



Univesidade Federal do Pará
Instituto de Ciências Exatas e Naturais
Faculdade de Computação

Italo Ramon da Costa Campos

Aplicação de Sistemas Multiagentes ao Problema de Autorrecuperação em Sistemas Elétricos de Distribuição do tipo Smart Grid

Belém

2018

Italo Ramon da Costa Campos

**Aplicação de Sistemas Multiagentes ao Problema de
Autorrecuperação em Sistemas Elétricos de Distribuição
do tipo Smart Grid**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Ciência da Computação pela
Universidade Federal do Pará.

Universidade Federal do Pará
Instituto de Ciências Exatas e Naturais
Faculdade de Computação

Orientador: Filipe de Oliveira Saraiva

Belém
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- D111a Da Costa Campos, Italo Ramon.
Aplicação de Sistemas Multiagentes ao Problema de Autorrecuperação em Sistemas Elétricos de Distribuição do tipo Smart Grid / Italo Ramon Da Costa Campos. — 2018.
96 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Filipe de Oliveira Saraiva
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Matemática, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
1. Autorrecuperação. 2. Smart grids. 3. Sistemas multiagentes. 4. Sistemas Elétricos de Potência. 5. Inteligência artificial. I. Título.

CDD 006.3

*À minha mãe que se esforçou para, sozinha,
me dar as condições primordiais para chegar aqui.*

Agradecimentos

Primeiramente, mesmo sendo bem clichê, agradeço ao Deus do céu, o maior de todos, por seu apoio incondicional, em todos os momentos, mesmo quando esvaía-se a esperança.

Agradeço à Universidade Federal do Pará que, através do PIBIC/PRODOUTOR, financiou a pesquisa e proveu meios informacionais e de infraestrutura para que este trabalho pudesse ser desenvolvido e consolidado como hoje está.

Ao meu orientador professor Dr. Filipe Saraiva, que foi o grande agente motivador desse tema. Agradeço por ter me proporcionado contato com uma área que desconhecia e por me fazer alcançar, através dela, voos maiores do que esperava. Não posso deixar de agradecer a paciência e a troca de experiências através de conversas e vivências que me fizeram ver com outros olhos a área acadêmica. Obrigado.

Aos meus professores do curso agradeço pelo conhecimento e incentivo transmitido, mesmo que por vezes não fossem entendidos assim. Ao professor José Bitar, obrigado pela sabedoria e experiência. Agradeço em especial à minha *orientadora de corredor*, Regiane Kawasaki, pelas ideias e esclarecimentos quando o desespero chegava. Exemplo de profissional.

Não poderia deixar de agradecer ao meu grande cais, minha família, dona Ana, seu Carlos, Vitor e Nadine. À minha mãe, pelo acordar matinal insistente, pelo cuidado mesmo quando as coisas fugiam de seu controle. Ao Carlos pela responsabilidade voluntária e pela paciência infinita. Ao Vitor pelo suporte primordial. À Nadine pelo incentivo e exemplo. Obrigado por se esforçarem por mim quando eu estive ausente.

À minha Igreja agradeço também. Obrigado por entender esses últimos períodos difíceis nos quais estive ausente. Que o Senhor seja cada vez mais glorificado pelas vidas de vocês. Ao Jackson, pelas broncas insistentes e apoio incondicional. À Quezia por tomar conta do Jabez.

Em especial quero agradecer às pessoas que me incentivaram e me ajudaram de forma inimaginável durante todo o ciclo da graduação. Ao Mateus Trindade pelo conselho decisivo. Às famílias Trindade e Andrade pelo apoio irreparável nos dias que precisei ficar mais perto do *campus*. À Eydlane Costa pelo apoio no curso e seu companheirismo.

Aos colegas de curso que me acompanharam nessa jornada. Ao Leonardo, Fernando, Matheus e os mais pela amizade e pelos *rolês* pós-aula. Obrigado por dividirem comigo grandes desespos e conquistas ao longo desses anos. Obrigado pelas partidas de jogos nos corredores da UFPA. Obrigado também por estarem comigo nas minhas maiores

conquistas na graduação.

Aos sites [Freepik](#) e [Flaticon](#) por disponibilizarem gratuitamente os ícones para algumas das ilustrações desse trabalho. Dou créditos a vocês.

E, finalmente, tomando as palavras do meu orientador, agradeço a todos os brasileiros e brasileiras que financiam as instituições públicas de ensino superior, tornando possível o desenvolvimento científico do país.

*“Que o sábio não se orgulhe de sua sabedoria,
nem o poderoso de seu poder,
nem o rico de suas riquezas.
Aquele que deseja se orgulhar,
que se orgulhe disto:
de me conhecer e entender que eu sou o SENHOR (...)
(Bíblia Sagrada, Jeremias 9: 23-24a, NVT)*

Resumo

Um dos setores mais importantes na vida da sociedade moderna é, sem dúvida, o setor de energias e os seus sistemas de geração, transmissão e distribuição. Esses sistemas elétricos são complexos e difíceis de se gerenciar, requerendo aplicações de técnicas sofisticadas para tornar o fornecimento de energia estável e minimamente confiável. Uma área que muito vem sendo desenvolvida ao longo dos últimos anos é a de *smart grids*, que incorpora à rede elétrica funcionalidades que melhoram a qualidade do serviço prestado, como controle em tempo real dos dados gerados, comunicação digital entre as diferentes partes do sistema, autorrecuperação frente à falhas, etc. Existem muitos trabalhos desenvolvidos que se propõem a estudar o problema da autorrecuperação nos *smart grids* se utilizando de diferentes técnicas. A autorrecuperação, então, se mostra uma funcionalidade que pode trazer à rede elétrica um grande avanço no sentido de fornecer um serviço contínuo e de qualidade. No âmbito das redes elétricas de distribuição, este trabalho propõe um modelo de sistema multiagente para lidar com o problema da autorrecuperação das redes elétricas do tipo *smart grids*. Foi desenvolvido um sistema multiagente para simular e gerenciar as operações, as falhas e a autorrecuperação de redes elétricas. A autorrecuperação segue um algoritmo de quatro passos e realiza as decisões com base num algoritmo de fluxo de potência. Para avaliar o sistema proposto, foram utilizados dois modelos de rede elétrica: um primeiro concebido para esta pesquisa, com 8 nós, e outro proposto no trabalho de [Baran e Wu \(1989\)](#), com 33 nós. Os resultados foram obtidos através de simulação computacional e tabulados para análise. Tais resultados mostram que o sistema multiagente é capaz de realizar a autorrecuperação da rede através da execução do algoritmo de quatro passos, salientando que a maneira distribuída como os agentes se coordenam para realizar as operações necessárias é um diferencial na questão de tempo de resposta e esforço computacional demandado pelo sistema.

Palavras-chave: autorrecuperação. smart grids. sistemas multiagente. sistema elétrico de potência. inteligência artificial.

Abstract

One of the most important sectors of modern society is, undoubtedly, the energy sector and its systems of generation, transmission and distribution. These electric systems are complex and hard to handle, requiring applications of sophisticated techniques to make energy supply stable and minimally reliable. Smart grids is an area that has been developing along last years, which incorporates features to electrical grids that improve the quality of its services, such as real-time data control, digital communication between different parts of the system, self-healing, and others. There are many researches developed that study the self-healing problem using many techniques. The self-healing, so, is a functionality that may bring to the electrical grids great advances in the way to provide a quality and continuous service. In the scope of power distribution grids, this work proposes a model of multiagent system (MAS) to deal with the self-healing problem of smart grids in power distribution level. A MAS was developed to simulate and handle the operations, failures and self-healing of electrical grids. The self-healing follows a four-step algorithm and takes decisions based on a power-flow algorithm. To evaluate the proposed MAS, two models of electrical grid were used: the first one was designed for this research, with 8 nodes, and the second one was proposed in the work of [Baran e Wu \(1989\)](#), with 33 nodes. The results were obtained by computational simulations and tabulated to analysis. These results show that MAS proposed is able to perform the grid self-healing through the four-step algorithm execution, emphasizing that the distributed way how the agents coordinates themselves to perform the needed operations is a differential in relation to the response time and computational effort required by the system.

Keywords: self-healing. smart grids. multiagent systems. electric power systems. artificial intelligence

Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo esquemático da organização dos subsistemas do SEP	24
Figura 2 – Modelo esquemático de geração de energia	26
Figura 3 – Matriz energética do Brasil em 2017	27
Figura 4 – Esquema de organização em camadas dos <i>smart grids</i>	35
Figura 5 – Modelo esquemático de um agente	38
Figura 6 – Esquema organizacional do JADE	44
Figura 7 – Fluxograma do ciclo de vida dos agentes no JADE	45
Figura 8 – Esquema de comunicação dos agentes no JADE	46
Figura 9 – Grafo da topologia <i>8-bus</i>	50
Figura 10 – Grafo da topologia <i>33-bus</i>	51
Figura 11 – Grafos das topologias de rede de comunicação nos sistemas <i>8-bus 33-bus</i>	53
Figura 12 – Esquema de comunicação na topologia <i>8-bus</i> para o LA1 durante o processo de isolamento do algoritmo de autorrecuperação	55
Figura 13 – Esquema de candidatura dos LA 1 e 4 na topologia <i>8-bus</i> durante o processo de eleição do algoritmo de autorrecuperação	56
Figura 14 – Esquema de comunicação na topologia <i>8-bus</i> durante o processo de mapeamento da ilha por troca de mensagens recursivas	57
Figura 15 – Esquema da tomada de decisão por um agente ativo da ilha utilizando o método de varredura de Saraiva (2015)	58
Figura 16 – Diagrama de sequência do algoritmo de autorrecuperação	59
Figura 17 – Diagrama de atividades do algoritmo de autorrecuperação	60
Figura 18 – Gráfico do desempenho do sistema com relação ao tempo de execução <i>versus</i> número de nós afetados	65
Figura 19 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 8	67
Figura 20 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 9	67
Figura 21 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 4	68
Figura 22 – Grafos da topologia <i>8-bus</i> ao longo da autorrecuperação consecutiva nas simulações 1, 2 e 3	69
Figura 23 – Grafos da topologia <i>8-bus</i> ao longo da autorrecuperação consecutiva nas simulações 4, 5, 6 e 7	70
Figura 24 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 10	72
Figura 25 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 11	72
Figura 26 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 12	73
Figura 27 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 15 e 16	74
Figura 28 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 17	75

Figura 29 – Grafos da topologia <i>33-bus</i> ao longo da autorrecuperação consecutiva nas simulações 18, 19 e 20	76
Figura 30 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 1	86
Figura 31 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 2	86
Figura 32 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 3	87
Figura 33 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 4	87
Figura 34 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 5	88
Figura 35 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 6	88
Figura 36 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 7	89
Figura 37 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 8	89
Figura 38 – Grafo da topologia <i>8-bus</i> ao final da simulação 9	90
Figura 39 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 10	90
Figura 40 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 11	91
Figura 41 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 12	91
Figura 42 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 13	92
Figura 43 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 14	92
Figura 44 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 15	93
Figura 45 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 16	93
Figura 46 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 17	94
Figura 47 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 18	94
Figura 48 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 19	95
Figura 49 – Grafo da topologia <i>33-bus</i> ao final da simulação 20	95

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos níveis de tensão	25
Tabela 2 – Níveis de tensão por subsistema do SEP	25
Tabela 3 – Comparação entre <i>grids</i> tradicionais e <i>smart grids</i>	33
Tabela 4 – Valores de resistência e reatância nas linhas da topologia <i>8-bus</i>	50
Tabela 5 – Resultados das simulações realizadas sobre topologia regular	64
Tabela 6 – Resultados das simulações consecutivas realizadas sobre as topologias <i>8-bus</i> e <i>33-bus</i>	64
Tabela 7 – Valores de resistência e reatância nas linhas da topologia <i>33-bus</i>	96

Lista de abreviaturas e siglas

AA	<i>Active Load Agent</i> (Agente de carga ativo)
AMS	<i>Agent management system</i>
PA	<i>Passive Load Agent</i> (Agente de carga passivo)
DF	<i>Directory facilitator</i>
IA	Inteligência artificial
JADE	<i>Java Agent Development Framework</i>
LA	<i>Load Agent</i> (Agente de carga)
LGPL	<i>Lesser General Public License</i>
OO	Paradigma de programação orientação a objetos
SA	<i>Switch Agent</i> (Agente de chave)
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMA	Sistema Multiagente

Lista de símbolos

P	Potência dissipada no resistor (em Watts)
R	Resistência do material da linha (em Ohm)
I	Corrente elétrica que atravessa a linha (em Ampère)
V	Tensão elétrica (em Volts)
$\overline{N1, N2}$	Linha de distribuição entre os nós $N1$ e $N2$

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	O Sistema Elétrico de Potência e suas características	16
1.2	Trabalhos relacionados	17
1.3	Objetivos	19
1.3.1	Gerais	19
1.3.2	Específicos	19
1.4	Metodologia	20
1.5	Estrutura do trabalho	21
2	SISTEMAS ELÉTRICOS E AUTORRECUPERAÇÃO	23
2.1	Sistemas Elétricos de Potência	23
2.1.1	Sistemas de geração	26
2.1.2	Sistemas de transmissão	27
2.1.3	Sistemas de distribuição	29
2.2	Smart Grids	31
2.3	Autorrecuperação de redes elétricas inteligentes	33
2.4	Considerações do capítulo	34
3	SISTEMAS MULTIAGENTE	36
3.1	Inteligência artificial e agentes	36
3.2	Sistemas multiagente e suas características	40
3.2.1	Arquiteturas de sistemas multiagente	42
3.3	A plataforma JADE	43
3.4	Considerações do capítulo	46
4	MODELAGEM DO SISTEMA	48
4.1	Definição e características dos modelos de rede elétrica utilizados	48
4.2	O sistema multiagente e suas operações	51
4.2.1	Algoritmo de autorrecuperação	53
4.2.2	Isolamento	54
4.2.3	Eleição do agente ativo	55
4.2.4	Mapeamento da ilha	56
4.2.5	Tomada de decisão e religamento	57
4.2.6	Diagramas	59
4.3	Considerações do capítulo	61

5	SIMULAÇÕES, RESULTADOS E ANÁLISE	62
5.1	O ambiente de simulações	62
5.2	Resultados gerais	63
5.3	Simulações com a topologia <i>8-bus</i>	66
5.3.1	Autorrecuperação sobre a topologia regular	66
5.3.2	Simulação 8	66
5.3.3	Simulação 9	67
5.3.4	Simulação 4	68
5.3.5	Autorrecuperações consecutivas em tempo de execução	68
5.4	Simulações com a topologia <i>33-bus</i>	71
5.4.1	Autorrecuperação sobre a topologia regular	71
5.4.2	Simulação 10	71
5.4.3	Simulação 11	71
5.4.4	Simulação 12	73
5.4.5	Simulação 15 e 16	73
5.4.6	Simulação 17	74
5.4.7	Autorrecuperações consecutivas em tempo de execução	75
5.5	Considerações do capítulo	77
6	CONCLUSÕES	79
6.1	Trabalhos futuros	80
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICES	85
	APÊNDICE A – GRAFOS DAS SIMULAÇÕES	86
	APÊNDICE B – RESISTÊNCIAS DAS LINHAS NA TOPOLOGIA	
	<i>33-BUS</i>	96

1 Introdução

Este capítulo descreve brevemente o contexto do trabalho, sua relevância, os trabalhos relacionados, a metodologia, o aparato tecnológico utilizado e outras características que resumem a organização do texto.

1.1 O Sistema Elétrico de Potência e suas características

A energia elétrica é uma das formas de energia mais importantes para o desenvolvimento da sociedade atual. Com ela, é possível realizar desde as atividades mais básicas da economia até fabricar a mais nova tecnologia a ser utilizada na indústria. Por essas e outras razões, uma demanda crescente pelo consumo de energia vem se instaurando na sociedade ao redor do mundo, o que confere aos sistemas elétricos grande complexidade e requer destes o desdobramento necessário para atender às questões de geração e distribuição de energia elétrica (GEBRAN, 2013). Assim, torna-se cada vez mais necessário o uso de técnicas sofisticadas para que o sistema elétrico consiga dar conta das demandas que são a ele submetidas. Nesse sentido, é interessante que novas tecnologias forneçam maneiras de se produzir e distribuir energia elétrica de forma otimizada (GEBRAN, 2013) e que atenda à maior parte da demanda dentro de limites de qualidade estabelecido pelos órgãos competentes.

Quando se fala em geração e transmissão de energia elétrica em termos de Brasil, refere-se em grande parte ao parque hidrelétrico nacional, que figura entre os maiores do mundo em produção de energia elétrica (MAUAD; FERREIRA; TRINDADE, 2017). Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica, a ANEEL, a produção de energia no Brasil por hidrelétricas ainda é a que corresponde à maior cota na matriz energética do país, chegando aos 60,36% (ANEEL, 2018a) de toda a potência produzida no país. Seguindo as hidrelétricas, estão as usinas termoelétricas e campos eólicos, com 25,54% e 8,35%, respectivamente (ANEEL, 2018a). Considerando esse cenário, há a necessidade de se gerenciar todo o processo de geração e transmissão de energia elétrica dos pontos onde ela é gerada até o usuário final.

Um sistema elétrico de potência é basicamente dividido em três subsistemas, compreendidos em **geração**, **transmissão** e **distribuição** de energia elétrica (SARMA, 2001), cada um com características e complexidades próprias. Este trabalho tem foco nos sistemas de distribuição, que, em suma, são os responsáveis por transportar energia elétrica de baixa tensão aos consumidores finais. Neste contexto, aparecem uma modalidade de sistemas elétricos chamados *smart grids*, que são redes inteligentes capazes de realizar automaticamente algumas funções, entre elas a de autorrecuperação. A autorrecuperação

consiste basicamente na recuperação automática de uma rede que apresentou alguma falha e, em decorrência disso, interrompeu o fornecimento de energia em um conjunto de consumidores do sistema.

