UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Filipe de Oliveira Saraiva

**Aplicações Híbridas entre Sistemas
Multiagentes e Técnicas de Inteligência
Artificial para Redes Inteligentes de
Distribuição de Energia Elétrica**

Filipe de Oliveira Saraiva

**Aplicações Híbridas entre Sistemas
Multiagentes e Técnicas de Inteligência
Artificial para Redes Inteligentes de
Distribuição de Energia Elétrica**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Eduardo Nobuhiro Asada

São Carlos – São Paulo – Brasil

30 de novembro de 2015

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

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

S243a Saraiva, Filipe de Oliveira
Aplicações Híbridas entre Sistemas Multiagentes e
Técnicas de Inteligência Artificial para Redes
Inteligentes de Distribuição de Energia Elétrica /
Filipe de Oliveira Saraiva; orientador Eduardo Nobuhiro
Asada. São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Redes Elétricas Inteligentes. 2. Smart Grids. 3.
Sistemas Elétricos de Distribuição. 4. Inteligência
Artificial. 5. Sistemas Multiagentes. 6. Sistemas
Distribuídos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **FILIFE DE OLIVEIRA SARAIVA**.

Título da tese: "Aplicações híbridas entre sistemas multiagentes e técnicas de inteligência artificial para redes inteligentes de distribuição de energia elétrica".

Data da defesa: 24/11/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Eduardo Nobuhiro Asada (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Walmir de Freitas Filho**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Titular **Nelson Kagan**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

Prof. Associado **Jaime Simão Sichman**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

*Ao seu Saraiva e à dona Dêca,
Pai e Mãe.
Por tudo.*

Agradecimentos

Esta tese é resultado de muito trabalho e esforço empreendido para desenvolver algo em uma área diferente da qual me formei, mas que acabou por apresentar-se como um importante campo para estudos e aplicações dos mais diferentes conceitos da computação. Para além desse esforço empregado durante a realização, este trabalho também representa uma série de vivências e parcerias que, direta ou indiretamente, influenciaram durante diferentes fases desta pesquisa. Portanto, sou bastante grato às seguintes pessoas e instituições que tiveram, à sua maneira, participação nesta trajetória:

- ❑ À FAPESP, financiadora desta pesquisa, que proveu o suporte necessário para que eu me dedicasse a este trabalho. A agência patrocinou-me em dois projetos: a bolsa de doutorado regular (processo 2011/22411-7), realizado na USP – Universidade de São Paulo, São Carlos – Brasil, vinculada ao projeto de pesquisa temático “Desenvolvimentos Tecnológicos para a Proteção, Análise, Supervisão e Automação dos Sistemas Elétricos do Futuro” (processo 2010/01690-2) sob coordenação do Dr. Denis Vinicius Coury, e a bolsa de estágio em pesquisa no exterior (processo 2014/23935-8), realizado na KTH – *Royal Institute of Technology*, Estocolmo – Suécia.
- ❑ Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Asada, pela confiança de que conseguiríamos criar algo original, instigante e interessante. Por ter acreditado em meu potencial desde o início e estar sempre disposto a me recomendar conselhos e sugestões, a cada passo da pesquisa e a cada resultado obtido. Agradeço também pelas longas conversas que invariavelmente enveredavam por temas para além do trabalho.
- ❑ Ao meu orientador durante o período de estágio em pesquisa no exterior, Prof. Dr. Lars Nordström, por ter se mostrado receptivo desde o primeiro contato quando pedi admissão ao laboratório liderado por ele, PSMIX – *Power System Management with related Information Exchange*. Também agradeço pela orientação e paciência dispendida durante o estágio. Essa temporada foi de fundamental importância para

parte do trabalho aqui apresentado, a saber, as simulações utilizando a plataforma Raspberry Pi.

- ❑ Gostaria de estender meus agradecimentos a Mikel Armendariz, Daniel Brodén, Mehrdad Kazemtabrizi, Muhammad Hassan Fidai, Davood Babazadeh e Nicholas Honeth, integrantes do laboratório PSMIX, por me auxiliarem com os contatos e trabalhos realizados na KTH e também com o “*nordic way of life*”.
- ❑ Aos professores que estiveram no exame de qualificação desta pesquisa, e com suas contribuições tornaram a qualidade do texto agora apresentado melhor, mais completo e didático, sem desleixar do rigor que espera-se presente em uma tese. Obrigado aos professores Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior e Dr. Rafael Heitor Bordini.
- ❑ Aos funcionários e professores do departamento, sempre muito atenciosos. Gostaria de externar meus agradecimentos, em especial, à Marisa Fortulan e Jussara Zoia, por toda a dedicação e ajuda com a burocracia universitária, e aos professores Dr. Eduardo Asada, Dr. Ivan Nunes da Silva e Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior, por todo conhecimento partilhado e pelos bons profissionais que são. Levarei-os como exemplo para minha carreira.
- ❑ A Ana Asada e Wellington Bernardes, parceiros de pesquisa em dois estudos que estão presentes nesta tese, a citar, respectivamente, o método de controle de tensão e a classificação de cargas não-lineares.
- ❑ A Aldir Sousa, Eduardo Werley, Fillipe Vasconcelos, Guilherme Lages, e novamente a Wellington Bernardes, por todas as dúvidas que os amigos dirimiram sempre que me encontrava perdido nos conceitos de sistemas de potência. Gostaria de adicionar àqueles, Ana Mazzini e Ellen Ferreira, formando assim o grupo de membros do LASEE – Laboratório de Análise de Sistemas de Energia Elétrica – com quem mais convivi e dividi os caminhos da vida de estudante de pós-graduação.
- ❑ Aos amigos nordestinos em São Carlos, que tornaram a vida de “retirante acadêmico” mais fácil de ser vivida nesta cidade tão distante e tão diferente de nossa região. Muito obrigado a Aldir Sousa, Aracele Torres, Dario Mesquita, Eduardo Dhuba, Filipe Brito, Marcos Freitas e Patrícia Vaz.
- ❑ Ao Aldir Sousa, que me apresentou a ideia de fazer a pós-graduação na engenharia elétrica, área que tem bastante demanda por pesquisadores com perfil técnico próximo à computação. Seguir esta trilha me levou a um caminho na ciência que nunca havia imaginado, e que agora, ao final desta etapa, julgo como muito recompensador.

- ❑ Meus agradecimentos a todos os membros das diversas comunidades de software livre que produziram as tecnologias que possibilitaram este trabalho, especialmente às comunidades: GNU, Linux, KDE, Mageia, Python, Java, OpenJDK, Jade, openSSH, Eclipse, Raspbian, Raspberry Pi, LaTeX e abnTeX2.
- ❑ Para minha família, Saraiva e Dêca, pai e mãe, Diego e Lívia, irmão e irmã, e o pequeno João, meu sobrinho. Por toda a compreensão que vocês tiveram e tem comigo, e por todo apoio pela escolha que fiz em seguir essa vida longe de casa. Espero um dia retribuir à altura tudo o que representam e fazem por mim.
- ❑ Gostaria de agradecer a Aracele Torres, por toda a paciência, o carinho, força e aprendizado que trocamos em nossa cumplicidade. Por estar sempre por perto e disposta a ajudar nos momentos difíceis, e por partilhar as alegrias de cada conquista.
- ❑ E finalmente, meus agradecimentos a todos os brasileiros e todas as brasileiras, financiadores desta instituição que é a universidade e o ensino superior do país.

“Uma maneira de definirmos nossa identidade, talvez a principal, seja em contraposição ao “outro”, em primeiro lugar aos vizinhos. Essa forma de definição é válida tanto para disciplinas quanto para nações. Também elas têm seus “campos”, suas culturas, suas tribos e territórios. Apesar disso, a inovação intelectual é muitas vezes o resultado da burla da polícia de fronteira e da invasão do território dos outros, ou, para variar a metáfora, de tomar empréstimos dos vizinhos em vez de mantê-los à distância.”

– Peter Burke, Uma História Social do Conhecimento

Resumo

Saraiva, Filipe de O. **Aplicações Híbridas entre Sistemas Multiagentes e Técnicas de Inteligência Artificial para Redes Inteligentes de Distribuição de Energia Elétrica.** 154 p. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 30 de novembro de 2015.

Os *smart grids* representam a nova geração dos sistemas elétricos de potência, combinando avanços em computação, sistemas de comunicação, processos distribuídos e inteligência artificial para prover novas funcionalidades quanto ao acompanhamento em tempo real da demanda e do consumo de energia elétrica, gerenciamento em larga escala de geradores distribuídos, entre outras, a partir de um sistema de controle distribuído sobre a rede elétrica. Esta estrutura modifica profundamente a maneira como se realiza o planejamento e a operação de sistemas elétricos nos dias de hoje, em especial os de distribuição, e há interessantes possibilidades de pesquisa e desenvolvimento possibilitada pela busca da implementação destas funcionalidades. Com esse cenário em vista, o presente trabalho utiliza uma abordagem baseada no uso de sistemas multiagentes para simular esse tipo de sistema de distribuição de energia elétrica, considerando opções de controle distintas. A utilização da tecnologia de sistemas multiagentes para a simulação é baseada na conceituação de *smart grids* como um sistema distribuído, algo também realizado nesse trabalho. Para validar a proposta, foram simuladas três funcionalidades esperadas dessas redes elétricas: classificação de cargas não-lineares; gerenciamento de perfil de tensão; e reconfiguração topológica com a finalidade de reduzir as perdas elétricas. Todas as modelagens e desenvolvimentos destes estudos estão aqui relatados. Por fim, o trabalho se propõe a identificar os sistemas multiagentes como uma tecnologia a ser empregada tanto para a pesquisa, quanto para implementação dessas redes elétricas.

Palavras-chave: Redes Elétricas Inteligentes, Sistemas Elétricos de Distribuição, Inteligência Artificial, Sistemas Multiagentes, Sistemas Distribuídos.

Abstract

Saraiva, Filipe de O. **Hybrid Applications of Multiagent Systems and Artificial Intelligence Techniques to Smart Grids in Power Distribution Level.** 154 p. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, November 30, 2015.

The smart grids represent a new generation of electric power systems, combining advances in computing, communication, distributed systems, and artificial intelligence, to provide new features to the power systems as the real-time demand monitoring and real-time energy consumption monitoring, large-scale managing of distributed generators, among others. It is possible by the existence of a distributed control system on the grid. This structure modifies the way it conducts the planning and operation of electrical systems currently, especially in the distribution level, and there are interesting possibilities for research and development made possible by the need for implementation of these features. With this scenario in mind, this thesis uses an approach based on multi-agent systems to simulate this new power distribution system, considering different control options. The use of multi-agent systems technology for smart grid simulation is based on the concept of smart grid as a distributed system - this conceptualization is realized in this work too. In order to validate this proposal, three features expected of these grids were simulated: the classification of non-linear loads; the voltage profile management; and the topological reconfiguration in order to reduce electrical losses. All modeling and developments of these studies are reported here. Finally, the study aims to identify the multi-agent systems as a technology to be utilized both for research and for implementing these grids.

Keywords: Smart Grid, Power Distribution System, Artificial Intelligence, Multi-agent Systems, Distributed Systems.

Lista de figuras

Figura 1 – <i>Smart Grids</i> em camadas	37
Figura 2 – Sistema de Distribuição com Geração Centralizada	39
Figura 3 – Sistema de Distribuição com Geração Distribuída	39
Figura 4 – Componentes de interação entre um agente e o ambiente	49
Figura 5 – Agentes em um sistema multiagente e a representação de interações . .	51
Figura 6 – Diagrama com as fases e artefatos da metodologia Prometheus	54
Figura 7 – Modelos de sistemas distribuídos – arquitetura cliente-servidor	61
Figura 8 – Modelos de sistemas distribuídos – arquitetura P2P (par-a-par)	61
Figura 9 – Agentes dispersos em um sistema elétrico de distribuição	65
Figura 10 – Forma de onda da corrente das cargas do raio-X e e do tomógrafo helicoidal, separadamente	71
Figura 11 – Forma de onda da corrente das cargas do raio-X e e do tomógrafo helicoidal, juntos	72
Figura 12 – Modelo de neurônio de uma rede neural artificial	72
Figura 13 – Arquitetura do perceptron multicamadas	75
Figura 14 – Agentes na rede de distribuição - proposta 1	77
Figura 15 – Fluxograma do Agente <i>Smart Meter</i> - proposta 1	78
Figura 16 – Fluxograma do Agente Subestação – proposta 1	78
Figura 17 – Diagrama de sequência do sistema multiagente – proposta 1	79
Figura 18 – Agentes na rede de distribuição – proposta 2	80
Figura 19 – Fluxograma do Agente <i>Smart Meter</i> – proposta 2	80
Figura 20 – Fluxograma do Agente Subestação – proposta 2	81
Figura 21 – Diagrama de sequência do sistema multiagente - proposta 2	82
Figura 22 – Treinamento para perceptron 2	84
Figura 23 – Treinamento para perceptron 5	85
Figura 24 – Sistema de inferência fuzzy	90

Figura 25 – Função da variável tensão (V)	91
Figura 26 – Função da variável desvio de tensão (ΔV)	92
Figura 27 – Função da variável banco de capacitores (Bc)	92
Figura 28 – Fluxograma do agente subestação	94
Figura 29 – Fluxograma do Agente Medidor	96
Figura 30 – Diagrama de sequência do sistema multiagente	97
Figura 31 – Sistema de 14 barras	99
Figura 32 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 11 barras	105
Figura 33 – Mensagem trocada entre os LoA na fronteira da coalizão	106
Figura 34 – Mensagem trocada entre os LoA na fronteira da coalizão e os SuA	107
Figura 35 – Novas estado do sistema elétrico após LoA 5 ter migrado da coalizão do SuA 0 para coalizão do SuA 1	108
Figura 36 – Fluxograma do agente na chave (SwA)	109
Figura 37 – Fluxograma do agente na subestação (SuA)	110
Figura 38 – Fluxograma do agente na carga (LoA)	111
Figura 39 – Diagrama de sequência do sistema multiagente	115
Figura 40 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 11 barras	115
Figura 41 – Topologia dos cenários - sistema de 11 barras: (a) topologia para ce- nário 1; (b) topologia para cenário 2; (c) topologia para cenário 3	117
Figura 42 – Topologia final - sistema de 11 barras	117
Figura 43 – Decréscimo das perdas elétricas, cenário 3 - sistema de 11 barras	118
Figura 44 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 16 barras	119
Figura 45 – Topologia dos cenários - sistema de 16 barras: (a) topologia para ce- nário 1; (b) topologia para cenário 2; (c) topologia para cenário 3; (d) topologia para cenário 4	121
Figura 46 – Topologia final - sistema de 16 barras	121
Figura 47 – Decréscimo das perdas elétricas, cenário 4 - sistema de 16 barras	122
Figura 48 – Perfil de Carga	123
Figura 49 – Perfis de Carga Médio para 3 Tipos de Consumidores: Residencial, Comercial e Industrial	124
Figura 50 – Perfis de Carga Gerados a Partir dos Dados de Perfil de Carga Médio de Tipos Diferentes de Consumidor	125
Figura 51 – Raspberry Pi 2 Model B	126
Figura 52 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 12 barras	128
Figura 53 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 1	129
Figura 54 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 2	130
Figura 55 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 3	131
Figura 56 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 4	131
Figura 57 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 5	132

Figura 58 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 16 barras	135
Figura 59 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 1	136
Figura 60 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 2	136
Figura 61 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 3	137
Figura 62 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 4	138
Figura 63 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 5	138

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características próximas entre sistemas distribuídos e <i>smart grids</i> . . .	62
Tabela 2 – Características das Cargas	71
Tabela 3 – Codificação da camada de saída	74
Tabela 4 – Mapeamento das cargas para as classes	75
Tabela 5 – Resultados obtidos para fase de treinamento	84
Tabela 6 – Resultados obtidos para fases de validação + operação	85
Tabela 7 – Resultados obtidos por classe e por cada rede neural	85
Tabela 8 – Limites de tensão (V) para redes cuja tensão nominal está entre 1 kV e 69 kV	88
Tabela 9 – Limites de desvio de tensão (ΔV) em porcentagem para redes cuja tensão nominal está abaixo de 230 kV	89
Tabela 10 – Utilização de bancos de capacitores	93
Tabela 11 – Tabela com as regras <i>fuzzy</i> , suas entradas e o mapeamento para as respectivas saídas	93
Tabela 12 – Dados do sistema de 14 barras	98
Tabela 13 – Dados das linhas do sistema de 14 barras	98
Tabela 14 – Resultado dos testes quando os agentes medidores estão alocados nas barras 5 e 14	98
Tabela 15 – Valores das potências - sistema de 11 barras	116
Tabela 16 – Parâmetros das linhas - sistema de 11 barras	116
Tabela 17 – Cenários iniciais - sistema de 11 barras	116
Tabela 18 – Perdas para cada coalizão para cada cenário inicial - sistema de 11 barras	117
Tabela 19 – Iterações para convergência - sistema de 11 barras	118
Tabela 20 – Valores das potências - sistema de 16 barras	119
Tabela 21 – Parâmetros das linhas - sistema de 16 barras	119
Tabela 22 – Cenários iniciais - sistema de 16 barras	120

Tabela 23 – Perdas para cada coalizão para cada cenário inicial - sistema de 16 barras	120
Tabela 24 – Iterações para convergência - sistema de 16 barras	122
Tabela 25 – Parâmetros das linhas - sistema de 12 barras	127
Tabela 26 – Perfis de Consumidores Alocados para Simulações no Sistema de 12 Barras	128
Tabela 27 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 1	130
Tabela 28 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 2	130
Tabela 29 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 3	131
Tabela 30 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 4	132
Tabela 31 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 5	132
Tabela 32 – Operações de Chaveamento por Hora para Simulações no Sistema de 12 Barras	133
Tabela 33 – Movimentos dos agentes para o sistema de 12 barras – cada célula destaca o LoA agente movimentado e, entre parêntesis, a coalizão de origem seguida da coalizão destino	134
Tabela 34 – Perfis de Consumidores Alocados para Simulações no Sistema de 16 Barras	135
Tabela 35 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 1	136
Tabela 36 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 2	137
Tabela 37 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 3	137
Tabela 38 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 4	138
Tabela 39 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 5	139
Tabela 40 – Operações de Chaveamento por Hora para Simulações no Sistema de 16 Barras	140
Tabela 41 – Movimentos dos agentes para o sistema de 16 barras – cada célula destaca o LoA agente movimentado e, entre parêntesis, a coalizão de origem seguida da coalizão destino	141

Lista de algoritmos

Algoritmo 1 – Definição mínima de agente em JADE	57
Algoritmo 2 – Definição de comportamento do tipo <i>SimpleBehaviour</i>	57
Algoritmo 3 – Definição de comportamento do tipo <i>CyclicBehaviour</i>	58
Algoritmo 4 – Leitura de dados, classificação de cargas não-lineares e envio de mensagens do Agente <i>Smart Meter</i> – proposta 1	78
Algoritmo 5 – Recebimento de mensagens e guarda de dados do Agente Subestação – proposta 1	79
Algoritmo 6 – Leitura de dados e envio de mensagens do Agente <i>Smart Meter</i> – proposta 2	81
Algoritmo 7 – Recebimento de mensagens e classificação de cargas não-lineares do Agente Subestação – proposta 2	81
Algoritmo 8 – Recebimento de mensagens e tomada de decisão <i>fuzzy</i> sobre utilização de bancos de capacitores do Agente Subestação	95
Algoritmo 9 – Leitura de dados sobre tensão e envio de mensagens do Agente Medidor	96
Algoritmo 10 – Reconfiguração de chaves do agente na chave (<i>SwA</i>)	109
Algoritmo 11 – Acompanhamento do estado da rede e reconfiguração da coalizão pelo agente na subestação (<i>SuA</i>)	112
Algoritmo 12 – Tomada de decisão do agente na carga (<i>LoA</i>)	114

Sumário

1	Introdução	27
1.1	As Redes Elétricas Inteligentes e as Pesquisas em Sistemas Elétricos de Potência	27
1.2	Objetivos	30
1.2.1	Geral	30
1.2.2	Específicos	30
1.3	Metodologia	31
1.4	Estrutura do Trabalho	32
2	<i>Smart Grids</i>	35
2.1	Os Sistemas Elétricos de Potência do Futuro: Conceitos e Perspectivas	35
2.2	Os Sistemas Elétricos de Potência do Futuro: Implantação e Experiências	40
3	Sistemas Multiagentes	47
3.1	Inteligência Artificial e o Conceito de Agentes	47
3.2	Inteligência Artificial Distribuída e o Conceito de Sistemas Multiagentes	49
3.3	A Engenharia de Sistemas Multiagentes	53
3.4	Tecnologias para Desenvolvimento de Sistemas Multiagentes	55
4	Sistemas Multiagentes como Ferramentas para Simulação de <i>Smart Grids</i>	59
4.1	Simulação Computacional de <i>Smart Grids</i>	59
4.2	<i>Smart Grids</i> no Nível da Distribuição e Sistemas Multiagentes	63
5	Classificação de Cargas Não-Lineares em Sistemas Elétricos de Distribuição tipo <i>Smart Grids</i>	69
5.1	Descrição do Problema	69
5.2	Detalhes da Modelagem do Método de Resolução	70
5.2.1	Dados para a Simulação	70

5.2.2	Rede Neural para Classificação de Cargas Não-Lineares	71
5.2.3	Sistema Multiagente Modelado	76
5.3	Implementação e Simulações Computacionais	82
5.4	Conclusões e Trabalhos Futuros	84
6	Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Distribuição tipo <i>Smart Grids</i>	87
6.1	Descrição do Problema	87
6.2	Detalhes da Modelagem do Método de Resolução	88
6.2.1	Dados para a Simulação	88
6.2.2	Sistema <i>Fuzzy</i> para Controle de Tensão	89
6.2.3	Sistema Multiagente Modelado	93
6.3	Implementação e Simulações Computacionais	96
6.4	Conclusão e Trabalhos Futuros	99
7	Minimização das Perdas em Sistemas Elétricos de Distribuição tipo <i>Smart Grids</i>	101
7.1	Descrição do Problema	101
7.2	Detalhes da Modelagem do Método de Resolução	103
7.2.1	Modelagem Matemática do Problema	103
7.2.2	Sistema Multiagente Modelado	104
7.3	Implementação e Simulações Computacionais – Demanda Estática	113
7.3.1	Testes no Sistema de 11 Barras	115
7.3.2	Testes no Sistema de 16 Barras	118
7.4	Implementação e Simulações Computacionais – Demanda Dinâmica	122
7.4.1	Demanda Dinâmica e Dados para a Simulação	122
7.4.2	A Plataforma Raspberry Pi e Modificações na Modelagem e Simulação	125
7.4.3	Testes no Sistema de 12 Barras	127
7.4.4	Testes no Sistema de 16 Barras	135
7.5	Conclusões e Trabalhos Futuros	139
8	Considerações Finais	143
8.1	Conclusões	143
8.2	Trabalhos Futuros	145
	Referências	147

Introdução

1.1 As Redes Elétricas Inteligentes e as Pesquisas em Sistemas Elétricos de Potência

Já faz alguns anos que diferentes atores interessados no tema discutem o futuro dos sistemas elétricos de potência. Apesar de no momento ainda serem um tanto incipientes em termos de implementação no “mundo real”, há alguns consensos sobre as características que esses sistemas deverão ter: possibilitarão o uso e gerenciamento de diferentes fontes geradoras de energia distribuídas pela rede; serão dotados de um nível elevado de automação, necessário para o desempenho de funcionalidades hoje não existentes no atual sistema; possibilitarão o acompanhamento de dados do sistema em tempo real, como consumo, perdas, perfil de tensão, e outros; os dispositivos presentes nos futuros sistemas de potência utilizarão redes de comunicação para trocarem dados entre si; entre outras.

É possível perceber dois movimentos que impulsionam a criação desse novo tipo de sistema elétrico. Por um lado, a crescente descentralização do setor vai abrindo espaços para oportunidades de negócios e criação de empresas que dividem uma estrutura comum no campo de atuação de seus empreendimentos – a própria rede elétrica. Por conta disso, faz-se necessário investimentos no desenvolvimento tecnológico dessas redes, possibilitando tanto um maior controle sobre o estado da mesma quanto o provimento (ou a base para o futuro provimento) de novos e variados serviços.

De outro lado, a questão ambiental, e em especial o aquecimento global, demandam da sociedade uma maior preocupação com a poluição e as consequências negativas do efeito estufa. A possibilidade de migração para uma matriz energética mais limpa, limitando o uso de usinas termelétricas e outras reconhecidamente poluentes, requer um sistema elétrico que possibilite o gerenciamento de fontes alternativas de energia, onde esta viria tanto de usinas de grande e médio porte, quanto de pequenos geradores instalados ao longo do sistema elétrico nas casas e estabelecimentos dos consumidores.

De fato, este tema tornou-se rotineiro na agenda de governos e organizações com

interesse na questão energética. Já é comum que encontros relacionados às mudanças climáticas realizados pela Organização das Nações Unidas (ONU), como as *United Nations Climate Change Conference* – UNCCC, as *Conferences of the Parties* – COP, as *Climate Summit* (conhecidas na mídia brasileira como “Cúpulas do Clima”), ou, citando um grande evento que ocorreu em solo nacional, a Rio+20, tenham painéis ou eventos satélite direcionados à tecnologia das redes elétricas do futuro. Podemos citar ainda como exemplo o estudo da Comissão de Energia da União Europeia (*European Commission Energy*), que em seu relatório sobre o planejamento energético para 2020, aponta que investirá maciçamente em uma nova iniciativa onde:

*(...)smart grids to link the whole electricity grid system, from the offshore wind farms in the North Sea, solar plants in the South and existing hydro-electric dams, to individual households, while making power networks more intelligent, efficient and reliable*¹

Nesse sentido, há um contexto construído por esses atores que, em suas ações e cada um buscando seus objetivos, pavimentam o caminho que conduzirá a migração do atual sistema elétrico de potência para esta anunciada nova direção. Políticos buscam legislar sobre o tema, aprovar projetos que objetivam modernizar a infraestrutura da rede elétrica, criar novas regras, e abrir oportunidades para o mercado; empresários estão atentos à demanda dos usuários e às novas possibilidades de negócios que essas redes permitirão; cientistas e pesquisadores estudam de que forma introduzir as novas características no atual sistema elétrico, e de que maneira essas novas funcionalidades desejadas poderiam ser implementadas.

Posto que essas novas redes elétricas necessitam trocar dados entre os equipamentos alocados a ela, pressupõe-se a existência de uma rede de comunicação e um protocolo comum para o envio, recebimento e interpretação desses dados. Além disso, para tratar essa quantidade de informação, presumivelmente grande, e realizar ações autônomas na rede a partir delas, imagina-se que essa rede necessitará de diversas aplicações que utilizam diferentes métodos de inteligência artificial e otimização para realizar tomada de decisão sobre a execução (ou não) das funcionalidades. Essas duas características combinadas batizam essas redes com o seu nome mais comumente utilizado: *smart grids*, ou as “redes elétricas inteligentes”.

A adequação destas funcionalidades pressupõe uma radical modificação na infraestrutura atual dos sistemas elétricos, em especial no nível da distribuição e geração. Mas há também outro impacto significativo que esta tecnologia deve causar: a forma como engenheiros e cientistas da área trabalham suas pesquisas, especialmente em tópicos como operação dos sistemas elétricos de potência. Dadas as profundas mudanças que os *smart*

¹ O relatório completo é disponibilizado pela comissão, e pode ser encontrado em http://ec.europa.eu/energy/strategies/2010/2020_en.htm (Acessado em 1 de outubro de 2015)

grids trarão tanto em termos tecnológicos quanto em termos gerenciais para as redes, os atuais métodos computacionais deverão ser atualizados para este novo paradigma, outros métodos serão criados e novas tecnologias para simulação desses sistemas serão avaliadas.

A partir dessa premissa, a tarefa preliminar deste trabalho foi entender o conceito de *smart grids* em seus pressupostos técnicos, para além da carga de propaganda que a palavra carrega. Este exercício inicial desvendou essas redes elétricas como um grande sistema computacional distribuído, com diferentes equipamentos realizando diferentes tarefas, de maneira concorrente, trocando dados por uma rede de comunicação, executando tarefas de reconfiguração ou utilização de dispositivos na rede necessários para a realização de diferentes funcionalidades.

A partir dessa visão do cenário, foi empreendida uma busca por métodos computacionais que se adequassem ao ambiente que pretendia-se simular e sugerir caminhos para implementações. Nesse momento foi definido o uso de sistemas multiagentes, uma técnica relacionada principalmente à inteligência artificial distribuída, que possui diversas características similares às esperadas pelas redes elétricas inteligentes.

Do exposto, é possível identificar dois nortes que guiaram a realização desta tese: o primeiro, a classificação do *smart grid* como um sistema de computação distribuída; o segundo, a defesa do uso de métodos de sistemas de computação distribuída em geral, e sistemas multiagentes em particular, para o estudo e desenvolvimento de métodos e simulações para *smart grids*.

Guiado por estes objetivos, este trabalho apresenta estudos e experimentações sobre diferentes problemas de sistemas elétricos de distribuição, adaptando-os para a futura realidade das redes elétricas, criando métodos de solução baseados nos conceitos de sistemas de computação distribuída e sistemas multiagentes. Para validar essas áreas como de importância-chave para estudos de *smart grids*, o trabalho acaba se deslocando da fórmula “método X aplicado a problema Y” e passa a trabalhar com diferentes problemas e suas respectivas modelagens, tendo como ligação entre elas as diferentes aplicações de um mesmo conjunto de técnicas (sistemas de computação distribuída e sistemas multiagentes) em cenários típicos das redes elétricas inteligentes.

Esta é a contribuição central que esse trabalho pretende realizar e, em busca desse intento, as páginas seguintes se preocuparão em conduzir o leitor a esta percepção, se utilizando de conceitos diversos, provenientes de áreas distintas (sistemas elétricos de potência; *smart grids*; redes de computadores; sistemas computacionais distribuídos; inteligência artificial; sistemas multiagentes), interpretando-os e apresentando-os de uma maneira que acaba por revelar, além da contribuição, o perfil multidisciplinar desta pesquisa – e o que as pesquisas na área de sistemas elétricos de potência podem vir a se tornar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Simular um subconjunto de funcionalidades de uma rede de distribuição de energia elétrica do tipo *smart grid* através de sistemas multiagentes, modelando e implementando estas funcionalidades em termos de sistemas computacionais distribuídos, de forma a validar, tanto em termos teóricos quanto práticos – em ambiente de simulação – a adoção da técnica de sistemas multiagentes como uma importante ferramenta para o estudo, avaliação, desenvolvimento, modelagem e implementação das redes elétricas inteligentes.

1.2.2 Específicos

- ❑ Desenvolver e apresentar o conceito de *smart grids* como um sistema computacional distribuído, apontando pressupostos teóricos e técnicos já amplamente desenvolvidos na área de redes de computadores e sistemas de computação distribuídos que podem ser apropriados por essa área de pesquisa;
- ❑ Modelar equipamentos demandados por *smart grids* para as funcionalidades aqui simuladas, bem como seus respectivos sensores e atuadores, como agentes;
- ❑ Modelar o relacionamento entre os agentes como um sistema multiagente, de forma a atender os requisitos das funcionalidades estudadas;
- ❑ Desenvolver os algoritmos necessários, utilizando conceitos de sistemas computacionais distribuídos e inteligência artificial distribuída, de forma a prover as funcionalidades estudadas;
- ❑ Implementar métodos híbridos que utilizem algoritmos de otimização, inteligência artificial e sistemas multiagentes para as funcionalidades simuladas que demandarem este tipo de abordagem;
- ❑ Fazer estudos comparativos entre diferentes algoritmos desenvolvidos para uma mesma funcionalidade e destacar as vantagens e desvantagens entre eles;
- ❑ Avaliar os métodos desenvolvidos em cenários dinâmicos, ou seja, onde há variações no estado do sistema elétrico estudado durante a simulação;
- ❑ Validar a abordagem de sistemas multiagentes e sistemas computacionais distribuídos para simulações de redes elétricas inteligentes.

