ricardo_Van_Erven.pdf>. Acesso em: 15 set. 2010.

EURIDIS. **The "essential" of Euridis**. Disponível em: <http://www.euridis.org/solution_details.html>. Acesso em: 12 dez. 2010.

FALCÃO, D. M. **Pesquisa e formação em tecnologias para viabilização da Smart Grid**. Disponível em: <http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2010/Djalma_Mosqueira_Falcao.pdf>. Acesso em: 15 set. 2010.

_____. Smart Grid e microrredes: o futuro já é presente. In: SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 8., 2009, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: [s. n.], 2009.

FARUQUI, A. **The case for dynamic pricing**. Disponível em: <http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2010/Ahmad_Faruqui.pdf>. Acesso em: 15 set. 2010a.

_____. The ethics of dynamic pricing. **The Electricity Journal**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 13-27, July 2010b.

FINEP. **Relação final das propostas classificadas na etapa de análise conclusiva por área: Seleção Pública MCT/FINEP/FNDCT - Subvenção Econômica à Inovação – 01/2010**. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/fundos_setoriais/subvencao_economica/resultados/resultado%20final%20da%20etapa%20conclusiva%20da%20Subven%C3%A7%C3%A3o%202010.pdf>. Acesso em: out. 2011.

FIPA. **Foundation for intelligent physical agents**. Disponível em: <<http://www.fipa.org>>. Acesso em: 11 Feb. 2011.

FREIRE, A. **Jini: Introdução**. Disponível em: <http://gsd.ime.usp.br/~kon/MAC5755/aulas/slides/palestra_jini_slides.pdf>. Acesso em: 10 out. 2011.

G1. **Paris terá sistema de aluguel de carros elétricos públicos**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mundo/noticia/2010/12/paris-tera-sistema-de-aluguel-de-carros-eletricos-publicos.html>>. Acesso em: 22 dez. 2010.

GAMMA, E. et al. **Padrões de Projeto: soluções reutilizáveis de software orientado a objetos**. Porto Alegre: Bookman, 2000.

GOMES, F. M.; CARRAPATOSO, A. M. Projeto InovGrid: a evolução da rede de distribuição como resposta aos novos desafios do sector elétrico. In: SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 8., 2009, Rio de Janeiro. **Anais . . .** Rio de Janeiro: [s. n.], 2009.

GREENTECH GRID. **Iberdrola looks to prime PLC standard**. Disponível em: <<http://www.greentechmedia.com/articles/read/iberdrola-looks-to-prime-plc-standard/>>. Acesso em: 11 Dec. 2009.

GUDI, N. et al. Demand response simulation implementing heuristic optimization for home energy management. In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM, 2010, Arlington. **Proceedings . . .** Arlington: IEEE, 2010. p. 1 - 6.

HIRSCH, J. **Performance of open-standard PLC technologies on ERDF distribution network**. Disponível em: <<http://www.maxim-ic.com/products/powerline/pdfs/plc-erdf.pdf>>. Acesso em: 20 Dec. 2009.

HLEDIK, R. **Integrating dynamic pricing with inclining block rates**. Disponível em: <http://piee.stanford.edu/cgi-bin/docs/behavior/workshop/2008/presentations/05-04_Integrating_Dynamic_Pricing_with_Inclining_Block_Rates.pdf>. Acesso em: 15 Dec. 2008.

HUBERT, T.; GRIJALVA, S. Realizing smart grid benefits requires energy optimization algorithms at residential level. In: INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES, 2011, Anaheim. **Proceedings . . .** Anaheim: IEEE, 2011. p. 1-8.

HUHNS, M. N.; STEPHENS L. M. Multiagent systems and societies of agents. In: WEISS, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. Massachusetts: The MIT Press, 1999. p.79-120.

IDC ENERGY INSIGHTS. **Enel makes its smart meters "open source"**. Disponível em: <<http://idc-insights-community.com/posts/d13371cf85>>. Acesso em: 13 Dec. 2009.