Segundo dados da [ANEEL \(2018b\)](#), em 2017, em média, cada unidade consumidora no Brasil contou com aproximadamente 14 horas de interrupção, distribuídas em aproximadas 8 interrupções computadas pelo órgão ([ANEEL, 2018b](#)). Isso significa uma média de 1 hora e 45 minutos de falta de energia por cada interrupção no fornecimento. Analisando os últimos cinco anos, há uma média de 17 horas de interrupção por ano, com aproximadas 9 interrupções computadas no fornecimento de energia elétrica ([ANEEL, 2018b](#)). A recuperação de falhas nas redes elétricas do Brasil atualmente é feita majoritariamente de maneira manual, explicando a quantidade de tempo que decorre de cada falha no sistema elétrico de distribuição. Investiga-se aqui qual será o impacto da aplicação de um sistema que se recupere automaticamente, utilizando um sistema multiagente para tal feito.

Este não é um problema trivial a se resolver, uma vez que é necessário considerar múltiplos cenários em um ambiente altamente dinâmico e com muitas variáveis a serem consideradas. [Pramio \(2014\)](#) destaca o problema de autorrecuperação como um problema de otimização combinatória, sendo inviável em custo computacional encontrar uma solução ótima. Para atacar esse tipo de problema, muitos autores se valem de técnicas da computação para se obter resultados próximos aos da solução ótima com um custo computacional viável. Conforme [Saraiva \(2015\)](#), uma das técnicas utilizadas para tal fim é a de sistemas multiagente, que consiste em modelar um sistema por meio de agentes independentes que se coordenam mutuamente para alcançar um objetivo comum ([REIS, 2003](#)). Ainda segundo [Saraiva \(2015\)](#), utilizar sistemas multiagente para lidar com problemas do sistema de potência é vantajoso, já que o sistema elétrico possui características que favorecem a utilização dessa técnica.

1.2 Trabalhos relacionados

O tema *autorrecuperação* ganhou foco entre a comunidade de pesquisadores de *smart grids* ao longo dos últimos anos, rendendo uma quantidade considerável de trabalhos sobre o tema atualmente. É possível observar que diferentes abordagens vêm sendo utilizadas para alcançar a autorrecuperação, levando em conta fatores importantes como desempenho dos métodos, robustez, tolerância a falhas, dinamismo, entre outros. A seguir, são brevemente relatadas e discutidas algumas dessas abordagens, com foco no método utilizado por cada uma.

Iniciando pelo trabalho de [Souza \(2015\)](#), verifica-se a utilização de SMA para lidar com o problema da autorrecuperação. No trabalho, o autor se utiliza de um modelo de

autorrecuperação já publicado por outro autor, que sugere uma autorrecuperação em três etapas e utilizando energia provinda de fontes de geração distribuídas. Souza (2015) propõe uma quarta etapa, que é o restabelecimento de energia por um processo de ilhamento e corte arbitrário de cargas, com base na sua prioridade. Cargas com maior prioridade, em termos práticos, são locais nos quais a interrupção de energia elétrica pode significar consequências de alto impacto, como hospitais, prédios de serviços públicos básicos, entre outros. A abordagem do autor considera que nos casos de falta, mesmo que não seja possível recuperar todas as cargas do sistema, poderá ser empregado o ilhamento intencional de cargas através do corte de algumas com baixa prioridade, com o fim de restabelecer o fluxo energético pelo menos nos pontos com maiores prioridades da rede. O trabalho modela e propõe um sistema multiagente reativo para detectar e isolar falhas na rede, além de realizar negociações e operações de chaveamento. A abordagem do autor tem maior sucesso nos casos onde a energia provinda de fontes distribuídas é suficiente para dar conta das mínimas demandas das ilhas. Observa-se nesse trabalho que o caráter distribuído do SEP é acompanhado adequadamente por sistemas multiagente.

Wang et al. (2016) trazem um modelo mais abstrato para a autorrecuperação. Os autores utilizam o conceito de *microgrids* independentes que mantêm informações, controle e as restrições de todas as cargas que lhe são submetidas. O sistema proposto é dividido em camadas de comunicação, onde as camadas mais altas se comunicam independentemente e não têm informações sobre as cargas que pertencem à outras *microgrids*. As camadas mais baixas dizem respeito à comunicação entre as cargas de uma mesma *microgrid*. Igualmente, uma carga de uma *microgrid* não tem acesso a informações de outras cargas em outras *microgrids*. Cada *microgrid* pode ter vários geradores (inclusive geração distribuída) e, nos casos de falta, negocia com outras *microgrids* de forma a cooperarem entre si e realizarem autorrecuperação. Nessa abordagem, os autores não utilizam diretamente multiagentes, mas são claras as suas características compatíveis com SMA. O caráter autônomo das *microgrids*, a gerência distribuída e a negociação são pontos dessa abordagem que são perfeitamente cobertas por SMA.

Uma abordagem que foge à descentralização é proposta por Ferreira et al. (2013). Os autores fazem uso da técnica de algoritmo genético para reconfigurar as chaves do sistema, modelando para isso o problema de autorrecuperação como uma função de minimização. São utilizados múltiplos pontos de falha para verificar o desempenho do algoritmo. O número de soluções diminui conforme o número de pontos de falha aumenta. Nessa abordagem, o processamento do algoritmo é centralizado e os autores cogitam a adição de alguma outra técnica que eliminem resultados redundantes para melhorar o desempenho do algoritmo.

Sharma, Srinivasan e Trivedi (2018) propõem uma abordagem também com sistemas multiagente. Os autores utilizam como modelo uma rede em operação na Tasmânia e

Singapura. Sobre esse modelo há um sistema multiagente com diferentes agentes que gerenciam cargas, baterias, geradores distribuídos, chaves e regiões do *smart grid*. Nos casos de falta, os agentes trocam mensagens com o objetivo de formar ilhas. Essas ilhas possuem demandas específicas e cargas com prioridades diferentes. Depois disso os agentes comunicam os agentes regionais de modo a estabelecer de que forma a energia será restabelecida, isto é, quais serão as fontes a suprir as demandas da ilha, quais as operações de chaveamento necessárias e quais as cargas que não poderão ser religadas à rede. O sistema tem melhor desempenho não só quando há geração distribuída, mas também quando é levado em conta o caráter incerto dessas fontes.

Verifica-se que há diversas metodologias envolvidas no campo da autorrecuperação com diferentes técnicas utilizadas (centralizadas, descentralizadas, priorizadas, entre outras). Também é possível notar certa tendência para o uso de geração distribuída entre os *smart grids*, aumentando a complexidade desses sistemas, mas por outro lado, concretizando rico campo para aplicação de sistemas multiagente.

No contexto de autorrecuperação de *smart grids*, este trabalho propõe um algoritmo de autorrecuperação descentralizado para ser executado por um sistema multiagente. A contribuição deste trabalho está centrada especialmente na forma descentralizada como os agentes se coordenam para alcançar a autorrecuperação da rede.

1.3 Objetivos

1.3.1 Gerais

O principal objetivo deste trabalho é modelar uma rede elétrica do tipo *smart grid* e, utilizando simulação computacional, realizar a autorrecuperação dessa rede aplicando um algoritmo aqui proposto, algoritmo este executado por um sistema multiagente. Com a autorrecuperação, objetiva-se reforçar a ideia validada por [Saraiva \(2015\)](#) de que sistemas multiagente podem ser utilizados para implementar redes inteligentes (*smart grids*), bem como, a sua autorrecuperação. Como consequência da validação da ideia principal deste trabalho, objetiva-se verificar como o caráter distribuído dos sistemas multiagente influencia no processo de autorrecuperação das *smart grids*.

1.3.2 Específicos

- Utilizar modelos de sistemas elétricos de distribuição que respeitem restrições nativas de uma rede elétrica real para servir de base às simulações propostas neste trabalho;
- Modelar e implementar um sistema multiagente que ofereça suporte para executar algoritmos de cálculos relativos aos sistemas elétricos de distribuição e tomada de

decisão;

- Propor um algoritmo que seja capaz de executar a autorrecuperação de *smart grids* levando em conta o caráter distribuído do sistema multiagente;
- Testar, utilizando-se de simulações por computador, a efetividade do algoritmo a ser executado pelos agentes do sistema e, posteriormente, aplicá-lo aos modelos de rede elétrica escolhidos;
- Verificar como se dá a autorrecuperação no sistema proposto e considerar seus principais aspectos sob a abordagem de sistemas multiagente;
- Avaliar trabalhos relacionados que utilizem ou não a técnica de sistemas multiagente de forma que embasem as propostas deste trabalho. Para os que utilizam técnicas diferentes, realizar comparações que permitam verificar as principais diferenças para uma abordagem utilizando multiagentes.

1.4 Metodologia

A ideia primária desta pesquisa se baseia no problema de autorrecuperação de redes elétricas, problema que ainda é um desafio para a área dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) por ser este um sistema dinâmico e complexo (SARAIVA, 2015). A partir deste ponto, foi necessário realizar pesquisas bibliográficas para consolidar o conhecimento sobre o problema e verificar quais materiais e métodos a comunidade científica utiliza para abordá-lo. Ao longo da pesquisa, notou-se que grande parte dos trabalhos escolhidos utilizam técnicas de inteligência artificial ou computacional (como algoritmos genéticos, lógica *fuzzy*, redes neurais e sistemas multiagente) e matemáticas (como análise combinatória e programação linear) para abordar o problema da autorrecuperação. Assim, foi possível notar que é mais vantajoso utilizar um método de aproximação da solução ótima do que modelar o problema em uma função objetivo e tentar alcançar a solução ótima.

A partir de então, baseada na ideia de Saraiva (2015), de que sistemas multiagente podem ser utilizados para implementar *smart grids*, a pesquisa utilizou como ator principal um sistema multiagente para simular uma rede de distribuição de energia elétrica e executar uma série de passos, de forma que fosse possível implementar a autorrecuperação dessa rede. Foi utilizado também um modelo de sistema elétrico de distribuição baseado no sistema elétrico introduzido por Baran e Wu (1989) em sua publicação, que apresenta um modelo com 33 nós.

Concluída a etapa de escolha dos métodos de abordagem, foi necessário escolher em seguida uma plataforma para implementação de sistemas multiagente que provesse um ambiente para o desenvolvimento dos agentes do sistema de maneira que não fosse

necessário tratar dos detalhes de comunicação e de comportamentos dos agentes. Foi então escolhido para essa tarefa o **JADE** (2017), um *framework* licenciado sob a licença LGPL (FSF, 1999) e baseado na linguagem de programação Java (ORACLE, 2018). Após isso, foi produzido um algoritmo de alto nível de abstração para realizar a autorrecuperação do sistema. Esse algoritmo é composto por quatro passos básicos e utilizam uma abordagem descentralizada para o controle de *smart grids* durante o processo de autorrecuperação.

Em seguida, foram produzidos diagramas para os agentes do sistema, modelando os comportamentos de acordo com o algoritmo de autorrecuperação e de forma a prover padrões para a realização das tarefas desse algoritmo. Nesse ponto da pesquisa, também foram definidos padrões para a troca de mensagens no sistema, de modo a favorecer a execução do algoritmo de forma distribuída entre os agentes. Há certa preocupação com o algoritmo nessa parte da pesquisa pois uma abordagem distribuída (como sistemas multiagente) confere maior complexidade aos sistemas que a implementam (TANEMBAUM; STEEN, 2008). Portanto, modelar os agentes e seus comportamentos no sistema exigiu constante validação dos modelos produzidos com o objetivo de manter o sistema descentralizado. Finalmente, o sistema foi implementado seguindo os modelos definidos.

Terminada a etapa de desenvolvimento, foi elaborado um modelo mais simples de rede elétrica, com 8 nós, para realizar testes iniciais com o objetivo de averiguar os primeiros resultados produzidos pelo sistema. Esse modelo foi produzido especificamente para a fase inicial de testes, portanto não possui qualquer estudo anterior que comprove sua validação para o uso em um sistema real. A pesquisa optou por adotá-lo unicamente para servir como modelo-protótipo, onde fosse possível testar os comportamentos do sistema multiagente e verificar se este estava seguindo corretamente os passos do algoritmo de autorrecuperação.

A seguir, o sistema foi executado sobre o modelo de 33 nós, este por sua vez apresentado e validado por Baran e Wu (1989) e, por conseguinte, utilizado para também validar esta pesquisa. Os testes foram conduzidos apenas fornecendo estímulos para os agentes e verificando os estados do sistema. Os testes revelaram que a autorrecuperação do sistema foi executada com sucesso, sob as condições de cada rede. Ainda foi possível coletar dados a respeito das características sob as quais se deu o processo de autorrecuperação, permitindo obter conclusões a respeito do principal tema desta pesquisa.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em sete capítulos, onde o presente capítulo trouxe a introdução, contextualização, os trabalhos relacionados, a relevância e motivação desta pesquisa. Os demais capítulos com seus conteúdos são descritos abaixo.

- **Capítulo 2:** trata do aparato teórico que é necessário para embasar este trabalho. Neste capítulo são definidos os sistemas elétricos e seus componentes, bem como o problema em análise e suas consequências. O capítulo também traz definições de alguns termos comuns ao domínio dos Sistemas Elétricos de Potência.
- **Capítulo 3:** um capítulo dedicado exclusivamente para definir, descrever e discutir os aspectos da técnica de sistemas multiagente.
- **Capítulo 4:** descreve a forma como foram modelados os sistemas elétricos utilizados para validação da proposta dessa pesquisa. Este capítulo também apresenta detalhes da modelagem do sistema multiagente implementado, bem como dos processos que ele realiza para alcançar a autorrecuperação dos sistemas. Também é realizada uma breve análise de trabalhos relacionados para fortalecer as abordagens utilizadas nesta pesquisa.
- **Capítulo 5:** este capítulo descreve como foram realizadas as simulações do sistema elétrico, sua autorrecuperação e apresenta os resultados obtidos dessas simulações. O capítulo também analisa e discute os principais resultados.
- **Capítulo 6:** capítulo que resume as ideias e as conclusões apresentadas ao longo do trabalho, além dos trabalhos futuros derivados desta pesquisa.

2 Sistemas elétricos e autorrecuperação

Este capítulo trata das definições teóricas nas quais se baseiam as técnicas utilizadas nesta pesquisa e o seu problema de investigação. Primeiramente, adentra-se no mais fundamental conceito onde se baseia toda a cadeia do estudo realizado por este trabalho, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Após isso, serão apresentadas as modalidades de redes elétricas *smart grids* e em seguida o problema de autorrecuperação, centro de interesse desta pesquisa. Ao fim são realizadas considerações sobre o capítulo.

2.1 Sistemas Elétricos de Potência

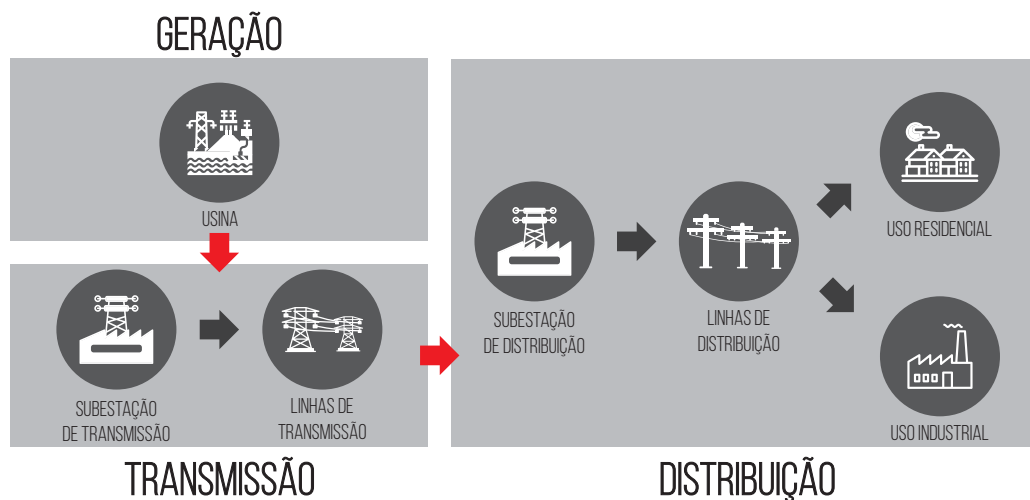
Sistemas Elétricos de Potência são sistemas complexos especializados na produção, transmissão e fornecimento de energia de forma a suprir uma demanda variável ao longo do tempo. Nas palavras de Blume (2017, p.2), Sistemas Elétricos de Potência — ou simplesmente SEP — são “*sistemas de fornecimento de energia elétrica em tempo real*”. Isso significa que a energia é produzida, transmitida e fornecida ao requisitante no momento em que esta a demanda (BLUME, 2017).

Basicamente, a humanidade aproveita energia nas mais diversas formas, mas a energia elétrica se tornou a principal fonte movedora das atividades humanas, especialmente por possuir características que favorecem seu transporte a diversos lugares. Porém, essa forma de energia não é comum na natureza, pelo menos não em quantidades suficientes para suprir as demandas humanas. Assim, se torna necessário utilizar meios de transformar energia das mais diversas formas e fontes em energia elétrica.

Às formas de energia que o SEP transforma em energia elétrica chama-se *energia primária* e ao produto final dos SEP, a energia elétrica, chama-se então *energia secundária* (GEBRAN, 2013). O Sistema Elétrico de Potência é comumente especializado em três subsistemas, compreendidos em subsistema de **geração**, de **transmissão** e de **distribuição** — também chamado de sistema de subtransmissão — de energia elétrica (BLUME, 2017). Esquemáticamente, pode-se descrever o SEP como na Figura 1. As setas em vermelho evidenciam as trocas de contexto da energia gerada ao longo dos subsistemas do SEP; já as setas em cinza estabelecem a ordem de passagem da energia entre uma seção e outra de cada subsistema.