1.3 Metodologia

A metodologia empregada para a realização deste trabalho consistiu, em um primeiro momento, na definição preliminar de que a pesquisa versaria sobre o desenvolvimento de simulações computacionais de funcionalidades das redes elétricas inteligentes utilizando alguma técnica que seria selecionada após o entendimento dos requisitos demandados por estas redes.

A partir dessa base o primeiro passo da pesquisa foi estudar artigos científicos e realizar leituras de textos sobre *smart grids*, com a finalidade de conhecer quais as características destes sistemas, suas necessidades, e quais seus componentes. Esse levantamento bibliográfico permitiu enxergar esse tipo de sistema elétrico como um sistema de computação distribuída, o que definiu sobremaneira os passos posteriores da pesquisa.

Com esses dados e conceito, fez-se a escolha sobre qual tecnologia seria utilizada para simulação e consequente estudos computacionais sobre o tema. Decidiu-se, a fim de se conseguir simular as redes elétricas inteligentes com um certo grau de fidelidade, os sistemas multiagentes. Cabe comentar que a seleção da tecnologia utilizada não foi anterior à definição do projeto. Uma explicação mais aprofundada sobre esta escolha encontra-se no Capítulo 4 dessa obra.

Em seguida foram decididas as funcionalidades desejadas para as redes elétricas inteligentes a serem modeladas e simuladas. Por conta de fatores como disponibilidade de dados e possibilidade de diferentes tipos de implementação, foram selecionadas as funcionalidades de classificação de cargas não-lineares e identificação do consumidor, utilização de banco de capacitores para gerenciamento de tensão, e reconfiguração topológica para redução das perdas elétricas. Essas funcionalidades serão melhor descritas, respectivamente, nos Capítulos 5, 6 e 7.

Com a tecnologia a ser adotada e a as funcionalidades a serem simuladas selecionadas, partiu-se para o estudo da teoria de sistemas multiagentes, sua relação com a inteligência artificial e sistemas distribuídos, suas teorias organizacionais e as tecnologias de programação que implementam o paradigma orientado a agentes. Estes assuntos estavam presentes em artigos, livros e revisões de literatura. Também foi escolhida e estudada a linguagem de programação, bibliotecas e tecnologias relacionadas a serem utilizadas neste trabalho.

Após estes estudos, foram realizadas as modelagens em forma de agentes dos diferentes equipamentos dos sistemas elétricos para que realizassem as funcionalidades selecionadas para simulação. Além disso, as interações entre esses agentes, via troca de mensagens, foi modelada de forma a cumprir o objetivo da simulação para cada funcionalidade.

Com as implementações computacionais dos modelos para as diferentes funcionalidades, os sistemas foram executados para conjuntos de testes que tivessem características que propiciassem a verificação do funcionamento dos métodos.

Cabe aqui comentar que para uma das aplicações estudadas, a minimização das perdas no sistemas elétricos de distribuição com variação dinâmica nas cargas, a ser apresentada

na seção 7.4, foi utilizada uma plataforma de simulação diferente do computador pessoal convencional, com o intuito de servir de um primeiro passo para criação de um protótipo. A plataforma utilizada, chamada Raspberry Pi, será melhor detalhada também na seção já referenciada.

Ao final, com a coleta dos resultados, foi possível tecer comentários conclusivos para o trabalho bem como abrir novas possibilidades de investigação baseadas nas realizações alcançadas por esta pesquisa.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado na forma descrita a seguir.

O presente capítulo fez uma breve descrição da área de estudos, motivação do trabalho, objetivo e metodologia utilizada.

O Capítulo 2 apresenta informações mais detalhadas sobre o objeto de estudo – os *smart grids*. O capítulo descreve conceitos, possibilidades, e alguns projetos em fase de implementação em diferentes países, incluindo o Brasil. O capítulo também discute as mudanças imaginadas para as redes elétricas convencionais.

O Capítulo 3 trata da teoria dos sistemas multiagentes através de uma revisão bibliográfica sobre o assunto. São abordados tópicos como definição, características, aspectos organizacionais, engenharia de agentes, tecnologias e aplicações.

Já o Capítulo 4 apresenta a conceituação de *smart grids* como sistemas computacionais distribuídos e, a partir dessa base, se utiliza dos temas expostos nos dois capítulos anteriores para justificar o uso de sistemas multiagentes para simulação desse tipo de sistema elétrico. Esse capítulo também marca um ponto de transição no texto, pois a partir do próximo capítulo são apresentados os estudos e simulações desenvolvidos.

Iniciando a parte dedicada às simulações, o Capítulo 5 detalha o problema de classificação de cargas não-lineares nos consumidores. Tanto a definição do problema quanto a modelagem, implementação, características dos agentes desenvolvidos, e resultados obtidos são apresentados. Cabe antecipar que uma rede neural foi utilizada como ferramenta de classificação das cargas utilizadas no estudo.

O Capítulo 6 apresenta a aplicação e modelagem de um sistema multiagente para o problema de gerenciamento de tensão em redes elétricas de distribuição utilizando banco de capacitores. Para esta aplicação foi desenvolvido um sistema de lógica *fuzzy* utilizado como tomador de decisão sobre os dados adquiridos de forma distribuída pelos agentes do sistema.

Finalizando a parte sobre simulações, o Capítulo 7 apresenta uma solução baseada em sistema multiagente desenvolvida para reduzir as perdas elétricas no sistema a partir do chaveamento de trechos da rede, resultando na reconfiguração topológica da rede elétrica. Foram realizadas simulações em dois cenários com características diferentes: no primeiro,

apresentado na seção 7.3, o sistema elétrico tem uma demanda de energia que não varia durante a simulação – demanda estática. Já no segundo cenário, descrito na seção 7.4, a demanda por energia no sistema elétrico sofre variação ao longo da simulação – demanda dinâmica. Para esta última, as simulações se diferenciam das demais por ter sido realizada em computadores Raspberry Pi. Dentre as aplicações estudadas neste trabalho, a apresentada neste capítulo é a que faz o maior uso de tomada de decisão distribuída em termos de modelagem e resolução do problema.

Encerrando o presente trabalho, o Capítulo 8 apresenta algumas reflexões finais sobre o tema e discorre sobre os resultados dos testes realizados. Também são discutidas algumas possibilidades e desdobramentos da pesquisa para trabalhos futuros, que darão prosseguimento aos estudos aqui desenvolvidos.

Smart Grids

2.1 Os Sistemas Elétricos de Potência do Futuro: Conceitos e Perspectivas

Grupos de pesquisa de diferentes universidades e empresas ao redor do mundo empreendem investigações para as modelagens, desenvolvimento e implementações de um novo tipo de sistema elétrico de potência. Essas diferentes propostas devem lidar com um requisito principal: a característica multidisciplinar necessária para o projeto desses sistemas, que integram avanços tecnológicos de diferentes áreas, tais como computação, telecomunicações, sistemas computacionais distribuídos, inteligência artificial, economia, e outras, nos níveis de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica.

Existem várias denominações para referenciar os projetos com essa finalidade, entretanto a mais comumente utilizada hoje chama-se *smart grids* – as “redes elétricas inteligentes”, chamadas assim por terem as características de monitoramento do estado da rede elétrica e terem alto nível de automação na tomada de decisão e consequente execução de funcionalidades no sistema elétrico. Entre estas funcionalidades, destacam-se (BROWN, 2008; WEI; YU-HUI; JIE-LIN, 2009):

- ❑ Auto-recuperação do sistema;
- ❑ Alta qualidade da energia entregue;
- ❑ Resistência a ataques cibernéticos;
- ❑ Possibilidade de utilização em larga escala de geração distribuída;
- ❑ Acomodação de equipamentos para armazenamento de energia;
- ❑ Controle e acompanhamento pormenorizado do consumo por parte do usuário;
- ❑ Maior acompanhamento da demanda dos usuários pelas empresas de distribuição;

- ❑ Reconfiguração do sistema de distribuição a partir de medições observadas em tempo-real;
- ❑ Maior eficiência energética no nível do consumidor;
- ❑ Possibilidade do consumidor também produzir energia e vendê-la para a concessionária;
- ❑ Acompanhamento em tempo-real da cotação do preço da energia elétrica;
- ❑ Possibilidade de gerenciamento da energia em veículos elétricos realizado sob demanda;
- ❑ Minimização dos custos de operação e manutenção;
- ❑ Entre outras.

É possível visualizar a maior parte dessas funcionalidades como uma série de ações de reconfiguração sobre a rede, realizadas por diferentes equipamentos presentes no sistema elétrico. A tomada de decisão nestes casos é possível pois estes equipamentos, distribuídos no *smart grid*, são responsáveis por realizar medições, acompanhar alterações no estado do sistema, e enviar os dados mensurados para outros equipamentos na rede. A partir dessa coleta de dados, realizada de maneira descentralizada no sistema elétrico, é possível decidir sobre a execução ou não de determinada funcionalidade.

Estes dados coletados e trocados, além de permitirem um controle mais eficaz sobre o estado do sistema e possibilitar uma melhor observação das características da rede para os operadores, também alimentarão bases de dados e bases de conhecimento que serão utilizadas por sistemas especialistas para desempenhar alguma função específica do *smart grid*, executando o processo de tomada de decisão acerca da funcionalidade e operando intervenções de reconfiguração autônomas na rede.

Do requisito de equipamentos trocando dados entre si, surge a necessidade da existência de uma rede de comunicação lado-a-lado com a rede elétrica, interligando estes dispositivos e permitindo o fluxo de informação entre eles, essencial para o pleno funcionamento desse tipo de sistema.

A partir desse quadro, é possível deduzir que estas redes transformariam os sistemas elétricos convencionais em um grande “sistema de informação” computacional (SARAIVA; ASADA, 2012), onde as características já mencionadas de controle distribuído e conhecimento do estado da rede possibilitariam a implementação destas funcionalidades.

A Figura 1 (baseada em (SARAIVA; ASADA, 2012)) apresenta um *smart grid* no nível da distribuição de energia dividido em camadas, a saber, a camada do consumidor, camada de comunicação e camada da subestação de distribuição. O fluxo de informação flui da camada do consumidor para a camada da subestação via rede de comunicação. Cada camada tem equipamentos e tecnologias próprias.

Figura 1 – *Smart Grids* em camadas

Espera-se que, com o contínuo desenvolvimento, pesquisa e implementação desta tecnologia, mais funcionalidades serão imaginadas e posteriormente estudadas para implantação no *smart grid*. Esta linha de estudos é relativamente recente e repleta de possibilidades para pesquisa e inovação.

O esforço empreendido no desenvolvimento desta tecnologia é motivado principalmente por dois movimentos que ganharam visibilidade na última década entre os atores do mercado global de energia – a crescente desregulamentação deste mercado e a busca pela eficiência energética a partir de uma visão direcionada para a responsabilidade ambiental (WEI; YU-HUI; JIE-LIN, 2009).

A desregulamentação do mercado energético retirou, através das privatizações, muito da responsabilidade que o Estado exercia diretamente sobre a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica¹. Isso abriu novos mercados para a iniciativa privada em todos os níveis dos sistemas de potência e, apesar destas dividirem uma estrutura comum (o sistema elétrico), cada empresa é responsável por oferecer o seu tipo de serviço. Criou-se então um cenário em que existem diversas empresas especializadas em um ou mais ramos do mercado energético, competindo entre si pelos consumidores a partir de regras de mercado próprias da área.

Portanto, um sistema elétrico que permitisse um melhor acompanhamento de seu es-

¹ Apesar de, normalmente, o Estado manter agências reguladoras para fiscalizar os serviços das empresas do mercado energético.

tado para os atores nele interessados seria de grande utilidade para esta nova configuração do mercado. Nesse contexto de forte descentralização, cada empresa teria a possibilidade de, levando em conta os dados observados, acompanhar o desempenho de suas respectivas tarefas e programar equipamentos para realizarem ações a partir de um estado específico do sistema. Estes sistemas teriam autonomia para executar suas funcionalidades, sempre remetendo a seus responsáveis as descrições sobre suas ações e as causas que os levaram a realizá-las.

O segundo movimento que impulsiona a pesquisa e desenvolvimento na área de *smart grids*, a busca pela eficiência energética a partir de uma visão direcionada para a responsabilidade ambiental, surge como consequência de uma percepção hoje difundida em várias empresas, governos e instituições sociais nos últimos anos sobre a questão ambiental, aquecimento global e limites das reservas energéticas dos países.

Esta preocupação é ainda mais presente em alguns países cuja matriz energética é prioritariamente constituída por fontes não-renováveis ou bastante poluentes, como alguns países europeus e os Estados Unidos da América, uma realidade bastante diferente da brasileira onde a principal fonte de energia é a hidrelétrica².

Uma alternativa para as fontes energéticas muito poluentes seria a energia nuclear, porém a mesma sofreu um severo revés no plano político e na opinião pública após o recente caso do acidente na usina nuclear de Fukushima (HAYASHI; HUGHES, 2013). Após este acontecimento, países com forte poder econômico e amplo utilizadores desse tipo de fonte de energia, como o próprio Japão e a Alemanha, anunciaram planos para o desligamento de suas centrais nucleares e migração para outras fontes de energia.

Para boa parte dos países com planos de migração ou mudança no perfil das suas fontes energéticas, a possibilidade de utilização de fontes de energia renováveis e não poluentes implicaria, dependendo das características de cada um, no uso de energia eólica, solar, biomassa, etc.

Entretanto, a utilização e manuseio destes tipos de fontes de energia são ainda pouco maduras em seu desenvolvimento (como a energia solar) ou muito dependentes de condições climáticas/ambientais bastante inconstantes (como a força dos ventos). A utilização destes tipos de fonte de energia demanda um sistema de transmissão e/ou distribuição que seja capaz de gerenciar o fluxo de energia dessas fontes a partir da disponibilidade de geração das mesmas em determinado intervalo de tempo, alternando entre fontes diferentes a partir de um plano de contingência que garanta a plena oferta de energia aos consumidores. Sistemas assim existem hoje, porém não são os mais comuns dentre os sistemas elétricos instalados e em funcionamento.

² Apesar de existirem alguns estudos sobre a produção de gases poluentes nos lagos criados por grandes barragens em usinas hidrelétricas, levaremos em conta neste trabalho que a energia proveniente de fonte hidrelétrica é pouco poluente se comparada a energia gerada em termelétricas, por exemplo. Maiores detalhes sobre este assunto podem ser encontrados em (KEMENES; FORSBERG; MELACK, 2007).

Ou seja, o sistema deveria garantir que, quando turbinas eólicas ou geradores fotovoltaicos estivessem com disponibilidade de geração de energia a um nível suficiente para injeção no sistema, eles seriam utilizados pela rede. Entretanto, quando os ventos não tivessem força para rodar a hélice do gerador eólico, ou quando a baixa luminosidade impedisse que a placa fotovoltaica captasse e gerasse energia, outros meios de produção de energia elétrica deveriam estar disponíveis para imediata utilização.

Por conta disso, para potencializar a adoção destes tipos de fontes de energia, seria interessante utilizá-las de forma distribuída em um dado espaço geográfico. Por exemplo, pequenas turbinas eólicas e placas fotovoltaicas em coberturas de edifícios de uma metrópole, responsáveis pela geração de energia e posterior injeção da mesma na rede de distribuição. A essa forma de obtenção de energia chama-se geração distribuída (RODRIGUES; BORGES; FALCÃO, 2007).

A seguir são apresentadas duas imagens que ilustram as diferenças conceituais entre geração tradicional – centralizada – e a geração distribuída. A Figura 2 apresenta um único gerador e as linhas de distribuição em sentido único, alimentando indústria, área residencial e comércio. Já a Figura 3 apresenta um grande gerador central e vários pequenos geradores. Percebe-se que os fluxos de energia representados pelos arcos chegam de várias direções a um mesmo lugar (no comércio, por exemplo) ou mesmo chegam a sair de convencionais consumidores de energia (indústria, no exemplo). Isso exemplifica a possibilidade de geração de energia também por parte de alguns consumidores, através do uso de painéis fotovoltaicos, pequenas turbinas eólicas ou outras tecnologias. Estas imagens foram baseadas nos originais de (WEI; YU-HUI; JIE-LIN, 2009).

Figura 2 – Sistema de Distribuição com Geração Centralizada

Figura 3 – Sistema de Distribuição com Geração Distribuída

Entretanto, o modelo convencional de redes de distribuição de energia que existe nas

idades e é comumente trabalhado na engenharia elétrica, não comporta este tipo de gerenciamento de geradores distribuídos de forma simples. Em muitos casos, a geração distribuída pode prejudicar o sistema de distribuição ou transmissão como um todo a partir de uma ocasional diferença de tensão, por exemplo. E como a rede não tem automação para executar ações corretivas em casos como este, torna-se muito complicado, ou em alguns casos mesmo impraticável, o uso deste tipo de geração.

Logo, um sistema de controle e avaliação distribuído ao longo da rede poderia gerenciar estas múltiplas fontes de energia sem desestabilizar o sistema de distribuição ou transmissão, utilizando a geração distribuída a partir do acompanhamento temporal da disponibilidade de geração das fontes, injetando energia no sistema sempre que isso não incorrer em problemas técnicos para a infraestrutura ou para o provimento de seus respectivos serviços.

O desenvolvimento da tecnologia de *smart grids* e suas funcionalidades impactará no planejamento dos futuros sistemas elétricos, mas em especial no nível da distribuição. Se hoje há sistemas prioritariamente radiais e sem (ou com pouca) automação, no futuro o controle distribuído da rede permitiria que a mesma tenha uma topologia malhada, permitindo uma maior flexibilidade para a reconfiguração do sistema (BROWN, 2008).

Como será apresentado na seção a seguir, muitos países criaram projetos piloto de implantação de *smart grids*, e inclusive alguns já começaram as primeiras fases de construção dos mesmos, mostrando que a aposta nesta tecnologia é séria e está mobilizando a indústria do setor energético em geral.

2.2 Os Sistemas Elétricos de Potência do Futuro: Implantação e Experiências

Fora comentado na introdução deste trabalho sobre o projeto da Comissão de Energia da União Europeia e seus estudos sobre as perspectivas energéticas e enfrentamento da questão do aquecimento global até 2020. No relatório, a comissão prevê investimentos no desenvolvimento das tecnologias de redes inteligentes como uma forma de atingir a eficiência energética, utilizando prioritariamente fontes alternativas de energia não poluidoras através de uma rede que seja “mais inteligente, eficiente e robusta” (EC – European Commission, 2011). O projeto é conhecido como 20-20-20: uma alusão a meta de reduzir o nível de emissão de gás carbônico para o ano de 2020 em pelo menos 20% daquela emitida em 2007.

Com este objetivo, a União Europeia iniciou ainda em 2005 o seu projeto de estudo e desenvolvimento de redes inteligentes, chamado ETP SmartGrids – *European Technology Platform SmartGrids*³ (EC – European Commission, 2006). As características buscadas

³ A União Europeia mantém um site específico sobre seu projeto ETP SmartGrids, com vários documentos acessíveis para leitura. <http://www.smartgrids.eu/> (Acessado em 25 de setembro de

pelo bloco de países para suas redes de energia são flexibilidade quanto a reconfiguração, expansão de acessibilidade ao sistema para os usuários, uso prioritário de fontes de energia renováveis e busca pelo gerenciamento eficiente da energia (JIANG et al., 2009).

Em 2012 esse projeto foi atualizado a partir de um estudo que define um planejamento com horizonte ainda mais longo, até 2035. O trabalho coloca como foco para esta época o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia, para compensar a geração distribuída baseada em fontes renováveis e pouco poluentes, o desenvolvimento de tecnologias de informação e comunicação, além da necessidade de marcos legais e modelos de mercado compatíveis com o sistema elétrico naquela época⁴ (EC – European Commission, 2012).

Ainda no continente europeu, outro exemplo de projeto de instalação de *smart grid* está localizado na cidade portuguesa de Évora, capitaneado pela empresa EDP em parceria com outras empresas, centros de pesquisa e universidades. Este projeto já se encontra em um interessante estado de operação, permitindo aos consumidores o acompanhamento do consumo de energia de sua casa via internet, lâmpadas de iluminação pública inteligentes que adequam sua luminosidade (e, por consequência, seu consumo) a partir de relógios e sensores de presença, possibilidade de criação de um perfil de consumo personalizado para um dado grupo de usuários, entre outras.

O medidor inteligente fornecido pela EDP para esse projeto, o EDP Box, é versátil a ponto de servir tanto para consumidores quanto para micro produtores de energia. Esse medidor permite acesso detalhado ao perfil de utilização de energia de dado consumidor, informando o consumo realizado em cada intervalo de tempo, a variação do preço da energia ao longo do dia, além de fazer alterações no plano de pagamento do consumidor diretamente no aparelho, também permitindo a programação de avisos automáticos a partir de parâmetros como nível de consumo, faixa de preço, etc. Já para micro produtores o medidor permite consultas sobre a quantidade de energia produzida, preço, e um balanço sobre o consumo/produção da habitação, indicando em que momentos o proprietário é consumidor ou produtor de energia⁵.

O projeto de Évora já tem interessantes funcionalidades implementadas, mas ainda está na busca de diversificar a quantidade destas, em especial na expansão da rede de abastecimento de carros elétricos⁶.

Além destes projetos desenvolvidos no âmbito dos países europeus, existem muitas outras iniciativas de estudo e implantação de *smart grids* sendo realizadas por governos,

2015).

⁴ O estudo, intitulado *SmartGrids SRA 2035 – Strategic Research Agenda Update of the SmartGrids SRA 2007 for the needs by the year 2035* pode ser acessado no link <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf> (Acessado em 25 de setembro de 2015)

⁵ Maiores detalhes sobre a EDP Box podem ser obtidos em <http://www.inovcity.com/pt/inovcity/casas-inteligentes/energy-box/> (Acessado em 25 de setembro de 2015).

⁶ A EDP mantém um site em <http://www.inovcity.com/> sobre o projeto onde podem ser encontradas mais informações (Acessado em 25 de setembro de 2015).

empresas e laboratórios de pesquisa em outros países e regiões do mundo.

No continente americano, mais precisamente nos Estados Unidos, o Departamento Americano de Energia (*U.S. Department of Energy*) iniciou o projeto GridWise, que tem como objetivo modernizar a infraestrutura e operação das redes de distribuição, adicionando um fluxo de mão-dupla tanto de eletricidade quanto de informação entre consumidores e subestações (BROWN, 2008).

Este projeto acabou fomentando a criação de outros dois subprojetos complementares: o GridApps e o GridWorks, ambos também patrocinados pelo Departamento Americano de Energia.

GridApps é um consórcio de empresas de tecnologia que trabalham para fornecer aplicações que visam modernizar a operação dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição. As tecnologias utilizadas neste projeto podem ser divididas em três tipos: monitoramento e gerenciamento de redes, novos dispositivos e engenharia de integração de sistemas para otimização de performance.

Já GridWorks tem como alvo fortalecer a confiabilidade dos sistemas elétricos através da modernização de condutores, subestações e sistemas de proteção, utilizando principalmente a eletrônica de potência. A implementação deste projeto inclui as etapas de desenvolvimento das tecnologias e instalação imediata das mesmas nos sistemas elétricos convencionais já existentes.

O projeto também deu início à GridWise Alliance, um fórum que reúne empresas e pesquisadores para avançar a política americana para implantação das redes elétricas inteligentes. Recentemente esse grupo publicou um relatório com métricas sobre o estado atual de implementação dessas redes em diversos estados americanos⁷ (ALLIANCE; CENTER, 2014).

Ainda nos Estados Unidos, o projeto DV2010 (*Distribution Vision 2010*) teve o objetivo de, através da combinação de redes de comunicação de alta velocidade, dispositivos de chaveamento de redes e controladores inteligentes, criar uma rede de distribuição virtualmente “à prova de falhas” (FANNING, 2004; BROWN, 2008).

Entretanto, pelo menos em um primeiro momento, os resultados obtidos pelo DV2010 não seriam implementados em todo o sistema de distribuição. Seria criada uma área “*premium*” onde a operação do sistema teria estas características funcionais. Esta área seria destinada para consumidores com necessidades críticas de energia (grandes indústrias, *data centers* e outras) e que poderiam pagar um valor adicional por um serviço de alta qualidade.

A EPRI – *Electric Power Research Institute*, centro de pesquisa californiano, iniciou em 2001 o projeto IntelliGrid, com o objetivo de criar uma nova infraestrutura de distribuição

⁷ Este relatório, intitulado *2014 Grid Modernization Index* pode ser acessado em http://www.gridwise.org/report_download.asp?id=15 (Acessado em 25 de setembro de 2015).

de energia integrando avanços na comunicação, computação e eletrônica⁸ (JIANG et al., 2009).

Esta iniciativa almeja o desenvolvimento, integração e aplicação destas tecnologias para tornar a infraestrutura dos sistemas de distribuição mais eficientes, com alta qualidade, segurança e robustez. Este projeto acabou evoluindo e gerando outro com objetivos um pouco mais ousados. O ADA – *Advanced Distribution Automation* – visa criar os sistemas de distribuição do futuro, onde a infraestrutura será totalmente automatizada através de uma arquitetura de operação flexível, gerenciada por sistemas de controle que se comunicam através de um protocolo aberto (BROWN, 2008).

O projeto IntelliGrid também serviu como um primeiro experimento para que a EPRI desenvolvesse outras pesquisas voltadas para a área de redes elétricas inteligentes, agora reunidas sob o grupo *Smart Grid Resource Center*⁹.

Também existem várias outras iniciativas de desenvolvimento de *smart grids* em países do continente asiático. Citar-se-á neste texto, como exemplo, as experiências da China e Coreia do Sul.

A China é atualmente um dos países que mais crescem economicamente no mundo. Com o avanço da economia, aumenta também a demanda por energia. Estima-se que o país, que atualmente conta com uma capacidade de geração instalada de 792 milhões de kilowatts, deverá necessariamente dobrá-la até 2020 (BI et al., 2010).

O governo chinês, então, aposta na geração distribuída a partir de fontes renováveis de energia como uma forma de complementar os esforços para suprir sua demanda energética neste espaço de tempo. Logo, o país necessitará de uma rede de distribuição que dê suporte à integração de diferentes tecnologias de geração de energia, garantindo também a eficiência da operação.

Em 2007, a *East China Power Grid Company* iniciou as pesquisas para avaliação da viabilidade do desenvolvimento de *smart grids* para o país. Os resultados obtidos foram a constatação desta viabilidade e o direcionamento do plano para que o desenvolvimento da mesma seja pautado pela criação de equipamentos de alta tecnologia e na habilidade de inovação dos grupos de pesquisa do país (LU; AI, 2009).

Foi então idealizada uma estratégia de 3 passos para a implantação de *smart grids* no leste chinês: primeiramente, a construção de centrais para monitoramento das redes de distribuição a partir de 2010; em seguida, a implementação de uma camada de comunicação na rede de distribuição com capacidade de automação preliminar até 2020; e por último, a capacidade do sistema de auto-recuperar-se após alguma falha já em funcionamento a partir de 2030 (LU; AI, 2009).

Em adição, a *Shanghai Municipal Electric Power Company* e a *North China Power Grid*

⁸ A EPRI mantém um site específico para o projeto IntelliGrid, com muitas informações, artigos, e mais. <http://smartgrid.epri.com/IntelliGrid.aspx> (Acessado em 25 de setembro de 2014).

⁹ O site desse grupo pode ser acessado em <http://smartgrid.epri.com/> (Acessado em 25 de setembro de 2015).

Company também lançaram projetos de redes inteligentes, em 2008 e 2009, respectivamente, focando medição inteligente, automação da distribuição, interação com o usuário e mais outras funcionalidades (BI et al., 2010).

O desenvolvimento de *smart grids* na Coreia do Sul é capitaneado pela empresa KEPCO – *Korea Electric Power Corporation* – entre outras organizações de pesquisa. Através do projeto Power IT, a empresa utiliza tecnologias de informação e comunicação para prover os já comentados controle e monitoramento distribuído do sistema elétrico de distribuição (KWON et al., 2008).

No Brasil também há diferentes empresas apostando no desenvolvimento de redes elétricas inteligentes, todas pesquisando a implementação de projetos piloto.

Por exemplo, a empresa EDP Bandeirante, do mesmo grupo EDP que desenvolve o projeto InovCity na cidade portuguesa de Évora, desenvolveu um projeto semelhante ao da cidade lusitana e que foi implementado em Aparecida, no interior de São Paulo. O projeto teve o mesmo nome da iniciativa desenvolvida em Évora. Em um primeiro momento, foi focado na instalação de medidores inteligentes nas locações dos consumidores. Após isso o projeto instalou iluminação pública com lâmpadas de LED que reduzem o consumo em horários de maior iluminação natural, além de realizar testes de geração distribuída utilizando placas solares¹⁰.

A concessionária de distribuição mineira Cemig também tem um projeto piloto de instalação de *smart grid*, este na cidade de Sete Lagoas, interior de Minas Gerais. Utilizando como referência o projeto IntelliGrid da EPRI (o comitê gestor do projeto na Cemig chama-se CGEPRI – Comitê de Gestão do Projeto IntelliGrid), o programa intitulado “Cidades do Futuro” concentrou-se em testes nas áreas de automação da medição de consumo, automação de subestações e redes de distribuição, sistemas computacionais de operação da rede, gerenciamento e integração da geração distribuída¹¹.

O programa Smart Grid Light, da concessionária carioca Light, é um guarda-chuva de projetos que miram o desenvolvimento de redes elétricas inteligentes. Atualmente a iniciativa já desenvolveu um medidor inteligente próprio, que está em fase de implantação para futuros testes na comunidade Morro da Formiga, na Tijuca¹².

Já as concessionárias da rede Eletrobrás criaram um projeto em conjunto na cidade de Parintins, Amazonas, que serviu de modelo de implantação de *smart grids* para todas as empresas do grupo. Foram instalados na cidade uma série de medidores inteligentes que utilizam redes *mesh* para trocar dados entre si e com a concessionária.

Para o caso brasileiro há um estudo bastante amplo que contempla análises sobre a

¹⁰ O site do projeto está em <http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-bandeirante/projetos/inovcity/Paginas/default.aspx> (Acessado em 25 de setembro de 2015).

¹¹ Os sites com essas informações são http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Paginas/smart_grid.aspx e http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Paginas/cidades_do_futuro.aspx (Acessados em 25 de setembro de 2015).

¹² Site do projeto em <http://smartgridlight.com.br/> (Acessado em 25 de setembro de 2015).

implantação das redes inteligentes no país, o custo estimado em diferentes cenários, as diferentes funcionalidades possíveis como tipos de geração distribuída, o uso de veículos elétricos, a automação do sistema de distribuição, entre outros (KAGAN et al., 2013). Um sítio na internet¹³, peça integrante do estudo citado, apresenta informações e acompanha projetos piloto em diferentes regiões do Brasil e do mundo, e disponibiliza relatórios, informações sobre ferramentas e outros temas relacionados com os *smart grids*.

Em geral, a implantação de *smart grids* seguirá um ritmo ditado por uma série de etapas, onde pouco a pouco a atual estrutura de distribuição/transmissão de energia elétrica receberá equipamentos e sistemas que adicionarão as funcionalidades esperadas para essas redes.