IEC. **IEC Smart Grid standardization roadmap**. Disponível em: <http://www.iec.ch/smartgrid/downloads/sg3_roadmap.pdf> Acesso em: 13 June 2010

INSTITUTO ACENDE BRASIL. **Perdas e inadimplência no setor elétrico**. Disponível em:<http://www.acendebrasil.com.br/archives/files/estudos/Caderno_05_Perdas_e_Inadimplencia.pdf> Acesso em: 13 mar. 2010.

JADE. **Java agent development framework**. Disponível em: <<http://jade.tilab.com>>. Acesso em: 10 Feb. 2011.

JENNINGS, N. R. Coordination techniques for distributed artificial intelligence. In: O'HARE, G. M. P.; JENNINGS, N. R. **Foundations of Distributed Artificial Intelligence**. New York: John Wiley & Sons, 1996. p. 187-210.

JIANG, X. **A High-fidelity energy monitoring and feedback architecture for reducing electrical consumption in buildings**. 2010. 110f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - University of California, Berkeley, 2010.

JIANG, X. et al. Design and implementation of a high-fidelity AC metering network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION PROCESSING IN SENSOR NETWORKS, 2009, San Francisco. **Proceedings . . .** San Francisco: IEEE, 2009. p. 253 – 264.

JMEDS. **Java multi edition DPWS stack**. Disponível em: <<http://ws4d.e-technik.uni-rostock.de/jmeds/>> Acesso em: 7 Feb. 2011.

JU, S. H. et al. An efficient home energy management system based on automatic meter reading. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, 2011, Udine. **Proceedings . . .** Udine: IEEE, 2011. p. 479 – 484.

KOK, K. et al. Field-testing smart houses for a Smart Grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 21, 2011, Frankfurt. **Proceedings . . .** Frankfurt: [s. n.], 2011. p. 1 - 4.

_____. Agent-based electricity balancing with distributed energy resources: a multiperspective case study. In: ANNUAL HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 41., 2008, Waikoloa. **Proceedings . . .** Waikoloa: IEEE, 2008. p.173-182.

KOK, K.; WARMER, C.; KAMPHUIS, R. PowerMatcher: multiagent control in the electricity infrastructure. In: INTERNACIONAL JOINT CONFERENCE ON AUTONOMOUS AGENTS & MULTIAGENT SYSTEMS, 4., 2005, Utrecht. **Proceedings . . .** Utrecht: [s. n.] 2005. p.75-82.

KSGI. **Korea Smart Grid Institute**. Disponível em: <<http://www.smartgrid.or.kr/eng.htm>>. Acesso em: 17 Dec. 2010.

LARK JUNIOR, W. **CityCar mobility-on-demand**. Disponível em: <<http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2009/willianlarkjr.pdf>>. Acesso em: 17 Dec. 2009.

LEITE, N. F. **O potencial da aplicação do pré-pagamento no mercado de energia elétrica do Brasil**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/hotsite/seminario/apresentacoes/22-09%20manha/Nelson%20Leite%20Apres%20%20ANEEL%20V4.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2011.

LI, J. **From strong to smart: the chinese smart grid and its relation with the globe**. Disponível em: <<http://www.aepfm.org/ufiles/pdf/Smart%20Grid%20-%20AEPN%20Sept.pdf>>. Acesso em: 20 Dec. 2009.

LI, J. et al. On The design and implementation of a home energy management system. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WIRELESS AND PERVASIVE COMPUTING, 6., 2011, Hong Kong. **Proceedings . . .** Hong Kong: IEEE, 2011. p 1-6.

LOPES, P. H. S. **O papel da ANEEL na regulação da geração distribuída**. Disponível em: <<http://www.tec.abinee.org.br/2011/arquivos/s410.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2011.

LUI, T. J.; STIRLING, W.; MARCY, H. O. Get Smart. **IEEE Power & Energy Magazine**, [s. l.], v.8, n. 3, p. 66-78, May-June 2010.