Quando se fala em transmissão e armazenamento de energia, tem-se um grande dilema em relação aos SEP: não se consegue armazenar quantidade suficiente de energia secundária para alimentar grandes demandas, porém é mais fácil transportá-la. Por outro lado, é mais viável, armazenar grandes quantidades de energia primária, tecnologicamente

Figura 1 – Modelo esquemático da organização dos subsistemas do SEP



Fonte: Adaptado de Blume (2017, p. 3)

falando, ao passo que seu transporte até o consumidor final é inviável (GEBRAN, 2013). Para ilustrar a problemática, pode-se imaginar que é mais fácil transportar energia elétrica, porém não se dispõe de tecnologia para armazenar um volume de energia suficiente para iluminar uma cidade, ao passo que é mais fácil represar as águas de um rio, porém inviável transpô-lo para dentro de uma cidade com o fim de se aproveitar a energia cinética de suas águas. Uma vez que o SEP está sujeito à essas condições, os consumidores precisam utilizar toda a energia que é gerada, sob pena de desperdiçar o excedente (GEBRAN, 2013). Assim, é justificável que os SEP tenham as especializações descritas no esquema da Figura 1, de forma que possui características específicas em cada um de seus subsistemas. Esses subsistemas precisam responder com eficiência à complexidade que possuem e às demandas as quais são expostos, sendo necessário controlá-los em tempo real (BLUME, 2017).

Durante todo o processo de geração, transmissão e distribuição de energia pelo SEP, a energia elétrica é transportada à diversas tensões elétricas, de acordo com as características dos locais por onde ela passa. A Tabela 1 apresenta os valores que classificam os níveis de tensões padrões nos SEP e a Tabela 2 mostra em quais níveis de tensão operam cada subsistema do SEP. Esses níveis de tensão se justificam principalmente pela distância que a energia elétrica percorre em cada processo e pela relação com as perdas elétricas.

A energia elétrica é a energia aproveitada do movimento dos elétrons livres das partículas dos materiais. Esse movimento é chamado de corrente elétrica e atualmente pode ser produzida na forma de corrente contínua ou corrente alternada (HALLIDAY; R; WALKER, 2012). É possível que um SEP trabalhe com essas duas formas de corrente, porém é quase padrão encontrar SEP que trabalhem com energia de corrente alternada

Tabela 1 – Classificação dos níveis de tensão

Classificação	Nível de tensão
Baixa tensão	até 1 kV
Média tensão	de 1 a 66 kV
Alta tensão	de 69 kV a 230 kV
Extra-alta tensão	de 230 kV a 800 kV
Ultra-alta tensão	maior que 800 kV

Fonte: Retirado de [Gebran \(2013\)](#)

Tabela 2 – Níveis de tensão por subsistema do SEP

Subsistema	Nível de tensão
Geração	Baixa e média tensão
Transmissão	Alta, extra-alta e ultra-alta tensão
Distribuição	Baixa e média tensão

Fonte: Baseada no trabalho de [Gebran \(2013\)](#)

devido suas características de transmissão, que são mais econômicas que o transporte por corrente contínua ([RAUF, 2016](#)).

Considerando essas características, um SEP tem o objetivo principal de fornecer energia aos consumidores que estão, geralmente, localizados à longas distâncias dos centros de geração de energia elétrica. Ainda assim, segundo [Gebran \(2013\)](#) há três subobjetivos que um SEP precisa levar em consideração durante sua operação. São eles:

1. *Continuidade*: fornecer e manter o fornecimento de energia elétrica aos consumidores levando em consideração a demanda variável, isto é, gerando energia à medida que há necessidade;
2. *Qualidade*: fornecer energia elétrica dentro dos padrões de qualidade estabelecidos pelos órgãos reguladores com um mínimo possível de variação;
3. *Eficiência*: fornecer energia elétrica de maneira que haja o menor custo e desperdício o quanto possível.

[Gebran \(2013\)](#) salienta que esses objetivos seguem uma ordem concisa, na qual não é possível descender ao nível subjacente sem ter alcançado o objetivo anterior. Isso significa que, por exemplo, não é possível manter o fornecimento de energia dentro dos padrões de qualidade sem entregar um serviço contínuo.

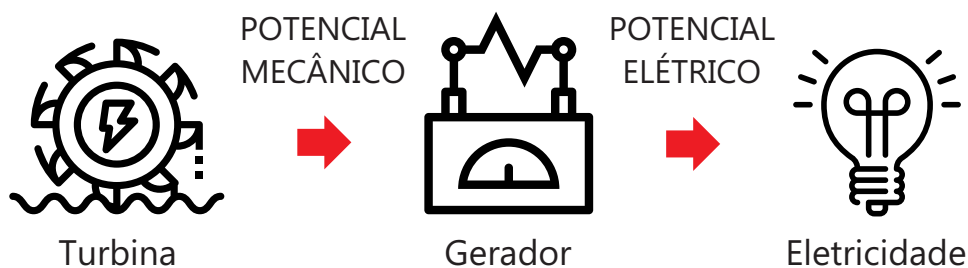
Passa-se agora a discorrer as principais características dos subsistemas de um Sistema Elétrico de Potência.

2.1.1 Sistemas de geração

O sistema de geração é a seção do SEP responsável por transformar energia primária em energia elétrica (secundária). Esse processo atualmente é realizado de várias maneiras ao redor do mundo, utilizando diversos tipos de energia primária, como energia cinética hidráulica, solar, eólica, térmica, nuclear, geotérmica, maremotriz e combustíveis fósseis (GEBRAN, 2013). Cada região do globo possui características sazonais diferentes, o que permite aos países explorarem menos ou mais determinados tipos de energia primária. Ainda assim, entre os maiores polos produtores de energia elétrica, destacam-se as hidrelétricas e os combustíveis fósseis. Existem grades discussões de cunho social e ambiental a respeito da exploração desses tipos de energia devido aos grandes impactos que implicam na adoção de usinas que explorem rios e na emissão de gases maléficos à saúde e ao meio ambiente. Por esse motivo há um crescente incentivo pelo uso das chamadas *energias limpas* — compreendem principalmente em energia eólica e solar —, pois têm um impacto ambiental muito menor se comparadas às principais formas de exploração de energia primária. Embora a energia limpa seja uma alternativa viável de produção de energia elétrica, sua exploração possui a característica de ser incerta, pois depende de fatores climáticos e de não conseguir armazenar a energia em forma primária, sendo a produção de energia elétrica limitada à disponibilidade da energia primária.

A energia que é produzida nos SEP utilizando energia cinética — como as hidrelétricas e as usinas eólicas — segue um esquema de geração que é apresentado na obra e (GEBRAN, 2013). Há três passos básicos nesse esquema, onde o primeiro é o responsável por produção de energia mecânica através da ativação de uma turbina pelo fluxo de entrada (da energia primária), o segundo é a produção de energia potencial elétrica por um gerador e, finalmente, a obtenção da corrente elétrica, que pode ser contínua ou alternada. A Figura 2 retrata esse esquema.

Figura 2 – Modelo esquemático de geração de energia



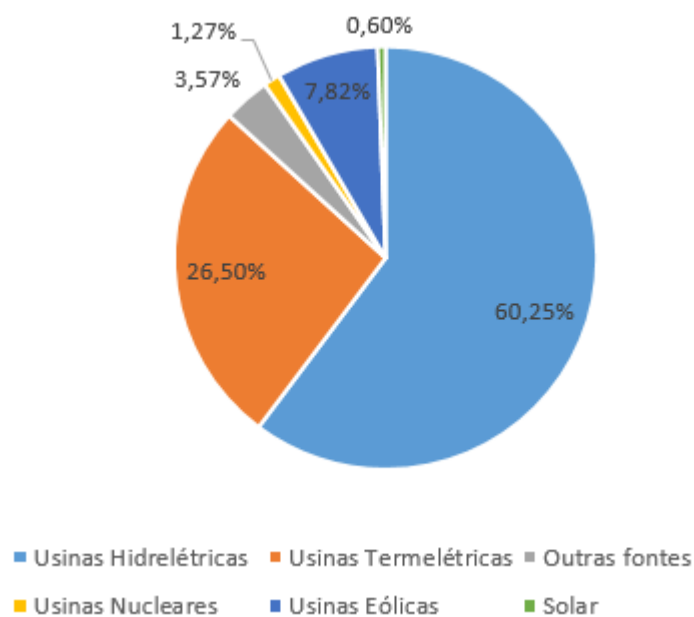
Fonte: Adaptado de Gebran (2013, p. 13)

A energia na forma elétrica é a melhor em termos de transporte e controle (FREITAS, 2009), porém exige um controle complexo de forma que se evite o colapso da rede através de sobrecarga, curto-circuito ou corte. É desejável que se empreguem tensões na

geração de energia que permitam o atendimento à demanda de energia elétrica de maneira satisfatória, entretanto o processo de geração é feito em voltagens de baixa e média tensão (GEBRAN, 2013), conforme mostrado na Tabela 2, porque há uma limitação no fator de isolamento dessas cargas, que deixa de ser eficaz quando uma linha, por exemplo, é submetida a uma tensão muito alta (SARMA, 2001).

Um grande trunfo usado para contornar o problema de transmissão de cargas elétricas geradas à altas tensões é o uso de corrente elétrica alternada, tipo padrão de corrente gerada nas usinas hidrelétricas e uma das formas mais usadas de produzir energia elétrica. A nível nacional, a EPE (2018) divulgou no Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2018 que as hidrelétricas correspondem à produção de 60,2% da capacidade instalada de geração elétrica no Brasil, assumindo ainda o topo da matriz energética do país. O gráfico na Figura 3 resume a composição da matriz energética elétrica do Brasil.

Figura 3 – Matriz energética do Brasil em 2017



Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 (EPE, 2018)

Depois de gerada, a energia precisa percorrer grandes distâncias até alcançar o seu destino final. Esse é o principal objetivo dos sistemas de transmissão, descritos a seguir.

2.1.2 Sistemas de transmissão

O sistema de transmissão é a parte do SEP responsável por transmitir a energia elétrica do sistema de geração às subestações de distribuição do SEP, componentes primais do sistema de distribuição. O processo de transmissão é realizado através de grandes torres interligadas por linhas de alta-tensão, que podem ser aéreas ou subterrâneas. Conforme

discutido na [subseção 2.1.1](#), isolantes são os grandes limitadores do transporte de energia por altas tensões e esse fato aumenta o custo de produção de materiais que sejam eficientes para esse fim. Por essa razão, sistemas de transmissão via linhas aéreas, em geral, são mais baratos e largamente utilizados pelo mercado elétrico, uma vez que nesse tipo de sistema os condutores não são envolvidos por um isolante sólido, mas o ar é utilizado como um. Por isso é necessário que haja uma análise fina para definir questões como a tensão à qual determinada linha será submetida, quais tipos de torres usar, a distância mínima entre cada linha condutora, o tipo de material condutor, etc.

O sistema de transmissão precisa vencer grandes distâncias para levar energia aos consumidores finais, sendo necessário lidar com alguns fatores da transmissão, especialmente as perdas elétricas. Perdas elétricas se caracterizam pela conversão espontânea de energia elétrica em outras formas de energia (principalmente energia térmica) que não serão aproveitadas ao final do sistema. Fisicamente falando, as perdas elétricas se dão especialmente pelo *efeito Joule* e podem ser obtidas pela Lei de Ohm que define a potência dissipada num resistor como sendo:

$$P = RI^2 \quad (2.1)$$

Nessa relação, P é a potência perdida, R é a resistência elétrica do material da linha de transmissão e I é a corrente que atravessa a linha de transmissão. Analisando matematicamente, mantendo a resistência constante, a potência dissipada e a corrente são grandezas diretamente proporcionais, o que significa que quanto maior for a corrente na linha de transmissão, maior será a potência perdida (BLUME, 2017). Dessa forma é necessário se considerar meios que permitam a transmissão de energia elétrica com uma corrente mínima possível, mas que seja capaz de cruzar grandes distâncias. Uma outra consequência da Lei de Ohm descreve relação entre tensão, resistência e corrente elétrica. Essa equação descreve que:

$$P = VI \quad (2.2)$$

Analisando matematicamente nota-se que, para transmitir uma potência P ao consumidor, as grandezas de tensão (V) e corrente (I) tornam-se inversamente proporcionais, o que significa que aumentando a tensão V , a corrente na linha diminui, satisfazendo a restrição imposta pela potência dissipada na linha, descrita na [Equação 2.1](#).

O tipo de corrente empregada na transmissão de energia elétrica varia de acordo com a finalidade de cada linha de transmissão. Entretanto, é muito comum encontrar sistemas de distribuição que utilizam corrente alternada devido ser um tipo de corrente que exige equipamentos mais simples, menores e baratos que os de corrente contínua, além de conseguirem percorrer maiores distâncias que os transmissores de corrente contínua

em transmissões de mesma potência (RAUF, 2016). Em outras palavras, sistemas de transmissão de corrente alternada conseguem transmitir a mesma potência que um sistema de transmissão de corrente contínua, porém consumindo menos recursos. No Brasil, o órgão regulamentador determina que as correntes alternadas sejam transmitidas à frequência de 60 Hz, à luz de países como Estados Unidos. Já os países da Europa regulamentam os setores de transmissão de corrente alternada à faixa de 50 Hz (SARMA, 2001).

Um outro fator destacável nos sistemas de transmissão é o transporte de energia à tensões muito elevadas, conforme a Tabela 2 descreveu. Teoricamente, a tensão poderia ser elevada a níveis altíssimo, mas nesses casos há problemas com o isolamento das linhas. Embora esse seja um fator limitador, há razões pelas quais são empregadas tensões tão altas quanto possíveis nas linhas de transmissão, conforme observa Sarma (2001):

- Aumentar o alcance das linhas de transmissão à maiores distâncias;
- Diminuir perdas elétricas (conforme a Equação 2.2);
- Diminuir custos com a transmissão.

Por fim, os sistemas de transmissão são pontos estratégicos para alimentar consumidores com grande demanda, como indústrias (FREITAS, 2009). Nesse ponto também é possível conectar geradores distribuídos à rede, especialmente de fontes alternativas, de modo que a rede possua maneiras de suprir a demanda sem depender exclusivamente da geração de uma única usina. Os órgãos mundiais de padronização do setor elétrico incentivam amplamente a agregação de geradores distribuídos de energia limpa aos SEP, embora a agregação distribuída demande grande poder de controle sobre a rede (FREITAS, 2009).

2.1.3 Sistemas de distribuição

A terceira e última especificação do SEP é o sistema de distribuição, seção que recebe energia em alta tensão, e a distribui à tensão comercial entre os usuários finais, de acordo com a demanda. Conforme a Tabela 2 esse sistema opera à tensões inferiores à 66 kV, sendo mais comuns trabalharem nas faixas inferiores à 35 kV (GEBRAN, 2013). Esses sistemas podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos. Em termos de bibliografia, como no trabalho de Rauf (2016), considera-se como mais comuns no transporte de energia os sistemas monofásicos e trifásicos, possuindo esses últimos melhor aproveitamento por utilizarem corrente alternada na forma de ondas defasadas para compensar as perdas elétricas durante a transmissão.

Na prática, isso significa um alcance a maiores distâncias para transmissão, consumindo menos recursos, aplicando-se menores condutores em tamanho, peso e quantidade

que nos sistemas monofásicos (RAUF, 2016). Por essas razões, são adotados com muita frequência linhas trifásicas para a transmissão e distribuição de energia elétrica. Apesar disso, em última milha ainda são utilizadas distribuições monofásicas devido à menor demanda nas residências consumidoras.

No Brasil, é muito mais comum encontrar serviços de distribuição monofásico e bifásico, raramente adotando o sistema trifásico para o setor de distribuição aos consumidores convencionais. A tensão de uso residencial no país é de 110V a 240V, conforme padronização dos órgãos reguladores (FREITAS, 2009). Como adicional, as concessionárias de energia elétrica são regulamentadas a entregar 5% da tensão nominal aos consumidores (GEBRAN, 2013).

Os sistemas de distribuição são os setores do SEP mais próximos dos consumidores finais, precisando lidar com a constante transformação de tensão para diversos níveis, dependendo da tensão requerida pelos pontos consumidores de energia (BLUME, 2017). O controle e instalação de transformadores no sistema de distribuição é realizado pela subestação (FREITAS, 2009), sendo este um importante ponto de gerência desse sistema. Uma outra característica importante desses sistemas é que eles devem ser radiais. Nas palavras de Blume (2017, p.93), “*sistema radial significa que somente uma linha terminal do sistema de distribuição é conectado a uma fonte de energia*”. Isso significa que, modelados em um grafo, sistemas de distribuição não podem conter ciclos na malha interna de linhas ativas. Cabe ressaltar que essa é uma das características que norteou o desenvolvimento do projeto apresentado neste trabalho.

Uma subestação de distribuição precisa lidar com o fornecimento de energia elétrica a múltiplos pontos consumidores, fator que requer dessas subestações grande poder de controle das operações que ocorrem no *grid*. Uma falha em alguma das linhas de distribuição, por exemplo, precisa ser detectada, isolada e reparada rapidamente para se consiga manter bons níveis de qualidade de serviço. Porém, o que se vê na prática, à níveis nacionais, são altos índices de demora no atendimento desses casos, já que esse é um serviço majoritariamente manual e depende do contato dos consumidores com a concessionária, informando a falta.

Uma forma de minimizar esse tipo de problema é utilizar equipamentos como transformadores de potência, chaves elétricas de comando remoto, chaves de acionamento manual, filtros, sensores de sobrecarga, medidores, entre outros (FREITAS, 2009), com o fim de manter a gerência do *grid* em tempo real. Ainda assim os sistemas de distribuição são facilmente passíveis à falhas isoladas e podem representar um grande custo às concessionárias elétricas. Portanto, os sistemas de distribuição são grandemente focados por estudiosos, de modo que encontra-se neles um rico campo para desenvolvimento e aplicação de técnicas que permitam a esses sistemas se tornarem mais robustos e confiáveis. Há uma modalidade de sistema elétrico que é projetada para dar conta de toda essa

complexidade, se utilizando de redes de comunicação e tecnologias específicas, as chamadas redes inteligentes, ou ainda *smart grids*.