A primeira etapa é voltada para a troca dos antigos medidores de consumo de energia pelos novos medidores inteligentes. Com esses novos equipamentos já é possível, quando adicionados a alguma infraestrutura de aplicativos, permitir que o usuário acompanhe seu consumo, veja qual o seu perfil de utilização de energia, entre outras. Além dessas funcionalidades, a primeira etapa pode ser caracterizada também pela possibilidade de instalação de equipamentos que permitam funções simples, que não demandem alguma coordenação complexa entre diferentes equipamentos para sua realização, ou seja, que possam ser atingidas por tomada de decisão localizada. Um exemplo disso são as lâmpadas que alteram a iluminação produzida, e consequentemente o consumo de energia, a partir de relógios, sensores de iluminação ambiente e sensores de movimento.

A segunda etapa já demandaria um processo de tomada de decisão mais complexo, requerendo coordenação de equipamentos e conhecimento do estado de parte do sistema elétrico, mas cujas ações de reconfiguração do sistema deveriam, por consequência, terem impacto mais localizado. As funcionalidades que mais se adequam a esta característica seriam a adição e gerenciamento em pequena escala de geração distribuída, venda de energia produzida pelo consumidor para a concessionária, gerenciamento do perfil de tensão, entre outras. Também nesta etapa seriam adicionadas as funcionalidades que demandam investimento em estruturas ainda não existentes na etapa anterior, como postos de abastecimento de carros elétricos.

Já a terceira etapa demandaria conhecimento de maiores partes do sistema elétrico, e as funcionalidades providas teriam grande impacto na operação e performance da rede. Por exemplo, a funcionalidade de auto-recuperação – a capacidade do sistema de, ao perceber que está havendo uma falta em determinado trecho, automaticamente reconfigurar os alimentadores de forma a enviar energia para as cargas naquele trecho utilizando outro caminho no grafo da rede; ou o gerenciamento em larga escala de diferentes fontes de geração ligadas à rede, garantindo que a energia demandada será prontamente atendida ao menor custo.

¹³ Redes Inteligentes Brasil, disponível em <http://redesinteligentesbrasil.org.br/> (Acessado em 25 de setembro de 2015).

Além dos países citados neste capítulo, vários outros investem na tecnologia de *smart grids* a partir de um plano político próprio para os sistemas elétricos. Diante da quantidade de governos e empresas e do montante em investimentos por eles executados, o movimento para este novo tipo de sistema elétrico de potência, em escala mundial, parece ser irreversível. Os países que não aderiram a ele até a presente data certamente o farão no futuro próximo, visto a quantidade de tecnologia e *expertise* que está sendo desenvolvida agora.

Apresentados os conceitos sobre *smart grids* e alguns investimentos reais quanto a implementação destas redes, o próximo capítulo passará a apresentar o conceito, metodologias e tecnologias de sistemas multiagentes, a ferramenta que esse estudo selecionou para utilização em simulações computacionais das redes elétricas inteligentes.

Sistemas Multiagentes

3.1 Inteligência Artificial e o Conceito de Agentes

O campo de estudos sobre inteligência artificial é recente quando comparado a outras ciências, além de ter um caráter fortemente interdisciplinar. Diversas áreas se dedicam ao estudo de algum aspecto da inteligência artificial: ela é objeto de apreciação de cientistas da computação, matemáticos, economistas, neurocientistas, psicólogos, cientistas sociais, filósofos e outros (RUSSELL; NORVIG, 2010).

Talvez por conta desta característica interdisciplinar, definir de maneira unificada o termo “inteligência artificial” é uma tarefa complicada, pois suscita diferentes questionamentos e debates. Apesar disso, é possível trabalhar com a ideia de que os sistemas ditos “com inteligência artificial”, ou sistemas inteligentes, são capazes de executar alguma função que, quando realizada pelo homem, exigiria conhecimento e raciocínio (REZENDE, 2003).

Visualizando alguns conceitos à luz de termos computacionais, o conhecimento humano equivaleria a uma base de conhecimento onde o sistema inteligente guardaria informações importantes sobre os processos que o mesmo modela, podendo manipulá-las à medida que este se defronta com situações que ocorrem em seu ambiente de aplicação. Já a ideia de raciocínio humano teria sua contraparte nos métodos de busca e tomada de decisão dos sistemas inteligentes.

A partir destes componentes, diversos algoritmos voltados para processamento de conhecimento, classificação de padrões, tomada de decisão, otimização, entre outros, são vistos como técnicas de inteligência artificial. Entre as mais estudadas é possível listar os algoritmos genéticos (HOLLAND, 1992; LINDEN, 2008), programação genética (KOZA, 1992) e outras técnicas associadas à computação evolutiva (EIBEN; SMITH, 2003); redes neurais (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010), aprendizado por reforço e outras relacionadas com aprendizado de máquina; lógica *fuzzy* (ALMEIDA; EVSUKOFF, 2003) e demais algoritmos de tomada de decisão nebulosa; busca tabu (GLOVER; LAGUNA, 1997), colônia de formigas (DORIGO; STTZLE, 2004), enxame de partículas,

GRASP (MARQUES-SILVA; SAKALLAH, 1999), e demais métodos metaheurísticos de otimização (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003); entre outros.

Mesmo com algumas dificuldades em se trabalhar com conceitos unificados na área de inteligência artificial, uma abordagem didática da área, presente no livro de Russel e Norvig, vem ganhando muitos adeptos desde o final da década de 90. Ela unifica as diversas concepções da área a partir do conceito de agentes.

Um agente é uma entidade que percebe o ambiente em que está imerso e age sobre este ambiente na busca por atingir algum objetivo ou reproduzir algum comportamento (RUSSELL; NORVIG, 2010). É possível visualizar um agente como um tipo específico de software ou como um robô, se o ambiente for o meio físico. A principal característica do agente é que ele age de forma autônoma, sem um controle executado por qualquer ente exterior a ele próprio.

Um agente inteligente possui as características de um sistema inteligente: uma base de conhecimentos que servirá para embasar a resolução do tipo de problema ao qual o mesmo fora modelado, e métodos de busca e manipulação dessa base, que servirão para encontrar as informações que proverão a tomada de decisão da entidade.

O agente também é composto por duas partes que possibilitam a interação entre ele e o ambiente em que o mesmo se encontra. Os sensores são as ferramentas que o agente tem para perceber o ambiente; já os atuadores são as partes do agente que, de fato, executam a ação resultante da tomada de decisão feita a partir do estado em que o agente se encontra e da busca feita na base de conhecimento.

Logo, a partir da ideia de agente, é possível tratar, de forma semelhante em termos conceituais, tanto um carro robótico que deve percorrer determinado trajeto o mais rápido possível, porém não cometendo infrações e nem colocando em risco os ocupantes do veículo e os transeuntes, como um robô responsável por faxinar uma casa ou mesmo um personagem de algum jogo virtual que deve derrotar o personagem do jogador. Todos esses exemplos, nos seus aspectos arquiteturais, são dotados de sensores, atuadores, algoritmos de tomada de decisão, e estão imersos em um ambiente. Eles podem conceitualmente serem visualizados como similares, entretanto, para as implementações desses tipos de agentes, cada um deverá ter suas especificidades estudadas e desenvolvidas de acordo com os diferentes problemas aos quais os mesmos são construídos.

A Figura 4 apresenta a imagem de um agente e os componentes que fazem a interface entre a entidade e o ambiente em que o mesmo está imerso. O sensores poderiam representar, dependendo do agente e do tipo de aplicação para que o mesmo foi projetado, visão computacional, sonar, medidores, etc. Para os atuadores, poderiam ser pernas ou braços mecânicos, funções que disparassem ações de controle sobre o sistema, entre outras.

Normalmente, quando tratamos de inteligência artificial e sistemas inteligentes, nos referimos a um único sistema capaz de simular o processo de aprendizado e tomada de decisão para resolver algum problema. Entretanto, existe outra área de estudos e aplica-

Figura 4 – Componentes de interação entre um agente e o ambiente

ções onde a dinâmica de aprendizado simulada é mais próxima da interação entre agentes do que propriamente da obtenção de conhecimento realizada por um agente apenas, isolado de outros sistemas inteligentes. Essa área é conhecida como inteligência artificial distribuída, e suas teorias e técnicas formam as principais bases para o desenvolvimento de sistemas multiagentes.

3.2 Inteligência Artificial Distribuída e o Conceito de Sistemas Multiagentes

Alguns problemas em que ferramentas computacionais são aplicadas para obtenção de uma solução são de natureza distribuída, seja na obtenção dos dados, no controle ou no cálculo necessário para o tratamento do mesmo.

Para estes casos, existe um domínio de estudos próprios, com teorias, práticas e técnicas desenvolvidas para lidar com estas características. A essa área dá-se o nome de sistemas distribuídos.

Pode-se caracterizar um sistema como do tipo distribuído se seus componentes estiverem localizados em uma rede de computadores, aos quais seus recursos estão compartilhados, seu processamento é feito de forma concorrente pelos componentes e existe

coordenação para execução de uma dada tarefa (COULOURIS; DOLLIMORE; KINDBERG, 2005). O principal exemplo de sistema distribuído atual, e certamente um dos maiores existentes, são as aplicações que executam na internet, como a *web*.

De forma similar, há problemas cuja aplicação de sistemas inteligentes é mais propícia quando trabalhada em um conjunto de agentes, e não em apenas uma única entidade computacional que centraliza o processo de obtenção de dados e tomada de decisão. Entretanto, trabalhar sistemas inteligentes em ambientes distribuídos é uma mudança de paradigma que exige ferramentas teóricas diferentes e uma gama nova de técnicas para a implementação e obtenção de resultados satisfatórios para as aplicações modeladas.

A área de estudos que preocupa-se com a aplicação de sistemas inteligentes em ambientes cuja característica distribuída, seja física ou funcional, é intrínseca, chama-se inteligência artificial distribuída (GARCIA; SICHMAN, 2003). Ela se utiliza de estudos nas áreas de inteligência artificial, ciência da computação, ciências sociais, economia, organização e gerenciamento, para embasar seu corpo teórico (WEISS, 1999). Nesta especialidade, são modelados conjuntos de sistemas inteligentes que devem interagir entre si de alguma forma, afim de atingir um dado objetivo ou reproduzir algum comportamento.

A questão da interação pode ser dividida, a grosso modo, entre cooperação ou competição. Sistemas que cooperam entre si buscam atingir um objetivo global compartilhado pelos seus componentes. Em modelos de interação competitivos, sistemas disputam um mesmo recurso ou cada componente tem um objetivo pelo qual, para ser atingido, deve prejudicar o desempenho do cumprimento de objetivos de outros agentes.

Retornando ao conceito de agente citado na subseção anterior, os sistemas multiagentes seriam sistemas em que tem-se um conjunto de agentes em um ambiente computacional distribuído que implementam as técnicas de inteligência artificial distribuída (WOOLDRIDGE, 2009). Logo, em um sistema multiagente, cada agente pode implementar técnicas de inteligência artificial, obtenção de dados, entre outras – a diferença é que, neste tipo de sistema, a interação entre os agentes é necessária para a aplicação ao qual o mesmo foi modelado.

Neste contexto, onde a interação é uma característica essencial do sistema, o aprendizado em sistemas multiagente a partir de uma visão macro do modelo é deslocado para estas interações. Aqui não há mais agentes que interagem exclusivamente com o ambiente, com o processo de aprendizado acontecendo somente a partir das situações que o mesmo encontra.

Para sistemas multiagentes, a troca de informações entre os agentes é uma forma de propiciar o aprendizado. Por exemplo, um sistema de controle gerenciado por vários agentes, quando entra em um estado instável, poderia ser estabilizado a partir de um agente que, percebendo a perturbação, enviaria mensagens aos demais para que ações corretivas fossem tomadas afim de retomar o controle novamente.

As mensagens entre os agentes são trocadas via redes de telecomunicações, como

ethernet convencional, redes wi-fi, redes de celulares, etc (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2009). Os protocolos de transporte das mensagens são os comumente encontrados em sistemas de redes de computadores, como o HTTP e XMPP (KUROSE; ROSS, 2004), MTP (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007), entre outros. Quanto ao conteúdo das mensagens, a comunidade de desenvolvedores e pesquisadores de sistemas multiagentes definiu alguns protocolos padrões para esta finalidade, como KQML e FIPA (WOOLDRIDGE, 2009). O conteúdo que segue esses padrões pode ser escrito utilizando sintaxes convencionais de linguagens de marcação, como algumas bastante comuns da área de desenvolvimento para *web* como o XML (BRAY et al., 2008), JSON (CROCKFORD, 2006) ou YAML.

A Figura 5 apresenta um conjunto de agentes imersos em um mesmo ambiente. As setas entre os agentes representam as trocas de mensagens entre os mesmos, que é a maneira pela qual estes entes conseguem trocar informações e subsidiar a tomada de decisão distribuída.

Figura 5 – Agentes em um sistema multiagente e a representação de interações

Interações entre os agentes permitem a observação de comportamentos que “emergem” da sociedade de agentes. Decisões tomadas coletivamente a partir de análise e obtenção distribuída de dados reforça a característica de “aprendizado social” em sistemas multiagentes, ao contrário do aprendizado isolado sem interação inter-agentes dos sistemas inteligentes convencionais.

Inclusive, para Woodridge, a simulação da inteligência humana sem levar em conta as interações sociais é falha. Como seres humanos que vivem em comunidade, muito de nosso aprendizado e tomada de decisão constituem-se como fenômenos passíveis de influência ou intervenção externa àquele que as executa. Em termos de agentes, o aprendizado híbrido da inteligência artificial convencional com a proporcionada pela interação em ambientes multiagentes é mais próximo da observada em seres humanos que a aquisição de conhecimento ou tomada de decisão realizada isoladamente. Por conta disso, o citado autor defende que a inteligência artificial seria uma subárea da inteligência artificial distribuída, pois esta última se preocupa com assuntos mais gerais que englobam a inteligência artificial mais outras linhas de pesquisa (WOOLDRIDGE, 2009).

Dada a importância das maneiras como os agentes se relacionam, existem várias teorias e modelos organizacionais para mediar o processo de interação e tomada de decisão nos sistemas multiagentes. Entre alguns desses modelos, podemos citar (HORLING; LESSER, 2004):

- ❑ Hierarquia – modelo centralizado onde os agentes recebem estímulos de seus sensores e enviam os dados para um agente central, que tratará de tomar a decisão e reenviar a resposta para os demais agentes do sistema;
- ❑ Holoarquia – baseado na ideia de *hólon* (KOESTLER, 1969), cada grupo de agentes é responsável por uma seção de um dado nível de organização; o conjunto de seções de um mesmo nível forma um *hólon* que, agrupado a outros *hólons*, formam o próximo nível da pirâmide organizacional;
- ❑ Sociedade – modelo organizacional em que se pretende observar o comportamento dos agentes diante de situações de dinâmica social, não necessariamente voltada para resolução de problemas. Normalmente implementada em sistemas abertos;
- ❑ Federação – um dado agente é líder de um subgrupo de agentes. Todas as interações entre agentes de grupos diferentes devem ser realizadas sob mediação dos líderes, que também são responsáveis pela coordenação da execução de tarefas de seus respectivos times;
- ❑ Mercado – os agentes interagem a partir de regras de mercado, como oferta-e-procura. Cada agente tem uma função que pretende maximizar (lucros) e todas as interações são realizadas em termos de negociação;

- Modelos híbridos – formas de organização que implementam características de uma ou mais outras formas organizacionais.

Para auxiliar na tarefa de implementação de sistemas multiagentes, existem várias linguagens de programação, bibliotecas e *frameworks* que encapsulam API's diversas que possibilitam as interações entre os agentes, como acesso a redes de computadores, simulação de comportamento, programação *multithreading* (TANENBAUM, 2008) e outras características. Um interessante levantamento sobre estas tecnologias pode ser encontrado em (BORDINI et al., 2006).

Além das tecnologias utilizadas em sistemas multiagentes, há uma série de técnicas e conceitos que auxiliam no design, modelagem e implementação destes tipos de sistemas. A engenharia de sistemas multiagentes auxilia os desenvolvedores nesse trabalho e permite um mapeamento com mais chances de sucesso do problema a ser trabalhado.

3.3 A Engenharia de Sistemas Multiagentes

Desenvolver sistemas computacionais requer um complexo esforço de modelagem do problema a ser trabalhado, anterior ao esforço também considerável de implementação do sistema em si. A modelagem compreende um profundo entendimento do problema, levantamento de requisitos, seleção de metodologias adequadas para o desenvolvimento da solução, seleção de tecnologias que permitam atender aos requisitos, escrita de artefatos de documentação do projeto, e mais. Ao conjunto de práticas desenvolvidas para desempenhar esse tipo de trabalho dá-se o nome de Engenharia de Software (FILHO, 2003).

Implementar sistemas computacionais distribuídos requer diferentes ferramentas provenientes da engenharia de software, entretanto estes tipos de sistemas são ainda mais complicados de modelar devido à característica distribuída e concorrente dos seus componentes. E adicionalmente, quando os sistemas a serem modelados são baseados em sistemas multiagentes, ainda há necessidades específicas adicionais visto que, em alguns casos, os agentes desenvolvidos agem de acordo com seus objetivos e isso impossibilita uma forte coordenação de diferentes agentes para realizar alguma tarefa ou atingir determinado objetivo.

De forma a solucionar estas necessidades, há diferentes técnicas de engenharia de software voltada para sistemas multiagentes. Entre elas, podemos enumerar as metodologias Gaia (WOOLDRIDGE; JENNINGS; KINNY, 2000), MaSE (DELOACH, 2004), Tropos (BRESCIANI et al., 2004), entre outras.

Para este trabalho foi utilizada a técnica Prometheus (PADGHAM; WINIKOFF, 2004) para modelagem dos sistemas multiagentes desenvolvidos. Ela foi escolhida por ser bastante completa, herdar muitos conceitos da engenharia de software de sistemas orientados

a objetos, ser de fácil entendimento e utilização, e também por ser bastante utilizada por pesquisadores e empresas que trabalham esse tipo de sistema.

A Figura 6, baseada em (PADGHAM; WINIKOFF, 2004), apresenta um diagrama com as principais fases e os artefatos a serem produzidos nelas segundo a metodologia Prometheus. No desenho, os quadros com linhas pontilhadas identificam as atividades desenvolvidas enquanto os com linhas completas apresentam os produtos desenvolvidos a cada fase. As relações com linhas completas mostram quais produtos ou artefatos produzirão quais outros produtos ou artefatos, e as relações com linhas pontilhadas mostram produtos e artefatos com dependência recíproca, significando que pode haver interações e retroalimentações entre os mesmos durante a modelagem.

Figura 6 – Diagrama com as fases e artefatos da metodologia Prometheus

A metodologia Prometheus de engenharia de sistemas multiagentes subdivide o trabalho de modelar esses tipos de sistemas em três fases: a especificação do sistema, concepção da arquitetura e detalhamento do modelo.

A primeira fase, especificação do sistema, compreende a identificação dos objetivos do sistema a ser desenvolvido, desenvolvimento de cenários de caso de uso, identificação de funcionalidades básicas, especificação do ambiente, e especificação das interfaces entre o sistema e o ambiente a partir da definição de sensores e atuadores.

Nesta etapa é importante tornar claro qual o problema ou finalidade a qual o sistema será desenvolvido e o que é esperado deste para que ele seja efetivo nesta tarefa. O

mapeamento da interação do ambiente com o sistema a partir de sensores e atuadores é essencial pois estabelece o passo inicial para a especificação dos tipos de agentes adequados ao modelo do problema.

A fase posterior, concepção da arquitetura, indica a necessidade de decidir os tipos de agentes que serão implementados, o desenvolvimento de descritores para os agentes, o desenvolvimento de um diagrama geral do sistema para identificar sua estrutura, e descrição do comportamento dinâmico do sistema a partir de diagramas de interação e protocolos de interação.

Esta fase se caracteriza pela especificação das características macro do sistema multi-agente. A descrição do sistema dinâmico utilizando diagramas de interação e a definição dos protocolos modela a interação social entre os agentes, ou seja, de que forma esses agentes trabalharão e coordenarão suas ações de forma a atingir o objetivo proposto.

Na última fase, detalhamento do modelo, o foco da metodologia se dirige ao desenvolvimento de estruturas internas de cada agente, e como estes serão desenvolvidos de forma a executarem as tarefas deles esperadas. Portanto, esta fase detalha a definição das capacidades, eventos internos, planos e estruturas de dados utilizadas por cada agente.

Esta é a etapa em que a metodologia trabalha questões mais específicas da modelagem, tratando do desenvolvimento das ferramentas que permitirão aos agentes se comportarem como definido pelos produtos produzidos nas etapas anteriores. Para tanto, é necessário o desenvolvimento de diferentes funcionalidades auxiliares aos próprios agentes, como as estruturas de dados e os disparadores de eventos, além de verificar a necessidade de ações a serem iniciadas a partir de situações não esperadas pelo agente.

Apesar da apresentação do Prometheus como uma abordagem *top-down* – do mais genérico e macro até o mais específico e micro, a metodologia permite sucessivos retornos às etapas já realizadas para adequação e modificação de concepções, retrabalhando o modelo quando for necessário, em um processo iterativo de constante melhorias no desenvolvimento do modelo.

Apresentada a metodologia de desenvolvimento de sistemas multiagentes utilizada, a próxima seção será responsável por descrever sucintamente a tecnologia utilizada para implementação das simulações computacionais deste trabalho.

3.4 Tecnologias para Desenvolvimento de Sistemas Multiagentes

Há uma grande variedade de bibliotecas, *frameworks* e mesmo linguagens de programação específicas para o desenvolvimento de sistemas multiagentes (BORDINI et al., 2006).

Foram estabelecidos alguns critérios para a seleção da ferramenta, especialmente direcionados para a facilidade e agilidade no desenvolvimento do sistema. Entre eles, pode-se

listar:

- ☐ Verificação da continuidade do desenvolvimento da ferramenta;
- ☐ Facilidade na modelagem e desenvolvimento de agentes, sistemas multiagentes e seus comportamentos;
- ☐ Possibilidade de expandir e realizar manutenção no código do sistema, de forma simples;
- ☐ Facilidade de acesso a redes de computadores, necessário para troca de mensagens entre agentes instanciados em máquinas diferentes;
- ☐ Facilidade de trabalhar com *multithreading*, necessário para execução de vários comportamentos de um mesmo agente;
- ☐ Provimento de ferramentas para gerenciamento do sistema multiagente;
- ☐ A ferramenta deve ser *open source*;
- ☐ A ferramenta deve ter boa documentação;
- ☐ Deve haver um bom suporte por parte da comunidade de desenvolvedores e usuários da ferramenta;
- ☐ A ferramenta deve ser reconhecida pela comunidade de pesquisadores em sistemas elétricos de potência.

Diante dos critérios estabelecidos, foi selecionado o *framework* JADE (*Java Agent DEvelopment*)¹, desenvolvido em Java e que funciona sobre esta linguagem.

JADE é um *framework* que segue os padrões definidos pela FIPA² para estrutura das mensagens e comunicação entre sistemas multiagentes. O envio de mensagens é realizado a partir de protocolos de comunicação convencionais de redes de computadores, como HTTP e o MTP. A utilização de Java e o paradigma de programação orientado a objetos, além de possibilitar um desenvolvimento mais rápido devido ao conhecimento prévio por parte do pesquisador acerca da linguagem utilizada, permite também maior facilidade de manutenção do código-fonte.

Por exemplo, o fragmento de código abaixo apresentado no Algoritmo 1, cria um agente mínimo, já suportando acesso à criação, envio e recepção de mensagens, acesso à rede de computadores, criação de *threads*, e mais. Para tanto, bastaria adicionar as chamadas de funções respectivas a essas funcionalidades no código.

¹ Disponível em <http://jade.tilab.com/> (Acessado em 1 de outubro de 2015)

² FIPA – *Foundation for Intelligent Physical Agents*, fundação que padroniza várias tecnologias voltadas para sistemas multiagentes. O *website* da fundação pode ser visitado em <http://www.fipa.org/> (Acessado em 1 de outubro de 2015).

Algoritmo 1 Definição mínima de agente em JADE

```

1: import jade.core.Agent;
2:
3: public class MyAgent extends Agent {
4:
5:     @Override
6:     protected void setup() {
7:
8:     }
9: }
```

A modelagem e desenvolvimento de comportamentos de agentes também é algo muito simples de ser feito em JADE. Há 5 tipos de comportamentos pré-definidos: *OneShotBehaviour*, que executa uma dada ação apenas uma vez; *WakerBehaviour*, que espera um tempo t e executa um comportamento apenas uma vez; *CyclicBehaviour*, que mantém um *loop* infinito de execução de um comportamento, sempre o repetindo; *TickerBehaviour* que sempre executa um comportamento a cada intervalo t ; e *SimpleBehaviour*, onde o critério de parada do comportamento deve ser explicitamente definido pelo desenvolvedor.

A seguir, no Algoritmo 2, temos a definição de uma classe simples do tipo *SimpleBehaviour*, que pode ser vinculada a um agente ou mesmo reaproveitada no desenvolvimento de outros comportamentos para outros agentes.

Algoritmo 2 Definição de comportamento do tipo *SimpleBehaviour*

```

1: import jade.core.behaviours.SimpleBehaviour;
2:
3: public class MyBehaviour extends SimpleBehaviour {
4:
5:     public MyBehaviour(Agent agent) {
6:         this.agent = agent;
7:     }
8:
9:     @Override
10:    public void action(){
11:
12:    }
13:
14:    @Override
15:    public boolean done(){
16:        return true;
17:    }
18:
19: }
```

Já a classe descrita no Algoritmo 3, apresenta uma utilização simples de uma classe de comportamento do tipo *CyclicBehaviour*, que executa o mesmo comportamento infinitas

vezes – muito útil para o desenvolvimento de agentes reativos (WOOLDRIDGE, 2009), que ficam esperando o recebimento de mensagens para, em seguida, realizar determinada ação e voltar ao comportamento de esperar mensagens.

Algoritmo 3 Definição de comportamento do tipo *CyclicBehaviour*

```
1: import jade.core.behaviours.CyclicBehaviour;
2:
3: public class MyBehaviour extends CyclicBehaviour {
4:
5:     public MyBehaviour(Agent agent) {
6:         this.agent = agent;
7:     }
8:
9:     @Override
10:    public void action(){
11:
12:    }
13:
14: }
```

JADE também tem uma boa documentação, contando com diversos tutoriais distribuídos no próprio *website* do projeto além de um livro texto completo (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007). O suporte provido pelos desenvolvedores também está presente, a partir de uma lista de discussão sempre movimentada³. Além disso, JADE tem reconhecimento na área de sistemas elétricos de potência como um *framework* robusto e confiável, com utilizações que resultaram em casos de sucesso a várias aplicações e estudos (MCARTHUR et al., 2007b).

Apresentados os conceitos de sistemas multiagentes e sua relação com a inteligência artificial, além da discussão sobre a metodologia de desenvolvimento e tecnologia a ser utilizada, o próximo capítulo apresentará a proposta e motivações sobre o porquê de simular as redes elétricas inteligentes utilizando sistemas multiagentes.

³ A lista de discussão pode ser acessada em <http://avalon.tilab.com/mailman/listinfo/jade-develop> (Acessado em 1 de outubro de 2015).

Sistemas Multiagentes como Ferramentas para Simulação de *Smart Grids*

4.1 Simulação Computacional de *Smart Grids*

A adição de uma camada de comunicação ao sistema elétrico de distribuição possibilitará que equipamentos alocados neste sistema troquem informações relevantes sobre o estado da rede, permitindo a execução de ações de controle e reconfiguração.

Esta é a principal característica que aponta o diferencial entre as redes *smart grids* e as redes elétricas convencionais, que, especialmente no nível de distribuição, não possibilitam a comunicação entre equipamentos e, por consequência, não oferecem subsídios para a tomada de decisão e automação na reconfiguração ou gerenciamento do sistema elétrico.

Neste cenário de sistemas elétricos tipo *smart grids*, percebe-se que a mudança conceitual introduzida por esta tecnologia impacta, sobretudo, na maneira como as pesquisas em sistemas elétricos de potência são desenvolvidas.

Com diversos tipos de equipamentos acoplados ao sistema de distribuição, monitorando características do mesmo, e a possibilidade de troca de informação entre eles, se faz necessário pensar em métodos computacionais de simulação condizentes com esta nova arquitetura para verificar a viabilidade de novas funcionalidades que as redes elétricas poderão implementar nesse tipo de sistema elétrico.

Em termos computacionais, podemos pensar os *smart grids* como um sistema com características de sistemas computacionais distribuídos. Estes sistemas caracterizam-se por serem compostos de hardware ou software, localizados em sistemas computacionais interligados em rede, que se comunicam e coordenam suas ações apenas enviando mensagens entre si (COULOURIS; DOLLIMORE; KINDBERG, 2005). O conceito de sistemas distribuídos é amplamente trabalhado na ciência computação, mais especificamente nas áreas de redes, processamento distribuído, e outras.

A principal motivação para o desenvolvimento de sistemas computacionais distribuídos vem da necessidade do compartilhamento de recursos e escalonamento de processos para tarefas que demandam muitas requisições, onde técnicas distribuídas poderão levar o sistema a adquirir uma maior eficiência.

Entre algumas características dos sistemas distribuídos, podemos citar (COULOURIS; DOLLIMORE; KINDBERG, 2005):

- ❑ Concorrência – tarefas são processadas concorrentemente no ambiente, ou seja, quando uma tarefa tem seus pré-requisitos completos e recursos disponíveis, ela será executada em uma máquina. É possível ter diferentes tarefas sendo executadas simultaneamente em máquinas diferentes.
- ❑ Sincronização via mensagens – quando programas precisam cooperar para resolver determinada tarefa, eles fazem isso através de trocas de mensagens. Isso é executado dessa forma por conta da dificuldade em sincronizar as máquinas interligadas apenas a partir de relógios ou medições temporais.
- ❑ Falhas independentes – pode ocorrer de algumas máquinas alocadas no sistema distribuído falharem em suas tarefas. Isso não impedirá que demais máquinas continuem seus respectivos processamentos. Apesar de, em alguns casos, a falha de uma máquina levar à falha total do sistema, é possível criar metodologias de detecção e tratamento destas – as chamadas técnicas de tolerância a falhas.
- ❑ Heterogeneidade – não é necessário que o sistema computacional distribuído seja construído apenas com equipamentos de um mesmo tipo. Pelo contrário, um sistema deste tipo pode ser composto por máquinas para diversas finalidades, que cooperarão entre si para atingir um objetivo dado.
- ❑ Protocolos abertos de comunicação – é necessário que os diversos componentes do sistema consigam comunicar-se entre si. Para tanto, torna-se imprescindível que protocolos abertos de comunicação sejam utilizados, possibilitando o envio, recebimento e entendimento das mensagens entre os componentes.
- ❑ Transparência – para o usuário, sistemas distribuídos não aparentam ser formados por várias máquinas interconectadas. Normalmente, aquele que utiliza o sistema trabalha apenas com uma máquina, e o sistema gerencia a divisão das tarefas autonomamente.

Existem também vários tipos de arquiteturas de sistemas distribuídos. Por exemplo, a Figura 7 nos apresenta a arquitetura cliente-servidor, onde uma máquina “central” é responsável por distribuir as tarefas entre as demais máquinas processadoras. Já a Figura 8 apresenta uma rede onde a distribuição do processamento é feita par-a-par, também conhecida como arquitetura P2P (*peer-to-peer*).

Figura 7 – Modelos de sistemas distribuídos – arquitetura cliente-servidor

Figura 8 – Modelos de sistemas distribuídos – arquitetura P2P (par-a-par)

Estas arquiteturas de sistemas distribuídos são planejadas a partir do problema que deseja-se abordar. Cada uma delas tem características próprias que as definem como melhor solução para um dado problema e não para outro. Também é possível arquiteturas híbridas – por exemplo, é possível ter uma arquitetura P2P que automatiza uma dada tarefa mas que sempre reporta seus procedimentos para um computador central, como forma de criação de um *log* de informações e decisões tomadas ao longo da vida útil do sistema.