MARTINI, S. **O Smart Grid na visão das universidades e centros de P&D**. Disponível em: <http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2010/Jose_Sidnei_Colombo_Martini.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2010.

McARTHUR, S. D. J. et al. Multi-agent systems for power engineering applications—part I: concepts, approaches, and technical challenges . **IEEE transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 1743-1751, Nov. 2007.

MICROCHAP. **Micro combined heat & power introduction**. Disponível em: <http://www.microchap.info/introduction_to_micro_chp.htm>. Acesso em: 25 Jun. 2011.

MILAGAIA, R. R. **DPWS middleware to support agent-based manufacturing control and simulation**. 2009. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2009.

MOMA. **Modellstadt Mannheim - the power supply system gets intelligent**. Disponível em <<http://www.modellstadt-mannheim.de/moma/web/en/home/index.html>>. Acesso em: 15 Jul. 2011.

MOSSÉ, A. **Redes Inteligentes: Desafios e Realidades**. Disponível em: <<http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2009/achermosse.pdf>>. Acesso em: 17 Dec. 2009.

NESTLE, D.; BENDEL, C.; RINGELSTEIN, J. Bidirectional energy management interface (BEMI) integration of the low voltage level into grid communication and control. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 19., 2007, Vienna. **Proceedings . . .** Vienna: [s. n.], 2007. p.1-4.

NETL. **Advanced metering infrastructure**. Disponível em: <[http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/AMI%20White%20paper%20final%2020021108%20\(2\)%20APPROVED_2008_02_12.pdf](http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/AMI%20White%20paper%20final%2020021108%20(2)%20APPROVED_2008_02_12.pdf)>. Acesso em: 5 Fev. 2008.

_____. **Energy storage: a key enabler of the Smart Grid**. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/Energy%20Storage_2009_10_02.pdf>. Acesso: 10 Set. 2009.

NIST. **Framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 1.0**. Disponível em: <http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf>. Acesso em: 10 Jan. 2010

NOTÍCIAS R7. **Apagão atinge bairros de São Paulo**. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/sao-paulo/noticias/apagao-atinge-bairros-de-sao-paulo-20110208.html>>. Acesso em: 10 Mar. 2011a.

_____. **Falha em sistema de proteção provocou apagão no nordeste, diz diretor da Chesf**. Disponível em: <<http://noticias.r7.com/brasil/noticias/falha-em-sistema-de-protecao-provocou-apagao-no-nordeste-diz-chesf-20110204.html>>. Acesso em: 10 Mar. 2011b.

NWANA, H.S.; LEE, L.; JENNINGS, N. R. Co-ordination in software agent systems. **BT Technology Journal**, [s. l.], v. 49 n.4, p. 79-89, Out. 1996.

O GLOBO. **Leilão da Aneel consagra energia eólica como viável**. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/mat/2010/08/27/leilao-da-aneel-consagra-energia-eolica-como-viavel-917495354.asp>>. Acesso em: 10 Ago. 2010.

OASIS. **OASIS reference model for service oriented architecture 1.0**. Disponível em: <<http://docs.oasis-open.org/soa-rm/v1.0/soa-rm.pdf>>. Acesso em: 10 Jun. 2011.

OHARA, A. T. **Soluções Smart Grid S&C**. Disponível em: <<http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2009/alexandretajunohara.pdf>>. Acesso em: 20 Nov. 2009.

P3 INTERNATIONAL. **Kill a watt**. Disponível em: <<http://www.p3international.com/products/special/p4400/p4400-ce.html>>. Acesso em: 3 Dez. 2010.

PARIS, J. C. **Da teoria para a prática na América Latina: os primeiros cases de Smart Grid**. Disponível em: <http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2010/Jacir_Carlos_Paris.pdf>. Acesso em: 10 Ago. 2010.