2.2 Smart Grids

No sistema elétrico tradicional, em especial no nível de distribuição, há grandes limitações relacionadas ao controle das operações, pois em geral são realizadas através de mapeamentos por visita em campo, maquinário mecânico e reconfiguração manual. Por ser um sistema com demandas de tempo real, nem sempre é possível realizar manutenções preventivas nas linhas e equipamentos sem desativar ou isolar uma área, tornando esse processo caro e lento. A seção dos SEP mais sensíveis à falha e à maiores variações é o sistema de distribuição, sendo mais suscetível à fatores externos e ambientais (BLUME, 2017). Esse se torna um grande fator motivador para a aplicação de técnicas que permitam o controle, mapeamento e proteção do sistema em tempo real, bem como torná-lo mais inteligente para realização de operações de maneira automática.

Redes inteligentes ou *smart grids* é o termo usado para se referir a uma modalidade emergente de SEP, que precisa cumprir uma série de objetivos para tornar o seu controle e reconfiguração baseados na informação que ele mesmo produz. Saraiva (2015) define *smart grids* como tipos de SEP que utilizam sensores e equipamentos especializados para monitorar o estado da rede e tomar decisões a respeito das manobras necessárias para manter os índices de continuidade, qualidade e eficiência da energia elétrica. Para Larik e Mustafa (2015, p.234), “*smart grids é a combinação das tecnologias de informação e comunicação com os sistemas de distribuição e transmissão*”. Em suma, sabe-se que os *smart grids* são uma modalidade de sistemas elétricos que utilizam equipamentos tecnológicos suportados por uma rede de comunicação para alcançar objetivos específicos que melhorem a qualidade do serviço prestado ao consumidor final.

Os *smart grids* precisam manter alguns objetivos para que entreguem um serviço com qualidade ao consumidor final. Não há um consenso entre os autores sobre a quantidade de objetivos a serem atingidos, mas é desejável que os *smart grids* exibam pelo menos algumas funcionalidades. Saraiva (2015), Bansal e Mathur (2009) descrevem as principais:

- *Autorrecuperação do sistema:* significa que o sistema precisa se recuperar automaticamente de falhas;
- *Alta qualidade de energia elétrica fornecida:* significa que a energia entregue ao consumidor final deve ter o mínimo possível de variação de tensão ou outros ruídos;
- *Resistência a ataques:* a rede deve se proteger de ataques eletrônicos e manter um mapeamento atualizado em tempo real, de forma a permitir que uma influência externa seja detectada no momento em que ocorre;

- *Suportar a utilização de geradores distribuídos*: o *smart grid* precisa lidar com a geração distribuída de forma a decidir o momento em que novas correntes precisem ser injetadas no *grid*, garantindo a integridade do sistema durante esse processo. Ressalta-se que o *smart grid* é um esforço mundial para o incentivo à produção de energia limpa e renovável, sendo essa a principal modalidade geradora no conjunto de fontes distribuídas nesses sistemas. Essa característica também engloba o uso de baterias ao longo do sistema de distribuição;
- *Motivar os consumidores a participar ativamente das operações no grid*: significa permitir que o consumidor final tenha acesso a dados em tempo real sobre o consumo e geração de energia, de modo que possibilite que os consumidores tomem decisões sobre economia e consumo de energia. Também se inclui nesse item a visualização dados econômicos a respeito dos mercados do setor elétrico e dos preços de energia, dando ao consumidor a possibilidade de realizar transações financeiras a respeito da energia excedente que ele mesmo produz em geradores particulares. [Bansal e Mathur \(2009\)](#) ressaltam que esse processo só é possível através de uma via de comunicação dupla entre a concessionária e o consumidor;
- *Controle do grid baseado nos dados de leitura do próprio grid*: significa que o *grid* elétrico deve ter a capacidade realizar leituras periódicas do estado do sistema, alimentar uma base de dados e tomar decisões sobre esses dados de forma que se execute procedimentos antecipados às falhas. [Saraiva \(2015\)](#) amplia essa característica à sistemas distribuídos de sensores, de forma que se ganhe em desempenho no sistema e precisão nas medições;
- *Otimizar a distribuição de energia*: como consequência do maior controle sobre a rede, é possível otimizar a distribuição de energia elétrica de modo a tornar esse processo mais eficiente.

Os *smart grids* são sistemas complexos, pois lidam com os mesmos desafios dos sistemas elétricos de potência, como visto ao longo da [seção 2.1](#). Dessa maneira, o campo de estudo dos *smart grids* é multidisciplinar ([SARAIVA, 2015](#)), aumentando assim as possibilidades de abordagens possíveis para os diversos problemas das redes inteligentes. Em comparação com os sistemas elétricos tradicionais, os *smart grids* abrem maiores possibilidades em lidar com a geração, transmissão e consumo de energia elétrica, tornando-se um grande atrativo para o mercado energético. A [Tabela 3](#), de [Larik e Mustafa \(2015\)](#), resume as principais vantagens de uma rede inteligente sobre os *grids* tradicionais.

Através do seu comportamento autônomo, os *smart grids* são capazes de fornecer meios eficientes e confiáveis de geração e consumo de energia, abrindo o SEP para uma larga escala de aplicações em seus subsistemas ([LARIK; MUSTAFA, 2015](#)). Assim, os

Tabela 3 – Comparação entre *grids* tradicionais e *smart grids*

Característica	Smart grid	Grid tradicional
Operações	Digitais	Eletromecânicas
Comunicação	Duas vias	Via única
Geração	Distribuída	Centralizada
Controle	Pervasivo	Limitado
Qualidade da energia	Alta	Moderada
Resistência a falhas	Adaptável	Falhas e <i>blackouts</i>
Monitoramento	Automático	Manual
Recuperação de falhas	Automático	Manual

Fonte: Adaptado de Larik e Mustafa (2015)

smart grids são um grande mercado a ser explorado no futuro, oferecendo ainda meios de se utilizar a energia de forma consciente, racionada e responsável.

2.3 Autorrecuperação de redes elétricas inteligentes

A autorrecuperação de uma rede elétrica representa a execução autônoma de tarefas que, diante de uma falha no fornecimento elétrico, visam o restabelecimento da energia às cargas afetadas do sistema sem a intervenção humana (CAMPOS; SARAIVA, 2018). Essa é uma funcionalidade importante das redes inteligentes por se integrar ao esforço do “fornecimento ininterrupto” de energia ao consumidor (JIA; MENG; SONG, 2011), tornando o sistema elétrico mais confiável no quesito de continuidade e oferecendo um serviço melhor apoiado e com melhor qualidade.

A integração da autorrecuperação em si aos *smart grids* representa uma grande complexidade se levadas em conta a série de informações geradas pelo sistema, as demandas do consumidor e ainda a gerência de múltiplas fontes distribuídas. Em outras palavras, realizar procedimentos de autorrecuperação nos *smart grids* implica no mapeamento e controle das diversas fontes de energia ao longo do *grid*, realizando a tomada de decisão de acordo com a localização e estado das fontes e da rede. Tendo em vista esses objetivos, a autorrecuperação exige que os *smart grids* possuam características que deem suporte à suas operações. Jia, Meng e Song (2011) descrevem em seu trabalho um sistema de tecnologias dividido em três níveis, que são peças chave para a execução da autorrecuperação em *smart grids*:

- *Camada base*: é a camada de mais baixo nível do *smart grid* e engloba equipamentos de *hardware* de telecomunicações e elétrica, como enlace físico de comunicação, roteadores, *switches* inteligentes, terminais de distribuição, equipamentos de proteção e controle, medidores inteligentes, chaves elétricas de controle remoto, etc. É a partir dessa camada que todas as camadas superiores poderão oferecer seus serviços, pois é

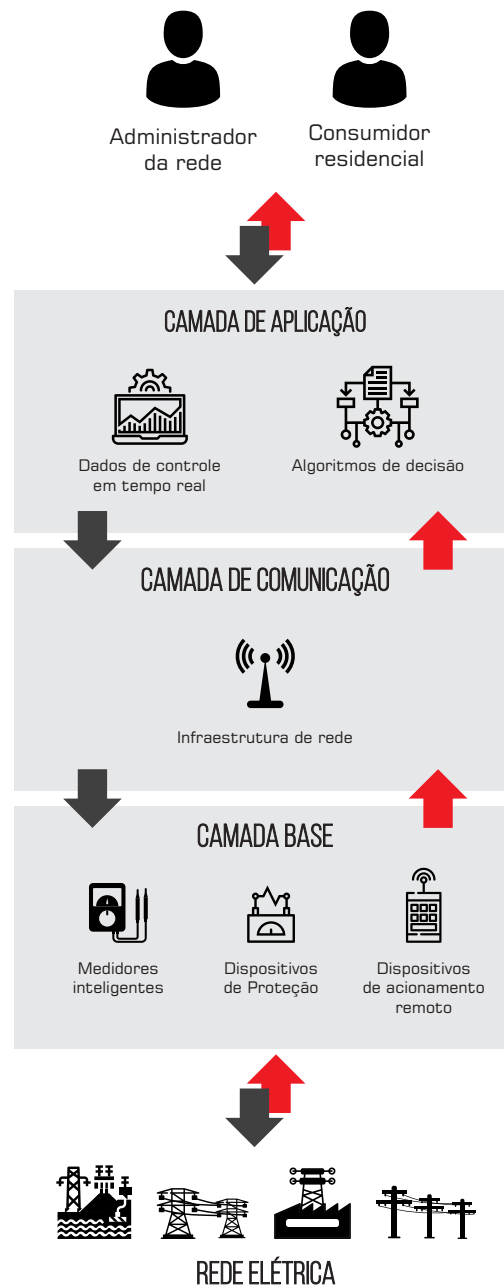
a camada mais básica e produz os dados que alimentarão a base de conhecimento do sistema, bem como todas as informações referentes ao estado corrente da rede. Em termos práticos, é a cada visível fisicamente que dará suporte às funcionalidades do *smart grid*;

- *Camada de suporte*: resume-se basicamente em toda a infraestrutura lógica da rede de comunicação que deve ser par à rede de distribuição (SARAIVA, 2015). Essa camada deve se preocupar em oferecer serviços de comunicação de alta velocidade e de via dupla, possibilitando a comunicação em tempo real entre a rede e os consumidores. Aspectos de segurança também devem ser levados em conta, pois é a partir dela que os serviços da rede serão prestados. Compõem essa camada principalmente os protocolos de segurança e rede, além de todo o esquema lógico de comunicação entre os multipontos da rede;
- *Camada de aplicação*: é a camada do *smart grid* mais externa, onde serão definidos e publicados os serviços disponibilizados. Entre esses serviços se incluem especialmente os serviços de monitoramento, avaliação, previsão de falhas, controle, recuperação e definição de políticas. Nessa camada vão os algoritmos utilizados para realizar procedimentos na rede (entre eles os de autorrecuperação), a tomada de decisão, a análise dos dados, os algoritmos de previsão, a análise de mercado energético, entre outros recursos.

Como adicional, o esquema da Figura 4 resume a organização dessa arquitetura de camadas nos *smart grids*. As setas em vermelho indicam o sentido da provisão de serviço entre uma camada e outra e o trânsito das informações geradas pela rede elétrica. Já as setas em cinza representam os comandos dos *stakeholders*, as tomadas de decisão e a realização de operações na rede. Na figura também é possível verificar a dupla via da cadeia de informações que gira em torno de toda a arquitetura dos *smart grids*.

2.4 Considerações do capítulo

Permeando o conceito de redes inteligentes há uma série de pormenores que precisam ser vistos como desafios a serem superados para que os *smart grids* sejam continuamente melhorados. Alguns países, como China e Estados Unidos (SARAIVA, 2015), já possuem projetos implantados de *smart grids*, mas um grande esforço ainda deve ser feito para que esses sistemas cheguem a países em desenvolvimento, como o Brasil. Embora seja uma área complexa e multidisciplinar, há uma série de pesquisas sendo incentivadas na área, tanto pelo setor público quanto pelo privado, de modo que esses sistemas sejam desenvolvidos e implementados.

Figura 4 – Esquema de organização em camadas dos *smart grids*

Fonte: Esquema do autor com base no trabalho de [Jia, Meng e Song \(2011\)](#)

Nesse capítulo visou-se definir e contextualizar os SEP e as principais funcionalidades dos *smart grids*, bem como a autorrecuperação e suas consequências. Definidos assim os principais conceitos englobados por esta pesquisa, destaca-se como seu ponto de foco a autorrecuperação em *smart grids*, fazendo uso da técnica de sistemas multiagente para isso. As razões que sustentaram os objetivos desta pesquisa e os trabalhos correlatos ao presente tema estão descritas no capítulo [Capítulo 3](#).

3 Sistemas multiagente

Este capítulo se encarrega de descrever a técnica de sistemas multiagente, bem como suas características. Na [seção 3.1](#) é dissertada a relação entre inteligência artificial e agentes, além de considerar alguns aspectos importantes sobre inteligência artificial tradicional e distribuída. A seguir, na [seção 3.2](#), são explanados os conceitos fundamentais que circundam os sistemas multiagente e suas características. Nesta seção também são verificadas algumas relações que existem entre sistemas multiagente e sistemas distribuídos. Logo após, a [seção 3.3](#) expõe um pouco da estrutura do [JADE \(2017\)](#), o *framework* utilizado para desenvolver os agentes do sistema proposto nessa monografia. Por fim, são realizadas algumas considerações a respeito dos tópicos abordados nesse capítulo.

3.1 Inteligência artificial e agentes

A computação começou a ganhar corpo de ciência após o fim da Segunda Guerra Mundial e, a partir desse momento, muitas de suas subáreas passaram a ser desenvolvidas por pessoas que apostavam na ciência como revolucionária das próximas décadas — e assim o foi. Sistemas Operacionais, linguagens de programação, redes de computadores e outras vertentes ganharam grande atenção dos pesquisadores na época.

Uma das áreas que também emergiu nesse contexto foi a inteligência artificial (IA), que na época era vista como uma maneira de os computadores interagirem com humanos de uma forma que fosse mais natural. Desde esses tempos uma pergunta intriga grandes nomes da ciência da computação: “*o que é inteligência artificial?*”. Para respondê-la, é necessário desbravar áreas além da computação em busca da raiz do termo *inteligência*, envolvendo ciências como a filosofia, as ciências sociais, a psicologia, entre outras ([SARAIVA, 2015](#)). Mesmo após discussões conjuntas entre as áreas, ainda não se tem resposta universal para o que é *inteligência*, dessa forma, tampouco haveria consenso para o termo *inteligência artificial*. Ainda assim, muitos autores se lançam a definir o termo, contudo os mesmos reconhecem que não são definições universais.

Há diversos pontos de vista que norteiam essas definições — segundo [Russel e Norvig \(2010\)](#), há quatro correntes de pensamento —, mas suas discussões estão fora do escopo deste trabalho. Para esta pesquisa, a definição de [Rich, Knight e Nair \(2009\)](#) será suficiente, que diz que inteligência artificial é o estudo de como programar os computadores de forma que façam atividades que, até o momento, as pessoas fazem melhor. Assim, desvia-se o foco do “computador inteligente” e concentra-se na ideia de “ação inteligente”. Entende-se por ação inteligente a realização de atividades que exijam certo grau de inteligência dos seres humanos. É possível programar computadores para realizarem ações inteligentes

e, dentro dessa questão, aparecem várias técnicas para se conseguir realizar esse tipo de programação.

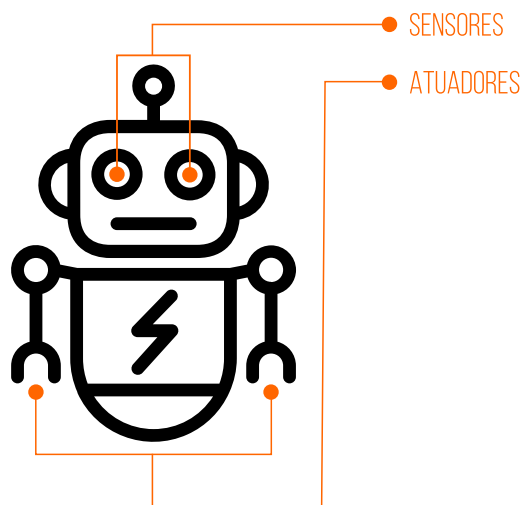
Uma forma de programar ações inteligentes é através do conceito de *agentes inteligentes*. Na área da inteligência artificial, define-se agente inteligente como uma entidade que pode perceber o ambiente através da sua leitura por meio de *sensores* e consegue interagir sobre ele por meio de *atuadores* (RUSSEL; NORVIG, 2010). Aqui entende-se “entidade” como qualquer objeto físico ou não, isto é, ultrapassa os conceitos gerais da robótica e computação. De uma forma mais específica, Wooldridge (2009) define um agente como um sistema computacional imerso em um ambiente e que realiza ações *autônomas* sobre ele para alcançar os objetivos que lhes foram determinados. Em suma, um agente é um sistema autônomo que realiza ações inteligentes através da percepção e atuação sobre o ambiente no qual está inserido. O termo *agente autônomo* significa que ele consegue realizar suas ações sem a intervenção direta de comandos externos ou controle sobre seu estado atual (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007). Para realizar a leitura e a interação com o ambiente, um agente precisa de dois componentes fundamentais denominados sensores e atuadores (RUSSEL; NORVIG, 2010).

- *Sensores*: são meios pelos quais o agente terá acesso à informações de estado do ambiente onde ele está inserido. Na computação, em geral, esses sensores são dispositivos e/ou softwares que leem o estado do ambiente e mantém esses dados em memórias;
- *Atuadores*: são meios pelos quais o agente poderá agir sobre o ambiente. Em geral, essa ação se dá pelo resultado do processamento dos dados de entrada à luz dos objetivos que o agente tem. Na computação, esses atuadores podem ser dispositivos de saída (como monitores, *leds* ou caixas de som), atuadores mecânicos (como braços ou pernas robóticas), entre outros.