Com a conceituação e as características dos sistemas distribuídos expostas, torna-se possível fazer uma comparação entre as características desejadas de um *smart grid* e as presentes em um sistema computacional distribuído. A Tabela 1 apresenta alguns desses elementos (SARAIVA; ASADA, 2012):

Dada as similaridades de características, é possível aferir que as técnicas de sistemas distribuídos são fortes candidatas para servirem de ferramentas à simulações computacionais mais fiéis de sistemas elétricos do tipo *smart grid*. Entretanto, falta avaliar mais uma característica fundamental desse novo tipo de sistema elétrico: a capacidade de resolver problemas de forma autônoma, a partir da observação do estado do mesmo.

Um *smart grid* tem diversas funcionalidades a serem executadas pelos sistemas nele instalados. Cada uma dessas funcionalidades pode ser vista como um objetivo a ser atingido, por exemplo, redução das perdas, recuperação do sistema, gerenciamento da demanda, entre outras. Os equipamentos instalados observarão o estado da rede, comunicar-se-ão entre si caso necessário e executarão ações com a finalidade de atingir o objetivo modelado.

Esta descrição é muito similar ao conceito de inteligência artificial proposto por alguns autores. Por exemplo, no caso dos já citados Russel e Norvig, inteligência artificial é o estudo e implementação de agentes inteligentes. Agentes são abstrações para um conjunto de software ou hardware que procura atingir seus objetivos através de seus conhecimentos

Tabela 1 – Características próximas entre sistemas distribuídos e *smart grids*

Sistemas Distribuídos	<i>Smart Grids</i>
❑ Concorrência – processos sendo executados simultaneamente em máquinas diferentes.	❑ Concorrência – processos diferentes executados em dispositivos diferentes do sistema elétrico.
❑ Heterogeneidade – diferença entre máquinas no mesmo sistema distribuído.	❑ Heterogeneidade – máquinas com funções distintas estarão alocadas na mesma rede elétrica.
❑ Sincronização via mensagens – sistemas coordenam suas atividades a partir da troca de mensagens.	❑ Sincronização via mensagens – equipamentos do sistema usam a camada de comunicação para coordenar tarefas.
❑ Falhas independentes – uma falha poderá afetar parte de um sistema distribuído, sem necessariamente afetar o sistema inteiro.	❑ Falhas independentes – falha de equipamentos específicos de uma tarefa podem não afetar os relacionados à outra tarefa.
❑ Protocolos abertos de comunicação – é necessário que os diversos componentes do sistema consigam comunicar-se entre si através de um protocolo comum.	❑ Protocolos abertos de comunicação – os diferentes equipamentos alocados ao sistema devem utilizar um protocolo comum para troca de mensagens.

e comportamentos (RUSSELL; NORVIG, 2010).

Como também já comentado, existe uma área específica da inteligência artificial que trabalha sistemas inteligentes não-isolados, que se relacionam entre si. Esta área chama-se inteligência artificial distribuída, e seu foco de pesquisa se dá no estudos de modelos e técnicas onde a característica distribuída dos agentes é inerente à arquitetura do sistema (GARCIA; SICHMAN, 2003).

Em sistemas de inteligência artificial distribuída, existe uma ênfase maior no “comportamento social” dos agentes. A perspectiva é que técnicas dessa área possam dar subsídios para coordenar um conjunto de agentes, alguns inclusive com funcionalidades diferentes entre si, para simular um determinado comportamento de um conjunto de agentes cujo objetivo é alcançado a partir das interações entre eles. Fala-se que, a partir do comportamento desse conjunto de agentes, emerge a ação que o sistema deverá executar para atingir seu objetivo.

Recapitulando, é neste contexto da inteligência artificial distribuída que surgem os chamados sistemas multiagentes (WOOLDRIDGE, 2009; SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2009; WEISS, 1999). Nestes sistemas, cada agente é autônomo e projetado para atingir um dado objetivo. Entretanto, ele também tem a capacidade de se relacionar com outros agentes, seja através do envio de mensagens, seja através da repercussão no ambiente da

execução de determinada tarefa. O projeto de sistemas multiagentes deve se preocupar em garantir que os comportamentos dos agentes consigam gerar um encadeamento de ações que resolverão o problema proposto ou atingirão o objetivo imaginado (GARCIA; SICHMAN, 2003).

Assim, com os conceitos de sistemas distribuídos, a relação entre as características de *smart grids* e sistemas distribuídos, inteligência artificial distribuída e sistemas multiagentes apresentados, delimitou-se o embasamento sobre como este conjunto de tecnologias e conceitos funcionariam muito bem como uma alternativa de simulação computacional mais próxima às características das redes *smart grids*.

De fato, sistemas multiagentes já são empregados na área de sistemas elétricos de potência há algum tempo. Existem alguns trabalhos que utilizam esta tecnologia publicados na área (MCARTHUR et al., 2007a; MCARTHUR et al., 2007b).

Entretanto, apenas recentemente esta técnica está sendo pensada a partir do seu potencial de simular as características que as redes elétricas deverão assumir nos próximos anos. Logo, estudos que utilizem sistemas multiagentes para simular funcionalidades de *smart grids* estão ganhando espaço em publicações científicas especializadas da área e mesmo em aplicações reais nos sistemas elétricos instalados.

4.2 *Smart Grids* no Nível da Distribuição e Sistemas Multiagentes

Certamente, a quantidade de dados a ser adquirida e trabalhada em um sistema elétrico é bastante grande. Além disso, os próprios dados estão dispersos no sistema, devendo ser adquiridos de forma distribuída e transmitidos entre os equipamentos do mesmo para embasar as diferentes tomadas de decisão que o sistema realizará.

Manipular uma grande quantidade de dados pode inviabilizar a resolução do problema em tempo hábil. Métodos utilizados para superar esta dificuldade são normalmente técnicas de inteligência computacional para extração e gerenciamento de conhecimento. Em um ambiente distribuído, os dados também estão distribuídos, sendo necessário sistemas especializados no tratamento de diferentes tipos de dados trabalhando concorrentemente para a obtenção e processamento destes.

Após a fase de obtenção e pré-processamento dos dados, é chegado o momento de usar estas informações para a tomada de decisão. Novamente, técnicas de inteligência computacional deverão ser utilizadas para tratar o volume de dados que chega de forma temporalmente assíncrona e de regiões geograficamente dispersas do sistema elétrico. A decisão que o sistema terá que realizar é baseada nestes dados e visa atingir um objetivo específico, ao qual os componentes daquele sistema foram previamente modelado para trabalhar.

Estas fases de obtenção e pré-processamento dos dados, tomada de decisão e execução, descritas anteriormente, são características dos sistemas ditos “inteligentes” (RUSSELL; NORVIG, 2010). Quando estes sistemas são empregados em ambientes distribuídos, é necessário usufruir dos avanços da área e das técnicas de inteligência artificial distribuída, que encontram nos sistemas multiagentes seus principais representantes (WEISS, 1999).

A descrição das funcionalidades buscadas pelos *smart grids* revela um sistema de controle fortemente distribuído sobre a topologia da rede, onde diversos equipamentos ficariam responsáveis pelo monitoramento (coleta de dados) e tomada de decisão sobre ações no sistema.

Por exemplo, uma das funcionalidades dos *smart grids* seria a auto-recuperação do sistema (BROWN, 2008), ou seja, a possibilidade da rede elétrica perceber a falta de energia em um dado conjunto de linhas de distribuição e, de maneira autônoma, reconfigurar-se para fazer com que o fluxo de carga atinja aquela região agora em falta. Nesta funcionalidade, é imperativo que equipamentos consigam perceber a falta de energia elétrica em determinadas linhas e, ao se depararem com esta situação, enviar para outros equipamentos da rede a informação da falta. Em seguida, os equipamentos responsáveis pela configuração do sistema deverão encontrar uma topologia que envie energia de volta para a linha em falta (se possível), buscando atingir ainda algum outro objetivo, como redução das perdas.

Abordagem similar pode ser utilizada para todas as demais funcionalidades do *smart grid* que lidem com controle e reconfiguração da rede.

Objetivando gerar simulações do comportamento e das condições técnicas de operação de um *smart grid*, é necessário um método computacional que englobe sistemas distribuídos e tenha flexibilidade para implementação de técnicas de inteligência computacional, a fim de testar e simular algoritmos para as funcionalidades da rede elétrica inteligente.

Com estes requisitos postos, a utilização de métodos de modelagem e resolução baseados em sistemas distribuídos, como os sistemas multiagentes, mostra-se uma decisão interessante. Os agentes poderiam simular os diversos equipamentos da rede de distribuição e suas relações, como numa sociedade de agentes, com comunicação e tomada de decisão emergindo a partir da interação entre os mesmos (WOOLDRIDGE, 2009).

A Figura 9 apresenta um desenho esquemático de um sistema elétrico de distribuição, baseado em (CIVANLAR et al., 1988), com agentes dispersos geograficamente nos componentes deste sistema, tanto nas cargas, subestações e chaves, simbolizados respectivamente por “●”, “ ” e “□”.

Os agentes são flexíveis a ponto de servirem como “metáfora” do equipamento que eles simulam. Por exemplo, digamos um agente que simula um dispositivo de medição de consumo – o software poderia simular o processo através da leitura de um arquivo texto, ou através da “escuta” de uma porta de rede de computador com mensagens sendo transmitidas por um servidor. Quando houvesse variação no consumo, uma mensagem

de energia, é apresentado em (NUNNA; DOOLLA, 2013).

O estudo apresentado em (VEIT et al., 2013) propõe um método de comercialização de energia em tempo-real, baseada na formação de coalizão em sistemas multiagentes que minimizam o valor da transação enquanto suprem suas demandas por energia. Outro trabalho que utiliza sistemas multiagentes para avaliação de interações entre consumidores a partir de um modelo organizacional de mercado é apresentado em (YU; LIU; PRICE, 2010). Em (RAMOS, 2013) é desenvolvido um algoritmo para formação de coalizões de veículos elétricos, uma tecnologia passível de ser integrada ao *smart grid* e utilizada para comercialização de energia.

Em (LAGORSE; PAIRE; MIRAOU, 2010), um sistema multiagente foi aplicado para o gerenciamento de fontes distribuídas de geração de energia. Outros trabalhos que também focam no uso de agentes para gerenciamento distribuído de equipamentos em sistemas de energia são apresentados em (DIMEAS; HATZIARGYRIOU, 2004; KOK; WARMER; KAMPHUIS, 2005).

Do exposto, a aplicação de sistemas multiagentes para desenvolvimento de métodos e funcionalidades para os *smart grids* vem sendo, gradativamente, reconhecida pela comunidade de sistemas de potência, apesar de ainda serem poucos os pesquisadores devotados a esta técnica na área. Isso significa que ainda há muitos tipos de aplicação a serem explorados por estes estudiosos.

Assim, *smart grids* serão simulados neste trabalho através de sistemas multiagentes objetivando testar algoritmos computacionais aplicados a um conjunto de problemas nesse novo cenário, onde a aquisição de dados é distribuída, o transporte de informações e interação entre os equipamentos é condição necessária para o bom funcionamento do sistema, e o uso de ferramentas de inteligência computacional é desejável.

Das três componentes do sistema elétrico de potência – geração, transmissão e distribuição – estima-se que o nível da distribuição será o mais impactado pela utilização das redes elétricas inteligentes. O sistema elétrico de distribuição convencional tem pouca ou, o mais comum, não tem qualquer dispositivo de comunicação acoplado, poucos tipos de dados presentes no sistema são medidos, e o nível de automação é praticamente inexistente.

Portanto, por conta dessas características, o estudo aqui desenvolvido tratará da implementação de funcionalidades de redes elétricas inteligentes no nível dos sistemas elétricos de distribuição. Os próximos três capítulos apresentarão diferentes funcionalidades seguindo a progressão do que seria a implantação das redes elétricas inteligentes como comentada ao final do Capítulo 2.

Na primeira etapa de implantação de *smart grids*, as funcionalidades teriam maior relação com a implantação do medidor inteligente, sem demandar coordenação ou reconfiguração do sistema elétrico. Nesse sentido, desenvolve-se no Capítulo 5 a funcionalidade de classificação de cargas não-lineares em sistemas elétricos de distribuição, utilizando

sistemas multiagentes para modelar os dispositivos presentes na rede elétrica, e uma rede neural artificial como classificador de cargas.

A segunda etapa de implantação já permite alguma coordenação e reconfiguração de partes do sistema elétrico, porém com impacto mais localizado. Para exemplificar funcionalidades com essas características, apresenta-se no Capítulo 6 a funcionalidade de controle de tensão em sistemas elétricos de distribuição onde, novamente, os dispositivos da rede são modelados como agentes e um sistema de lógica *fuzzy* é empregado como método de tomada de decisão para a funcionalidade.

A última etapa de implantação das redes elétricas inteligentes prevê a possibilidade de funcionalidades que causam grande impacto na reconfiguração do sistema elétrico, a partir de um maior esforço de coordenação entre os dispositivos e medições. Neste caso, o Capítulo 7 apresenta a funcionalidade de redução das perdas no sistemas elétrico de distribuição através da reconfiguração topológica da rede, tanto quando a demanda de energia dos consumidores permanece constante, quanto com a variação da demanda ao longo do tempo. Os agentes utilizados modelam diferentes dispositivos no sistema elétrico e a tomada de decisão é resultante exclusivamente da interação entre eles.

Classificação de Cargas Não-Lineares em Sistemas Elétricos de Distribuição tipo *Smart Grids*

5.1 Descrição do Problema

Melhorar a qualidade da energia elétrica entregue é uma funcionalidade que espera-se ser implementada nos *smart grids*. Uma das métricas para avaliação da qualidade da energia entregue é aquela em que compara-se a forma de onda do sinal elétrico em relação à onda senoidal – quanto mais distorcida em relação a esta última, pior a qualidade da energia (CHAER; RAMBAULT; GAUBERT, 2012).

Existem várias formas de reduzir a qualidade da energia na rede e, entre elas, destaca-se a presença de cargas não-lineares no sistema. Este tipo de carga introduz harmônicos no sistema de potência, responsáveis por degradar a forma de onda (ABBAS; SAQIB, 2007). Com essa presença, a energia entregue passa a não seguir padrões de qualidade estabelecidos, causando falhas em equipamentos, erros de operação, perdas, falhas de fornecimento, e outros danos.

Ter um sistema que perceba a presença dessas cargas na rede elétrica, bem como a possibilidade de classificá-las, permitiria ao operador da rede ter um melhor conhecimento sobre as cargas presentes e, a partir desse conhecimento, criar políticas e campanhas voltadas para substituição de aparelhos ou mesmo o desenvolvimento de alguns tipos de represálias – talvez, na forma de cobrança de taxa adicional ou multa – ao consumidor que possui aquele tipo de carga.

Realizar esse tipo de monitoramento é problemático pois, com as tecnologias convencionais, pressupõe-se a verificação *in loco* dos equipamentos conectados à rede, necessitando portanto que um funcionário da concessionária se dirija aos locais de consumo para constatar a presença ou não desse tipo de carga. Esse tipo de metodologia é extremamente invasiva e juridicamente complicada de ser implementada para alguns tipos de consumi-

dores, por conta do direito à privacidade.

A tecnologia de *smart grids*, ou mais precisamente as diretamente relacionadas com *smart meters*, possibilitaria esse tipo de verificação a partir do medidor inteligente, dispensando a necessidade de um técnico no local para identificar os tipos de equipamentos e, conseqüentemente, os tipos de cargas conectadas. Entretanto, cabe ressaltar que este método de monitoramento telemático continua a ser bastante invasivo, diferindo do anterior apenas por ser mais sutil na metodologia de vigilância empregada.

Este estudo apresentará uma metodologia para classificação de cargas não-lineares no contexto dos sistemas elétricos de distribuição do tipo *smart grid*, utilizando uma técnica híbrida onde os dispositivos necessários para a resolução do problema foram modelados como agentes e o sistema multiagente representa a interação necessária entre os agentes para solucionar o problema. Em adição, serão apresentadas duas configurações do sistema multiagente, ambas baseadas em redes do tipo cliente-servidor (KUROSE; ROSS, 2004), discutindo as vantagens e desvantagens entre elas. Já o algoritmo utilizado para classificação das cargas não-lineares foi uma rede neural artificial do tipo perceptron de múltiplas camadas, que será melhor explicada em subseções seguintes.

Cabe comentar que essa metodologia pode ser empregada para outras funcionalidades que exijam classificação e monitoramento de diferentes tipos de carga. Um exemplo seria o acompanhamento por parte do consumidor da energia consumida por cada equipamento em seu estabelecimento. Classificar as diferentes cargas conectadas seria um primeiro passo para a implementação desse tipo de recurso.

Esse tipo de funcionalidade requer apenas a infraestrutura de comunicação e dispositivos capazes de fazer medições do sinal elétrico, além de enviar e receber mensagens. Não há, portanto, necessidade de qualquer reconfiguração no sistema elétrico. Essa característica torna essa aplicação uma candidata para a primeira etapa de implementação de novas funcionalidades nas redes elétricas inteligentes, pois não causam impacto relevante na operação desses sistemas.

5.2 Detalhes da Modelagem do Método de Resolução

5.2.1 Dados para a Simulação

Cargas não-lineares estão presentes em uma série de diferentes equipamentos elétricos, como motores, fornos industriais, lâmpadas, entre outros. Para este trabalho foram utilizadas cargas típicas de equipamentos encontrados no setor hospitalar.

Este estudo utilizou oito classes representando cargas não-lineares para realizar o processo de classificação. Três dessas classes representam cargas isoladas, enquanto as outras cinco são formadas pela combinação das três anteriores, algumas em estado de uso e outras em *standby*. A Tabela 2 apresenta os três tipos de equipamentos e as cargas utilizadas.

Tabela 2 – Características das Cargas

Carga	Tipo	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)
1	Equipamento de Raio-X	94	380	142,8
2	Tomografia Helicoidal Computadorizada	50	380	76,0
3	Sistema de Gravação Hemodinâmico	160	380	243,09

Figura 10 – Forma de onda da corrente das cargas do raio-X e do tomógrafo helicoidal, separadamente

Os sinais das cargas foram obtidos a partir de dados disponíveis na literatura sobre o tema (BERNARDES et al., 2012). Elas foram aferidas em equipamentos de um hospital utilizando o analisador de energia RMS MARH-21 (RMS Sistemas Elétricos, 2008) e tratadas em um laboratório de qualidade e eficiência energética. A frequência de medição para as cargas foi de 11,52 kHz e o intervalo de tempo de medição foi de 180 segundos.

Cada carga diferente tem uma forma de onda particular. É possível criar um gráfico com essas ondas a partir da medição das cargas em um dado intervalo de tempo durante a operação. A Figura 10 apresenta as formas de onda da corrente do equipamento de raio-X e do tomógrafo helicoidal. Já a Figura 11 apresenta o sinal obtido quando o raio-X e o tomógrafo helicoidal estão ligados ao mesmo tempo.

5.2.2 Rede Neural para Classificação de Cargas Não-Lineares

Foi utilizada uma rede neural artificial como ferramenta para a classificação das cargas na metodologia apresentada. Redes neurais artificiais são poderosas ferramentas inspiradas pelo funcionamento do neurônio biológico e do cérebro, utilizada em diversas áreas como engenharia e computação, para diferentes tipos de aplicações como reconhecimento

Figura 11 – Forma de onda da corrente das cargas do raio-X e do tomógrafo helicoidal, juntos

Figura 12 – Modelo de neurônio de uma rede neural artificial

de padrões, classificação, controle, predição, estimação, otimização, entre outros (HAYKIN, 1999; SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

O “neurônio” de uma rede neural artificial se comporta como uma sequência de expressões matemáticas. A Figura 12 apresenta o modelo básico de neurônio nas redes neurais.

Naquela figura tem-se um neurônio j cujos sinais de entrada são representados pelo vetor $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, de tamanho n . Cada sinal de entrada será ponderado a partir do produto entre o referido sinal e o peso sináptico correspondente w_{ij} , onde i é o identificador do sinal de entrada.

A função de ponderar as entradas realizada pelos pesos sinápticos é responsável por mapear a entrada enviada para a rede neural com a saída obtida. Modificar esses pesos

modifica também o resultado obtido. Por conta disso, os métodos de treinamento em redes neurais alteram os valores desses pesos, tentando configurar o comportamento da rede para que ela alcance uma boa performance em termos de número de acertos no caso de problemas de classificação.

A função de transferência Σ trata de reunir todos os sinais que estão incidindo no neurônio após suas respectivas ponderações. Para o caso da Figura 12, a função de transferência é a somatória desses sinais adicionado a um valor de bias θ_j . A função matemática dessa etapa pode ser expressa pela Equação 1.

$$u_j = \sum_i^n (x_i * w_{ij}) - \theta_j \quad (1)$$

O resultado dessa função é o sinal de transferência u_j , que será processado na etapa de cálculo da função de ativação φ . A literatura sobre redes neurais apresenta diversas funções de ativação diferentes, como a função degrau, função sinal, função logística, função tangente, função gaussiana, entre outras, cada uma com suas características e melhor compatíveis com diferentes áreas de aplicação.

Portando, calculado o sinal de transferência u_j , aplica-se esse valor à função de ativação conforme a Equação 2, obtendo-se assim o sinal de ativação σ_j que sai do neurônio após todo o processamento.

$$\sigma_j = \varphi(u_j) \quad (2)$$

Diversos conjuntos de neurônios como o apresentado anteriormente podem ser ligados em série e em paralelo, fazendo com que o sinal de ativação de determinado neurônio seja utilizado como sinal de entrada de outro. A depender do problema trabalhado, o conjunto e a disposição desses neurônios – que podem ser visualizados como unidades de processamento – poderá variar.

Neste trabalho utilizou-se a arquitetura de redes neurais conhecida como perceptron de multicamadas, que é exatamente composta por diferentes neurônios dispostos como conjuntos em paralelo. Essa arquitetura foi utilizada pois é reconhecida como de bom desempenho computacional e capaz de obter bons resultados para problemas de classificação.

Sobre as medições realizadas para obtenção dos dados, foi utilizada uma janela de tamanho igual a 64 medições por ciclo sobre a tensão e os sinais de corrente. Estes atributos foram baseados em artigos nos quais o uso de técnicas de processamento de sinais similares foram utilizadas, necessárias para distinguir as formas de onda das mesmas (BIDGOLI; SOORI; BINA, 2011; YANG; KRATZ, 2009). A camada de entrada tem 23 neurônios, onde os primeiros 20 representam os harmônicos da corrente, o 21º é o valor eficaz (*root mean square – rms*) da tensão, o neurônio 22 representa o *zero-crossing* – o número de vezes que o sinal de corrente mudou de negativo para positivo –, e o neurônio 23 é a integral do sinal da corrente.

O *rms* da tensão é calculado de acordo com a fórmula apresentada na Equação 3, onde V é a tensão durante a medição.

$$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3)$$

Os harmônicos dos sinais foram processados utilizando transformada discreta de Fourier. Essa transformada é baseada em técnicas matemáticas apropriadas para estudar esses sinais e extrair seus componentes em determinada frequência (FU et al., 2013). Após normalização dessas entradas, elas foram utilizadas para treinamento e validação da rede neural desenvolvida.

Como o problema a ser trabalhado diz respeito à classificação de padrões, foi utilizado o mapeamento conhecido como *c-class* para relacionar uma determinada classe de padrões e sua representação na camada de saída da rede neural (DUDA; HART; STORK, 2001). O caso de teste utilizado neste trabalho tem 8 classes; logo, a camada de saída da rede tem 8 neurônios. A Tabela 3 apresenta os padrões de saída para cada classe do problema.

Tabela 3 – Codificação da camada de saída

Classe da carga	Padrão da camada de saída							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1

Já a Tabela 4 apresenta o mapeamento entre cada equipamento ou a combinação de equipamentos utilizadas nas simulações e sua respectiva classe representada na rede neural.

Diferentes arquiteturas de perceptrons multicamadas foram testadas, e a melhor arquitetura, em termos de performance, custo computacional, velocidade do processamento e qualidade dos resultados, foi a rede neural com uma camada oculta de 21 neurônios, adicionada à camada de entrada com 23 e a de saída com 8, já comentadas. A função de ativação utilizada na camada oculta foi a tangente hiperbólica, enquanto para a camada de saída foi a função linear. A Figura 13 apresenta a arquitetura utilizada para o perceptron.

Também foram testados diferentes algoritmos de treinamento para a rede neural, e o método Levenberg-Marquardt (HAGAN; MENHAJ, 1994) foi o único método onde houve convergência para o caso de testes utilizado. O processo de treinamento da rede neural foi realizado em modo *offline*, usando sinais do conjunto de treinamento. As fases de

Tabela 4 – Mapeamento das cargas para as classes

Carga	Classe da carga
Equipamento de Raio-X	1
Tomografia Helicoidal Computadorizada	2
Sistema de Gravação Hemodinâmico	3
Equipamento de Raio-X + Tomografia Helicoidal Computadorizada	4
Tomografia Helicoidal Computadorizada + Sistema de Gravação Hemodinâmico	5
Equipamento de Raio-X + Sistema de Gravação Hemodinâmico em <i>standby</i>	6
Tomografia Helicoidal Computadorizada em <i>standby</i> + Sistema de Gravação Hemodinâmico em <i>standby</i>	7
Equipamento de Raio-X + Tomografia Helicoidal Computadorizada + Sistema de Gravação Hemodinâmico em <i>standby</i>	8

Figura 13 – Arquitetura do perceptron multicamadas

validação e operação foram realizadas *online*, após a rede neural ser integrada a um dos agentes do sistema multiagente.

A próxima subseção descreverá em maiores detalhes os modelos de sistema multiagentes desenvolvidos bem como os processos de validação e operação para cada um destes.

5.2.3 Sistema Multiagente Modelado

Como já comentado, *smart grids* terão diferentes dispositivos alocados ao longo do sistema. Esses dispositivos, geograficamente dispersos, realizarão diferentes medições, troca de dados, e mais, possibilitando que as funcionalidades esperadas para esse tipo de rede, que demandam coordenação entre estes dispositivos, sejam realizadas.

Para a metodologia proposta, existem dois tipos específicos de agentes que realizam diferentes tarefas. Um destes é chamado Agente *Smart Meter*, que simula um medidor inteligente no lado do consumidor, agente este responsável por fazer medições da carga. O outro agente é o Agente Subestação, que está localizado nas subestações elétricas de distribuição. Este último é responsável por receber os sinais enviados pelo Agente *Smart Meter* e guardar a informação sobre a carga não-linear identificada e o consumidor responsável por ela.

Como também já comentado anteriormente, este estudo é baseado em técnicas de sistemas computacionais distribuídos e, por conta disso, é possível criar diferentes modelos de métodos de resolução para um mesmo problema com diferentes características, metodologias, dispositivos requeridos, tratamentos, entre outros atributos, com diferentes impactos sob o custo, dificuldade de implementação no mundo real, e mais.

O estudo apresenta duas propostas diferentes de sistemas multiagentes para a aplicação de classificação de cargas não-lineares em sistemas de distribuição do tipo *smart grid*. A saber, na proposta 1, a ferramenta de classificação reside no Agente *Smart Meter*, e o Agente Subestação é responsável apenas por guardar o tipo de carga não-linear detectada e informações de seu respectivo consumidor. Já na proposta 2 a ferramenta de classificação está localizada no Agente Subestação, enquanto o Agente *Smart Meter* apenas lê os sinais das cargas no lado do consumidor e envia estes dados para a subestação.

Em termos de qualidade dos resultados obtidos pela ferramenta de classificação, ambas as propostas têm os mesmos resultados pois a rede neural utilizada é a mesma para as duas abordagens. Mas em termos de tolerância a falhas, a proposta 2 é mais sensível que a proposta 1, visto que naquela o dispositivo de classificação é único e centralizado – caso ele tenha algum erro, o sistema de identificação das cargas não-lineares para o sistema elétrico inteiro estará comprometido. Por outro lado, ter a ferramenta de identificação presente nos medidores inteligentes fará a proposta 1 mais cara que a proposta 2, pois isso demandará equipamentos mais robustos, com melhores processadores e mais memória.

As propostas serão descritas em mais detalhes nas próximas subseções.

5.2.3.1 Proposta 1: Classificação de Cargas Não-Lineares no *Smart Meter*

Na primeira proposta, a rede neural está residente nos agentes que representam os *smart meters*, dispositivos alocados nos estabelecimentos dos consumidores. Esses dispositivos são responsáveis por fazer as medições dos sinais e realizarem o processo de classificação diretamente. Após isso, os Agentes *Smart Meters* enviam a informação para o Agente Subestação, residente na subestação de distribuição, e esta informação sobre a carga não-linear detectada e o respectivo consumidor responsável por ela serão guardadas em um banco de dados. Em seguida, após determinado intervalo de tempo, o medidor inteligente fará uma nova leitura do sinal da carga do consumidor, iniciando então uma nova iteração.

Para essa proposta, a Figura 14 apresenta uma representação desses agentes num sistema elétrico de distribuição.

Figura 14 – Agentes na rede de distribuição - proposta 1

Figura 15 apresenta o fluxograma de ações dos Agentes *Smart Meter*, enquanto o Algoritmo 4 apresenta essas ações em forma algorítmica.

As linhas 2 e 3 do Algoritmo 4 executam, respectivamente, a leitura dos sinais da carga e a classificação desses sinais utilizando a rede neural desenvolvida. Em seguida, a linha 4 cria uma mensagem M contendo o identificador do consumidor C e a carga classificada L . Após isso, a linha 5 executa a ação de enviar a mensagem para o Agente Subestação. Esse algoritmo é executado a partir de um *loop* infinito, pois o agente realizará essas ações indefinidamente.

Já a Figura 16 apresenta o fluxograma para o Agente Subestação enquanto o Algoritmo 5 descreve a sequência de ações desse agente.

O Algoritmo 5 descreve um agente que está sempre atento para o recebimento de mensagens. Quando uma delas chega (na ação descrita na linha 2), o Agente Subestação extrai as informações da carga não-linear detectada e classificada e do consumidor responsável por ela (linhas 3 e 4, respectivamente), para em seguida salvar esses dados obtidos.

A Figura 17 apresenta o diagrama de sequência com as interações entre esses agentes.

Esta proposta utiliza uma arquitetura de redes de computadores do tipo cliente-servidor para a comunicação entre os Agentes *Smart Meter* e o Agente Subestação, onde a

Figura 15 – Fluxograma do Agente *Smart Meter* - proposta 1

Algoritmo 4 Leitura de dados, classificação de cargas não-lineares e envio de mensagens do Agente *Smart Meter* – proposta 1

Requer: C {identificador do consumidor}

Requer: SuA {Agente subestação}

1: **loop**

2: $S \leftarrow LeituraDeSinais()$

3: $L \leftarrow ClassificacaoDeSinais(S)$

4: $M \leftarrow CriaMensagem(C, L)$ {Cria mensagem M contendo consumidor C e carga não-linear detectada L }

5: $Envia(M, As)$ {Envia mensagem M ao agente subestação SuA }

6: $EsperaProximaLeitura()$

7: **fim loop**

Figura 16 – Fluxograma do Agente Subestação – proposta 1

Algoritmo 5 Recebimento de mensagens e guarda de dados do Agente Subestação – proposta 1

```

1: loop
2:   se  $M$  então {Mensagem  $M$  recebida}
3:      $L \leftarrow \text{ExtraiClassificação}(M)$ 
4:      $C \leftarrow \text{ExtraiConsumidor}(M)$ 
5:      $\text{Salva}(C, L)$  {Salva dados do consumidor e da carga não-linear detectada}
6:   fim se
7: fim loop

```

Figura 17 – Diagrama de sequência do sistema multiagente – proposta 1

funcionalidade de classificação das cargas não-lineares é considerada como implementada de forma distribuída. Essa proposta também apresenta algum nível de tolerância a falhas pois, se algum medidor inteligente apresentar problemas, isto não afetará o restante do sistema. Esta proposta permite o uso de métodos de classificação específicos para um dado subconjunto de consumidores, possibilitando assim a customização dessa funcionalidade.