PERRY, S. Watt Matters: Smart Grid security. **Infosecurity**, [s. l.] v.6, n. 5, p. 38-40, Jul-Ago. 2009.

PETRONI, P.; COTTI, M.; BONO, O. The new edge for the Enel telegestore: an integrated solution for the remote management of electricity and gas distribution allowing a total management of the energy consumptions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 20., 2009, Praga. **Proceedings . . .** Praga: IEEE, 2009. p. 1-5.

POURBEIK, P.; KUNDUR, P.S.; TAYLOR, C.W. The anatomy of a power grid blackout: root causes and dynamics of recent major blackouts. **IEEE Power and Energy Magazine**, [s. l.], v. 4, n.5, p. 22-29, Set./Out. 2006.

POWERMATCHER. **Basic structure and agent roles**. Disponível em: <<http://www.powermatcher.net/get-technical/powermatcher-technology/basic-structure-and-agent-roles/>>. Acesso em: 25 Jan. 2011.

PRIME ALLIANCE. **Technology overview**. Disponível em: <http://www.prime-alliance.org/technology.php#technology_overview>. Acesso em: 17 Dez. 2010.

RABELO, R. J. **DAS6607: inteligência artificial aplicada à controle e automação**. Disponível em: <<http://www.das.ufsc.br/~rabelo/Ensino/DAS6607/>>. Acesso em: 20 Out. 2010.

REIS, L. P. **Coordenação em sistemas multi-agente: aplicações na gestão universitária e futebol robótico**. 2003. 432 f. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

RENEWABLE ENERGY WORLD. **Ontario unveils green energy and green economy act, 2009**. Disponível em:

<<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/02/ontario-unveils-green-energy-and-green-economy-act-2009>>. Acesso em: 28 Dez. 2009.

RIBEIRO, N. M.; GOUVEIA, L. B.; RURATO, P. **Informática e competências tecnológicas para a sociedade da informação**. Porto: Universidade Fernando Pessoa, 2003.

RICH, E.; KNIGHT, K. **Artificial intelligence**. New York: McGraw-Hill, 1990.

RINGELSTEIN, J.; NESTLE, D. Application of bidirectional energy management interfaces for distribution grid services. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 20., 2009, Praga. **Proceedings . . .** Prague: IEEE, 2009. p. 1-4.

ROOSSIEN, B. et al. Virtual power plant field experiment using 10 Micro-chp units at consumer premises. In: CIRED SEMINAR: SMARTGRIDS FOR DISTRIBUTION, 1., 2008, Frankfurt. **Proceedings . . .** Frankfurt: IEEE, 2008. p.1-4.

SCE. **Critical peak pricing rate schedule**. Disponível em: <http://asset.sce.com/Documents/Shared/NR580V40410_CPP.pdf>. Acesso em: 10 Jun. 2011.

SCHOMBERG, R. **Strategic IEC approach for the Smart Grids** . Disponível em: <http://www.rpmbrasil.com.br/smartgrid2010/Richard_Schomberg.pdf>. Acesso em: 12 Ago. 2010.

SGA. **Smart Grid Australia**. Disponível em: <<http://www.smartgridaustralia.com.au>>. Acesso em: 20 Mar. 2011.

SMARTGRIDS ETP. **Strategic deployment document for Europe's electricity networks of the future**. Disponível em: <http://www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids_SDD_FINAL_APRIL2010.pdf>. Acesso em: 03 Out. 2010.

_____. **Strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future**. Luxembourg: European Communities, 2007.

_____. **European technology platform SmartGrids: vision and strategy for Europe's electricity networks of the future**. Luxembourg: European Communities, 2006.

SON, Y. et al. Home energy management system based on power line communication. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 56, n. 3, p. 1380-1386, Ago. 2010.

SOUZA, D. C. C. **Redes inteligentes, Smart Grid: projeto cidades do futuro**. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/energia/pdf/tema5-painel3-denys-claudio-cruz-de-souza.pdf>>. Acesso em: 03 Out. 2011.