Fazendo uma analogia, podemos considerar um pequeno robô autônomo com um agente inteligente. Seus “olhos” seriam seus sensores e seus braços e pernas mecânicas seus atuadores. A Figura 5 ilustra essa analogia. Como alternativa, um software pode ser considerado um agente se consegue operar autonomamente em um ambiente e, sem comandos externos, observá-lo — através de uma variável ou configuração, por exemplo — e atuar sobre ele — escrevendo um arquivo ou fazendo *prints* na tela, por exemplo.

As atividades que os agentes realizam durante o seu ciclo de vida são descritas como comportamentos. Comportamentos, então, podem ser definidos em termos do que o agente precisa executar, colocando cláusulas para que determinadas tarefas sejam realizadas ou não. Os comportamentos podem descrever três faces, em particular, de cada objetivo do agente: *o que fazer*, *quando fazer* e *como fazer*. Cabe delinear que, dependendo da

Figura 5 – Modelo esquemático de um agente



Fonte: Adaptado de [Saraiva \(2015, p. 49\)](#)

abordagem utilizada para a programação dos agentes, essas faces dos comportamentos podem ser alteradas em função de como o agente percebe o ambiente, podendo até mesmo definir novos objetivos durante o seu ciclo de vida. Isso faz parte da característica autônoma que os agentes inteligentes possuem, isto é, devem se adaptar por si só ao ambiente no qual estão imersos. Para diversos autores, todo agente exibe algumas características fundamentais em seus comportamentos que estão atreladas à sua existência e operação. Entre uma variação ou outra, os itens abaixo listam as principais características que um agente inteligente possui ([SARAIVA, 2015](#));([BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007](#));([WOOLDRIDGE, 2009](#));([WEISS, 1999](#)).

- *Reatividade*: é a habilidade de perceber o ambiente e suas variações e responder esses a estímulos em um tempo aceitável, de forma que a base de dados do agente tenha dados atuais sobre o estado do ambiente;
- *Proatividade*: ser proativo significa que o agente é capaz de tomar as iniciativas para agir sobre o ambiente, executando seus comportamentos para alcançar seus objetivos;
- *Habilidade social*: diz respeito à capacidade de interagir com outros agentes (humanos ou não) para satisfazer seus objetivos;

A capacidade de um agente agir socialmente está relacionada com a sua capacidade de comunicação. Um agente que consegue se comunicar, acaba por trocar “experiências” com a entidade a qual se comunica. Essa comunicação se dá pela troca coordenada de mensagens, e pode ser feita entre dois ou mais agentes ou outra entidade qualquer que entenda a linguagem utilizada pelo agente na sua comunicação. Assim, se estabelece a

necessidade de haver uma padronização a respeito da linguagem usada entre agentes e sistemas que pretendem manter uma comunicação ao longo do tempo. Em termos de computação, essa comunicação se dá através de redes de computadores, utilizando os protocolos de comunicação vigentes e herdando todas as suas características. Mais características a respeito da comunicação entre agentes serão dadas na [seção 3.2](#), pois a partir desse ponto há o estabelecimento de uma sociedade de agentes, denominada *sistema multiagente*.

À um primeiro olhar, agentes possuem uma raiz muito próxima à ideia de objetos do paradigma de programação orientada a objetos. Em ambos, objetos e agentes são independentes uns dos outros, executam tarefas definidas e se comunicam através da troca coordenada de mensagens. Essas características ajudaram o desenvolvimento dos sistemas multiagente ao longo dos anos, já que acompanharam, em certo aspecto, o desenvolvimento das linguagens orientadas a objetos ([BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007](#)). Além disso, as linguagens de orientação a objetos (OO) possuem características que favorecem a implementação de agentes, tão verdade que muitos *frameworks* para programação multiagentes atuais se utilizam de linguagens e bibliotecas OO em suas implementações, tais quais o [JADE \(2017\)](#), por exemplo.

Entretanto, há que se pontuar que técnicas tão parecidas possuem diferenças chave que lhes atribuem o caráter de serem únicas. As principais diferenças entre essas duas modalidades de programação se dão em três pontos, a saber autonomia, flexibilidade e controle de processo ([WOOLDRIDGE, 2009](#))([WEISS, 1999](#)); ([BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007](#)).

Autonomia, como já definido, dá ao agente a possibilidade de executar seus comportamentos por iniciativa própria, não necessitando que um agente externo lhe dê estímulo para que isso ocorra. Na programação OO, um objeto só executa seu comportamento (método) se for invocado por algum outro objeto em algum momento da execução.

A *flexibilidade* está relacionada ao tipo de comportamento que um agente executa, isto é, há uma escolha ativa do agente sobre a decisão de executar ou não determinado comportamento e, em caso positivo, que tipo de comportamento deve ser executado (reativo, proativo ou social). Em relação aos objetos, qualquer chamada a seus métodos deve ser feita de maneira explícita, indicando qual método será executado, mesmo que estes tenham a vantagem do polimorfismo. Além do mais, objetos não podem escolher se executam ou não determinado método, mas necessariamente respondem à todas as chamadas que lhes são feitas.

Finalmente, em termos de *controle de processo*, um agente tem total controle sobre os processos e *threads* que ele executa naquele momento, podendo criar, parar ou remover *threads* que estejam executando seus comportamentos. No caso da estrutura OO, não há controle por parte do objeto sobre as *threads* que executam suas atividades, pelo contrário,

por questões de segurança, abstraem essa tarefa de si.

A técnica de desenvolver agentes utiliza a ideia do aprendizado coletivo. Isso significa que um agente pode aprender por meio da interação com o ambiente (aprendizado indireto) e também pela interação com outros agentes (aprendizado direto) (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007). Essa ideia básica traz consequências relevantes para a programação com agentes, pois entra num ramo mais recente da IA, a inteligência artificial distribuída.

Segundo Saraiva (2015), a inteligência artificial distribuída é a parte da IA que estuda as relações de aprendizado por interação entre múltiplos agentes inteligentes. Para o autor, cada agente possui uma visão específica do ambiente em que está inserido e, por meio das interações entre outros agentes, atinge um determinado objetivo. Essa parte da IA se difere da IA tradicional porque esta é vista como um único sistema inteligente que é capaz de simular aprendizado e tomada de decisão. A IA distribuída, por outro lado, concentra-se no fato do conhecimento estar distribuído, simulando os comportamentos inteligentes através do compartilhamento das múltiplas visões do estado do sistema. A vantagem está no fato de ser possível simular com mais precisão ambientes que por natureza são distribuídos, tais quais os *smart grids*.

Bellifemine, Caire e Greenwood (2007) complementam essa ideia trazendo afirmações a respeito da eficácia desse tipo de método para resolver problemas complexos, já que haveria um processamento descentralizado. Como resultado de tal distinção, novas técnicas surgem para explorar a vertente de aprendizado e inteligência artificial distribuída, como a técnica de sistemas multiagente.

3.2 Sistemas multiagente e suas características

O processo de aprendizagem na IA distribuída é diferente dos processos de aprendizagem da IA tradicional, conforme discutido na seção anterior. Sabe-se que a interação é um fator imprescindível para técnicas da IA distribuída, portanto, as redes de comunicação são requisito básico para esse tipo de abordagem. No âmbito dos agentes, o processo de aprendizagem se dá, da mesma forma, por meio da comunicação entre vários agentes, podendo ser agente humanos ou não (SARAIVA, 2015). À reunião de vários agentes inteligentes, imersos em um ambiente, conectados por uma rede de comunicação e se coordenando pela troca de mensagens, dá-se o nome de *sistema multiagente* (SMA).

Saraiva (2015), por sua vez, define sistema multiagente como um conjunto de agentes em um ambiente computacional e que implementam as técnicas de inteligência artificial distribuída. Um sistema multiagente, portanto, é um plataforma *peer-to-peer*, já que agentes autônomos são quem requisitam e proveem toda a informação que circula no sistema. Com o termo *autônomo* diz-se que os agentes não precisam ter, necessariamente,

um ponto central para fazer requisições ou se reportar, pois todos podem ser, ao mesmo tempo, provedores e requisitantes dos recursos de informação do sistema, eliminando assim, nativamente, a figura do ponto central de falhas.

É interessante notar que a definição de SMA é muito próxima à definição de sistemas distribuídos. [Coulouris et al. \(2013\)](#) definem um sistema distribuído como diferentes componentes localizados em computadores interligados por uma rede e se comunicam e coordenam através da troca de mensagens. Assim, pode-se classificar SMA como um tipo de sistema distribuído, com o adendo que o SMA trabalha autonomamente devido as características dos agentes que o compõe. Dessarte, SMA são muito vantajosos quando trabalham com problemas distribuídos e sobre sistemas distribuídos ([SARAIVA, 2015](#)). Esse se torna então o principal motivo por optar pelo uso da técnica de SMA nesta pesquisa, uma vez que o problema de autorrecuperação nos *smart grids* é também um problema distribuído.

Um ator muito importante no funcionamento dos SMA é a mensagem, pois é o objeto que carregará as informações entre os agentes que se comunicam. Como consequência, as mensagens precisam seguir um protocolo bem definido, como fim de que os múltiplos agentes consigam compreender as informações que são trocadas no sistema e para proporcionar até mesmo a interoperabilidade entre diferentes sistemas multiagente. Existem alguns esforços atuais no sentido de prover especificações para essas linguagens e uma delas é a [FIPA \(2002\)](#), que propõe um protocolo muito utilizado pelos diversos *framework* para multiagentes ([BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007](#)).

Evidencia-se, porém, que um protocolo de comunicação de agentes não obriga a implementação de um protocolo de redes específico, ficando a cargo do desenvolvedor escolher qual o protocolo mais adequado para sua abordagem. De toda forma, toda mensagem em sistemas multiagentes deve expressar — além de especificar campos derivados dos atuais protocolos de rede, tais como endereço IP e MAC do remetente e destinatário, porta, entre outras coisas — pelo menos dois campos: ato comunicativo e conteúdo.

Ato comunicativo é a informação que definirá qual o tipo de comunicação que será feita entre os agentes. Fazendo uma analogia, quando duas pessoas conversam por texto na língua portuguesa, uma frase é definida como uma pergunta quando termina com o caractere “?”. Isso significa que haverá o aguardo por uma resposta, salvo alguns casos, pelo emissor da mensagem. De outra maneira, uma frase que termina com o caractere “.” pode significar uma resposta ou uma simples informação. O segundo campo, o *conteúdo*, diz respeito ao que será transmitido na comunicação. Em termos de protocolo de comunicação dos agentes, uma padronização nessa forma de trocar mensagens pode significar a interoperabilidade entre os diversos e heterogêneos SMA que possam existir.

3.2.1 Arquiteturas de sistemas multiagente

A possibilidade de interação entre múltiplos agentes do sistema abre precedentes para as mais diversas formas de organização dos agentes. Bellifemine, Caire e Greenwood (2007) definem essas formas de organizar os agentes como arquiteturas de SMA e, segundo os autores, podem ser classificadas em quatro tipos:

- *Arquitetura baseada em lógica*: é um tipo de arquitetura baseada em linguagem simbólica, como a dos seres humanos. Tem raízes na lógica simbólica e, por isso, possui uma lógica fácil de entender, porém, tem problemas quanto ao tempo de processamento das respostas e à abstração do mundo real, que nem sempre se dá por símbolos;
- *Arquitetura reativa*: é baseada na dualidade estímulo-resposta. Os agentes atuam sobre um ambiente em função do que eles conseguem ler do mesmo ou dos estímulos que recebem de outros agentes. É vantajoso por produzir respostas rápidas em ambientes dinâmicos e são facilmente adaptáveis. Porém, tomam as decisões somente baseados na leitura do ambiente, que nem sempre é correta ou clara. Além disso, sistemas reativos não conseguem aprender por experiência;
- *BDI*: baseia-se na formação de regras através de lógica modal que descrevem os “desejos” do agente. Possui quatro estruturas de dados básicas na sua construção: *belief*, que representa as informações que um agente tem sobre um ambiente; *desire*, que representa os objetivos que o agente tem, baseado nos dados lidos do ambiente (*belief*); *intention*, que são os comportamentos que o agente deverá executar (subconjunto de *desire*); e *plan*, que é uma estrutura linear com os passos que o agente deverá executar para concluir suas tarefas (*intention*). Nesses casos, dependendo de como foi programado, um agente consegue criar novos objetivos à medida que convive com outros ou observa o ambiente. É ideal para técnicas de aprendizado, porém, possui uma linguagem não favorável à adaptação OO.
- *Arquitetura em camadas*: utiliza camadas que funcionam como mini agentes. Essas arquiteturas podem ser organizadas em camadas horizontais ou verticais. Na arquitetura *horizontal* as camadas são conectadas diretamente aos sensores e atuadores do agente, trabalhando mutuamente para executar as ações baseado-se na leitura dos sensores. Já nas arquiteturas verticais as camadas possuem uma hierarquia. Só uma camada é conectada diretamente aos sensores e outra aos atuadores, obrigando o fluxo de informação passar pelas camadas intermediárias e mediando conflitos entre elas.

Há autores que também classificam arquiteturas de SMA dependendo de como os agentes interagem. Para isso, esses autores se baseiam nas relações sociais humanas

e replicam esses conceitos em SMA. Assim, tem-se sistemas onde os agentes agem com concorrência, cooperação ou negociação, formando modelos como sociedades, hierarquia, mercado, federação, entre outros.

Os SMA atualmente são muito utilizados para resolver problemas complexos e simular ambientes para prever fatos. Sistemas como simulação de partículas, previsão climática (LEE; LIU, 2004), simulação do comportamento das bolsas de valores (LUO; LIU; DAVIS, 2002), pesquisas simuladas de implantação de mercado (PRACA et al., 2003), sistemas de segurança, sistemas de distribuição hídrica, sistemas elétricos de potência (EDDY; GOOI; CHEN, 2015), problemas de otimização são alguns exemplos dos campos onde os SMA são usados como meio de se conseguir obter soluções próximas daquilo que se espera.

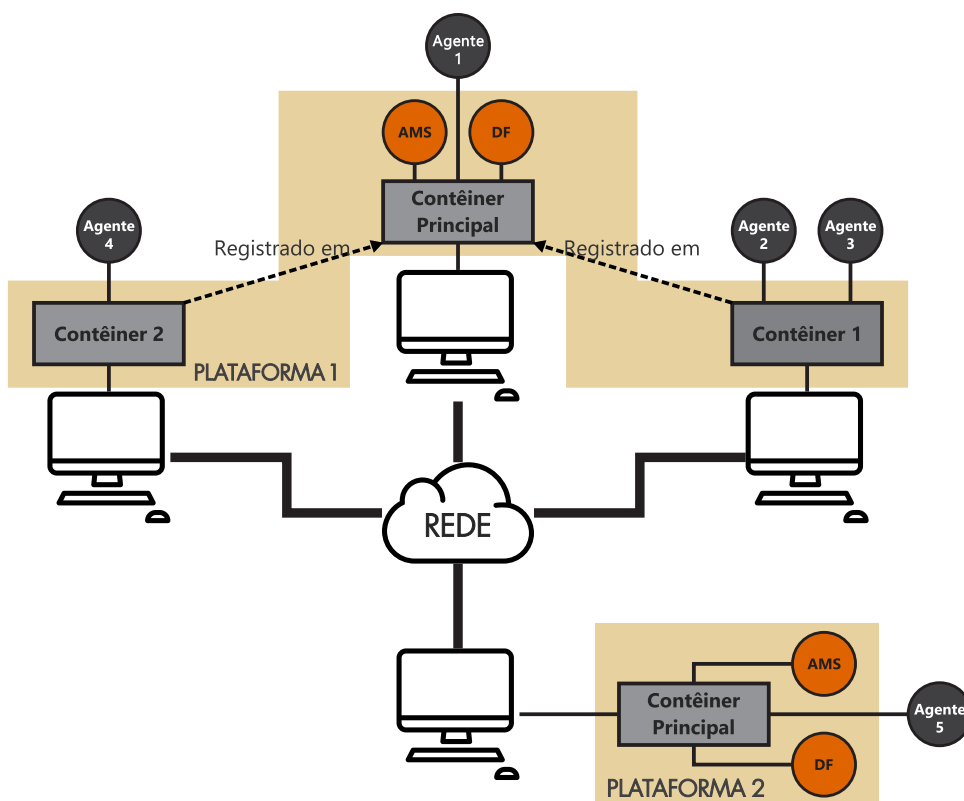
3.3 A plataforma JADE

Existe uma série de plataformas para desenvolvimento de sistemas multiagente, cada uma com foco em diferentes arquiteturas com o fim de incentivar o estilo *Agent-Oriented Programming* (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007) de desenvolver *software*. Uma plataforma muito usada é o JADE (2017), que segundo os seus criadores, é um *middleware* que traz facilitadores para a implementação de SMA. O JADE é baseado na linguagem de programação Java (ORACLE, 2018) e por isso suporta uma série de bibliotecas que acompanham a linguagem, além de prover algumas ferramentas para análise de ambientes, checagem de estados de agentes entre outras.

No JADE, os agentes são organizados em plataformas e contêineres. *Plataformas* são os espaços mais básicos num ambiente JADE e são elas que abrigarão todos os contêineres e agentes do sistema. É importante ressaltar que uma plataforma identifica um conjunto de agentes, o que significa que o nome da plataforma compõe os endereços dos agentes que nela residem. Agentes de uma mesma plataforma também compartilham recursos e se comunicam mais facilmente, porém esse fato não impede que plataformas diferentes consigam se comunicar, desde que se saiba o endereço e o protocolo de comunicação utilizado na plataforma com a qual se deseja manter comunicação. *Contêineres* são subconjuntos das plataformas que abrigam de fato os agentes do sistema. Diferentes contêineres podem pertencer a uma mesma plataforma, além de poderem ser executados em diferentes *hosts*, entretanto, todo contêiner deve estar registrado em uma única plataforma.