Entretanto, instalar um grande número de *smart meters* com métodos de classificação de cargas não-lineares embutido, que portanto requerem equipamentos mais robustos com melhores processadores e mais memória, pode aumentar consideravelmente o custo de implementação desse tipo de sistema em cenários do mundo real.

5.2.3.2 Proposta 2: Classificação de Cargas Não-Lineares na Subestação de Distribuição

Na segunda proposta, a rede neural que classificará as cargas não-lineares está alocada no Agente Subestação. Os agentes nos medidores inteligentes do lado dos consumidores são responsáveis apenas por fazer medições das cargas e enviar os sinais para a subestação.

Neste caso, o processamento da funcionalidade de classificar as cargas, a exemplo da guarda dos dados dos consumidores, será também centralizada.

Figura 18 apresenta os agentes no sistema elétrico de distribuição a partir dessa abordagem. O fluxograma dos Agentes *Smart Meters* é apresentado na Figura 19 e seu algoritmo correspondente no Algoritmo 6.

Figura 18 – Agentes na rede de distribuição – proposta 2

Figura 19 – Fluxograma do Agente *Smart Meter* – proposta 2

Nessa proposta, o Agente *Smart Meter* realiza a leitura dos sinais da carga e envia esses dados para o Agente Subestação (linha 4 do Algoritmo 6). Em seguida, após o intervalo de tempo para a próxima leitura, ele executará a ação novamente.

Já o fluxograma do Agente Subestação é apresentado na Figura 20 e seu algoritmo no Algoritmo 7.

Quando o Agente Subestação receber a mensagem do Agente *Smart Meter* (linha 2, Algoritmo 7), ele extrairá o sinal enviado (linha 3) e realizará a classificação em seguida (linha 5). Após realizar essas operações, a informação obtida juntamente com a identificação do consumidor responsável (extraído na linha 4) serão salvas no banco de dados do agente.

A Figura 21 mostra o diagrama de sequência apresentando as interações entre estes agentes.

Algoritmo 6 Leitura de dados e envio de mensagens do Agente *Smart Meter* – proposta 2

Requer: C {identificador do consumidor}

Requer: SuA {Agente subestação}

- 1: **loop**
 - 2: $S \leftarrow LeituraDeSinais()$
 - 3: $M \leftarrow CriaMensagem(C, S)$ {Cria mensagem M contendo consumidor C e o sinal lido S }
 - 4: $Envia(M, As)$ {Envia mensagem M ao agente subestação SuA }
 - 5: $EsperaPróximaLeitura()$
 - 6: **fim loop**
-

Figura 20 – Fluxograma do Agente Subestação – proposta 2

Algoritmo 7 Recebimento de mensagens e classificação de cargas não-lineares do Agente Subestação – proposta 2

- 1: **loop**
 - 2: **se** M **então** {Mensagem M recebida}
 - 3: $S \leftarrow ExtraiSinais(M)$
 - 4: $C \leftarrow ExtraiConsumidor(M)$
 - 5: $L \leftarrow ClassificaçãoDeSinais(S)$
 - 6: $Salva(C, L)$ {Salva dados do consumidor e da carga não-linear detectada}
 - 7: **fim se**
 - 8: **fim loop**
-

Figura 21 – Diagrama de sequência do sistema multiagente - proposta 2

Na proposta 2, a obtenção dos dados continua distribuída, entretanto a classificação das cargas se dá em um processo centralizado. Apesar disso, o sistema continua a ser caracterizado como do tipo distribuído, visto que a obtenção dos dados ainda requer dispositivos dispersos em um ambiente.

Esta abordagem é muito sensível a falhas, pois se o dispositivo na subestação apresentar algum defeito, todo o sistema de classificação e identificação das cargas não-lineares para o sistema elétrico inteiro deixará de funcionar. Há um outro problema também relacionado com a centralização do processo de classificação – pode ser bastante complicada a identificação correta de todos os tipos de cargas não-lineares que possam existir em um determinado sistema elétrico. Entretanto, esta abordagem tem menos custo de manutenção e é mais barata de ser implementada no mundo real.

Na próxima seção serão apresentadas a implementação e os resultados obtidos com a simulação das metodologias aqui desenvolvidas.

5.3 Implementação e Simulações Computacionais

Para as simulações computacionais, as abordagens apresentadas foram implementadas usando as seguintes tecnologias. O sistema multiagente foi implementado em Java usando o *framework* JADE, enquanto o perceptron de multicamadas foi implementado no Matlab utilizando o *toolbox* de redes neurais. A fase de treinamento é realizada *offline* e, após terminada, a rede neural é integrada aos agentes responsáveis pela classificação das cargas não-lineares e, então, são realizadas as fases de validação e operação.

O agente responsável pela identificação e classificação das cargas, implementado em

Java/JADE, faz chamadas a uma função desenvolvida no Matlab para realizar a tarefa de classificação. Para conectar Java e Matlab, foi utilizada a biblioteca *matlabcontrol*, uma API Java não-oficial que permite a interação entre estas tecnologias¹.

O conjunto de dados utilizados é composto por 4000 exemplos, 500 para cada classe. 70% do caso de teste – 2800 exemplos, 350 por classe – foi usado para a fase de treinamento, enquanto 15% – 600 exemplos, 75 por classe – foi usado para validação e os outros 15% para a fase de operação do sistema.

O software foi executado em dois computadores. Para a proposta 1, os Agentes *Smart Meter* responsáveis pela classificação foram executados em um computador Intel i7 64-bits quad-core, com 8 GB RAM. O Agente Subestação foi executado em um computador Intel Core 2 Quad 64-bits, com 4 GB RAM. Para a proposta 2, o Agente Subestação, responsável pela classificação, foi instanciado no computador Intel i7, enquanto os agentes medidores inteligentes foram colocados no computador Intel Core 2 Quad. Ambos os computadores tinham o sistema operacional Fedora Linux 64 Bits e Java OpenJDK. A comunicação entre os agentes utilizou a infraestrutura ethernet e a pilha TCP/IP.

Para simular o processo de medição do *smart meter*, foi criado um arquivo texto com os sinais de entrada para a fase de operação. Os agentes liam esse arquivo e, para a proposta 1, realizavam o processo de classificação da entrada e enviavam a informação para o Agente Subestação, ou, para a proposta 2, enviavam a entrada lida diretamente para o agente na subestação realizar a classificação.

Ao chegarem à subestação, as mensagens enviadas pelos *smart meters* tinham um código de identificação para informar qual agente havia enviado aquela mensagem. Isto permitiu ao Agente Subestação identificar qual era o consumidor responsável por aquela carga não-linear, possibilitando o tratamento adequado posterior dessa situação.

Para a fase de treinamento, a rede neural foi executada 10 vezes, afim de se verificar o desempenho médio do método. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos, onde a coluna de erros significa o valor percentual de classificações incorretas durante a fase de treinamento. O tempo de processamento necessário para o treinamento foi da ordem de poucas unidades de segundos. As Figuras 22 e 23 apresentam o decrescimento da somatória dos erros quadráticos durante a fase de treinamento para as redes neurais 2 e 5, respectivamente.

Estas redes neurais foram transpostas para o modo de operação em ambas as propostas apresentadas nessa metodologia. Isto implica que o resultado obtido para ambas as propostas foram os mesmos, porque a mesma rede neural foi utilizada nas simulações das duas arquiteturas. A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para as fases de validação mais operação. A melhor rede neural em termos de número de acertos na fase de validação e operação foi a rede neural 8, e a pior foi a 9. Entretanto, os resultados obtidos para todas as redes neurais foram bastante próximos: a diferença de resultados entre a melhor

¹ Disponível em <http://code.google.com/p/matlabcontrol/> (Acessado dia 10 de outubro de 2015).

Tabela 5 – Resultados obtidos para fase de treinamento

Execução	Número de Épocas	Tempo (s)	Erros (%)
1	67	60	1,37
2	52	47	1,66
3	73	65	1,15
4	56	51	1,34
5	53	47	1,55
6	76	68	1,25
7	47	43	1,58
8	47	43	1,54
9	44	40	1,48
10	49	44	10.50

Figura 22 – Treinamento para perceptron 2

e a pior rede foi de apenas 2,8%.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para cada classe de cada rede neural. A classe mais complexa para ser classificada foi a classe 4, onde algumas execuções obtiveram resultados abaixo de 90% (execução 3 obteve 86,7%; execução 5 atingiu 88,7%; já a execução 9 obteve 89,3%; e a execução 10 conseguiu 86%). As demais classes foram classificadas com mais de 90% de acertos por todas as execuções realizadas.

5.4 Conclusões e Trabalhos Futuros

O método aqui desenvolvido para classificação de cargas não-lineares utilizou sistemas multiagentes para modelar e simular os dispositivos e a estrutura de comunicação a ser implementada nas redes elétricas inteligentes. O método classificador utilizado foi uma rede neural artificial.

O método também foi apresentado em duas possíveis formas de implementação: na primeira, o método classificador está no *smart meter*, enviando para a subestação de

Figura 23 – Treinamento para perceptron 5

Tabela 6 – Resultados obtidos para fases de validação + operação

Execução	Validação + Operação (%)
1	97,6
2	97,8
3	96,2
4	96,7
5	97,2
6	97,8
7	97,3
8	98,7
9	96,0
10	96,5

Tabela 7 – Resultados obtidos por classe e por cada rede neural

Execução	1	2	3	4	5	6	7	8
1	100	98,7	100	93,3	98,0	90,7	100	100
2	100	99,3	100	96,7	96,7	94,7	100	94,7
3	100	95,3	100	86,7	97,3	90,7	100	99,3
4	100	96,0	100	91,3	97,3	92,7	100	96,0
5	100	100	100	88,7	97,3	92,7	100	99,3
6	100	97,3	100	96,7	98,0	91,3	100	99,3
7	100	100	100	99,3	97,3	91,3	100	90,7
8	100	99,3	100	99,3	97,3	93,3	100	100
9	100	98,7	100	89,3	97,3	92,7	100	90,0
10	100	99,3	100	86,0	98,0	92,0	100	96,7

distribuição o sinal já classificado. No segundo, o classificador está na subestação. Cada tipo de implementação tem suas vantagens e desvantagens, conforme discutidas no texto.

Por ser uma funcionalidade mais voltada para o acompanhamento de características no sistema elétrico, sem demandar reconfigurações ou quaisquer ações que impactem imediatamente no funcionamento da rede elétrica, esse recurso é um bom exemplo do tipo de função que pode ser implementada nos *smart grids* na primeira etapa de implantação de novas funcionalidades, pois demanda apenas a existência da infraestrutura de comunicação

e dos dispositivos básicos da rede.

Apesar da aplicação descrita aqui ser voltada para registrar os indivíduos que estão utilizando cargas prejudiciais ao sistema, há outros contextos onde a classificação de cargas pode ser utilizada para prover diferentes funcionalidades. Por exemplo, para verificar o quanto de energia cada equipamento elétrico em uma residência está consumindo, classificar as cargas existentes é um primeiro passo fundamental.

Para trabalhos futuros, seria interessante utilizar a metodologia desenvolvida com uma maior quantidade de cargas não-lineares para verificar o comportamento da performance da rede neural. Outra ideia é utilizar diferentes métodos de classificação, como por exemplo sistemas *fuzzy*, para verificar e comparar a performance dos resultados obtidos. Além destas, sugestões a proposta 1 permite ter uma extensão para ferramentas personalizadas de classificação para cada subconjunto de consumidores, onde diferentes *smart meters* classificariam diferentes tipos de cargas. Uma pesquisa sobre um método para atualizar as classes identificáveis no medidor inteligente renderia um estudo interessante para esse domínio de aplicação.

Cabe comentar que o estudo que desenvolveu esta metodologia foi publicado na revista *Neurocomputing* (SARAIVA; BERNARDES; ASADA, 2015), importante periódico da área de inteligência artificial, em um número especial sobre aplicações dessas técnicas para problemas em ambientes do tipo *smart grid*.

Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Distribuição tipo *Smart Grids*

6.1 Descrição do Problema

Este estudo propõe um método de controle de tensão em sistemas elétricos de distribuição em tempo-real, baseado nos conceitos de redes elétricas inteligentes e suas metodologias de simulação e desenvolvimento trabalhadas ao longo desta tese.

O método aqui abordado utiliza o conceito de sistemas multiagentes para modelar o gerenciamento de bancos de capacitores para o controle da tensão. A abordagem proposta difere das estratégias clássicas de regulação de tensão pois imagina-se a aplicação da mesma em um ambiente de operação do sistema elétrico. Diversos métodos de controle de tensão aplicam algoritmos de otimização e métodos baseados em inteligência artificial, porém, não consideram comunicação e a execução de ações para utilização de banco de capacitores.

Por exemplo, em (LIU; ZHANG; QIU, 2002) um método de programação dinâmica e lógica *fuzzy* é proposto como método para controle de tensão. Já (HSU; LU, 1998) combina redes neurais artificiais e programação dinâmica *fuzzy*; em (LIANG; WANG, 2003) há um sistema *fuzzy* otimizado por arrefecimento simulado (*simulated annealing*) aplicado a este problema; e finalmente, em (DIXON, 2001), potência reativa é usada para coordenação do banco de capacitores.

A principal contribuição do presente estudo diz respeito ao algoritmo distribuído executado pelo sistema multiagente, que modela e simula a operação de controle de tensão do sistema elétrico de distribuição em um ambiente do tipo *smart grid*. A metodologia desenvolvida utiliza um sistema *fuzzy* como tomador de decisão sobre a seleção dos bancos de capacitores necessários para dado momento da operação. Esta abordagem é significativamente diferente dos métodos clássicos de controle de tensão locais, porque neste estudo

a comunicação entre os equipamentos, presente nas redes inteligentes, habilita a tomada de decisão sobre o uso de banco de capacitores em tempo real, levando-se em conta o estado de partes do sistema elétrico distantes entre si porém monitorada por agentes.

Esse tipo de recurso pode ser classificado como um exemplo de funcionalidade a ser implementada na segunda etapa da implementação das redes elétricas inteligentes, pois requer comunicação entre dispositivos e realiza uma tomada de decisão que demanda uma reconfiguração mais localizada, de menor impacto na rede elétrica.

6.2 Detalhes da Modelagem do Método de Resolução

6.2.1 Dados para a Simulação

O sistema *fuzzy* aqui desenvolvido utiliza três variáveis, sendo duas de entrada e uma de saída. As variáveis de entrada são a última tensão medida (V) e o desvio de tensão (ΔV). Já a variável de saída, banco de capacitores (Bc), representa a utilização ou não de capacitores e a quantidade destes a serem ativados no sistema elétrico.

As duas variáveis de entrada tem o domínio de seus valores baseados em documento da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – que dispõe sobre regras de qualidade de energia e os limites de tensão a serem cumpridos na operação do sistema elétrico (ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2014).

A Tabela 8 apresenta os limites de tensão, dados em p.u., para redes cuja tensão nominal varia na faixa entre 1 kV e 69 kV. Esse tipo de rede será a utilizada na simulação do método desenvolvido nesse capítulo.

Tabela 8 – Limites de tensão (V) para redes cuja tensão nominal está entre 1 kV e 69 kV

Limites de tensão (p.u.)	
Crítica baixa	$V < 0,9$ p.u.
Precária	$0,9$ p.u. $\leq V < 0,93$ p.u.
Adequada	$0,93$ p.u. $\leq V \leq 1,05$ p.u.
Crítica alta	$V > 1,05$ p.u.

Ao contrário do documento original da ANEEL, aqui subdividiu-se a faixa definida como “crítica” entre “crítica baixa” e “crítica alta”. Não houve alteração nos termos matemáticos dos limites, apenas a categoria “crítica” foi desmembrada em duas para facilitar e dar maior expressividade quando da criação de regras linguísticas *fuzzy* baseadas nesses intervalos.

A Tabela 9, apresenta os limites relacionados à variável desvio de tensão, também conforme documento da ANEEL sobre o tema (ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2014). De acordo com esse texto, a alínea b da seção 2.5.2.2 dispõe que:

a tensão a ser contratada nos pontos de conexão com tensão nominal de operação inferior a 230 kV deverá situar-se entre 95% (noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão.

Portanto, há possibilidade de variação de 5% em torno da tensão nominal de operação padrão do sistema. Assim, e baseados em trabalhos prévios disponíveis na literatura sobre o tema (SPATTI et al., 2011), é possível definir 5 intervalos que delimitam diferentes condições de cumprimento dos limites de tensão na operação desses sistemas, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Limites de desvio de tensão (ΔV) em porcentagem para redes cuja tensão nominal está abaixo de 230 kV

Limites do desvio de tensão (%)	
Negativo	$\Delta V < -5\%$
Negativo-baixo	$-5\% \leq \Delta V < 0\%$
Zero	$\Delta V = 0\%$
Positivo-baixo	$0\% < \Delta V \leq 5\%$
Positivo	$\Delta V > 5\%$

A expressão matemática utilizada para encontrar o ΔV nesse trabalho é dada por:

$$\Delta V = V_{t_2} - V_{t_1} \quad (4)$$

Onde V_t é a medida da tensão V realizada em um dado tempo t . Para a expressão apresentada, tem-se sempre $t_2 > t_1$.

Já a variável de saída indica a quantidade de banco de capacitores que deverão ser ativados na rede elétrica dada a tomada de decisão do sistema *fuzzy*. Para o cenário aqui trabalhado, dispõe-se de 3 capacitores de 600 kvar cada, totalizando 1800 kvar de potência reativa quando todo o banco estiver em uso.

6.2.2 Sistema *Fuzzy* para Controle de Tensão

O sistema de inferência *fuzzy* utilizado é do tipo definido por Mamdani (MAMDANI, 1977) utilizando cláusulas de modelo “se-então-senão”. Os passos que compõe o sistema *fuzzy* são apresentados na Figura 24:

A implementação do sistema se utiliza de operações de união e interseção de conjuntos como proposto por Zadeh (ZADEH, 1973), a partir dos operadores de máximo e mínimo (o que dá ao sistema de inferência o nome operador Max-Min).

Para a fuzzificação das entradas, é utilizada a função de interseção de cada variável de entrada nos termos linguísticos definidos para cada uma. Este processo resulta na obten-

Figura 24 – Sistema de inferência fuzzy

ção do conjunto *fuzzy* ativo para cada conjunto de entradas, transformando a informação quantitativa em qualitativa.

Dado um determinado vetor de entradas $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ cujo número de entradas é igual a n , dependendo da descrição de cada conjunto *fuzzy* uma entrada pode ativar uma ou mais regras linguísticas. Sendo A_n uma certa regra linguística ativada por uma entrada n , calcula-se a implicação parcial sobre o conjunto *fuzzy* da variável de saída S como:

$$S = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad (5)$$

Como cada entrada pode ativar mais de uma regra *fuzzy*, é necessário calcular cada implicação parcial diferente a partir da permutação de regras linguísticas ativadas pelo vetor de variáveis de entrada. O número de operações necessárias nesse passo é igual ao produto cartesiano entre as regras linguísticas ativadas para cada variável de entrada.

Assim, fazendo o número de operações de implicações parciais igual a k , utiliza-se o operador de agregação união para encontrar qual a projeção final D de todas as projeções parciais sobre o conjunto *fuzzy* da variável de saída, definido como:

$$D = \max(S_1, S_2, \dots, S_k) \quad (6)$$

Como D representa o conjunto *fuzzy* final obtido a partir de todas as regras linguísticas ativas das variáveis de entrada, é agora possível realizar a defuzzificação e encontrar a solução procurada para o problema.

A defuzzificação utilizada no trabalho obtém os valores discretos que correspondem à ação de utilização dos bancos de capacitores. Para obtê-la, aplica-se o método de centro de área para a distribuição da saída onde, dado um gráfico bidimensional de eixos x e $f(x)$, com $j \leq x \leq n$, é possível calcular através da fórmula:

$$C = \frac{\sum_{i=j}^n (f(x) * x)}{\sum_{i=j}^n f(x)} \quad (7)$$

Descreve-se agora o processo de fuzzyficação das variáveis do problema. Como já comentado, o sistema implementado utiliza três variáveis, sendo duas de entrada e uma

de saída. Como variáveis de entrada temos a tensão V e o desvio de tensão ΔV , e para a saída temos o nível de utilização do banco de capacitores Bc .

A variável tensão foi dividida em quatro subconjuntos *fuzzy* baseados nos limites apresentados na Tabela 8. O universo de discurso das regras *fuzzy* varia entre $[0,8; 1,1]$ (p.u.). Esses subconjuntos são representados por:

- ❑ Crítica baixa (V_{Cb}): $[0,8; 0,8; 0,9; 0,92]$ - Função trapezoidal;
- ❑ Precária (V_P): $[0,9; 0,925; 0,95]$ - Função triangular;
- ❑ Adequada (V_A): $[0,93; 1; 1,05]$ - Função triangular;
- ❑ Crítica alta (V_{Ca}): $[1,03; 1,05; 1,1; 1,1]$ - Função trapezoidal.

Os gráficos das regras linguísticas relacionadas à variável V são apresentadas na Figura 25.

Figura 25 – Função da variável tensão (V)

O desvio de tensão ΔV foi dividido em cinco subconjuntos *fuzzy*, onde o universo de discurso varia entre $[-0,1; 0,1]$. Esses valores são a normalização do intervalo entre -5% e 5% delimitados no documento da ANEEL. Os subconjuntos foram definidos após alguns testes para identificar a melhor média das performances:

- ❑ Negativo (ΔV_N): $[-0,1; -0,1; -0,05; -0,04]$ - Função trapezoidal;
- ❑ Negativo baixo (ΔV_{Nb}): $[-0,03; -0,0018; -0,0015; 0]$ - Função trapezoidal;
- ❑ Zero (ΔV_Z): $[-0,01; 0; 0,01]$ - Função triangular;
- ❑ Positivo baixo (ΔV_{Pb}): $[0; 0,0022; 0,025; 0,05]$ - Função trapezoidal;
- ❑ Positivo (ΔV_P): $[0,04; 0,06; 0,1; 0,1]$ - Função trapezoidal;

Figura 26 – Função da variável desvio de tensão (ΔV)

Os gráficos para as regras linguísticas relacionadas com a variável desvio de tensão ΔV são apresentados na Figura 26.

Já a variável de saída Bc foi dividida em quatro subconjuntos *fuzzy*, onde o universo de discurso é descrito por $[0; 1]$. Os subconjuntos foram definidos da seguinte forma:

- Zero (Bc_Z): $[0; 0; 0,075; 0,09]$ - Função trapezoidal;
- Baixo (Bc_B): $[0,05; 0,13; 0,18; 0,2]$ - Função trapezoidal;
- Médio (Bc_M): $[0,18; 0,22; 0,7; 0,8]$ - Função trapezoidal;
- Alto (Bc_A): $[0,7; 0,8; 1; 1]$ - Função trapezoidal.

Os gráficos para as regras linguísticas da variável banco de capacitores Bc são apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Função da variável banco de capacitores (Bc)

Finalmente, os valores numéricos da decisão *fuzzy* podem agora ser obtidos. Para este trabalho foram definidos 3 capacitores de 600 kvar. A variável linguística determinará se

eles serão usados e, caso afirmativo, quantos serão necessários. A Tabela 10 apresenta a relação entre a variável de saída utilização de bancos de capacitores Bc e a potência reativa fornecida.

Tabela 10 – Utilização de bancos de capacitores

Bancos de capacitores	
Alto (Bc_A)	1800 KVAR
Médio (Bc_M)	1200 KVAR
Baixo (Bc_B)	600 KVAR
Zero (Bc_Z)	Não usar

A Tabela 11 compreende o mapeamento do sistema *fuzzy* completo, apresentando o resultado da operação Mínimo E (*AND*) entre as entradas ΔV e V .

Tabela 11 – Tabela com as regras *fuzzy*, suas entradas e o mapeamento para as respectivas saídas

E (<i>AND</i>)		V			
		V_{Cb}	V_P	V_A	V_{Ca}
ΔV	ΔV_N	Bc_A	Bc_A	Bc_M	Bc_Z
	ΔV_{Nb}	Bc_M	Bc_M	Bc_B	Bc_Z
	ΔV_Z	Bc_B	Bc_B	Bc_Z	Bc_Z
	ΔV_{Pb}	Bc_M	Bc_M	Bc_Z	Bc_Z
	ΔV_P	Bc_B	Bc_B	Bc_Z	Bc_Z

6.2.3 Sistema Multiagente Modelado

Este trabalho propõe o uso de um sistema multiagente, composto por dois tipos de agentes diferentes, para controle de tensão utilizando banco de capacitores.

Um dos agentes, o Agente Medidor, reside em uma das barras do sistema elétrico de distribuição e periodicamente faz medições sobre a tensão naquela barra e envia os valores dessas medições para o centro de controle do sistema elétrico. No centro de controle há um agente, chamado Agente Subestação, responsável pela tarefa de receber essas medições e realizar a tomada de decisão sobre a funcionalidade utilizando o sistema *fuzzy* desenvolvido. Assim, o agente verifica se é necessário utilizar o banco de capacitores para regular a tensão e, caso positivo, qual quantidade deles será utilizada. A Figura 28 apresenta o fluxo de ações realizadas pelo Agente Subestação, enquanto o Algoritmo 8 apresenta a ordem de ações para operação desse agente.

Interpretando o Algoritmo 8, em primeiro lugar são inicializadas as variáveis V_{atual} (tensão atual), $V_{anterior}$ (tensão anterior), ΔV e Bc , todas com valores nulos (representado por $\emptyset$).

Em seguida, o agente fica em *loop* infinito, representando o comportamento de espera de mensagens. Quando ele recebe alguma (linha 6 do Algoritmo 8), ele verifica se o V_{atual}

Figura 28 – Fluxograma do agente subestação

é nulo. Em caso positivo, essa é a primeira mensagem recebida, e o valor enviado através da mensagem M é extraído e colocado na variável V_{atual} .

Caso a mensagem não seja a primeira, então o antigo valor V_{atual} é inserido na variável $V_{anterior}$, e o novo valor de tensão é alocado na variável V_{atual} , tornando assim possível o cálculo de ΔV . Com V_{atual} e ΔV , é possível realizar a tomada de decisão *fuzzy* (a chamada de função da linha 13), e em seguida defuzzificar a resposta (com a chamada de função da linha 14).

Com o resultado obtido, o agente consegue saber se é necessário o uso dos bancos de capacitores e, em caso afirmativo, a quantidade que será utilizada. A função *ExecutaAção(C)*, na linha 15 do Algoritmo 8, é responsável pela configuração dos bancos.

Após a realização da tarefa, o agente volta ao estado de esperar requisições, aguardando o momento da chegada de novas mensagens para em seguida executar sua funcionalidade novamente.

Algoritmo 8 Recebimento de mensagens e tomada de decisão *fuzzy* sobre utilização de bancos de capacitores do Agente Subestação

```

1:  $V_{atual} \leftarrow \emptyset$ 
2:  $V_{anterior} \leftarrow \emptyset$ 
3:  $\Delta V \leftarrow \emptyset$ 
4:  $Bc \leftarrow \emptyset$ 
5: loop
6:   se  $M$  então {Mensagem  $M$  recebida}
7:     se  $V_{atual} = \emptyset$  então {Primeira mensagem}
8:        $V_{atual} \leftarrow ExtraiMedição(M)$ 
9:     senão
10:       $V_{anterior} \leftarrow V_{atual}$ 
11:       $V_{atual} \leftarrow ExtraiMedição(M)$ 
12:       $\Delta V \leftarrow V_{atual} - V_{anterior}$ 
13:       $Bc \leftarrow DecisãoFuzzy(V_{atual}, \Delta V)$ 
14:       $C \leftarrow Defuzzyficação(Bc)$  {Determina os bancos de capacitores que serão utilizados}
15:       $ExecutaAção(C)$ 
16:   fim se
17: fim se
18: fim loop

```

O Agente Subestação recebe os dados coletados pelo Agente Medidor e realiza a tomada de decisão a partir deles. Isso significa que o processo de tomada de decisão é separado do processo de obtenção dos dados, permitindo que um controle global do sistema seja implementado na central de controle da subestação.

Para cada agente, há a necessidade da definição de vários parâmetros. Por exemplo, o intervalo de tempo no qual os dados são coletados pelo Agente Medidor – se este intervalo é muito curto, a quantidade de dados a ser tratado pelo sistema pode ser muito grande, ou, a constante alteração da tensão em pouco tempo pode ocasionar indesejáveis oscilações elétricas. Já, caso o intervalo seja muito longo, a eficiência do sistema de controle pode ser muito baixa.

Outro dado importante que deve ser definido no início do processo é a posição do Agente Medidor no sistema elétrico de distribuição. O posicionamento afeta o tipo de informação que pode ser obtida e a habilidade de implementação das ações de reconfiguração e controle.

O Agente Medidor estará localizado, em termos de visualização do sistema elétrico como um grafo, em alguma barra-folha da representação. A determinação dessa posição será, portanto, um problema a ser trabalhado no planejamento da instalação dessa funcionalidade. Para a aplicação nesse trabalho, será considerado que a posição do agente já está definida.

De forma simplificada, o Agente Medidor realiza duas medições consecutivas da tensão do sistema, enviando os resultados obtidos para o Agente Subestação. Após isso, o Agente

Medidor receberá a solução calculada da funcionalidade para o estado do sistema aferido durante a última medição. A Figura 29 apresenta o fluxograma de ações e o Algoritmo 9 apresenta as operações do Agente Medidor.

Figura 29 – Fluxograma do Agente Medidor

A execução desse agente é bastante simples. Ele está em um *loop* infinito realizando ações de leitura da tensão (linha 2 do Algoritmo 9, onde a tensão está representada pela variável V) e subsequente envio da mesma (linha 4) para o agente na subestação. Em seguida ele aguarda um intervalo de tempo até realizar a próxima leitura da tensão.

Algoritmo 9 Leitura de dados sobre tensão e envio de mensagens do Agente Medidor

Requer: SuA {Agente subestação}

- 1: **loop**
 - 2: $V \leftarrow \text{LeituraDeTensão}()$
 - 3: $M \leftarrow \text{CriaMensagem}(V)$ {Cria mensagem M contendo tensão medida V }
 - 4: $\text{Envia}(M, SuA)$ {Envia mensagem M contendo tensão medida V para o agente na subestação SuA }
 - 5: $\text{EsperaPróximaLeitura}()$
 - 6: **fim loop**
-

A Figura 30 apresenta o diagrama de sequência para os agentes do sistema, mostrando a interação necessária para a resolução do problema conforme o modelo desenvolvido.

6.3 Implementação e Simulações Computacionais

O sistema *fuzzy* foi projetado no Matlab utilizando o *toolbox Fuzzy Logic*, uma extensão do software de cálculo numérico específico para esse tipo de aplicação.

Figura 30 – Diagrama de sequência do sistema multiagente

Também no Matlab foram realizadas simulações e cálculos de fluxo de potência para obtenção dos dados da tensão a serem utilizadas na simulação da operação do sistema propriamente.

Para essa etapa de simulações do sistema durante a operação, tanto o sistema multiagente quanto o sistema de inferência *fuzzy* foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação Java. Mais especificamente, o sistema multiagente utilizou JADE, enquanto a lógica *fuzzy* foi programada sem uso de bibliotecas.

Os agentes foram executados em dois computadores conectados por rede ethernet padrão. O tempo de processamento da tomada de decisão levava menos de um segundo, a partir do recebimento das mensagens enviadas pelo agente medidor.

Os testes foram realizados baseados em um sistema elétrico malhado de 14 barras customizado. A topologia é apresentada na Figura 31 e as características do sistema são mostradas na Tabela 12 e Tabela 13.