STEVENS, R. **Utility benefits of advanced metering infrastructure (AMI)**. Disponível em: <<http://esr.degroote.mcmaster.ca/documents/2B-1.pdf>>. Acesso em: 20 Mar. 2010.

SUHARA, Y.; NISHI, H. Distributed demand side management system for home energy management. In: ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 36., 2010, Glendale. **Proceedings . . .** Glendale: IEEE, 2010. p 2430-2435.

TAN, L.; WANG, N. Future internet: the internet of things. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTER THEORY AND ENGINEERING, 2010. Chengdu. **Proceedings . . .** Chengdu: IEEE, 2010.

TED. **The energy detective**. Disponível em: <<http://www.theenergydetective.com>>. Acesso em: 17 Dez. 2010.

TROMPOS, S. et al. A pervasive network architecture featuring intelligent energy management of households. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERVASIVE TECHNOLOGIES RELATED TO ASSISTIVE ENVIRONMENTS, 1., 2008, **Proceedings . . .** New York: [s. n.], 2008. p.1-4.

UI. **What is variable peak pricing (VPP)?** Disponível em: <https://uinet.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/296#What%20is%20Variable%20Peak%20Pricing?>. Acesso em: 23 Jun. de 2011.

UPNP. **UPnP device architecture 1.1**. Disponível em: <<http://www.upnp.org/specs/arch/UPnP-arch-DeviceArchitecture-v1.1.pdf>> Acesso em: 20 Out. 2011.

US CONGRESS. **Energy independence and security act of 2007**. Disponível em: <<http://www.govtrack.us/data/us/bills.text/110/h/h6enr.pdf>>. Acesso em: 12 Mar. 2011.

WE ENERGIES. **Peak-time rebates program**. Disponível em: <<http://www.we-energies.com/residential/acctoptions/ptr.htm>>. Acesso em: 23 Jun. 2011.

WEI, C. et al. Learning agents for storage devices management in the Smart Grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND SOFTWARE ENGINEERING, 2., 2010, Wuhan. **Proceedings . . .** Wuhan: IEEE, 2010. p. 1-4.

WHITE HOUSE. **President Obama announces \$3.4 billion investment to spur transition to smart energy grid**. Disponível em: <<http://www.whitehouse.gov/the-press-office/president-obama-announces-34-billion-investment-spur-transition-smart-energy-grid>>. Acesso em: 2 Mar. 2011.

WILSON, C, M.; PRICE, C. W. **Do consumers switch to the best supplier?** Disponível em: <<https://ired.uea.ac.uk/documents/107435/107587/ccp07-6.pdf>>. Acesso em: Mar. 2011.

WOOLDRIDGE, M. **An introduction to multiagent systems**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

_____. Intelligent Agents. In: WEISS, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. Massachusetts: The MIT Press, 1999. p.27-77.

WS4D. **Web services for devices**. Disponível em <<http://www.ws4d.org/>>. Acesso em: 15 Fev. 2011.

YGGE, F. **Market-oriented programming and its application to power load management**. 1998. 224f. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Lund University, Lund, 1998.

ZEEB, E.; BOBEK, A.; GOLATOWSKI, F. Service-oriented architectures for embedded systems using devices profile for web services. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION NETWORKING AND APPLICATIONS WORKSHOPS-COVER, 21., 2007, Niagara Falls. **Proceedings . . .** Niagara Falls: IEEE, 2007. p. 956 - 963.

ZILLES, R. **Geração distribuída e sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/workshop/2011/Geracao_Distribuida_Sist_Fotovoltaicos_29032011.pdf>. Acesso em: 20 Mar. 2011.

ZPRYME. **Smart Grid: hardware & software outlook**. Smart Grid insights. Disponível em: <http://www.zpryme.com/SmartGridInsights/2010_Smart_Grid_Hardware_Software_Outlook_Zpryme_Smart_Grid_Insights.pdf>. Acesso em: 28 Dez. 2009.