Toda plataforma tem um contêiner principal, que é de onde dois agentes específicos (AMS e DF) vão exercer o papel de gerência da plataforma e dos recursos compartilhados entre os agentes. Esses agentes proveem espaços para a publicação de serviços (páginas amarelas), reconhecimento de agentes (páginas brancas) e outros recursos compartilhados que visam garantir a comunicação entre os diferentes agentes do sistema. Essa estrutura

Figura 6 – Esquema organizacional do JADE



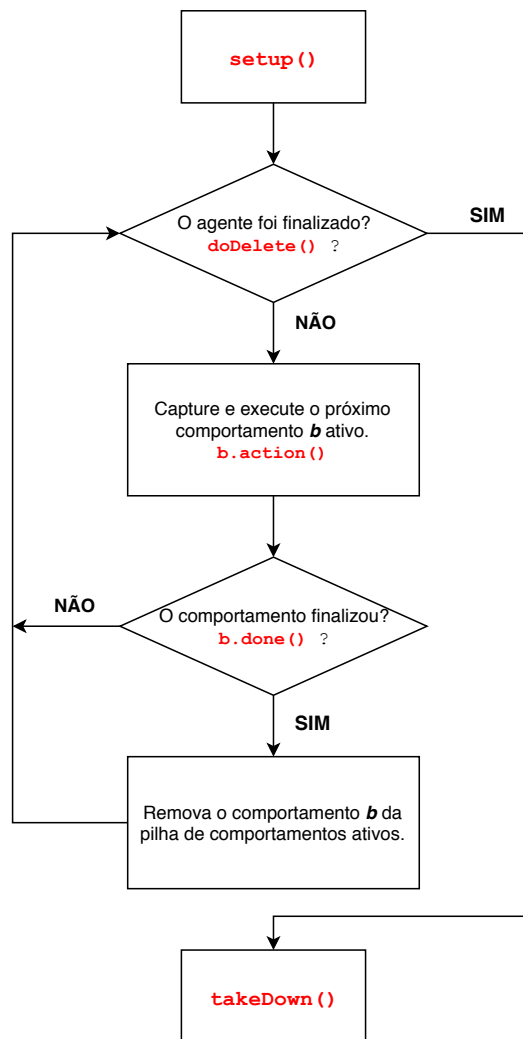
Fonte: Adaptado de [Caire \(2009, p. 6\)](#)

básica de todo SMA programado em JADE está ilustrada na [Figura 6](#).

Todo agente em JADE possui um ciclo de vida bem definido, que é controlado pelo próprio agente, dependendo do alcance de seus objetivos, onde é possível observar três momentos típicos. A *inicialização* é o momento onde o agente receberá todas as informações das quais precisará durante o seu ciclo de vida, além de adicionar seus comportamentos iniciais. O momento de *execução* é quando o agente está operando e executando seus comportamentos de acordo com a variação do ambiente e os estímulos que recebe. Por fim, o momento de *finalização* ocorre quando o agente atingiu seu objetivo final e executa as suas últimas operações antes de ser finalizado e encerrar todos os seus processos. A [Figura 7](#) apresenta um fluxograma que resume o ciclo de vida de um agente no JADE, onde os comandos destacados em vermelho são métodos dos agentes e comportamentos executados pelo sistema.

Um agente pode executar uma série de comportamentos durante o seu ciclo de vida. Os comportamentos em JADE são classes Java que definem as tarefas a serem executadas em cada comportamento e podem ser de dois tipos básicos: comportamentos com fim definido ou comportamentos com fim indefinido. Como o nome já explica, *comportamentos com fim definido* são comportamentos que executam suas tarefas — ou não — e depois são

Figura 7 – Fluxograma do ciclo de vida dos agentes no JADE



Fonte: Adaptado de [Caire \(2009, p. 11\)](#)

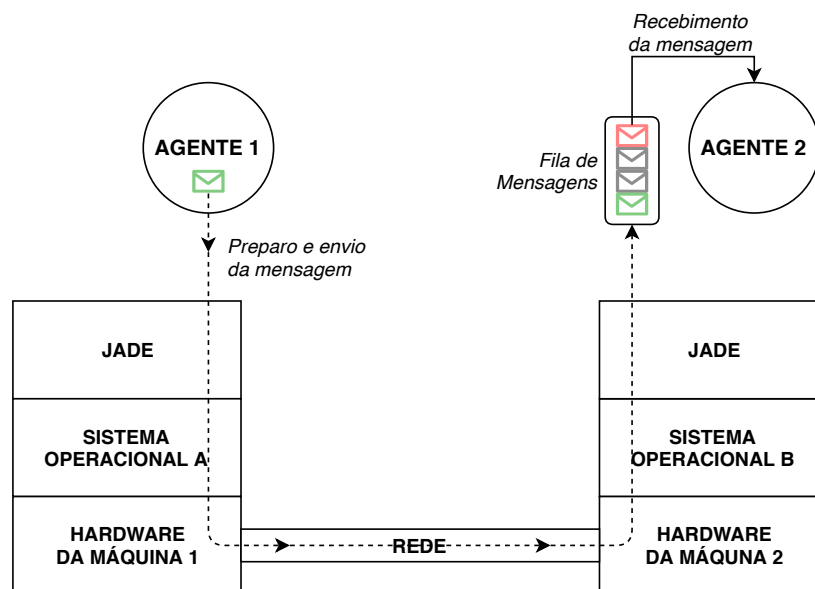
finalizado. Existem muitas variações desse tipo de comportamento, mas foge do escopo deste trabalho uma discussão detalhada sobre eles. Da mesma forma, *comportamentos com fim indefinido* são comportamentos cíclicos e não finalizam até que o agente seja finalizado. Também existem uma série de variações dos comportamentos cíclicos e são usadas de acordo com as tarefas que precisam realizar. Vale frisar também que essas variações de comportamentos podem ser temporais, compostas, simuladoras de máquinas de estado, entre outras.

O JADE também oferece ferramentas para a comunicação entre agentes. Como todo *framework* para sistema multiagente, o JADE pré-implementa uma biblioteca que lida com toda a complexidade da comunicação, sendo necessário apenas informar dados sobre o *receptor*, *ato comunicativo* e *conteúdo* da mensagem. A passagem de mensagens no JADE é assíncrona ([CAIRE, 2009](#)), o que traz vantagens como o não-bloqueio dos

agentes que enviam ou recebem as mensagens. Isso permite que os agentes continuem a executar suas tarefas sem ficarem presos à espera por operações de rede e de arquivos. A principal desvantagem em sistemas distribuídos desse tipo é a dificuldade em saber se haverá resposta daquela requisição, precisando estabelecer técnicas de *timeout* para escapar de possíveis falhas (COULOURIS et al., 2013). Esse problema, logicamente, se estende para SMA, porém os agentes têm a flexibilidade de tomar diversas decisões em casos como esse, podendo, por exemplo, contornar o problema verificando com outros agentes próximos se podem atender à sua requisição.

Todo o processo de troca de mensagem é controlado pelo JADE, que entrega as mensagens à pilha que cada agente possui. Ao receber uma mensagem, o agente pode estabelecer uma série de filtros que lhe permite decidir o que fazer sobre uma mensagem e o seu conteúdo e o momento de fazê-lo. A troca de mensagens no JADE utiliza a linguagem ACL e protocolo MTP (*Message Transport Protocol*), ambos seguindo as determinações da FIPA (2002). O protocolo MPT não obriga o programador a utilizar um protocolo da camada de aplicação específico, mas possui pré-configurado, por questões de convenção, o protocolo HTTP para transmitir as mensagens. A Figura 8 retrata resumidamente como é feita a troca de mensagens no JADE.

Figura 8 – Esquema de comunicação dos agentes no JADE



Fonte: Adaptado de Caire (2009, p. 15)

3.4 Considerações do capítulo

O presente capítulo definiu termos relativos à inteligência artificial e agentes inteligentes, que são primordiais para a fundamentação teórica de sistemas multiagente.

Não há um consenso que defina se agentes são realmente inteligentes, mas sabe-se que podem simular ações inteligentes. Um agente precisa interagir com o ambiente e com outros agentes, processos pelo qual ele aprende. Um sistema multiagente é a coleção de diversos agentes inteligentes que interagem uns com os outros com o fim de alcançarem seus objetivos e podem ser organizados de diversas maneiras. Cada tipo de arquitetura de SMA é adequado para um ou outro problema dependendo da abordagem utilizada. A ferramenta utilizada para implementar o SMA proposto neste trabalho é o JADE, *framework* baseado na linguagem Java e que possui estruturas de organização e comunicação distribuídas, característica intrínseca dos SMA.

4 Modelagem do sistema

Este capítulo tem como objetivo especificar três importantes elementos deste trabalho: os modelos de rede elétrica utilizados, o sistema multiagente modelado e o algoritmo de autorrecuperação proposto para execução no sistema multiagente (SMA). Em especial, a modelagem do algoritmo de autorrecuperação seguiu a ideia de, utilizando-se de falhas simuladas em pontos arbitrários, dar meios para que o sistema multiagente reconfigure a rede de forma a garantir o restabelecimento da energia às cargas que foram afetadas.

Pontua-se aqui que os modelos de rede elétrica utilizados são de redes elétricas de distribuição, sendo empregados os termos “rede elétrica” ou simplesmente “rede”, por questões de simplificação da escrita. Numa primeira etapa são apresentados os modelos de rede elétrica utilizados no trabalho e suas características, bem como topologia, entre outros. A seção a seguir mostra o SMA modelado e as operações que ele realiza. Por fim, são realizadas as considerações do capítulo.

4.1 Definição e características dos modelos de rede elétrica utilizados

Para investigar o problema da autorrecuperação e validar a proposta realizada nesta pesquisa é necessário, num primeiro momento, definir os aspectos da rede elétrica na qual se realizarão as simulações de falta e se executará o algoritmo de autorrecuperação. São utilizados dois modelos de rede elétrica para este fim, sendo a primeira com 8 (oito) nós e a segunda com 33 (trinta e três). O primeiro modelo, com 8 nós, aqui chamado de topologia *8-bus*, foi concebido para este trabalho com o fim de testes primários para o SMA aqui proposto, enquanto que o segundo modelo, o de 33 nós, nomeado topologia *33-bus* é um modelo da IEEE, com dados relatados por [Baran e Wu \(1989\)](#), com o fim de validar esta proposta por meio de um modelo já utilizado em outros trabalhos.

Primeiramente, cabe delinear que todo sistema elétrico possui uma série de restrições que precisam ser seguidas para que opere dentro da normalidade. Não fugindo à essa regra, abaixo tem-se definidas as restrições consideradas para essas duas redes elétricas ([CAMPOS; SARAIVA, 2018](#)):

- A rede elétrica ativa — a rede pela qual circula de fato corrente elétrica — deve ser radial, isto é, não pode apresentar ciclos;

- A rede elétrica deve dispor de linhas de reserva (*tie lines*) que servirão como canal alternativo para religamento dos nós em falta.

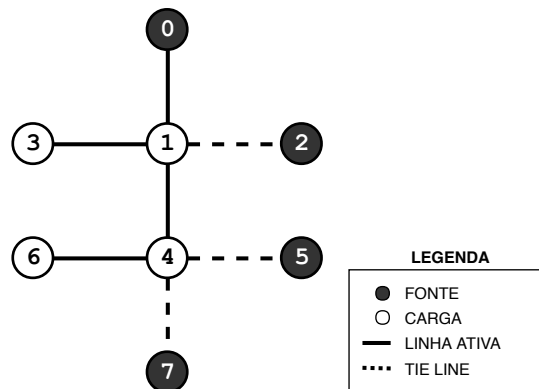
Definidas as restrições, é necessário modelar a topologia das redes escolhidas. Ambas as redes foram modeladas como grafos, onde os vértices representam as cargas, isto é, os nós demandantes de energia elétrica no sistema, e as arestas representam as linhas de distribuição. As arestas do grafo possuem pesos que no sistema são dados por números complexos, representando a resistência elétrica (parte real) e a reatância (parte imaginária). Assim, quanto maior o valor do peso da aresta na parte real, maior deverá ser a perda elétrica naquela linha, considerando uma corrente elétrica constante. As arestas pontilhadas no grafo representam as *tie lines*, que são linhas desligadas, isto é, com a chave elétrica aberta, e por isso não formam ciclo na rede, apesar de o fazerem visualmente na topologia *33-bus*. A rigor, a rede elétrica, então, possui dois grafos sobrepostos, sendo o primeiro composto pelas arestas preenchidas — representando a rede elétrica ativa, isto é, o fluxo elétrico que atende às demandas das cargas — e o segundo composto por este primeiro grafo somando-se à ele as arestas pontilhadas — representando a topologia total da rede. Portanto, o interesse desse trabalho é justamente encontrar uma configuração do grafo da rede ativa que, diante de uma falta por queda de linha, consiga restabelecer a energia elétrica aos nós afetados considerando todas as linhas da rede, ativas e inativas.

Em ambas as topologias todas as linhas são controladas por chaves elétricas que podem ser abertas ou fechadas em tempo de execução, com vistas a reconfigurar a rede sempre que necessário por meio de comandos remotos. Chaves elétricas então, para esta abordagem, são instrumentos elétricos controlados por comando remoto que podem fechar ou abrir um circuito, permitindo ou não a passagem de corrente elétrica por uma linha condutora, respectivamente. Considera-se que em cada carga nas duas topologias também existem dispositivos com capacidade de processamento e sensores que mantêm dados atualizados da própria carga. Uma carga no sistema é todo nó que possui uma demanda de potência e consome energia elétrica e são as entidades que são afetadas nos casos de falha no fornecimento. A ideia é testar o sistema multiagente modelado por este trabalho fazendo-o lidar com diferentes topologias de rede e, por isso, deverá levar em conta as peculiaridades das duas topologias aqui especificadas.

Diante dessas considerações, são apresentados os grafos correspondentes aos modelos de rede utilizados nas Figuras 9 e 10 para as topologias *8-bus* e *33-bus*, respectivamente.

A título de informação, as tensões nominais nos nós-fonte 0 (zero), 2 (dois), 5 (cinco) e 7 (sete) da topologia *8-bus* são todas iguais a 12,66 kV, decaindo ao longo da rede. O mesmo vale para a topologia *33-bus*, porém esse valor é aplicado somente ao nó 0 (zero), única fonte no modelo. Em termos práticos, esses nós-fontes são representações das subestações de distribuição da rede elétrica e são localizadas em diferentes regiões

Figura 9 – Grafo da topologia 8-bus



Fonte: O autor

Tabela 4 – Valores de resistência e reatância nas linhas da topologia 8-bus

Linha	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
$\overline{0,1}$	0.0922	0.0470
$\overline{1,3}$	0.0669	0.0864
$\overline{1,4}$	0.1811	0.1941
$\overline{4,6}$	1.1966	1.1550
$\overline{1,2}$	0.1500	0.1500
$\overline{4,5}$	0.1500	0.1500
$\overline{4,7}$	0.8190	0.7070

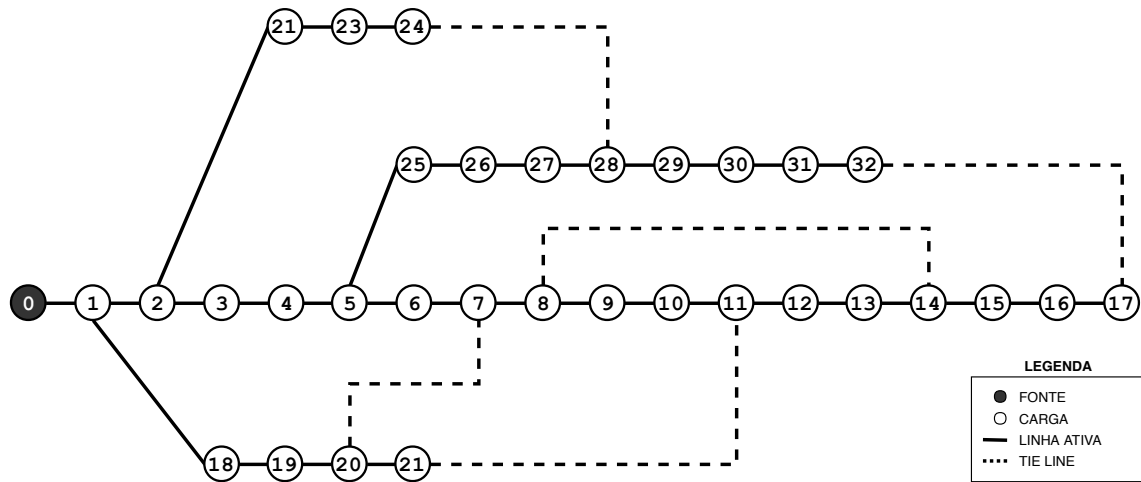
Fonte: O autor

geográficas, além de possuírem características peculiares. A Tabela 7 detalha os valores de resistência e reatância nas linhas de distribuição da topologia 8-bus, valores que influenciam nos cálculos de perda elétrica no sistema. Os valores de resistência e reatância para a topologia 33-bus estão definidos no trabalho de Baran e Wu (1989), entretanto podem ser consultados no apêndice deste texto.

A topologia 8-bus foi concebida para operar com os primeiros testes do SMA aqui proposto, por isso possui uma peculiaridade em relação à topologia 33-bus. A topologia 8-bus possui múltiplas fontes, exatamente quatro. Devido ao fato de ser uma topologia pequena, para aumentar o estresse no SMA em relação ao número de possibilidades de configurações que o sistema pode assumir após o processo de autorrecuperação foi necessário criar múltiplas fontes e aumentar a densidade de tie lines em relação ao número de linhas do modelo, que nessa topologia é de $\frac{3}{7}$ contra $\frac{5}{37}$ da topologia 33-bus. A topologia 33-bus já conta com apenas uma fonte, contudo possui um maior número de nós, tendo como objetivo testar o desempenho do sistema quando se tem muitos nós para gerenciar.

A topologia 8-bus é um resultado direto dos primeiros testes realizados com o

Figura 10 – Grafo da topologia 33-bus



Fonte: O autor

sistema multiagente proposto e por isso não é encontrada em nenhuma literatura. Durante os primeiros testes com o modelo de SMA e o algoritmo de autorrecuperação, foi necessário produzir diversos modelos de redes pequenos para que fosse possível validar as etapas do algoritmo e atestar a coerência das ações tomadas pelos agentes. Dessa forma, foi proposto um modelo com 8 (oito) nós pelo fato deste culminar em um número menor de *logs* e saídas no terminal do sistema operacional, tornando a análise dos resultados mais legível.