Na Figura 31, há agentes medidores localizados nas barras 5 e 14. Os valores utilizados para as medições das tensões foram baseadas em cálculos de fluxo de potência. Os Agentes Medidores realizaram a leitura dos dados e enviaram ao Agente Subestação no centro de controle para realização da tomada de decisão *fuzzy*. Os bancos de capacitores estão localizados juntos ao Agente Subestação.

Os resultados dessas simulações são apresentados na Tabela 14. Para estas condições, o sistema de inferência determinou uma necessidade de utilização de bancos de capacitores B_c baixo, significando a ativação de um banco de 600 kvar apenas.

Tabela 12 – Dados do sistema de 14 barras

Barra	P (MW)	Q (Mvar)
1	0,0	0,0
2	2,0	1,6
3	3,0	1,5
4	2,0	0,8
5	1,5	1,2
6	4,0	2,7
7	5,0	3,0
8	1,0	0,9
9	0,6	0,1
10	4,5	2,0
11	1,0	0,9
12	1,0	0,7
13	1,0	0,9
14	2,1	1,0

Tabela 13 – Dados das linhas do sistema de 14 barras

Barra Origem	Barra Destino	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
1	2	0,75	10,0
2	3	8,0	11,0
2	4	9,0	18,0
4	5	4,0	4,0
1	6	11,0	11,0
6	7	8,0	11,0
6	8	11,0	11,0
7	9	11,0	11,0
7	10	8,0	11,0
1	11	11,0	11,0
11	12	9,0	12,0
11	13	8,0	11,0
13	14	4,0	4,0
3	9	4,0	4,0
8	12	4,0	4,0
5	14	9,0	12,0

Tabela 14 – Resultado dos testes quando os agentes medidores estão alocados nas barras 5 e 14

Resultados				
Carga	Tensão (p.u.) em t_1	Tensão (p.u.) em t_2	B_c	
5	0,9452	0,9408	Baixo (B_{c_B})	
5	0,9408	0,9407	Baixo (B_{c_B})	
14	0,9413	0,9360	Baixo (B_{c_B})	
14	0,9360	0,9359	Baixo (B_{c_B})	

Minimização das Perdas em Sistemas Elétricos de Distribuição tipo *Smart Grids*

7.1 Descrição do Problema

O problema de minimização de perdas em sistemas elétricos de distribuição é um dos problemas clássicos em sistemas de potência. Há diferentes formas de conseguir essa redução, sendo uma delas a reconfiguração topológica do sistema.

Este método consiste em mudar a topologia da rede a partir da alteração do estado, entre aberto e fechado, das chaves nos ramos da rede elétrica (CIVANLAR et al., 1988). Quando a chave está aberta, o circuito naquele trecho está aberto e então não há transferência de potência naquela linha; porém, quando a chave está fechada, a transferência de energia acontece.

A reconfiguração da topologia da rede pode ser aplicada a diversos problemas além da minimização das perdas, todos relacionados com gerenciamento da operação ou otimização de características do sistema elétrico como, por exemplo, proteção elétrica, coordenação e atenuação de correntes de curto-circuito (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000), cortes de carga e ilhamentos de partes do sistema (GUERRA; UNSIHUAY-VILA; KAGAN, 2011), melhorar o perfil de tensão (KAYAL; CHANDA; CHANDA, 2011), balanceamento de carga (KE, 2004), restauração do sistema (BOTEJA; RINTANEN; BANERJEE, 2012), rotear o fluxo de carga para trechos diferentes, entre outros.

A utilização desse método implica que o problema terá uma natureza combinatória, visto que o número de respostas possíveis depende da combinação dos estados das chaves. Cada configuração representa uma topologia que é associada a um valor de performance da função objetivo do problema trabalhado. As mudanças da topologia devem satisfazer algumas condições e restrições, sendo as mais comuns a manutenção da topologia radial (principalmente para problemas em sistemas de distribuição), restrições de tensão, limites

de correntes, e outros.

Especificamente para o problema de minimização das perdas, há diversos estudos publicados apresentando utilizações de diferentes algoritmos de resolução aplicados ao chaveamento da rede. Por exemplo, em (CIVANLAR et al., 1988) os autores apresentam um método heurístico baseado em pares de abertura/fechamento de chaves. Utilizando esse método como base, (BARAN; WU, 1989) apresentará algumas modificações que melhoram a solução obtida na proposta.

Citando alguns artigos que apresentam abordagens metaheurísticas para o problema, em (AHUJA; PAHWA, 2005) o autor aplica um algoritmo de colônia de formigas, enquanto em (RAVIBABU et al., 2010) foi empregado um algoritmo genético. O estudo apresentado em (TSAI; CHU, 2011) utiliza um método híbrido entre colônia de formigas e algoritmos genéticos.

A novidade do método de resolução aqui proposto é a consideração da existência de uma infraestrutura mais avançada na rede elétrica, composta por sensores e equipamentos que utilizam redes de comunicação para trocar mensagens e, a partir desses dados, basear a tomada de decisão sobre a execução de determinada funcionalidade no estado do sistema monitorado de forma distribuída. Ou seja, o método leva em conta que o sistema elétrico de distribuição é um *smart grid*.

Portanto, o estudo propõe uma modelagem e método de resolução baseados em sistemas multiagentes para reconfiguração topológica da rede inteligente de distribuição de energia elétrica, buscando a minimização das perdas no sistema. Os agentes realizam as atividades de monitoramento, troca de dados, tomada de decisão, e reconfiguração das chaves, como será apresentado nas seções à frente.

O método foi aplicado em dois tipos diferentes de simulação. Na primeira, a demanda de energia elétrica nas cargas não sofre alteração enquanto o método de resolução executa suas ações. Convencionou-se chamar esse cenário de demanda estática.

Já no outro conjunto de simulações, a demanda por energia nas cargas varia ao longo do tempo, enquanto o método de resolução processa as ações de reconfiguração. Essa característica representa a variação presente em sistemas elétricos reais, permitindo que o método seja avaliado em uma situação mais próxima do que é encontrada na operação da distribuição. Chamou-se esse tipo de cenário de demanda dinâmica.

Outro diferencial das simulações com demanda dinâmica diz respeito à plataforma de *hardware* utilizada para realizar os estudos. Os sistema multiagente desenvolvido foi executado em um conjunto de computadores Raspberry Pi. As motivações e características desse tipo de dispositivo serão discutidas em seções a seguir.

A funcionalidade trabalhada nesse capítulo executa diversas ações de reconfiguração de chaves, alterando a topologia do sistema durante a sua operação, repercutindo consideravelmente em diferentes serviços na rede elétrica. Esse recurso demandaria equipamentos confiáveis e redes robustas para garantir que a funcionalidade seria aplicada com êxito.

Por conta do grande impacto que uma funcionalidade como essa pode gerar, e também dos seus altos requisitos, estima-se que ela seria implementada somente em redes elétricas inteligentes em avançado estado de implantação, que já contem com diferentes equipamentos e tecnologias de contingência que permitam garantir a segurança e a disponibilidade de energia enquanto fazem uso de funções assim.

7.2 Detalhes da Modelagem do Método de Resolução

7.2.1 Modelagem Matemática do Problema

Sempre que há diferença de tensão entre dois pontos de um circuito, há presença de corrente elétrica transportando energia do ponto de maior para o de menor tensão. Nos ramos dos alimentadores da rede elétrica por onde passam essas correntes, há resistências que são características do material utilizado. Sempre que uma corrente passa por uma resistência há perda de parte da energia transportada, normalmente em forma de calor.

Trabalhando-se apenas com potência ativa, é possível calcular as perdas na rede elétrica a partir da seguinte função matemática descrita na Equação 8:

$$Z = \sum_{l \in L} R_l \cdot i_l^2 \cdot e_l \quad (8)$$

Na Equação 8, Z representa as perdas totais no sistema para um certo estado de configurações das chaves existentes. l é uma linha qualquer do alimentador, onde o conjunto de todas as linhas é dado por L . As variáveis R_l , i_l e e_l significam, respectivamente, a resistência, a corrente, e o estado da chave na linha l . A variável estado da chave é binária (0 ou 1), significando que, caso a chave em dada linha esteja aberta, não existe corrente naquele trecho – ou seja, tem-se $e_l = 0$. Caso a chave esteja fechada, o circuito também está fechado, havendo portanto passagem de corrente naquele trecho. Nesses casos, $e_l = 1$.

Portanto, para um mesmo sistema elétrico de distribuição com diferentes configurações do conjunto de chaves E , ter-se-á diferentes valores para as perdas elétricas Z .

A partir do exposto já é possível definir a modelagem matemática do problema de minimização das perdas elétricas em sistemas de distribuição a ser trabalhado nesse capítulo.

$$\text{Min } Z = \sum_{l \in L} R_l \cdot i_l^2 \cdot e_l \quad (9)$$

Sujeito a:

$$\begin{cases} e_l = (0,1), \forall l \in L & (10) \\ \forall c \in C, \exists s \in S \text{ onde } (s, c) \subset G^r & (11) \\ \forall s_j, s_k \in S, \text{ onde } j \neq k, \nexists (s_j, s_k) \subset G^r & (12) \end{cases}$$

No conjunto das restrições são apresentadas algumas variáveis novas. A saber, c significa um ponto de carga no sistema elétrico, cujo conjunto de cargas é dado por C . G^r é o grafo da resposta que está sendo analisada. Já s é uma subestação do sistema elétrico, e o conjunto de todas elas é representado por S .

A função de minimização apresentada na Equação 9 é a mesma fórmula matemática já discutida na Equação 8, acrescida apenas da indicação que agora trata-se de um problema de otimização.

A restrição apresentada na Equação 10 delimita a natureza binária da variável que representa o estado da chave e em uma linha l qualquer do sistema elétrico.

Já a Equação 11 indica que para todas as cargas c do problema, deve haver pelo menos uma subestação s ligada a cada uma delas – ou seja, há um caminho entre esses dois tipos diferentes de nós do grafo. O caminho dessa ligação é denotado pela expressão (s, c) que é um subgrafo do grafo-solução em avaliação G^r . Essa restrição serve para garantir que uma possível solução ao problema deve alimentar todas as cargas existentes na rede.

A última restrição, Equação 12, impede que exista qualquer subgrafo do grafo solução G^r que tenha um caminho que ligue qualquer par de subestações (s_j, s_k) . Essa restrição inviabiliza soluções que tenham topologia diferente da radial, requerida para operações em sistemas de distribuição.

Da modelagem discutida, é possível perceber que algumas restrições típicas dos problemas em sistemas elétricos de distribuição foram relaxadas para esse estudo, como os limites de queda de tensão ou os limites de fluxo de potência em trechos. Isso ocorreu porque, para esse trabalho em específico, decidiu-se focar mais em como um sistema multiagente utilizando os conceitos de *smart grids* conseguiriam resolver um problema desse tipo. A adição de mais restrições foi postergada para ocorrer em trabalhos futuros, depois que uma primeira versão do método de solução que conseguisse resolver o problema em sua versão um pouco mais simples tivesse êxito e fosse analisada em maior profundidade.

7.2.2 Sistema Multiagente Modelado

No sistema multiagente proposto, foram definidos três tipos de agentes: o agente subestação (SuA – *Substation Agent*), responsável por monitorar a subestação de distribuição de energia e o fluxo de potência que sai da subestação monitorada em direção às cargas; o agente das chaves (SwA – *Switch Agent*), responsável por monitorar o estado de determinada chave e realizar a operação de reconfiguração desta; e o agente das cargas (LoA – *Load Agent*), residente na carga de determinado consumidor e responsável por verificar a demanda desta.

As seguintes ações ilustram o funcionamento do sistema multiagente. A metodologia requer que o processo tenha início a partir de uma solução inicial. Nesta solução, um conjunto de LoA recebe energia elétrica de um SuA específico, representando assim o que chama-se nesse texto de coalizão. O conjunto de coalizões representa o sistema ativo na

rede elétrica. Os SwA correspondentes devem estar configurados para permitirem que as cargas tenham suas demandas abastecidas.

Para exemplificar, de forma gráfica, a Figura 32 apresenta um sistema de distribuição com seus respectivos equipamentos e, por consequência, os diferentes tipos de agentes modelados. As chaves são representadas por retângulos, que quando for “□” significa que a chave está aberta, então não há fluxo de energia naquele trecho. Porém, quando a chave é representada por “■”, significa que o estado da mesma é fechado e então há passagem de energia por ela. Cada chave é um SwA diferente. As “●” representam as cargas, com cada uma sendo um LoA. Os nós 0 e 1 representam as subestações, cada uma com um agente SuA.

Figura 32 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 11 barras

Ainda na Figura 32 é possível ver o destaque nas duas coalizões presentes neste sistema. A coalizão do SuA 0 é formada pelas cargas 2, 3, 4 e 5. Estas cargas recebem energia da subestação 0. Já a coalizão que recebe energia da subestação 1 é formada pelas cargas 6, 7, 8, 9 e 10. O que garante que essas cargas recebam energia das respectivas subestações de suas coalizões são as configurações do estado das chaves no sistema. A chave 5-6, que tem estado aberto, separa as duas coalizões.

No início do funcionamento do método, cada LoA envia uma mensagem para o SuA correspondente de sua coalizão informando sua demanda atual. Após receber as mensagens de todos os LoA, o SuA faz um cálculo de fluxo de potência apenas para os trechos correspondentes à sua coalizão, utilizando o método da varredura (KERSTING, 2012), calculando assim as perdas elétricas correspondentes.

Após esse cálculo, o SuA identifica os LoA alocados na fronteira da coalizão, ou seja, aqueles que estão nos nós folha no grafo do sistema elétrico ativo. Esta fronteira identifica a existência de um trecho da rede elétrica que liga duas coalizões mas cujo o SwA correspondente a ela está configurado como aberto, impedindo que o fluxo de potência flua naquele ramo.

Para o exemplo apresentado na Figura 32, esses LoA são os localizados nas cargas 5 e 6, respectivamente, as fronteiras das coalizões dos SuA 0 e SuA 1.

Então, o SuA envia mensagens para os LoA residentes na fronteira da coalizão informando-os sobre as perdas elétricas da coalizão e habilita estes agentes a se comunicarem com os LoA vizinhos, mas pertencentes à outras coalizões, de forma a verificar a possibilidade de

mudanças que permitam a redução das perdas elétricas. O SuA também envia mensagens para os demais LoA alocados em regiões não fronteiriças apenas avisando-os sobre o fim do cálculo das perdas.

Aplicando esta etapa ao exemplo, podemos indicar que o SuA 0 envia para o LoA 5 a perda elétrica da coalizão naquele momento, $Z_{c(SuA_0)}$, o mesmo ocorrendo entre os agentes SuA 1 e LoA 6, porém com o valor $Z_{c(SuA_1)}$.

Nesse ponto, os LoA na região de fronteira enviam mensagens para os LoA vizinhos de outra coalizões, que por sua vez também estão na região de fronteira. Esta mensagem pergunta sobre o SuA ativo daquela coalizão e a atual perda elétrica deles. Após receber o questionamento, o LoA responde imediatamente com as informações pedidas.

Voltando ao exemplo utilizado para ilustrar o método, os LoA 5 e 6 trocam mensagens entre si perguntando sobre o SuA e a perda elétrica no momento para a coalizão vizinha. A Figura 33 destaca as mensagens trocadas e demais elementos de interesse nessa etapa do método.

Figura 33 – Mensagem trocada entre os LoA na fronteira da coalizão

Com a informação sobre o SuA responsável pela coalizão vizinha e a perda elétrica atual daquela, o LoA envia mensagem para este SuA requerendo informações sobre o incremento das perdas elétricas na coalizão caso ele passe a fazer parte dela. O LoA também envia mensagem para o SuA da coalizão que faz parte requerendo a avaliação sobre o decremento de perda elétrica caso o agente saia da atual coalizão. Todos os LoA nas regiões de fronteiras das coalizões farão esses pedidos. A Figura 34 ilustra essa troca de mensagens.

Quando os SuA das coalizões recebem mensagens dos LoA de suas próprias coalizões, ele “removem” os LoA do grafo do grupo apenas para realização dos cálculos – ou seja, ele não remove o LoA de fato, o que implicaria em reconfigurações de chaves e alterações na topologia do sistema. O cálculo é executado utilizando-se novamente o método da varredura, obtendo-se a perda elétrica da coalizão sem aquele LoA. Após o cálculo o SuA envia ao LoA requerente o valor encontrado no teste.

No caso dos SuA das coalizões diferentes, quando eles recebem a mensagem dos LoA, ele “adiciona” a carga mas, novamente, apenas no modelo matemático da coalizão para

Figura 34 – Mensagem trocada entre os LoA na fronteira da coalizão e os SuA

realização do cálculo. Executando o método da varredura, os SuA encontram a perda elétrica para esse cenário onde os LoA foram adicionados à suas coalizões. Os resultados obtidos são enviados para os LoA que requisitaram a avaliação.

Para o exemplo, o LoA 5 requisita ao SuA 0 o cálculo da perda elétrica na coalizão caso ele seja removido da mesma, enquanto requisita ao SuA 1 o cálculo da perda no caso dele ser adicionado à coalizão vizinha. O SuA 0 informará o valor $Z_{c(SuA_0)-\{LoA_5\}}$ da perda ao LoA 5, enquanto o SuA 1 informará $Z_{c(SuA_1)+\{LoA_5\}}$ a este agente.

Para o agente LoA 6, os valores a serem recebidos serão, do agente SuA 0, $Z_{c(SuA_0)+\{LoA_6\}}$, e do agente SuA 1, $Z_{c(SuA_1)-\{LoA_6\}}$.

Após receber as respostas de todos os SuA, agora os LoA tem as informações para decidirem se continuam em suas atuais coalizões ou se mudam para a vizinha. Esta decisão é feita selecionando a combinação que provê a menor soma entre a perda na configuração atual da coalizão mais a perda nas coalizões vizinhas, e a perda na atual coalizão com o LoA sendo removido desta somado a perda da outra coalizão caso o LoA esteja residente nela.

A formulação matemática dessa decisão para o agente LoA 5 é apresentada na Equação 13, onde $Min_{LoA_5}^Z$ representa o valor mínimo na comparação entre as perdas no cenário atual e as perdas no caso do agente mudar de coalizão. A Equação 14 apresenta a tomada de decisão D_{LoA_5} a ser realizada a partir do valor mínimo obtido na Equação 13.

$$Min_{LoA_5}^Z = \min(Z_{c(SuA_0)} + Z_{c(SuA_1)}, Z_{c(SuA_0)-\{LoA_5\}} + Z_{c(SuA_1)+\{LoA_5\}}) \quad (13)$$

$$D_{LoA_5} = \begin{cases} Min_{LoA_5}^Z = Z_{c(SuA_0)} + Z_{c(SuA_1)} & ; \text{Continua na coalizão} \\ Min_{LoA_5}^Z = Z_{c(SuA_0)-\{LoA_5\}} + Z_{c(SuA_1)+\{LoA_5\}} & ; \text{Muda para } c(SuA_1) \end{cases} \quad (14)$$

Apesar das equações anteriores tomarem o LoA 5 como exemplo, o LoA 6 terá que fazer tomada de decisão semelhante, porém com os valores que lhe correspondem no método.

Generalizando esse processo de tomada de decisão, a Equação 15 apresenta qual seria o cálculo para um LoA i qualquer onde o SuA da sua coalizão é representado por SuA_j e o SuA vizinho é identificado por SuA_k . A consequente tomada de decisão D_{LoA_i} é apresentada na Equação 16.

$$Min_{LoA_i}^Z = \min(Z_{c(SuA_j)} + Z_{c(SuA_k)}, Z_{c(SuA_j) - \{LoA_i\}} + Z_{c(SuA_k) + \{LoA_i\}}) \quad (15)$$

$$D_{LoA_i} = \begin{cases} Min_{LoA_i}^Z = Z_{c(SuA_j)} + Z_{c(SuA_k)} & ; \text{Continua na coalizão} \\ Min_{LoA_i}^Z = Z_{c(SuA_j) - \{LoA_i\}} + Z_{c(SuA_k) + \{LoA_i\}} & ; \text{Muda para } c(SuA_k) \end{cases} \quad (16)$$

A partir dessa análise, o LoA decide para qual coalizão ele será membro. Após isso, o LoA envia mensagens para os SuA implicados informando a decisão tomada. Caso o LoA permaneça na atual coalizão, nada muda e o sistema elétrico permanece como está. Entretanto, caso ele migre para outra coalizão, o SuA antes responsável pelo LoA envia uma mensagem para o SwA na linha que conecta o LoA à coalizão requerendo que este altere seu estado para aberto, desconectando o LoA. Já o SuA que será o novo responsável pelo LoA envia mensagem ao SwA que está no trecho elétrico entre o LoA e a coalizão e pede para que este altere seu estado para fechado, conectando a carga à coalizão.

Supondo que no exemplo discutido nesta seção o LoA 5 decidisse mudar da coalizão do SuA 0 para a do SuA 1, em primeiro lugar ele avisaria a estes agentes nas subestações e, em seguida, o SuA 0 enviaria mensagem ao SwA 4-5 para que este alterasse o seu estado para aberto, enquanto o SuA 1 pediria ao SwA 5-6 que mudasse para fechado. A Figura 35 apresenta o novo estado do sistema elétrico após essas reconfigurações.

Figura 35 – Novas estado do sistema elétrico após LoA 5 ter migrado da coalizão do SuA 0 para coalizão do SuA 1

Cada SuA espera que todos os LoA nas regiões de fronteira realizem as ações descritas anteriormente. Após isso, os SuA enviam mensagens para os LoA de suas coalizões requerendo a atual demanda das cargas monitoradas. Após receber a resposta, uma nova iteração se inicia e o processo começa novamente.

Os processos descritos anteriormente podem ser vistos mais a frente em forma de fluxogramas e algoritmos para cada agente. A Figura 36 apresenta as ações dos agentes das chaves, enquanto o Algoritmo 10 descreve a ordem das ações. A Figura 37 apresenta

o encadeamento de ações para os agentes das subestações, enquanto o Algoritmo 11 faz o mesmo porém usando notação de algoritmo. Por fim, a Figura 38 e o Algoritmo 12 apresentam as ações do agente das cargas.

Figura 36 – Fluxograma do agente na chave (*SwA*)

No Algoritmo 10 o agente na chave executa indefinidamente o comportamento de esperar uma mensagem de um agente da subestação para alterar – ou não – o estado da chave que ele representa.

Algoritmo 10 Reconfiguração de chaves do agente na chave (*SwA*)

Requer: S {Definição do estado inicial da chave S }

```

1: loop
2:   se  $M$  então {Mensagem  $M$  recebida}
3:      $S_{novo} \leftarrow ExtraiEstado(M)$ 
4:     se  $S_{novo} \neq S$  então
5:        $S \leftarrow S_{novo}$ 
6:        $ReconfiguraChave(S)$ 
7:     fim se
8:   fim se
9: fim loop
  
```

Para o SuA executar suas ações, como descritas no Algoritmo 11, é necessária a definição do conjunto inicial dos LoA que fazem parte da coalizão do SuA (conjunto L), quais desses estão na fronteira ($L_{fronteira}$) e quais os agentes SwA da coalizão (S). Em seguida, o SuA requisita as demandas de todos o LoA de L , calcula o fluxo de potência (linha 12), e avisa aos LoA de $L_{fronteira}$ que eles podem iniciar suas operações. Nesse momento, o SuA receberá mensagens requisitando cálculos de perdas para diferentes configurações da coalizão (a saber, quando um LoA faz ou não parte dessa coalizão). O número de mensagens a serem trocadas nessa etapa é igual à 4 vezes o número de LoA

Figura 37 – Fluxograma do agente na subestação (SuA)

da coalizão na fronteira (pois cada um enviará duas mensagens, além de outras duas para cada LoA de outra coalizão na região de fronteira) – conforme linha 16. Após cumprido o critério de parada da linha 31, o SuA requisitará as alterações necessárias dos SwA correspondentes e requisitará uma vez mais as demandas dos LoA do conjunto L atualizado, iniciando uma nova iteração da funcionalidade.

Figura 38 – Fluxograma do agente na carga (LoA)

Algoritmo 11 Acompanhamento do estado da rede e reconfiguração da coalizão pelo agente na subestação (*SuA*)

Requer: L {Definição do conjunto de agentes nas cargas (*LoA*) inicial}

Requer: $L_{fronteira}$

Requer: S {Conjunto dos agentes nas chaves (*SwA*)}

```

1: para todo  $l \in L$  faça
2:   RequisitaDemanda( $l$ )
3: fim para
4: loop
5:   repita
6:     se  $M$  então {Mensagem  $M$  recebida}
7:        $R \leftarrow \text{ExtraiRemetente}(M)$ 
8:        $D \leftarrow \text{ExtraiDemanda}(M)$ 
9:       SalvaDemanda( $R, D$ )
10:    fim se
11:  até Receber mensagens de todo  $l \in L$ 
12:   $P \leftarrow \text{CalculoFluxoDePotencia}()$ 
13:  para todo  $l_{fronteira} \in L_{fronteira}$  faça
14:    EnviaMensagem( $P, l_{fronteira}$ )
15:  fim para
16:   $L_{fronteira}^{expandida} \leftarrow 4 \times L_{fronteira}$ 
17:  repita
18:    se  $M$  então {Mensagem  $M$  recebida}
19:       $A \leftarrow \text{ExtraiAssunto}(M)$ 
20:       $R \leftarrow \text{ExtraiRemetente}(M)$ 
21:      se  $A = \text{RequisitaProposta}$  então
22:        AtualizaGrafoSistemaElétrico( $R$ )
23:         $P \leftarrow \text{CalculoFluxoDePotencia}()$ 
24:        RetornaGrafoOriginalSistemaElétrico( $R$ )
25:        EnviaMensagem( $P, R$ )
26:      fim se
27:      se  $A = \text{InformaDecisão}$  então
28:        AtualizaSistemaElétrico( $R$ )
29:      fim se
30:    fim se
31:  até Receber mensagens de todo  $l_{fronteira}^{expandida} \in L_{fronteira}^{expandida}$ 
32:  para todo  $s \in S$  faça
33:    RequisitaReconfiguraçãoChaves( $s$ )
34:  fim para
35:  para todo  $l \in L$  faça
36:    RequisitaDemanda( $l$ )
37:  fim para
38: fim loop

```

Na instanciação de um LoA, é necessário que ele saiba qual o *SuA* responsável pela coalizão à qual o LoA faz parte, bem como quem são seus os LoA vizinhos (conjunto $L_{vizinhos}$). Iniciando as operações apresentadas no Algoritmo 12, o agente aguarda mensagem do SuA requisitando a demanda verificada que é prontamente enviada. Nesse momento o LoA passa a ficar esperando a próxima mensagem. Caso esse agente não esteja na fronteira da coalizão, ele ficará esperando a mensagem que, novamente, requisita a demanda (condição de saída do laço na linha 34). Caso o agente esteja na fronteira, ele receberá mensagem indicando que ele está na fronteira (linha 11) e imediatamente enviará mensagem ao SuA responsável pedindo a perda na coalizão caso ele não faça mais parte dela e envia mensagens para os LoA vizinhos ($L_{vizinhos}$) perguntando pelos respectivos SuA das coalizões deles. Recebendo as mensagens o LoA requisitará a esses SuA que eles avaliem as perdas da coalizão caso o LoA migre para elas (linhas 22 à 24).

Sempre que uma mensagem indicar no assunto que é uma mensagem sobre perdas (linha 26), o agente extrairá o resultado e guardará em seu banco de dados. Após receber todas as mensagens sobre perdas (linha 29), o agente tomará a decisão (linha 30) e informará aos SuA implicados se ele irá permanecer ou mudar de coalizão. Com isso decidido, o LoA esperará a mensagem pedindo atualização da demanda medida, e uma nova iteração terá início.

A interação entre os agentes é a chave do método, e é a responsável pelo sucesso da aplicação. A Figura 39 mostra o diagrama de sequência, evidenciando a ordem das ações entre os agentes desenvolvidos.

A próxima seção descreverá os testes e simulações realizadas com o sistema proposto.

7.3 Implementação e Simulações Computacionais – Demanda Estática

O sistema multiagente foi implementado usando a linguagem de programação Java e o framework de desenvolvimento para sistemas multiagentes JADE.

Para os testes foram utilizados dados de dois sistemas elétricos de distribuição diferentes, um composto por 11 barras e outro composto por 16 barras, ambos retirados da literatura (GRAINGER; LEE, 1982; SARAIVA, 2012; CIVANLAR et al., 1988). Nos testes, assume-se que cada subestação tem um SuA alocado, assim como em cada carga há um LoA e em cada trechos da rede existe um SwA. Para todos os testes realizados, o tempo de processamento para convergência à solução final demandou poucos segundos da execução do método.

Algoritmo 12 Tomada de decisão do agente na carga (*LoA*)

Requer: *SuA* {Agente na subestação (*SuA*) responsável}**Requer:** $L_{vizinhos}$

```

1:  $P \leftarrow \emptyset$  {Inicialização da perda da coalizão}
2: loop
3:   repita
4:     se  $M$  então {Mensagem  $M$  recebida}
5:        $EnviaDemanda(D, SuA)$ 
6:     fim se
7:   até Receber mensagem do agente  $SuA$  da coalizão
8:   repita
9:     se  $M$  então {Mensagem  $M$  recebida}
10:     $A \leftarrow ExtraiAssunto(M)$ 
11:    se  $A = LoAnaFronteiradaCoalizão$  então
12:       $RequisitaPerdaQuandoForaDaCoalizão()$ 
13:       $P \leftarrow ExtraiPerda(M)$ 
14:      para todo  $l_{vizinho} \in L_{vizinho}$  faça
15:         $RequisitaSuADaCoalizãoVizinha(l_{vizinho})$ 
16:      fim para
17:    fim se
18:    se  $A = RequisiçõesobreSuAdaCoalizão$  então
19:       $R \leftarrow ExtraiRemetente(M)$ 
20:       $EnviaSuA(SuA, R)$ 
21:    fim se
22:    se  $A = InformaçõesobreSuAdaCoalizãoVizinha$  então
23:       $SuA_{vizinho} \leftarrow ExtraiSuA(M)$ 
24:       $RequisitaPerdaQuandoNaCoalizão(SuA_{vizinho})$ 
25:    fim se
26:    se  $A = RespostasobrePerdas$  então
27:       $R \leftarrow ExtraiRemetente(M)$ 
28:       $P_R \leftarrow ExtraiPerda(M)$ 
29:      se Recebeu mensagens de todos os  $SuA_{vizinhos}$  então
30:        Tomada de decisão sobre coalizão que o  $LoA$  fará parte
31:      fim se
32:    fim se
33:  fim se
34:  até  $A = SuARequisitaDemanda$ 
35: fim loop

```

Figura 39 – Diagrama de sequência do sistema multiagente

7.3.1 Testes no Sistema de 11 Barras

A Figura 40 apresenta a topologia do sistema de 11 barras, baseada em (GRAINGER; LEE, 1982; SARAIVA, 2012) e os dispositivos alocados. A Tabela 15 apresenta as potências ativas e reativas nas cargas, enquanto a Tabela 16 apresenta a resistência e reatância dos alimentadores quando as respectivas chaves estão fechadas.

Figura 40 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 11 barras

Três cenários representando diferentes estados iniciais para o problema foram definidos. A Tabela 17 apresenta estes cenários e suas características. A Figura 41 apresenta as coalizões, cargas e subestações, bem como os estados das chaves: quando aberta, o símbolo da chave é “□”, e quando fechada, a chave é representada por “■”.