Durante a evolução do sistema, percebeu-se a necessidade de verificar o comportamento do sistema para situações onde mais de uma fonte estivesse disponível. Dessa forma, para acompanhar o elevado número de *tie lines* sugeridos para a topologia 8-bus criou-se quatro pontos de fonte de energia (nós 0, 2, 5 e 7). Isso proporciona ao algoritmo mais de uma possibilidade de religamento da ilha na maioria dos casos.

Por fim, para aproximar essa topologia à um modelo mais real, foram utilizados os dados técnicos do modelo de 33 nós de [Baran e Wu \(1989\)](#), tais quais resistência e tensão nos nós, para nortear a escolha dos valores para a topologia 8-bus. Esses valores foram então escolhidos e estão descritos na [Tabela 7](#). Esta pesquisa optou por produzir, formalizar e utilizar esse modelo nas simulações para verificar as diferenças que o sistema pudesse apresentar ao operar sobre topologias com muitos ou poucos nós.

4.2 O sistema multiagente e suas operações

O sistema multiagente produzido por esta pesquisa foi projetado com o fim de se adaptar dinamicamente às diferentes topologias de redes que possam ser estudadas com o fim de validá-lo. Tal sistema possui dois tipos de agentes com diferentes atribuições: os **agentes de carga** (LA) e os **agentes de chave** (SA). Agentes de carga são as principais

personagens do SMA, pois são eles que executam a maior parte das operações no sistema. Cada LA do sistema monitora e reside em apenas uma carga da rede, ou seja, em termos práticos, um LA está relacionado apenas a uma carga, de modo que uma carga no sistema poder ser referida como um LA indiscriminadamente. Abaixo seguem as mais importantes atribuições desses agentes:

- Comunicar-se com LA vizinhos em busca de informações dos seus estados;
- Manter atualizados dados como alimentação, demanda, tensão e outros relativos à carga onde reside, de maneira a detectar alterações no ambiente e estar pronto a enviar atualizações do seu estado a quem as requisitar;
- Conectar-se a novos LA, em tempo de execução, para moldar-se ao dinamismo do sistema;
- Eleger um agente ativo nos casos de falta – agentes ativos serão discutidos mais à frente;
- No caso de ser eleito como agente ativo, realizar operações de mapeamento de rede e coordenar os agentes afetados pela falta.

Agentes de chave são majoritariamente passivos no sistema e suas operações são bem mais simples que as dos LA. Os SA residem em dispositivos nas linhas do sistema elétrico e guardam informações estáticas — como resistência e reatância — e dinâmicas — como estado da chave — da linha. Em semelhança à relação dos LA com as cargas, cada SA está relacionado a uma e somente uma linha do sistema elétrico. Abaixo tem-se a lista suas principais atribuições dos SA:

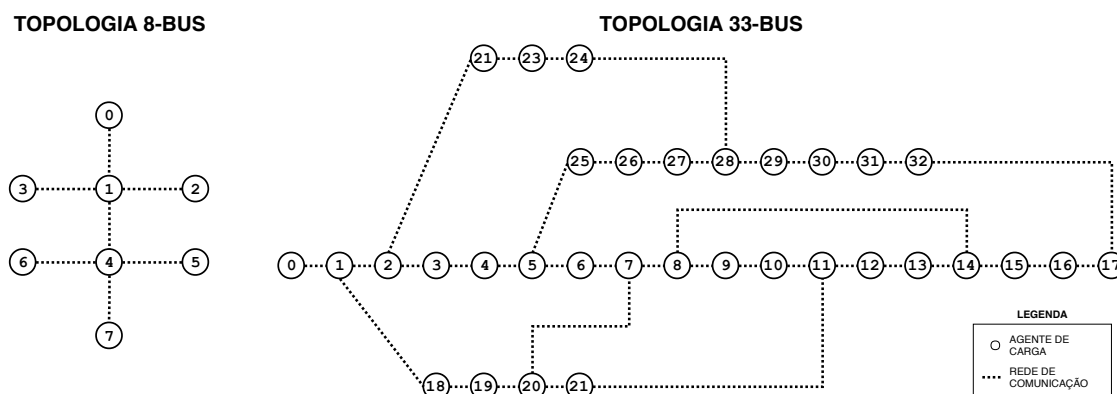
- Ser o mediador entre a conexão de dois LA, em tempo de execução;
- Receber comandos de abertura e fechamento de chaves, executá-los e notificar os LA próximos sobre o ocorrido.

Durante o processo de autorrecuperação, agentes de carga podem assumir dois papéis distintos no sistema: o de agente de carga ativo (AA) e o de agente de carga passivo (PA). AA é um LA eleito dentre o conjunto dos nós que sofreu falta para ser a autoridade que representa esse conjunto e que toma as decisões por ele. PA são os agentes que elegem o AA e aguardam por instruções a respeito de como devem cooperar para reconfigurar o sistema. A forma como esses agentes se coordenam para reconfigurar a rede e restaurar a energia na área em falta segue o algoritmo descrito na [subseção 4.2.1](#).

Uma outra característica do SMA proposto é a minimização do conhecimento da topologia da rede pelos agentes. Em termos de sistema, isso significa que cada LA tem

conhecimento e se comunica apenas com os LA vizinhos que estão diretamente conectados a ele. Portanto, a topologia da comunicação entre os agentes do sistema, quando não há perturbações na rede, é equivalente à topologia geral do sistema, incluindo linhas ativas e *tie lines*. A Figura 11 apresenta os grafos com as topologias de comunicação dos sistemas *8-bus* e *33-bus*, onde os vértices representam os agentes de carga e as arestas pontilhadas representam os caminhos de comunicação entre esses agentes.

Figura 11 – Grafos das topologias de rede de comunicação nos sistemas *8-bus* *33-bus*



Fonte: O autor

Em suma, as estruturas de comunicação representadas na Figura 11 indicam que, na topologia *33-bus* por exemplo, o LA que reside no nó 1 (simplesmente LA1) só conhece e se comunica com LA0, LA2 e LA18, ao passo que o LA8 se comunica com LA7, LA9 e LA14, mesmo que a linha $\overline{8,14}$ seja uma *tie line*. Essa perspectiva de comunicação ajuda a manter o sistema distribuído, limitando as despesas computacionais apenas aos nós que estão diretamente envolvidos nos eventos que ocorrem na rede. Vale ressaltar que o SMA aqui descrito é do tipo reativo, significando que realiza suas funções somente em decorrência dos estímulos ocorridos na rede.

4.2.1 Algoritmo de autorrecuperação

Para alcançar a autorrecuperação os agentes do sistema precisam seguir uma série definida de passos para estabelecer prioridades e resolver dependências e conflitos entre eles. Considera-se que, ao ocorrer a falha em uma das linhas do sistema, será naturalmente formado um conjunto de nós que sofreram interrupção no fornecimento de energia elétrica. A este conjunto chama-se *ilha*. A seguir, são apresentados os passos do algoritmo, seguidos de uma breve descrição a respeito das suas principais atividades. As próximas subseções descrevem detalhadamente os processos que ocorrem no sistema durante a execução de cada um destes passos.

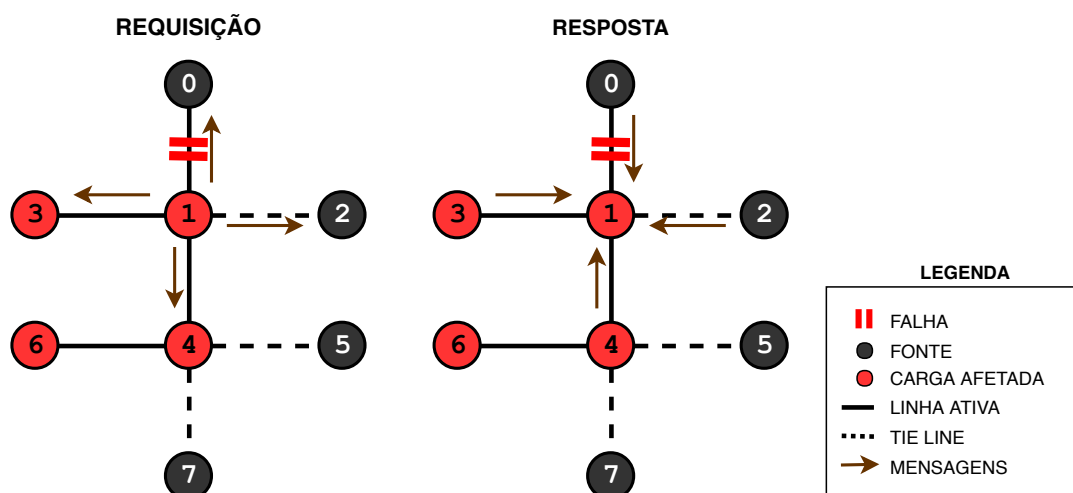
- **Passo 1.** *Isolamento da área em falta:* esse primeiro passo consiste basicamente em trocar mensagens entre os agentes adjacentes para identificar quais estão sem o suprimento de energia. Todos os LA que detectarem a falta realizam esse procedimento para que se conheça a área do sistema que foi afetada.
- **Passo 2.** *Eleição do agente ativo:* depois de isolada a área afetada, é necessário escolher um representante para executar cálculos que permita tomar decisões a respeito da recuperação da ilha. À este representante, dá-se o nome de *agente ativo* (AA). A eleição do AA é feita escolhendo o agente externo com maior ID¹ da ilha. Agente externo é todo LA que compõe a ilha e tem pelo menos um de seus vizinhos com o fornecimento de energia não interrompido. Essa eleição é realizada através da candidatura dos LA externos por estruturas de dados aqui chamados de *tickets*.
- **Passo 3.** *Mapeamento da ilha:* consiste no processo em que os agentes informam seus estados e endereços dos SA controladores de linhas próximas a eles para o AA, de forma que este tenha conhecimento de quais são as configurações possíveis que o sistema pode assumir depois da autorrecuperação. Esse processo é realizado por uma troca recursiva de mensagens entre os LA componentes da ilha.
- **Passo 4.** *Tomada de decisão e religamento:* realizando o mapeamento da ilha o AA tem a capacidade de reunir as informações necessárias para executar cálculos e efetuar a tomada de decisão, isto é, escolher de que forma religará a ilha novamente à rede ativa. O AA então requisita as operações de chaveamento necessárias e, finalmente, a energia é restabelecida à ilha.

4.2.2 Isolamento

No primeiro passo do algoritmo ocorrem trocas de mensagens entre os agentes de carga afetados. Ao ser detectada a falta, através dos seus sensores, um LA muda o seu estado disparando o início do algoritmo de autorrecuperação para esse agente. Nesse momento, o agente precisa isolar a área em falta, descobrindo quais agentes ao seu redor podem oferecer suporte para recuperação. Assim, esse LA envia mensagens aos seus vizinhos requisitando que enviem atualizações sobre o seu estado atual. A [Figura 12](#) ilustra essa troca de mensagens para o agente de carga 1, na topologia *8-bus*. Analogamente, todos os agentes que detectarem falha realizarão o mesmo processo, de modo que, ao final da troca de mensagens, todos os agentes afetados pela falta terão conhecimento de quais dos seus vizinhos estão na mesma situação e quais não.

¹ ID é um número inteiro que identifica a carga. É o mesmo usado para identificar um agente de carga no sistema.

Figura 12 – Esquema de comunicação na topologia 8-bus para o LA1 durante o processo de isolamento do algoritmo de autorrecuperação



Fonte: O autor

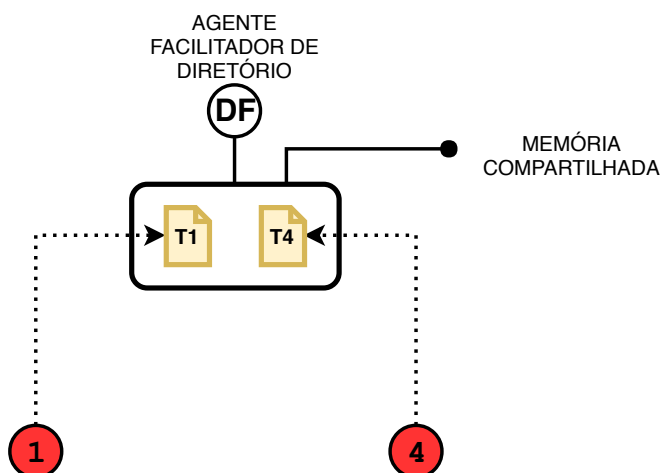
4.2.3 Eleição do agente ativo

Após a área ser isolada, é hora de escolher o agente ativo da ilha. Para realizar esse processo, todos os LA que forem agentes externos precisarão se candidatar enviando *tickets* contendo o seu ID para um ponto centralizador na rede, de modo que seja possível que dois ou mais agentes não adjacentes consigam interagir indiretamente. Esse ponto centralizador, por conveniência, é uma funcionalidade do agente *Directory Facilitator*, da plataforma JADE, que aceita registros de agentes para publicação de serviços através de uma memória compartilhada, chamada de *página amarela*. Somente agentes da uma mesma plataforma têm acesso a essa memória compartilhada.

Após o registro, um LA candidato deve aguardar o tempo de 370 ms para que todos os LA externos também se candidatem. Ao fim desse tempo, os agentes candidatos realizam a leitura da memória compartilhada, verificam quais agentes se registraram e verificam seus ID. No fim, o agente que tiver o ID igual ao maior ID registrado na página amarela será o agente ativo da ilha, enquanto que os outros agentes candidatos, assim como todos os outros afetados pela falha, automaticamente ficam aguardando comandos do AA para que se inicie o próximo passo do algoritmo de autorrecuperação — isto é, tornam-se *agentes passivos*.

Destaca-se que se não houver agentes candidatos nessa etapa, todos os agentes se tornam agentes passivos e não realizarão o processo de autorrecuperação. Esse fato acontece quando não há *tie lines* disponíveis para a autorrecuperação. No exemplo da [Figura 13](#), o agente LA4 será o AA da ilha por ter ID maior que os outros candidatos.

Figura 13 – Esquema de candidatura dos LA 1 e 4 na topologia *8-bus* durante o processo de eleição do algoritmo de autorrecuperação



Fonte: O autor

4.2.4 Mapeamento da ilha

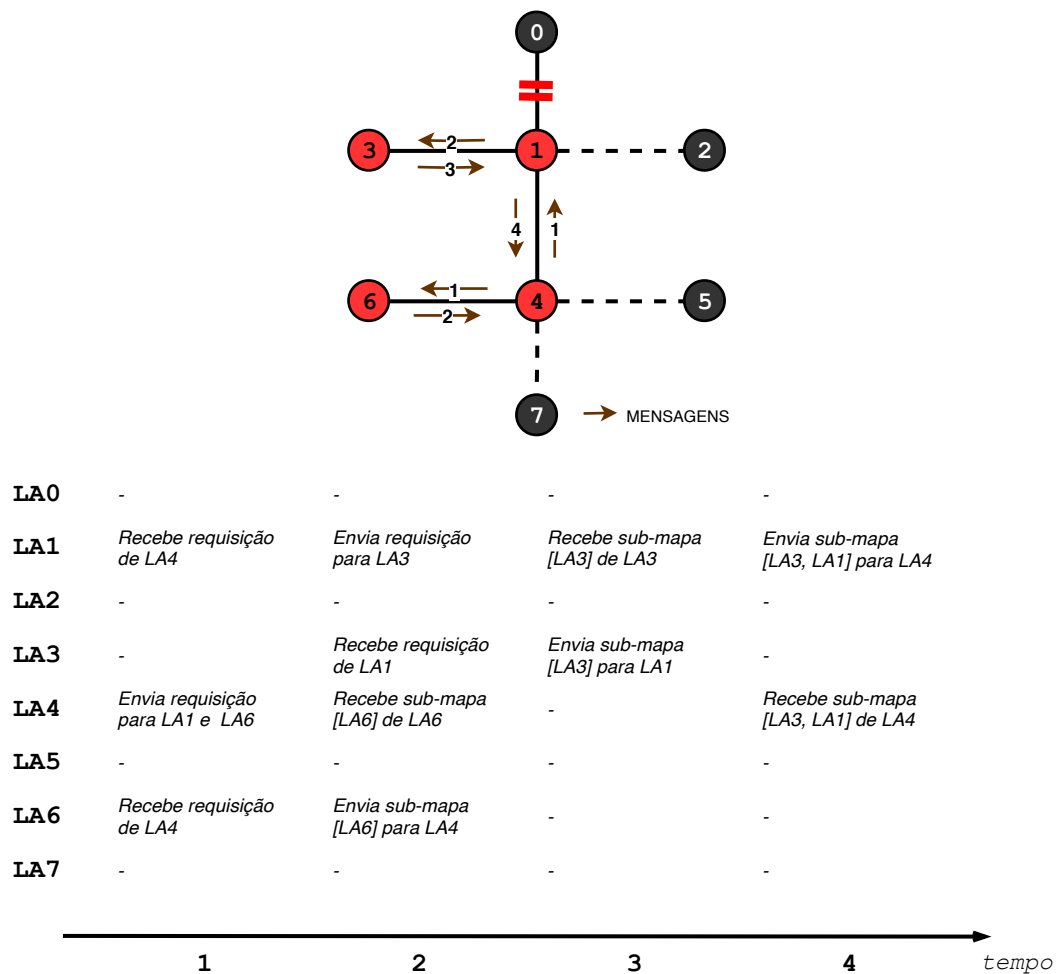
Nesse ponto do algoritmo, o AA precisa conhecer todos os agentes, linhas e *tie lines* que compõem a área afetada para que ele possa tomar decisão sobre qual configuração de rede será utilizada na autorrecuperação. Inicia-se então o processo de mapeamento de ilha entre os agentes afetados.