Tabela 15 – Valores das potências - sistema de 11 barras

Carga	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kvar)
2	1840	460
3	980	340
4	1790	446
5	1598	1840
6	1610	600
7	780	110
8	1150	60
9	980	130
10	1640	200

Tabela 16 – Parâmetros das linhas - sistema de 11 barras

Trecho	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
0-2	0,1233	0,4127
2-3	0,0140	0,6051
3-4	0,7463	1,2050
4-5	0,6984	0,6084
5-6	0,9053	0,7886
6-7	1,9831	1,7276
7-8	0,9053	0,7886
8-9	2,0552	1,1640
9-10	4,7953	2,7160
1-10	5,3434	3,0264

Tabela 17 – Cenários iniciais - sistema de 11 barras

Cenário	Coalizões
1	Subestação: 0; Cargas: 2, 3, 4, 5 Subestação: 1; Cargas: 6, 7, 8, 9, 10
2	Subestação: 0; Cargas: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 Subestação: 1; Cargas: 10
3	Subestação: 0; Cargas: 2, 3 Subestação: 1; Cargas: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Figura 41 – Topologia dos cenários - sistema de 11 barras: (a) topologia para cenário 1; (b) topologia para cenário 2; (c) topologia para cenário 3

A Tabela 18 apresenta as perdas elétricas para cada coalizão no cenário inicial, bem como as perdas elétricas totais de cada cenário.

Tabela 18 – Perdas para cada coalizão para cada cenário inicial - sistema de 11 barras

Cenário	Perdas por Coalizão (kW)	Perdas por Cenário (kW)
1	Coalizão 0: 117,1872 Coalizão 1: 1043,8731	1161,0603
2	Coalizão 0: 604,3742 Coalizão 1: 31,7786	636,1529
3	Coalizão 0: 6,0549 Coalizão 1: 4287,4195	4293,4745

Após a aplicação e processamento do método para a solução inicial de cada cenário, todos estes convergem para uma mesma topologia apresentada na Figura 42. Nesta topologia, a coalizão cujo SuA é o nó 0 tem os LoA nos seguintes nós: 2, 3, 4, 5, 6, 7, e 8, enquanto a coalizão onde o SuA é o nó 1 tem os LoA 9 e 10. A Tabela 19 apresenta o número de iterações que cada cenário levou para a convergência à topologia final.

Figura 42 – Topologia final - sistema de 11 barras

Tabela 19 – Iterações para convergência - sistema de 11 barras

Cenário	Número de Iterações
1	3
2	1
3	6

Na topologia final, a perda total do sistema elétrico corresponde a 533,3422 kW. As perdas da coalizão do SuA 0 são 438,4089 kW, enquanto as perdas da coalizão do SuA 1 são 94,9333 kW. Este resultado representa um decremento das perdas elétricas de 54,06% para o cenário 1, 16,16% para o cenário 2, e 87,58% para o cenário 3.

Figura 43 apresenta a redução das perdas elétricas ao longo das iterações para o cenário 3. O eixo vertical apresenta a somatória das perdas elétricas, em kW, das coalizões do sistema.

Figura 43 – Decréscimo das perdas elétricas, cenário 3 - sistema de 11 barras

7.3.2 Testes no Sistema de 16 Barras

Para a aplicação no sistema de 16 barras, obtemos os seguintes resultados. A Figura 44 apresenta a topologia do sistema. Para esse sistema, os nós 0, 1, e 2 representam as subestações de distribuição.

A Tabela 20 mostra as potências ativas e reativas nas cargas, enquanto a Tabela 21 apresenta as resistências e reatâncias dos alimentadores para os casos onde as chaves estão no estado fechado. Esse sistema é baseado em (CIVANLAR et al., 1988).

Figura 44 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 16 barras

Tabela 20 – Valores das potências - sistema de 16 barras

Carga	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kvar)
3	2000	1600
4	3000	1500
5	2000	800
6	1500	1200
7	4000	2700
8	5000	3000
9	1000	900
10	600	100
11	4500	2000
12	1000	900
13	1000	700
14	1000	900
15	2100	1000

Tabela 21 – Parâmetros das linhas - sistema de 16 barras

Trecho	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
0-3	0,075	0,1
3-4	0,08	0,11
3-5	0,09	0,18
5-6	0,04	0,04
1-7	0,11	0,11
7-8	0,08	0,11
7-9	0,11	0,11
8-10	0,11	0,11
8-11	0,08	0,11
2-12	0,11	0,11
12-13	0,09	0,12
12-14	0,08	0,11
14-15	0,04	0,04
4-10	0,04	0,04
9-13	0,04	0,04
6-15	0,12	0,12

Para o sistema de 16 barras foram definidos quatro cenários iniciais para realização dos testes. Estes cenários estão descritos na Tabela 22. A Figura 45 apresenta as coalizões, cargas, subestações e estado das chaves para todos os cenários.

Tabela 22 – Cenários iniciais - sistema de 16 barras

Cenário	Coalizões
1	Subestação: 0; Cargas: 3, 4, 5, 6
	Subestação: 1; Cargas: 7, 8, 9, 10, 11
	Subestação: 2; Cargas: 12, 13, 14, 15
2	Subestação: 0; Cargas: 3, 4, 10
	Subestação: 1; Cargas: 7, 8, 11
	Subestação: 2; Cargas: 5, 6, 9, 12, 13, 14, 15
3	Subestação: 0; Cargas: 3
	Subestação: 1; Cargas: 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13
	Subestação: 2; Cargas: 5, 6, 12, 14, 15
4	Subestação: 0; Cargas: 3, 5, 6, 14, 15
	Subestação: 1; Cargas: 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13
	Subestação: 2; Cargas: 12

As perdas elétricas para cada coalizão de cada cenário, bem como para os cenários completos, são apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Perdas para cada coalizão para cada cenário inicial - sistema de 16 barras

Cenário	Perdas por Coalizão (kW)	Perdas por Cenário (kW)
1	Coalizão 0: 32,5318	174,947
	Coalizão 1: 127,7250	
	Coalizão 2: 14,6902	
2	Coalizão 0: 13,8293	183,3431
	Coalizão 1: 106,0017	
	Coalizão 2: 63,5121	
3	Coalizão 0: 1,4154	259,6744
	Coalizão 1: 210,6075	
	Coalizão 2: 47,6515	
4	Coalizão 0: 54,1886	265,2102
	Coalizão 1: 210,6075	
	Coalizão 2: 0,4141

Figura 45 – Topologia dos cenários - sistema de 16 barras: (a) topologia para cenário 1; (b) topologia para cenário 2; (c) topologia para cenário 3; (d) topologia para cenário 4

As perdas elétricas do sistema para a topologia final, apresentada na Figura 46, é de 163,3019 kW. As perdas para a coalizão do SuA no nó 0 (composta pelos LoA 3, 4, 5, 6, e 10) são 36,5325 kW; para a coalizão do SuA 1 (composta pelos LoA 7, 8, e 11) são 106,0017 kW; e para a coalizão do SuA 2 (cujos LoA são 9, 12, 13, 14, e 15) são 20,7677 kW. Este resultado apresenta um decréscimo global na perda de energia de 6,65% para o cenário 1, 10,93% para o cenário 2, 37,11% para o cenário 3, e 38,42% para o cenário 4.

Figura 46 – Topologia final - sistema de 16 barras

Todos os cenários precisaram de 3 iterações para convergir à topologia final, como

apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 – Iterações para convergência - sistema de 16 barras

Cenário	Número de Iterações
1	3
2	3
3	3
4	3

A Figura 47 apresenta a redução das perdas elétricas ao longo das iterações para o cenário 4. Como na Figura 43 do teste no sistema de 11 barras, a soma das perdas elétricas (módulo) é apresentado no eixo vertical, enquanto o número de iterações é apresentado no eixo horizontal.

Figura 47 – Decréscimo das perdas elétricas, cenário 4 - sistema de 16 barras

7.4 Implementação e Simulações Computacionais – Demanda Dinâmica

7.4.1 Demanda Dinâmica e Dados para a Simulação

A demanda por energia elétrica nunca é constante por parte dos consumidores. Fatores como clima, estações do ano, períodos de trabalho ou férias, número de horas de luz solar, eventos televisivos que atraem muita audiência (como jogos esportivos ou o episódio final de alguma novela de sucesso no Brasil), se é dia ou noite, o tipo de estabelecimento

que utiliza a energia – como residências ou indústrias – modificam o valor de energia demandada a cada tempo e condição.

A curva da demanda de energia elétrica em um dado intervalo de tempo é conhecida como perfil de carga. A Figura 48 apresenta uma curva desse tipo para um intervalo de 24 horas.

Figura 48 – Perfil de Carga

Um sistema elétrico que conseguisse reagir às mudanças dinâmicas nas demandas de energia dos consumidores, a partir da obtenção de dados e tomada de decisão em tempo real, melhoraria determinados aspectos da rede elétrica, seja aumentando a qualidade da energia entregue, ou economizando recursos dispendidos de forma pouco efetiva ou mesmo desperdiçados.

Para esse estudo, aplicamos o método proposto anteriormente de redução das perdas elétricas no sistema de distribuição em um cenário com variação da demanda ao longo do tempo por parte dos consumidores – chamada aqui de demanda dinâmica.

Esta aplicação é possível a partir dos conceitos sobre *smart grids* já extensivamente trabalhados ou referenciados neste documento, implementado como um sistema distribuído via sistemas multiagentes, onde há leitura de dados em um ambiente descentralizado, troca de dados via redes de comunicação, e tomada de decisão distribuída, executando ações locais que, somadas, repercutem de forma global no sistema e atingem assim o objetivo proposto.

Os dados nessa simulação foram retirados de um trabalho anterior disponível na literatura (PAPATHANASSIOU et al., 2005). Naquele trabalho estão disponibilizados os perfis médios de demanda para um intervalo de um dia de 3 tipos de consumidores diferentes: residenciais, comerciais e industriais. A Figura 49 apresenta o perfil de carga médio para aqueles tipos de consumidores ao longo do dia.

Figura 49 – Perfis de Carga Médio para 3 Tipos de Consumidores: Residencial, Comercial e Industrial

Como mesmo para tipos de consumidores iguais as necessidades energéticas são diferentes, aplicou-se o método matemático de distribuição gaussiana para gerar perfis individuais baseados no perfil médio de cada tipo de consumidor, tornando assim cada perfil de carga único, ainda que seguindo um padrão médio. A variação utilizada na distribuição gaussiana foi de 50%, de forma a conseguir perfis cuja demanda variasse bastante durante as simulações.

A Figura 50 apresenta um exemplo de perfis de carga gerados com o método descrito acima utilizando uma variação de 5% a partir dos dados apresentados na Figura 49. Nesta imagem foram gerados 4 perfis de carga residenciais, 2 perfis de carga comerciais, e 4 perfis de carga industriais. Mesmo com cada perfil tendo sua curva própria, cada curva segue um traçado similar ao do perfil de carga médio de seu respectivo tipo de consumidor.

Com perfis de carga tão diversos é possível supor que a alocação de tipos de consumidores diferentes nas cargas do sistema poderão resultar em diferentes manobras de chaveamento em tempos também diferentes. Por exemplo, um sistema elétrico que possui um conjunto de indústrias em algumas cargas terá uma demanda energética própria em determinadas horas do dia. Já se essa mesma rede tivesse consumidores residenciais no lugar das indústrias, a demanda e padrão de consumo seria completamente outro.

Portanto, para as simulações, foram criados diferentes configurações de alocação de tipos de consumidores no sistema elétrico, permitindo a avaliação das operações realizadas pelo método em diferentes cenários. Nas subseções sobre as simulações e testes computacionais serão descritos os diferentes cenários criados para cada sistema elétrico utilizado como teste, bem como as operações de chaveamento realizadas para cada hora.

A seguir serão descritas a plataforma de simulação utilizada bem como as alterações na modelagem do método para o problema de demanda estática, como trabalhado anteriormente, para a demanda dinâmica, estudada nesta seção.

Figura 50 – Perfis de Carga Gerados a Partir dos Dados de Perfil de Carga Médio de Tipos Diferentes de Consumidor

7.4.2 A Plataforma Raspberry Pi e Modificações na Modelagem e Simulação

Ao contrário das demais simulações realizadas nos diferentes trabalhos reunidos nesta tese, o estudo implementado sobre a redução das perdas no sistema elétrico com demanda dinâmica foi executado utilizando uma plataforma computacional diferente do computador pessoal convencional.

As simulações foram realizadas utilizando um conjunto de dispositivos chamados Raspberry Pi. Raspberry Pi é um computador funcional com todos os componentes como microprocessador, memória RAM, e interfaces de entrada e saída construídos em um único circuito. Esses dispositivos proveem um computador completo porém com poder computacional menor que as atuais máquinas convencionais, sendo voltado à aplicações e prototipação de sistemas que demandam controladores embarcados, como sistemas distribuídos no meio físico, robótica, internet das coisas, automação residencial, e mais. A exemplo desse estudo, também há outros pesquisadores utilizando os Raspberry Pi como plataforma de simulação para problemas em sistemas elétricos de potência e *smart grids* (HONETH et al., 2014; ERIKSSON et al., 2015)

Apesar de ter um desempenho computacional mais modesto que os computadores comuns, o Raspberry Pi entrega um hardware suficiente para o desenvolvimento de diversas aplicações. O modelo utilizado, Raspberry Pi 2 Model B v1.1, tem dimensões de 8,56 cm x 5,6 cm x 2,1 cm (tamanho semelhante a um cartão de crédito convencional), um processador ARMv7 com 4 núcleos e clock de 900 MHz, 1 GB de memória RAM, 1 slot micro SD Card, 1 saída HDMI, 1 interface ethernet e 4 slots USB. A Figura 51 apresenta uma foto do modelo utilizado.

Figura 51 – Raspberry Pi 2 Model B

O Raspberry Pi é capaz de executar qualquer distribuição Linux compatível com a arquitetura ARMv7. Portanto, desenvolver software para o Raspberry Pi é relativamente fácil: o que o desenvolvedor precisa é ter o sistema operacional Linux como plataforma de desenvolvimento e produção, utilizar apenas linguagens de programação, bibliotecas e demais tecnologias que sejam compatíveis com ARM, além de se atentar às limitações de hardware presentes no dispositivo.

As configurações de hardware do Raspberry Pi permitem a execução da máquina virtual Java, necessária para o uso de agentes desenvolvidos em JADE. Além disso, a linguagem de programação Java e as bibliotecas utilizadas para criar o software dessa simulação são compatíveis com a arquitetura ARM, tornando possível a utilização nessa diferente plataforma computacional do mesmo software desenvolvido para o problema de minimização de perdas em sistemas elétricos sem variação de demanda.

Durante a fase de simulação foram utilizados 2 Raspberry Pi: em uma unidade foram instanciados todos os SuA, e na outra foram alocados os LoA e os SwA. Essa divisão ocorreu dessa forma porque os SuA são os agentes que mais demandam processamento computacional, pois são eles que executam os cálculos de fluxo de potência. Como a quantidade desses agentes é pequena, colocá-los em um mesmo computador fez com que a oferta de processamento daquela máquina fosse exclusiva para aqueles agentes, deixando os demais tipos de agentes, que demandam pouco processamento mas são instanciados em uma quantidade bem maior, disputarem entre si o processamento computacional do outro dispositivo.

Para simular a leitura de diferentes demandas no decorrer do tempo, foi utilizado um procedimento periódico de leitura de arquivo que continha os dados das demandas ao longo do dia.

Outra principal alteração entre a simulação no ambiente dinâmico para o ambiente estático diz respeito às adequações para fazer com que o sistema atuasse no ambiente com

variação das demandas.

Para tanto, o Agente SuA de cada coalizão requisita as demandas dos LoA membros, dando início ao processamento do método aqui desenvolvido, como na aplicação anterior. Após o fim da iteração, o SuA repetirá mais uma vez o pedido de demandas, até que o sistema permaneça por 10 iterações sem modificações topológicas – esse será o critério de parada definido para a simulação.

Após um intervalo de 1 minuto e meio, os agentes SuA repetirão o pedido de leitura da demanda no momento. Nessa etapa, os LoA lerão a demanda seguinte disponível em seus respectivos arquivos das demandas ao longo do dia. Essa ação serve para representar o intervalo de leitura a cada medição no sistema.

Em termos de simulação, isso significa que há uma “macro” iteração a cada 1 minuto e meio, representando a leitura em dado intervalo da demanda, e a cada iteração dessas há um espaço para diferentes avaliações sobre a reconfiguração da topologia, onde o critério de parada será 10 avaliações consecutivas onde não houveram mudanças na topologia da rede.

Sobre o intervalo de medição, foi definida uma medição a cada 3 horas e, além destas, medições adicionais na “hora zero” – solução inicial – e na última hora do dia. Assim, o método será aplicado na sequência de medições correspondentes às horas 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 e 23.

Com os dados e a plataforma de simulação apresentada, nas próximas subseções serão tratados os estudos realizados bem como os resultados obtidos.

7.4.3 Testes no Sistema de 12 Barras

O sistema de 12 barras utilizado nessa simulação é o encontrado em (CIVANLAR et al., 1988). A Tabela 25 apresenta os dados da rede do sistema elétrico.

Tabela 25 – Parâmetros das linhas - sistema de 12 barras

Trecho	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
0-2	0,075	0,1
2-3	0,08	0,11
3-4	0,09	0,12
4-5	0,04	0,04
5-6	0,03	0,03
6-7	0,04	0,01
7-8	0,1	0,1
8-9	0,11	0,11
9-10	0,09	0,12
10-11	0,055	0,11
1-11	0.1	0.1

A Figura 52 apresenta a topologia e solução inicial para o sistema de 12 barras. Como nas simulações anteriores para o problema com demanda estática apresentadas neste capítulo, o símbolo $\bullet$ representa as cargas do sistema. Cada carga tem um LoA alocado. Os SwA são representados pelos quadrados: quando o símbolo é $\square$, o estado do SwA é “aberto”, e consequentemente não há fluxo de potência naquele ramo; de outra forma, se o símbolo for um $\blacksquare$, o estado do SwA é “fechado”, havendo portanto fluxo de energia naquela linha. SuA são as subestações, representadas pelos nós 0 e 1 na figura.

Figura 52 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 12 barras

A solução inicial tem duas coalizões. SuA na subestação 0 mais os LoA nas cargas 2, 3, 4, 5 e 6 estão em uma mesma coalizão, onde o LoA na carga 6 é a atual fronteira desta coalizão. SuA na subestação 1 junto com os LoA nas cargas 7, 8, 9, 10 e 11 são membros da outra coalizão, com o LoA na carga 7 sendo a fronteira para esta coalizão.

Tabela 26 – Perfis de Consumidores Alocados para Simulações no Sistema de 12 Barras

Cenário	Perfis de Consumidores		
	Residencial	Comercial	Industrial
1	6, 7, 9, 10	8, 11	2, 3, 4, 5
2	6, 7, 8, 9	10, 11	2, 3, 4, 5
3	5, 6, 7, 8, 9, 10	11	2, 3, 4
4	3, 4, 5, 6, 7	2, 8	9, 10, 11
5	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	-	2, 3, 4

Para as simulações foram criados 5 diferentes cenários com diferentes alocações de perfis de consumidores para as diversas cargas do sistema. A Tabela 26 apresenta os cenários montados.

A seguir, da Figura 53 até a Figura 57 são apresentados os gráficos das perdas durante o intervalo de um dia da operação. Nesses gráficos, a linha azul significa as perdas calculadas no sistema a cada medição; já as linhas verdes representam as perdas calculadas após a aplicação do método aqui apresentado. Quando há reconfiguração possível que reduza essas perdas, ela é executada e, por consequência, é possível perceber nos gráficos que a linha verde se distancia da azul.

Acompanhando esses gráficos estão disponíveis, contabilizadas da Tabela 27 até a Tabela 31, os valores numéricos das perdas no início e no final de cada momento de medição e execução do método. Nestas tabelas as linhas destacadas em negrito indicam os momentos em que foi possível reduzir as perdas para a rede.

Examinando estas tabelas é possível identificar que algumas das reduções são bastante pequenas, como por exemplo no cenário 1 hora 9 (Tabela 27 – redução de 31,5757 kW para 31,5696), no cenário 3 hora 3 (Tabela 29 – de 2,2378 kW para 2,2179 kW), ou ainda no cenário 4 hora 3 (Tabela 30 – de 2,0831 kW para 2,0652 kW). Isso mostra que, matematicamente, o método proposto consegue encontrar até pequenos ganhos na redução das perdas, e realiza a reconfiguração para atingi-la. Por outro lado, em termos de engenharia, seria interessante estudar se a realização de operações que permitem otimizações dessa magnitude são necessárias ou poderiam ser descartadas.

Por outro lado, há reconfigurações que permitem uma notável redução nas perdas do sistema. Para esse conjunto de casos, citam-se as encontradas no cenário 1 hora 18 (Tabela 27 – de 20,4646 kW para 16,2621 kW), a do cenário 2 hora 15 (Tabela 28 – de 64,3060 kW para 53,3980 kW) ou a apresentada no cenário 5 hora 15 (Tabela 31 – 32,6846 kW para 28,8459).

Há também grandes reduções de perdas em algumas medições na “hora 0”, como no caso do cenário 1 (Tabela 27 – de 7,4651 kW para 2,0908 kW). Isso acontece porque a solução inicial utilizada para estes casos estava distante da ideal para a configuração de cargas alocadas.

Para além dos gráficos apresentando as perdas e as tabelas com os respectivos valores numéricos, são também apresentadas as alterações topológicas no sistema elétrico para cada instante em cada cenário das simulações. A Tabela 32 apresenta as operações de chaveamento realizadas a cada momento mensurado, enquanto a Tabela 33 apresenta os agentes LoA modificados a cada iteração. Nesta última tabela, cada célula identifica qual é o agente que está se movendo e, entre parêntesis, qual a coalizão de origem e qual a coalizão de destino do mesmo.

Figura 53 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 1

Tabela 27 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 1

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	7,4651	2,0908
3	2,5691	2,5691
6	3,1586	3,1586
9	31,5757	31,5696
12	47,9742	44,1014
15	29,1141	29,1141
18	20,4646	16,2621
21	38,8622	36,7010
23	10,3816	10,3114

Figura 54 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 2

Tabela 28 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 2

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	4,8770	4,7261
3	3,1538	3,1538
6	7,6591	7,5057
9	48,8966	48,8966
12	48,6775	48,6775
15	64,3060	53,3980
18	15,0961	15,0961
21	23,0509	23,0509
23	8,3969	8,3757

Figura 55 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 3

Tabela 29 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 3

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	4,4771	4,1796
3	2,2378	2,2179
6	4,8683	4,8683
9	22,6904	22,6904
12	39,4826	39,4826
15	16,4776	15,9216
18	14,4602	14,4602
21	18,6436	18,0866
23	11,9313	11,9313

Figura 56 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 4

Tabela 30 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 4

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	3,5914	3,4669
3	2,0831	2,0652
6	4,9690	4,6532
9	17,5435	17,5435
12	25,6067	23,2485
15	32,6846	28,8459
18	19,4417	15,1864
21	23,4247	22,0964
23	9,9820	9,0759

Figura 57 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 5

Tabela 31 – Perdas para o Sistema de 12 Barras – Cenário 5

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	4,3326	4,3316
3	2,5194	2,5194
6	4,8129	4,6628
9	9,2799	8,5896
12	28,7778	27,8564
15	20,9654	20,9654
18	16,9370	16,2893
21	22,2889	21,7428
23	8,5989	7,7471

Os dados na Tabela 32 identificam as operações de chaveamento realizadas. Essas operações são sempre executadas em pares, significando que a cada ramo “desligado” (a chave deste ramo muda para o estado “aberto”), um outra linha antes sem fluxo de energia será “ligada” (a chave desta muda o estado para “fechado”). Isso permite, a depender dos ramos escolhidos pelos agentes, garantir que uma carga terá seu alimentador modificado mas continuará a receber energia, porém a partir de outro caminho.

Tabela 32 – Operações de Chaveamento por Hora para Simulações no Sistema de 12 Barras

Hora	Cenários				
	1	2	3	4	5
0				Abre 7-8	
	Abre 5-6	Abre 5-6	Abre 5-6	Fecha 6-7	Abre 5-6
	Fecha 6-7	Fecha 6-7	Fecha 6-7	Abre 8-9	Fecha 6-7
3				Fecha 7-8	
	-	-	Abre 4-5	Abre 7-8	-
			Fecha 5-6	Fecha 8-9	
6		Abre 4-5		Abre 8-9	Abre 4-5
	-	Fecha 5-6	-	Fecha 7-8	Fecha 5-6
9	Abre 6-7	-	-	-	Abre 5-6
	Fecha 5-6				Fecha 4-5
12	Abre 5-6	-	-	Abre 7-8	Abre 4-5
	Fecha 6-7			Fecha 8-9	Fecha 5-6
15	-	Abre 5-6	Abre 5-6	Abre 8-9	-
		Fecha 4-5	Fecha 4-5	Fecha 7-8	
18	Abre 6-7				
	Fecha 5-6	-	-	Abre 7-8	Abre 5-6
	Abre 7-8			Fecha 8-9	Fecha 4-5
21					
	Abre 6-7	-	Abre 6-7	Abre 6-7	Abre 6-7
	Fecha 7-8		Fecha 5-6	Fecha 7-8	Fecha 5-6
23					Fecha 6-7
				Abre 7-8	
	Abre 5-6	Abre 6-7	-	Fecha 6-7	Abre 6-7
	Fecha 6-7	Fecha 5-6		Abre 8-9	Fecha 7-8
				Fecha 7-8	

Em termos do sistema multiagente aqui proposto, essa alteração tem como consequência a mudança de coalizão de um ou mais agentes nas fronteiras. Por exemplo, no cenário 1 hora 0, as operações de chaveamento são “Abre 5-6” e “Fecha 6-7”. Isso significa que o SwA na linha 5-6 será aberto, enquanto o SwA no ramo 6-7 será fechado, alterando a coalizão do LoA na carga 6, que passará da coalizão alimentada pelo SuA 0 para a coalizão que recebe energia do SuA 1.

Por conta da natureza dinâmica do problema, aquelas operações realizadas no cenário 1 hora 0 reconfigurarão a topologia de operação da rede, tornando então esta nova topologia a solução atual para o problema. Isso fará com que as futuras avaliações para realização de operações de chaveamento da rede levem em conta a última topologia configurada como solução de partida.

É o que ocorrerá, por exemplo, no cenário 1 hora 9. As operações de chaveamento descritas como “Abre 6-7” e “Fecha 5-6” trazem de volta o LoA na carga 6 da coalizão alimentada pelo SuA 1 para aquela energizada pelo SuA 0.

Para uma perspectiva diferente das alterações topológicas realizadas a cada execução do método, a Tabela 33 apresenta os agentes afetados a cada reconfiguração realizada.

Tabela 33 – Movimentos dos agentes para o sistema de 12 barras – cada célula destaca o LoA agente movimentado e, entre parêntesis, a coalizão de origem seguida da coalizão destino

Hora	Cenários				
	1	2	3	4	5
0	LoA 6 (0 → 1)	LoA 6 (0 → 1)	LoA 6 (0 → 1)	LoA 7 (1 → 0) LoA 8 (1 → 0)	LoA 6 (0 → 1)
3	-	-	LoA 5 (0 → 1)	LoA 8 (0 → 1)	-
6	-	LoA 5 (0 → 1)	-	LoA 8 (1 → 0)	LoA 5 (0 → 1)
9	LoA 6 (1 → 0)	-	-	-	LoA 5 (1 → 0)
12	LoA 6 (0 → 1)	-	-	LoA 8 (0 → 1)	LoA 5 (0 → 1)
15	-	LoA 5 (1 → 0)	LoA 5 (1 → 0)	LoA 8 (1 → 0)	-
18	LoA 6 (1 → 0) LoA 7 (1 → 0)	-	-	LoA 8 (0 → 1)	LoA 5 (1 → 0)
21	LoA 7 (0 → 1)	-	LoA 6 (1 → 0)	LoA 7 (0 → 1)	LoA 6 (1 → 0) LoA 7 (1 → 0)
23	LoA 6 (0 → 1)	LoA 6 (1 → 0)	-	LoA 7 (1 → 0) LoA 8 (1 → 0)	LoA 7 (0 → 1)

7.4.4 Testes no Sistema de 16 Barras

A Figura 58 apresenta a topologia e solução inicial para as simulações no sistema de 16 barras. Nessa solução há três coalizões, compostas respectivamente pelo SuA na subestação 0 e os LoA nas cargas 3, 5 e 6; SuA na subestação 1 e os LoA em 4, 7, 8, 9, 10, 11 e 13; e o SuA na subestação 2, com os LoA de 12, 14 e 15.

Figura 58 – Diagrama da rede elétrica - sistema de 16 barras

A Tabela 34 apresenta os 5 cenários criados para as simulações. A exemplo dos estudos realizados no sistema anterior, aqui também são fornecidos gráficos e tabelas detalhando os resultados. Da Figura 59 até a Figura 63, são ilustradas as perdas elétricas para cada cenário nos momentos anteriores e posteriores à execução do método. Respectivamente, os valores numéricos para essas perdas são apresentadas da Tabela 35 à Tabela 39.

Tabela 34 – Perfis de Consumidores Alocados para Simulações no Sistema de 16 Barras

Cenário	Perfis de Consumidores		
	Residencial	Comercial	Industrial
1	4, 7, 8, 9, 10, 11, 13	12, 14, 15	3, 5, 6
2	4, 7, 8, 9, 10, 11, 13	3, 5, 6	12, 14, 15
3	4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15	11	3, 5
4	4, 7, 8, 9, 10, 11, 13	3, 5, 15	6, 12, 14
5	3, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 15	11	7, 8

Figura 59 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 1

Tabela 35 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 1

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	2,4414	2,3016
3	2,4735	2,3665
6	4,8723	4,3212
9	25,4977	21,1949
12	18,1149	17,9610
15	16,3861	16,1462
18	12,7636	12,7636
21	20,0271	19,2522
23	8,2405	7,8260

Figura 60 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 2

Tabela 36 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 2

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	2,9608	2,7422
3	3,2427	2,7971
6	2,0870	1,9301
9	30,8598	27,4023
12	23,9722	23,5638
15	37,0330	36,5476
18	22,5814	22,5297
21	11,0689	10,3640
23	4,5303	4,5303

Figura 61 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 3

Tabela 37 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 3

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	3,0033	2,2979
3	1,5266	1,4492
6	2,0066	1,9207
9	8,7865	8,7865
12	11,8675	11,7845
15	17,7510	17,6704
18	11,5984	11,5984
21	16,5184	13,5158
23	6,4810	6,2319

Figura 62 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 4

Tabela 38 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 4

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	2,3012	1,9659
3	3,1354	3,0994
6	2,3824	2,3253
9	24,0166	23,9219
12	18,0428	17,7313
15	18,1019	18,1019
18	14,3043	13,8976
21	24,0190	17,8138
23	5,4531	5,0233

Figura 63 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 5

Tabela 39 – Perdas para o Sistema de 16 Barras – Cenário 5

Perdas Calculadas (kW) por Iteração		
Hora	Início	Fim
0	5,5161	3,2569
3	1,4779	1,4566
6	1,1925	1,1925
9	9,5596	9,5596
12	14,2758	14,2758
15	17,7583	17,7583
18	17,6374	17,6024
21	13,6968	12,7406
23	5,3951	5,1449

Esta rede é um pouco mais complexa que aquela do sistema de 12 barras. Além dela ter três coalizões, as fronteiras destas coalizões tem mais que apenas um LoA. Para todos os cenários, a execução do método realiza um considerável número de operações de chaveamento durante toda a execução, modificando sobremaneira a topologia da rede. É possível acompanhar essas operações na Tabela 40, bem como os consequentes agentes que migraram entre diferentes coalizões na Tabela 41.

Uma característica particular nas operações para a simulação no sistema de 16 barras é o grande número de agentes modificados em um mesmo momento, algo que no sistema de 12 barras só ocorreu quatro vezes. Ainda que mais de um agente mude de coalizão num mesmo momento de execução do método, essas operações sempre são avaliadas e executadas de forma sequencial, devido a própria natureza da rede. Por exemplo, no cenário 2 hora 0 os LoA 4 e LoA 10 mudam da subestação 1 para a 0. Entretanto, o LoA 10 só conseguiria migrar se, antes, o LoA 4 tivesse realizado essa operação.

7.5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Sistemas que trabalham de forma distribuída, como os sistemas multiagentes, tem importância fundamental para aplicações nas redes elétricas inteligentes, sejam como ferramentas que servem para “perceber” o ambiente (fazer medições), trocar dados e executar ações, com a tomada de decisão sendo realizada por outra ferramenta computacional, ou sejam como ferramentas onde a tomada de decisão é realizada pelo próprio sistema multiagente em si, como a aplicação apresentada nesse capítulo.

A funcionalidade de minimização das perdas elétricas aqui desenvolvida provê uma forma do sistema reduzir esse desperdício de recursos em tempo-real, reagindo à mudanças dinâmicas na rede de acordo com o comportamento dos próprios usuários.

Essa é, de fato, uma funcionalidade que causaria muito impacto ao sistema de distribuição convencional, pois a reconfiguração da rede acaba por modificar outras variáveis

Tabela 40 – Operações de Chaveamento por Hora para Simulações no Sistema de 16 Barras

Hora	Cenários				
	1	2	3	4	5
0			Abre 4-10		Abre 14-15
			Fecha 3-4	Abre 9-13	Fecha 6-15
	Abre 4-10		Fecha 3-4	Abre 9-13	Abre 4-10
	Fecha 3-4	Abre 4-10	Abre 8-10	Fecha 12-13	Fecha 3-4
	Abre 5-6	Fecha 3-4	Fecha 4-10	Abre 4-10	Abre 9-13
	Fecha 6-15	Abre 8-10	Abre 5-6	Fecha 3-4	Fecha 12-13
	Abre 9-13	Fecha 4-10	Fecha 6-15	Abre 14-15	Abre 8-10
3	Fecha 12-13		Abre 9-13	Fecha 6-15	Fecha 4-10
			Fecha 12-13		Abre 7-9
					Fecha 9-13
	Abre 8-10				
	Fecha 4-10	Abre 14-15	Abre 6-15	Abre 12-13	Abre 6-15
	Abre 6-15	Fecha 6-15	Fecha 5-6	Fecha 9-13	Fecha 14-15
	Fecha 5-6				
6	Abre 5-6				
	Fecha 6-15		Abre 4-10	Abre 6-15	
	Abre 4-10	Abre 6-15	Fecha 8-10	Fecha 14-15	
	Fecha 8-10	Fecha 14-15	Abre 5-6	Abre 8-10	-
	Abre 12-13		Fecha 6-15	Fecha 4-10	
	Fecha 9-13				
9	Abre 3-4	Abre 4-10		Abre 4-10	
	Fecha 4-10	Fecha 8-10		Fecha 8-10	
	Abre 6-15	Abre 14-15	-	Abre 3-4	-
	Fecha 5-6	Fecha 6-15		Fecha 4-10	
12		Abre 8-10			
	Abre 4-10	Fecha 4-10	Abre 8-10	Abre 4-10	
	Fecha 3-4	Abre 6-15	Fecha 4-10	Fecha 3-4	-
15		Fecha 14-15			
	Abre 8-10	Abre 4-10	Abre 7-9		
	Fecha 4-10	Fecha 8-10	Fecha 9-13	-	-
18		Abre 3-4			
		Fecha 4-10			
	-	Abre 4-10	-	Abre 14-15	Abre 14-15
21		Fecha 3-4		Fecha 6-15	Fecha 6-15
		Abre 8-10	Abre 6-15	Abre 6-15	
	Abre 9-13	Fecha 4-10	Fecha 5-6	Fecha 14-15	Abre 6-15
	Fecha 12-13	Abre 9-13	Abre 9-13	Abre 8-10	Fecha 14-15
		Fecha 12-13	Fecha 7-9	Fecha 4-10	Abre 9-13
				Abre 9-13	Fecha 7-9
23				Fecha 12-13	
			Abre 7-9	Abre 12-13	
	Abre 4-10		Fecha 9-13	Fecha 9-13	Abre 7-9
	Fecha 8-10	-	Abre 5-6	Abre 14-15	Fecha 9-13
			Fecha 6-15	Fecha 6-15	

Tabela 41 – Movimentos dos agentes para o sistema de 16 barras – cada célula destaca o LoA agente movimentado e, entre parêntesis, a coalizão de origem seguida da coalizão destino

Cenários					
Hora	1	2	3	4	5
0	LoA 4 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 4 ($1 \rightarrow 0$) LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 6 ($0 \rightarrow 2$)	LoA 13 ($1 \rightarrow 2$)	LoA 15 ($2 \rightarrow 0$)
	LoA 6 ($0 \rightarrow 2$)		LoA 13 ($1 \rightarrow 2$)	LoA 4 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 4 ($1 \rightarrow 0$)
	LoA 13 ($1 \rightarrow 2$)		LoA 4 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 15 ($2 \rightarrow 0$)	LoA 13 ($1 \rightarrow 2$)
	LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)		LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 9 ($1 \rightarrow 2$)
3	LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 15 ($2 \rightarrow 0$)	LoA 6 ($2 \rightarrow 0$)	LoA 13 ($2 \rightarrow 1$)	LoA 15 ($0 \rightarrow 2$)
	LoA 6 ($2 \rightarrow 0$)				
6	LoA 6 ($0 \rightarrow 2$)	LoA 15 ($0 \rightarrow 2$)	LoA 10 ($0 \rightarrow 1$)	LoA 15 ($0 \rightarrow 2$)	-
	LoA 10 ($0 \rightarrow 1$)		LoA 6 ($0 \rightarrow 2$)	LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	
	LoA 13 ($2 \rightarrow 1$)				
9	LoA 4 ($0 \rightarrow 1$)	LoA 10 ($0 \rightarrow 1$)	-	LoA 10 ($0 \rightarrow 1$)	-
	LoA 6 ($2 \rightarrow 0$)	LoA 15 ($2 \rightarrow 0$)		LoA 4 ($0 \rightarrow 1$)	
12	LoA 4 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 10 ($1 \rightarrow 0$) LoA 15 ($0 \rightarrow 2$)	LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 4 ($1 \rightarrow 0$)	-
15	LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 10 ($0 \rightarrow 1$) LoA 4 ($0 \rightarrow 1$)	LoA 9 ($1 \rightarrow 2$)	-	-
18	-	LoA 4 ($1 \rightarrow 0$)	-	LoA 15 ($2 \rightarrow 0$)	LoA 15 ($2 \rightarrow 0$)
21	LoA 13 ($1 \rightarrow 2$)	LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	LoA 6 ($2 \rightarrow 0$)	LoA 15 ($0 \rightarrow 2$)	LoA 15 ($0 \rightarrow 2$)
		LoA 13 ($1 \rightarrow 2$)	LoA 9 ($2 \rightarrow 1$)	LoA 13 ($1 \rightarrow 2$)	LoA 9 ($2 \rightarrow 1$)
				LoA 10 ($1 \rightarrow 0$)	
23	LoA 10 ($0 \rightarrow 1$)	-	LoA 9 ($1 \rightarrow 2$)	LoA 13 ($2 \rightarrow 1$)	LoA 9 ($1 \rightarrow 2$)
			LoA 6 ($0 \rightarrow 2$)	LoA 15 ($2 \rightarrow 0$)	

do sistema, alterando o provimento de outros serviços. Por conta disso, imagina-se que ela só seria aplicada a redes elétricas inteligentes em avançado estado de implementação, que contassem com tecnologias robustas e confiáveis, com planos de contingência que permitissem o bom aproveitamento dessa função.

Trabalhos futuros sobre este tópico incluem mais testes e modificações na modelagem do problema. Aplicar esse método a sistemas de distribuição maiores poderia indicar casos não tratados pela solução atual, implicando no melhoramento do método para que ele resolvesse situações não captadas atualmente.

Modificações na modelagem matemática, como a adição de novas restrições, pode contribuir para a avaliação do comportamento do método em simulações mais realistas. A avaliação de restrições como limites de fluxo nos trechos e valor mínimo de tensão nas cargas poderia ser facilmente cumprida a partir do cálculo de fluxo de potência realizado pelos agentes SuA.

A expansão dessa metodologia para agregar formulações multi-objetivo também é um caminho de pesquisa interessante. Como a reconfiguração afeta sobremaneira outras variáveis na rede elétrica, casos onde há conflitos de interesse na função objetivo – por exemplo, quando se leva em conta tanto a minimização das perdas elétricas quanto a

redução do número de ações de chaveamento – pode servir para encontrar soluções mais contundentes para o problema num âmbito mais generalista.

Outra importante frente de pesquisa apresentada neste capítulo é a validação e criação de protótipos embarcados para serem utilizados nas funcionalidades de *smart grids*, como a implementação em dispositivos do tipo Raspberry Pi. Certamente há um amplo leque de possibilidades alcançáveis a partir da prototipação dessas aplicações em ambientes de simulação no “mundo-real”, que utilizam sistemas embarcados nessas placas e permitem um novo nível de simulações, estudos e avaliações.

A versão “estática” desse estudo, com sua modelagem e resultados obtidos, foi publicada na conferência *VIII IEEE World Congress on Computational Intelligence – XI IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, um dos principais eventos sobre inteligência computacional do IEEE-CIS (*Computational Intelligence Society*), realizado em 2014 na cidade de Pequim, China (SARAIVA; ASADA, 2014).

O estudo com simulações para o sistema no ambiente de cargas dinâmicas está sendo preparado para submissão em uma revista da área.

Considerações Finais

8.1 Conclusões

Esta tese tratou de modelagens, implementações e simulações de uma série de sistemas multiagentes aplicados a diferentes funcionalidades esperadas a serem disponibilizadas nas redes elétricas inteligentes. Os estudos realizados foram direcionados para a classificação de cargas não-lineares em redes de distribuição, gerenciamento de tensão utilizando bancos de capacitores, e reconfiguração topológica para redução das perdas elétricas em sistemas elétricos de distribuição, incluindo em ambientes onde há variação dinâmica de demanda das cargas.

No cenário das redes elétricas inteligentes, teremos um sistema elétrico dotado de diferentes dispositivos alocados nos mais variados pontos da rede, provendo uma série de sensores para o acompanhamento de diferentes medidas, uma rede de comunicação interligando esses dispositivos, e mais equipamentos disponíveis responsáveis pela execução de ações de reconfiguração na rede.

Como um sistema de arquitetura distribuída, faz-se necessário que métodos compatíveis a cenários de aplicações com essas características sejam utilizados em estudos e simulações para as redes inteligentes. A partir do momento em que a comunicação assume um papel central nessa tecnologia, em especial quando relacionada a problemas ou funcionalidades na operação do sistema elétrico, métodos e técnicas que objetivam solucionar algum problema ou prover alguma funcionalidade para os *smart grids* deverão, sem dúvida, levar em conta a presença da comunicação em seu modelo de resolução.

Por conta disso, a escolha pela utilização de métodos distribuídos como os sistemas multiagentes torna-se natural e salutar diante dos desafios apresentados. Esses sistemas tem características muito próximas ao tipo de cenário imposto pelas redes elétricas inteligentes, e a flexibilidade dos mesmos para o uso hibridizado com outros métodos inteligentes, ou mesmo quando apenas a interação entre os agentes consegue solucionar o problema trabalhado, são vantagens a serem consideradas para utilização destes sistemas.

Os sistemas multiagentes também são passíveis de serem utilizados nas mais diferentes

etapas do estudo ou mesmo da implementação no “mundo real” das funcionalidades de redes elétricas inteligentes.

Nesta tese os métodos que utilizam sistemas multiagentes foram todos aplicados na etapa de projeto de funcionalidades, quando estudos de simulações computacionais são comuns para verificar o comportamento do método. Entretanto, não há impedimento para utilização das mesmas implementações de multiagentes na etapa de protótipo, quando uma versão preliminar da funcionalidade é testada em cenários próximos ao ambiente real de aplicação. Inclusive, como essa tese apresentou, é possível utilizar dispositivos computacionais simples e mais baratos que suportam a execução de sistemas multiagentes, como o Raspberry Pi, para essa etapa.

E para além das fases citadas anteriormente, também é possível utilizar esses sistemas no próprio produto final. A redução de custos consequente da utilização de uma mesma base de software nas diferentes etapas é algo a ser ressaltado para potenciais projetistas dessas funcionalidades.

Como destacado por pesquisadores e verificado em projetos-piloto sobre o tema, há três fases distintas relacionadas com a implementação de funcionalidades para os *smart grids* – a primeira, mais voltada para acompanhamento de medições e cujas aplicações não exigem reconfigurações do sistema elétrico; a segunda, com tomada de decisão e reconfigurações de impacto mais localizado em partes do sistema elétrico; e a terceira, com funcionalidades que exigem alto grau de coordenação e cujas ações de reconfiguração impactam sobremaneira a rede elétrica. Os sistemas multiagentes também são versáteis o suficiente para serem empregados em funcionalidades nessas três diferentes fases, como apresentou-se nessa tese, que modelou funcionalidades compatíveis com as descrições de cada fase apresentada utilizando a citada tecnologia.

Um dos objetivos da presente tese foi validar a utilização de sistemas multiagentes como uma interessante ferramenta a ser utilizada na simulação das redes elétricas inteligentes. Com o embasamento teórico desenvolvido, que aproxima sistemas multiagentes e *smart grids* a partir dos conceitos de sistemas computacionais distribuídos e inteligência artificial, bem como as funcionalidades desenvolvidas e apresentadas durante o trabalho, acreditamos que esse documento corresponde às expectativas e cumpre a meta estabelecida.

Entretanto, ao invés do trabalho esgotar o tema abordado, pelo contrário, abre possibilidades de pesquisa tanto a partir do aprofundamento dos métodos e simulações relatados quanto do desenvolvimento de outras frentes, como a teórica, modelagem e simulações de novas funcionalidades, e mesmo pedagógica, para a utilização de sistemas multiagentes ou sistemas computacionais distribuídos aplicados às redes elétricas inteligentes.

8.2 Trabalhos Futuros

O desenvolvimento das redes elétricas inteligentes abre uma ampla área de possibilidades para estudos e pesquisas de vários tipos, entre as quais pode-se citar as simulações computacionais, simulações físicas, prototipação de funcionalidades, testes com redes de comunicação, testes com tomada de decisão, desenvolvimento de novos algoritmos para alguma funcionalidade do *smart grid*, criação de novos equipamentos, segurança, entre outras.

Os capítulos de aplicações deste trabalho apresentam diversos exemplos de trabalhos futuros específicos para cada método apresentado.

Mas além deles, é possível a partir dos resultados positivos deste estudo, estender o conceito de utilização de sistemas multiagentes para outras funcionalidades dos *smart grids*, bem como combinar objetivos distintos, criando-se problemas multiobjetivo. Há uma ampla variedade de problemas e novas funcionalidades a serem implementadas nas redes elétricas inteligentes, e a comunidade de desenvolvedores e investigadores terá um imenso campo de pesquisa a ser explorado nas próximas décadas.

Referências

- ABBAS, W.; SAQIB, M. A. Effect of nonlinear load distributions on total harmonic distortion in a power system. In: IEEE. **International Conference on Electrical Engineering**. Lahore: IEEE, 2007. p. 1–6. ISBN 1-4244-0893-8.
- AHUJA, A.; PAHWA, A. Using ant colony optimization for loss minimization in distribution networks. In: IEEE. **Annual North American Power Symposium**. Iowa: IEEE, 2005. p. 470–474. ISBN 0-7803-9255-8.
- ALLIANCE, G.; CENTER, S. G. P. **2014 Grid Modernization Index**. USA, 2014.
- ALMEIDA, P. E. M. de; EVSUKOFF, A. G. Sistemas fuzzy. In: REZENDE, S. O. (Ed.). **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2003. p. 169–202. ISBN 85-204-1683-7.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica (Revião 6)**. Brasília, 2014.
- BARAN, M.; WU, F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989. ISSN 0885-8977.
- BELLIFEMINE, F. L.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. **Developing Multi-Agent Systems with JADE**. London: Wiley, 2007. ISBN 9780470057476.
- BERNARDES, W. M. S. et al. Um estudo acerca de equipamentos eletromédicos radiológicos na qualidade da energia elétrica em estabelecimentos assistenciais de saúde. In: SBA. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Goiânia: SBA, 2012. ISSN 2177-6164.
- BI, T. et al. The implication and implementation of smart grid in China. In: IEEE. **Power & Energy Society General Meeting**. Minneapolis: IEEE, 2010. p. 1–5. ISSN 1944-9925.
- BIDGOLI, M. A.; SOORI, A.; BINA, M. T. A new phase sequence detector for the three-phase rotary loads. In: IEEE. **Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference**. Tehran: IEEE, 2011. p. 529–533. ISBN 978-1-61284-422-0.

- BORDINI, R. H. et al. A survey of programming languages and platforms for multi-agent systems. **Informatica**, SDI, v. 30, n. 1, p. 33–44, 2006. ISSN 0350-5596.
- BOTEA, A.; RINTANEN, J.; BANERJEE, D. Optimal reconfiguration for supply restoration with informed A* search. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 3, n. 2, p. 583–593, 2012. ISSN 1949-3053.
- BRAY, T. et al. **Extensible markup language (XML) 1.0**. Massachusetts: W3C, 2008.
- BRESCIANI, P. et al. Tropos: An agent-oriented software development methodology. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, Springer, v. 8, n. 3, p. 203–236, 2004. ISSN 1387-2532.
- BROWN, R. Impact of smart grid on distribution system design. In: **Power & Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**. Pittsburgh: IEEE, 2008. p. 1–4. ISSN 1932-5517.
- CHAER, T. A.; RAMBAULT, L.; GAUBERT, J. P. Electrical energy quality: Modeling and H^∞ control of a three-phase shunt active filter. **International Journal of Control, Automation and Systems**, Springer, v. 10, n. 1, p. 36–49, 2012. ISSN 1598-6446.
- CIVANLAR, S. et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988. ISSN 0885-8977.
- COULOURIS, G.; DOLLIMORE, J.; KINDBERG, T. **Distributed systems: concepts and design**. Harlow: Addison-Wesley, 2005. ISBN 0321263545.
- CROCKFORD, D. **JSON: The fat-free alternative to XML**. 2006.
- DELOACH, S. A. The mase methodology. In: BERGENTI, F.; GLEIZES, M.-P.; ZAMBONELLI, F. (Ed.). **Methodologies and Software Engineering for Agent Systems**. Boston: Springer, 2004. p. 107–125. ISBN 978-1-4020-8057-9.
- DIMEAS, A.; HATZIARGYRIOU, N. A multi-agent system for microgrids. In: VOUIROS, G.; PANAYIOTOPOULOS, T. (Ed.). **Methods and Applications of Artificial Intelligence**. Berlin: Springer, 2004, (Lecture Notes in Computer Science, v. 3025). p. 447–455. ISBN 978-3-540-21937-8.
- DIXON, M. Innovative volt/var management provides payback. In: **IEEE Transmission & Distribution Conference & Exposition**. Atlanta: IEEE, 2001. p. 461–468. ISBN 0-7803-7285-9.
- DORIGO, M.; STTIZLE, T. **Ant Colony Optimization**. Cambridge: MIT Press, 2004. ISBN 9780262042192.
- DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. **Pattern classification**. New York: John Wiley, 2001. ISBN 978-0-471-05669-0.
- EC – European Commission. **European SmartGrids Technology Platform: Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future**. Belgium: European Communities, 2006. ISBN 92-79-01414-5.

_____. **Energy 2020: A Strategy for Competitive, Sustainable and Secure Energy**. Belgium: Publications Office of the European Union, 2011. ISBN 978-92-79-18869-5.

_____. **SmartGrids SRA 2035 - Strategic Research Agenda Update of the SmartGrids SRA 2007 for the needs by the year 2035**. Belgium: European Communities, 2012.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to evolutionary computing**. Berlin: Springer-Verlag, 2003. ISBN 978-3-642-07285-7.

ERIKSSON, M. et al. Multiagent-based distribution automation solution for self-healing grids. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 62, n. 4, p. 2620–2628, 2015. ISSN 0278-0046.

FANNING, R. Distribution vision 2010: planning for automation. In: IEEE. **Power Systems Conference and Exposition**. New York: IEEE, 2004. p. 1692–1693. ISBN 078038718X.

FILHO, W. de P. P. **Engenharia de Software – Fundamentos, Métodos e Padrões**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. ISBN 8521613393.

FU, L. et al. An improved discrete fourier transform-based algorithm for electric network frequency extraction. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, IEEE, v. 8, n. 7, p. 1173–1181, July 2013. ISSN 1556-6013.

GARCIA, A. C. B.; SICHMAN, J. S. Agentes e sistemas multiagentes. In: REZENDE, S. O. (Ed.). **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2003. p. 269–306. ISBN 85-204-1683-7.

GLOVER, F.; LAGUNA, M. **Tabu Search**. Boston: Springer, 1997. ISBN 978-0-7923-9965-0.

GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of Metaheuristics**. Boston: Springer, 2003. ISBN 978-0-306-48056-0.

GRAINGER, J. J.; LEE, S. H. Capacity release by shunt capacitor placement on distribution feeders: A new voltage-dependent model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, v. 101, n. 5, p. 1236–1244, 1982. ISSN 0018-9510.

GUERRA, W.; UNSIHUAY-VILA, C.; KAGAN, N. Impacto da Geração Distribuída na Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Busca em Vizinhança Variável. In: **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. São Paulo: SOBRAPO, 2011.

HAGAN, M. T.; MENHAJ, M. B. Training feedforward networks with the marquardt algorithm. **IEEE Transactions on Neural Networks**, IEEE, v. 5, n. 6, p. 989–993, 1994. ISSN 1045-9227.

HAYASHI, M.; HUGHES, L. The fukushima nuclear accident and its effect on global energy security. **Energy Policy**, Elsevier, v. 59, p. 102–111, 2013. ISSN 0301-4215.

HAYKIN, S. S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. ISBN 978-0132733502.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. Cambridge: MIT Press, 1992. ISBN 9780262082136.

HONETH, N. et al. Development of a laboratory platform for distributed grid management applications. In: **Power & Energy Society General Meeting**. National Harbor: IEEE, 2014. p. 1–5.

HORLING, B.; LESSER, V. A survey of multi-agent organizational paradigms. **The Knowledge Engineering Review**, Cambridge University Press, v. 19, n. 04, p. 281–316, 2004. ISSN 0269-8889.

HSU, Y.; LU, F. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 13, n. 4, p. 1265–1271, 1998. ISSN 0885-8950.

ISSICABA, D. **Block-Oriented Agent-Based Architecture to Support the Power Distribution System Operation**. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, Porto, 2013.

JIANG, Z. et al. A vision of smart transmission grids. In: IEEE. **Power & Energy Society General Meeting**. Calgary: IEEE, 2009. p. 1–10. ISSN 1944-9925.

KAGAN, N. et al. **Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação**. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2013. ISBN 8561325879.

KAYAL, P.; CHANDA, S.; CHANDA, C. An ann based network reconfiguration approach for voltage stability improvement of distribution network. In: IEEE. **International Conference on Power and Energy Systems**. Chennai: IEEE, 2011. p. 1–7.

KE, Y.-L. Distribution feeder reconfiguration for load balancing and service restoration by using g-nets inference mechanism. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 19, n. 3, p. 1426–1433, 2004. ISSN 0885-8977.

KEMENES, A.; FORSBERG, B.; MELACK, J. Methane release below a tropical hydroelectric dam. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union, v. 34, n. 12, p. L12809, 2007. ISSN 0094-8276.

KERSTING, W. **Distribution System Modeling and Analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 9781439856222.

KOESTLER, A. **O fantasma da máquina**. Rio de Janeiro: Zahar, 1969.

KOK, J. K.; WARMER, C. J.; KAMPHUIS, I. G. Powermatcher: Multiagent control in the electricity infrastructure. In: **Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems**. New York: ACM, 2005. p. 75–82. ISBN 1-59593-093-0.

KOZA, J. R. **Genetic Programming**. Cambridge: MIT Press, 1992. ISBN 0-262-11170-5.

- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet**. Boston: Pearson Addison-Wesley, 2004. ISBN 978-0321227355.
- KWON, S. et al. Current development and future plan for smart distribution grid in Korea. In: IET. **CIRED Seminar SmartGrids for Distribution**. Frankfurt: IET, 2008. p. 1–4. ISSN 0537-9989.
- LAGORSE, J.; PAIRE, D.; MIRAOU, A. A multi-agent system for energy management of distributed power sources. **Renewable Energy**, Springer, v. 35, n. 1, p. 174 – 182, 2010. ISSN 0960-1481.
- LIANG, R.-H.; WANG, Y.-S. Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 18, n. 2, p. 610–618, 2003. ISSN 0885-8977.
- LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 2. ed. São Paulo: Brasport, 2008. ISBN 978-85-7452-373-6.
- LIU, Y.; ZHANG, P.; QIU, X. Optimal volt/var control in distribution systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 24, n. 4, p. 271–276, 2002. ISSN 0142-0615.
- LOGENTHIRAN, T. et al. Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 3, n. 2, p. 925–933, 2012. ISSN 1949-3053.
- LU, J.; AI, Q. Research on smart grid in China. In: IEEE. **Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific**. Seul: IEEE, 2009. p. 1–4. ISBN 978-1-4244-5230-9.
- MAMDANI, E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. **IEEE Transactions on Computers**, IEEE, v. 26, n. 12, p. 1182–1191, 1977. ISSN 0018-9340.
- MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Revista Controle & Automação**, SBA, v. 11, n. 2, p. 150–159, 2000. ISSN 1807-0345.
- MARQUES-SILVA, J. P.; SAKALLAH, K. A. Grasp: A search algorithm for propositional satisfiability. **IEEE Transactions on Computers**, IEEE, v. 48, n. 5, p. 506–521, 1999. ISSN 0018-9340.
- MCARTHUR, S. et al. Multi-agent systems for power engineering applications - Part I: concepts, approaches, and technical challenges. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 22, n. 4, p. 1743–1752, 2007. ISSN 0885-8950.
- _____. Multi-agent systems for power engineering applications - Part II: technologies, standards, and tools for building multi-agent systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 22, n. 4, p. 1753–1759, 2007. ISSN 0885-8950.
- NUNNA, H. K.; DOOLLA, S. Energy management in microgrids using demand response and distributed storage – a multiagent approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 28, n. 2, p. 939–947, 2013. ISSN 0885-8977.

- PADGHAM, L.; WINIKOFF, M. **Developing intelligent agent systems: A practical guide**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. ISBN 978-0-470-86120-2.
- PAPATHANASSIOU, S. et al. A benchmark low voltage microgrid network. In: CIGRE. **Proceedings of the CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation**. Atenas: CIGRE, 2005. p. 1–8.
- RAMOS, G. de O. **Redução do espaço de busca de estruturas de coalizão a partir de informações sobre o domínio: uma aplicação em smart grids**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- RAVIBABU, P. et al. Implementation of improved genetic algorithm in distribution system with feeder reconfiguration to minimize real power losses. In: IEEE. **International Conference on Computer Engineering and Technology**. Chengdu: IEEE, 2010. v. 4, p. 320–323.
- REZENDE, S. Introdução. In: REZENDE, S. (Ed.). **Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole Ltda, 2003. ISBN 85-204-1683-7.
- RMS Sistemas Elétricos. **Manual operacional do medidor/registrador MARH-21**. Porto Alegre, 2008.
- RODRIGUES, F. F. C.; BORGES, C. L.; FALCÃO, D. M. Programação da contratação de energia considerando geração distribuída e incertezas na previsão de demanda. **Controle & Automação**, SBA, v. 18, n. 3, p. 361–371, 2007. ISSN 0103-1759.
- RUMLEY, S. et al. Multi-agent approach to electrical distribution networks control. In: IEEE. **Computer Software and Applications**. Turku: IEEE, 2008. p. 575–580. ISSN 0730-3157.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence: a Modern Approach**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. ISBN 978-0136042594.
- SARAIVA, F. de O. **Aplicação de sistemas multiagentes para gerenciamento de sistemas de distribuição tipo Smart Grids**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- SARAIVA, F. de O.; ASADA, A. C. C.; ASADA, E. N. Multi-agent system for voltage control in distribution systems. In: ISAP COUNCIL. **International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems**. Tokyo: ISAP Council, 2013.
- SARAIVA, F. de O.; ASADA, E. N. Modelando sistemas multiagentes para simulação computacional de redes elétricas inteligentes. In: SBA. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Goiânia: SBA, 2012. ISSN 2177-6164.
- _____. Decision making in intelligent electrical systems using distributed artificial intelligence and heuristic methods. In: IEEE. **PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America**. São Paulo: IEEE, 2013. p. 1–7. ISBN 978-1-4673-5272-7.

_____. Multi-agent systems applied to topological reconfiguration of smart power distribution systems. In: IEEE. **International Joint Conference on Neural Networks**. Beijing: IEEE, 2014. p. 2812–2819. ISBN 978-1-4799-6627-1.

SARAIVA, F. de O.; BERNARDES, W. M.; ASADA, E. N. A framework for classification of non-linear loads in smart grids using artificial neural networks and multi-agent systems. **Neurocomputing**, Elsevier, v. 170, p. 328–338, 2015. ISSN 0925-2312.

SHOHAM, Y.; LEYTON-BROWN, K. **Multiagent Systems: Algorithmic, Game-theoretic, and Logical Foundations**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. ISBN 9780521899437.

SILVA, B. C. da. **Utilização de um Sistema Multi-Agentes em Redes de Comunicação para a Proteção Digital de Distância Adaptativa**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SILVA, I. N. da; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas**. São Paulo: Artliber Editora, 2010. ISBN 978-85-88098-53-4.

SPATTI, D. H. et al. Regulação automática de tensão em transformadores de subestação de distribuição usando implementação fuzzy. **Controle & Automação**, SBA, v. 22, n. 2, p. 169–183, 2011. ISSN 0103-1759.

TANENBAUM, A. S. **Modern operating systems**. Upper Saddle River: Pearson Prentice-Hall, 2008. ISBN 978-0136006633.

TSAI, M.; CHU, C. Applications of hybrid ep-aco for power distribution system loss minimization under load variations. In: IEEE. **International Conference on Intelligent System Application to Power Systems**. Hersonissos: IEEE, 2011. p. 1–7. ISBN 978-1-4577-0807-7.

VEIT, A. et al. Multiagent coordination for energy consumption scheduling in consumer cooperatives. In: AAAI. **Proceedings of AAAI Conference on Artificial Intelligence**. Washington: AAAI, 2013. ISBN 978-1-57735-615-8.

WEI, X.; YU-HUI, Z.; JIE-LIN, Z. Energy-efficient distribution in smart grid. In: IEEE. **International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**. Nanjing: IEEE, 2009. p. 1–6. ISBN 978-1-4244-4934-7.

WEISS, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. Cambridge: MIT press, 1999. ISBN 978-0262731317.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multiagent Systems**. Chichester: Wiley, 2009. ISBN 04-70-51946-0.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. R.; KINNY, D. The gaia methodology for agent-oriented analysis and design. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, Springer, v. 3, n. 3, p. 285–312, 2000. ISSN 1387-2532.

YANG, X. X.; KRATZ, M. Power system flicker analysis by rms voltage values and numeric flicker meter emulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 24, n. 3, p. 1310–1318, July 2009. ISSN 0885-8977.

YU, N.-P.; LIU, C.-C.; PRICE, J. Evaluation of market rules using a multi-agent system method. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 25, n. 1, p. 470–479, 2010. ISSN 0885-8950.

ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, IEEE, SMC-3, n. 1, p. 28–44, 1973. ISSN 0018-9472.