O mapeamento de ilha se baseia no algoritmo de busca em profundidade de grafos, sendo portanto um algoritmo de busca recursiva. O processo de mapeamento por troca de mensagens se inicia no AA da ilha, o qual solicita aos seus vizinhos em falta que retornem para ele uma lista com informações sobre os vizinhos destes que também estão em falta, além das informações das linhas entre eles. Nessa lista também devem conter informações sobre a linha que falhou e sobre as *tie lines* disponíveis. À essa lista chama-se sub-mapa de rede, que é a visão individual que cada agente da ilha possui sobre o ambiente.

Os agentes adjacentes ao AA que também têm vizinhos afetados pela falta, por sua vez, farão requisições a estes solicitando os seus sub-mapas. Após ter recebido os sub-mapas de todos os seus vizinhos, tal agente soma à lista as informações da sua leitura do ambiente e retorna-a ao agente que a solicitou. Esse processo é repetido recursivamente até que todos os nós afetados enviem seus sub-mapas.

Para ilustrar, a [Figura 14](#) apresenta um esquema de como se dá a troca de mensagens no sistema durante o processo de mapeamento da ilha. O esquema da figura evidencia o estado dos agentes e as mensagens que eles trocam ao longo do tempo, considerando que todos os agentes trocam mensagens ao mesmo tempo. Não são levados em conta os *delays* de transmissão ou processamento.

Figura 14 – Esquema de comunicação na topologia 8-bus durante o processo de mapeamento da ilha por troca de mensagens recursivas



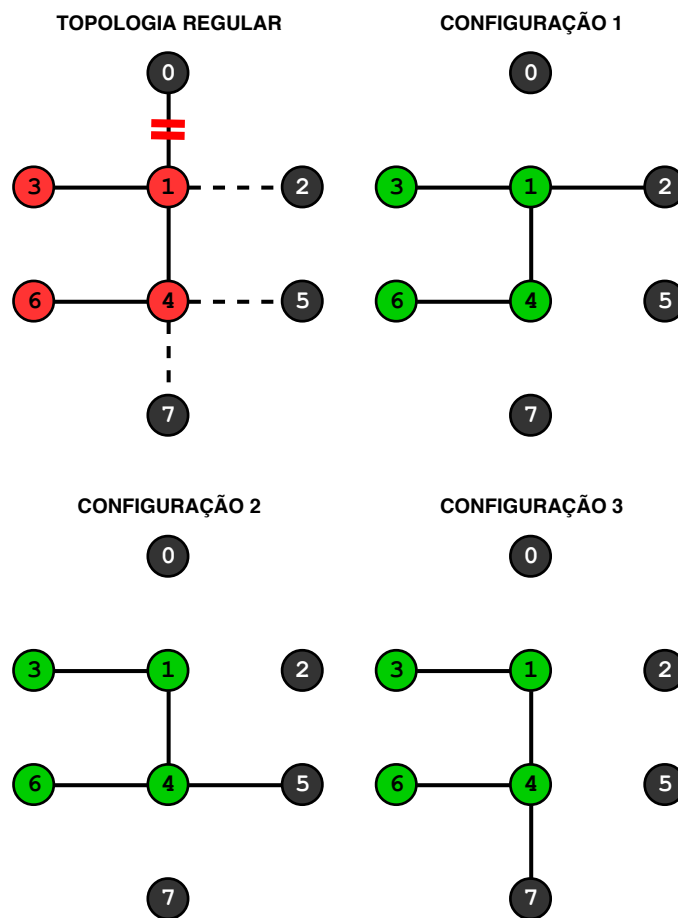
Fonte: O autor

4.2.5 Tomada de decisão e religamento

Após o término do mapeamento da ilha pelos agentes afetados, o AA possui todas as informações das quais necessita para realizar a tomada de decisão. Esse conjunto de informações é denominado *mapa de ilha* e incluem os estados dos agentes afetados pela falta, além do estado das linhas ligadas à esses agentes, o que permite ao AA determinar onde ocorreu a falha e quais *tie lines* pode usar.

O processo de tomada de decisão é realizado através do método de varredura de Saraiva (2015), que retorna informações como as tensões nos nós e as perdas elétricas de um sistema elétrico, desde que informados o nó por onde inicia o fluxo e as estruturas de dados que representam o grafo da rede elétrica. Esse é um método determinístico e considera especialmente as resistências nas linhas, a tensão nominal da fonte e as demandas das cargas naquele momento.

Figura 15 – Esquema da tomada de decisão por um agente ativo da ilha utilizando o método de varredura de Saraiva (2015)



Fonte: O autor

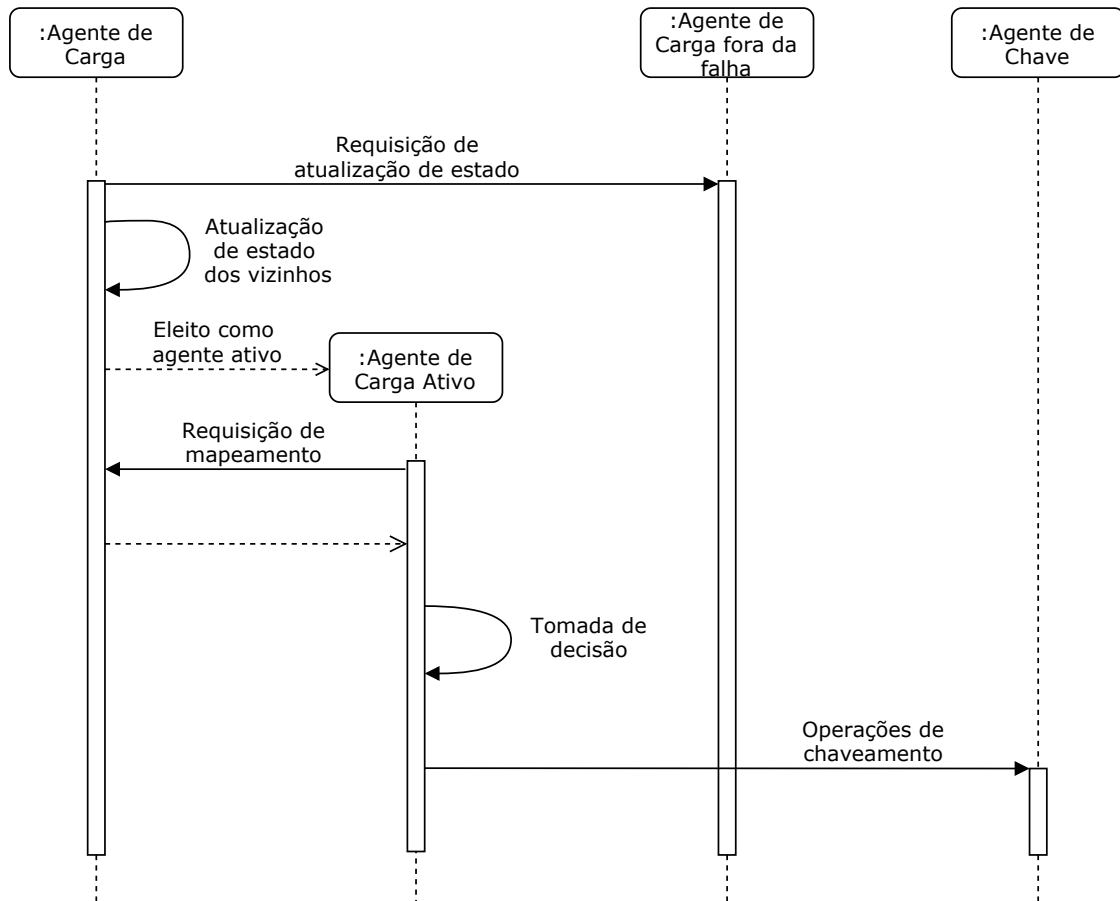
O algoritmo de varredura deverá ser executado tantas vezes quanto há *tie lines* disponíveis para religamento, já que cada *tie line* representa uma configuração de rede diferente. Entende-se como *configuração de rede* o conjunto de linhas ativas (com chave elétrica fechada) por onde flui a corrente elétrica que supre a demanda das cargas. Cada configuração de rede é modelada como uma árvore, cuja raiz é o nó de onde parte o fluxo de energia. A Figura 15 apresenta como são consideradas pelo AA as configurações de rede possíveis do sistema.

Destaca-se que o AA sempre escolhe a configuração de rede que render menor valor de perdas elétricas, escolha que é interessante para a rede, já que terá um aproveitamento melhor da corrente elétrica que flui através dela. Após escolher qual configuração será utilizada pelo sistema, o AA requisita primeiramente a abertura de chave ao SA que mantém controle da linha que falhou (para evitar futuros ciclos na rede) e, após confirmação, requisita ao SA da *tie line* escolhida o fechamento da chave, restaurando o fluxo de cargas na área afetada.

4.2.6 Diagramas

Em suma, as Figuras 16 e 17 apresentam, respectivamente, um diagrama de sequência UML e um diagrama de atividades UML a respeito algoritmo executado pelo SMA proposto. O diagrama da Figura 16 retrata de modo geral como se dão as trocas de mensagens ao longo do algoritmo de autorrecuperação.

Figura 16 – Diagrama de sequência do algoritmo de autorrecuperação



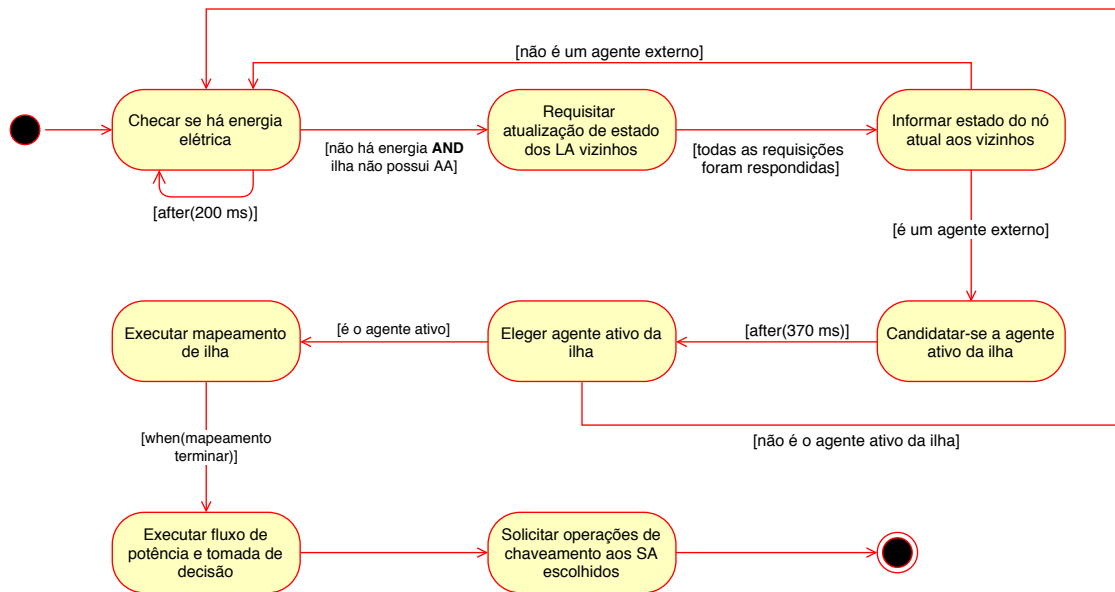
Fonte: O autor

Analisando agora o diagrama da Figura 17 torna-se importante dissertar sobre os dois limiares de tempo empregados nessa abordagem. O limiar na primeira atividade do diagrama diz respeito ao intervalo de tempo que o agente deverá esperar para realizar nova leitura dos sensores para atestar se há ou não fornecimento de energia.

Esse limiar foi escolhido com base em tentativa e erro, levando em conta que um limiar muito alto pode sacrificar o desempenho do algoritmo de autorrecuperação, já que cada LA demoraria para identificar a falta. Por outro lado, um limiar muito pequeno pode significar um gasto desnecessário de recursos computacionais, recursos esses que são escassos na maioria dos sistemas embarcados. Assim, este primeiro limiar foi ajustado para

o valor de 200 ms, julgando esta pesquisa ser um valor compatível com as expectativas do sistema.

Figura 17 – Diagrama de atividades do algoritmo de autorrecuperação



Fonte: O autor

O outro limiar, na transição entre as atividades 4 e 5 do diagrama de atividades, diz respeito ao tempo de espera pela candidatura de agentes ativos do sistema. Esse é o tempo que os LA da ilha devem aguardar para conferir os candidatos do sistema e eleger o AA. Isso é necessário pelo fato de os agentes não terem conhecimento de agentes não conectados diretamente a eles e, por isso, precisam que absolutamente todos os LA externos se candidatem dentro desse tempo. Ao contrário do limiar de espera pela leitura dos sensores, é interessante diminuir esse limiar ao máximo, pois penaliza diretamente o tempo de autorrecuperação. Porém, o processo candidatura dos agentes externos é muito dependente da arquitetura de hardware adotada em cada sistema, o que torna difícil definir um limiar mínimo. Além disso, esse limiar deve ser maior que o limiar para releitura dos sensores dos agentes para garantir que, no pior dos casos, todos os agentes externos tenham tido tempo de verificar que sofreram falta e se candidatar.

O tempo escolhido foi de 370 ms, valor escolhido por tentativa e erro por nunca ser extrapolado durante os testes realizados. Esse limiar significa que o tempo de autorrecuperação do sistema jamais será menor que 370 ms, pois necessariamente os AA deverão esperar pelo fim desse tempo para então se elegerem.

4.3 Considerações do capítulo

Neste capítulo foi possível revisar alguns trabalhos que empregam diferentes técnicas para abordar autorrecuperação em *smart grids*. Sistemas multiagente são muito utilizados na abordagem de problemas dos *smart grids* devido ao seu caráter distribuído, atributo nativo dessa técnica. Foram descritos os detalhes técnicos dos modelos de rede elétrica utilizados para validar o SMA proposto, um de 8 nós e outro de 33 nós. Além disso, descreveu-se o SMA com seus agentes principais: agente de carga e agente de chave. Os LA podem assumir diferentes papéis no sistema durante o algoritmo de autorrecuperação. O próximo capítulo traz detalhes das simulações realizadas e validam os resultados esperados dos sistemas propostos no presente capítulo.

5 Simulações, resultados e análise

O presente capítulo relata os resultados obtidos nas simulações e faz a sua análise com base nos objetivos da pesquisa. O capítulo inicia apresentando o ambiente onde foram realizadas as simulações e como foram conduzidos os experimentos ao longo destas. A seguir os resultados são resumidos em caráter geral, apontando as principais características observadas do sistema proposto. Após isso os resultados são divididos em duas seções: a [seção 5.3](#) traz os resultados obtidos para a topologia *8-bus* enquanto que a [seção 5.4](#) o faz para a topologia *33-bus*, cada qual discutindo aspectos importantes a se considerar a respeito dos resultados das simulações em cada topologia. Por fim são apresentadas as considerações do capítulo.

5.1 O ambiente de simulações

Os sistemas que rodam sobre *smart grids*, em geral, são executados em pequenos dispositivos alimentados por bateria, utilizando conexão sem fio e possuindo poder de processamento restrito por questões de tamanho e custo, podendo ser caracterizados como sistemas distribuídos pervasivos (COULOURIS et al., 2013). Assim, é desejável que esses sistemas exijam poucos requisitos de *hardware* e sejam testáveis em sistemas embarcados. Entretanto, as simulações descritas neste capítulo foram realizadas em um ambiente de testes do tipo *desktop*, em uma única máquina com as seguintes configurações:

- Sistema operacional Manjaro Linux (Arch);
- Memória principal de 10,7 GB;
- CPU Intel® Core™ i5-2310 com quatro núcleos de 2.90GHz e instruções de 64 bits;

Para simular o sistema elétrico foi necessário escolher um meio de os agentes do SMA proposto perceberem as alterações sem uma intervenção direta nos seus comportamentos. Para essa tarefa, foi escolhido tratar o sistema de arquivos do sistema operacional da máquina como o ambiente para realizar as simulações de falta de energia, no qual os agentes observam um diretório monitorando a existência de arquivos que representam uma variável booleana: se o arquivo existe (*true*), significa que aquele nó está com o fornecimento energético normal; se o arquivo não existe (*false*), significa que o fornecimento de energia foi interrompido. Ressalta-se que cada nó do sistema elétrico possui um arquivo próprio, o que permite aos agentes monitorarem individualmente os seus estados. Esses arquivos são denominados *arquivos de energia*.

As simulações são conduzidas da seguinte maneira: primeiramente o sistema multiagente é iniciado com o conjunto especificado de agentes de carga e agentes de chave em função da topologia a ser simulada, isto é, *8-bus* ou *33-bus*; os agentes instanciados são organizados de acordo com a topologia de comunicação (Figura 11), porém operam sobre a topologia da rede ativa de cada sistema; uma vez que os agentes de carga iniciam corretamente e reconhecem seus vizinhos, esses agentes monitoram os arquivos de energia e estão aptos a executarem o algoritmo de autorrecuperação; a partir de então, através do grafo da topologia, identifica-se quais nós seriam afetados por uma falha em uma determinada linha e os arquivos de energia desses nós são excluídos; os agentes de carga identificam a falha e iniciam a execução do algoritmo; após o término, os agentes criam novamente os arquivos de energia simbolizando o fim do processo; finalmente os resultados são analisados através de arquivos de *log* e mensagens no terminal do sistema operacional.

As simulações foram divididas em dois grupos para melhorar a análise dos resultados: simulações com a topologia *8-bus* e *33-bus*. Pelo fato de a topologia *33-bus* ser maior e por isso ter mais possibilidades de autorrecuperação, a maior parte das simulações foram realizadas utilizando esse modelo. Cada grupo de simulações possui dois outros subgrupos que especificam o tipo de simulação realizada: o primeiro subgrupo com *simulações sobre a topologia regular*, isto é, o sistema é iniciado, testado uma vez, reconfigurado pelos agentes e depois é finalizado, significando que os agentes sempre atuam sobre a topologia inicial regular; o segundo subgrupo com *autorrecuperações consecutivas e em tempo de execução*, isto é, o sistema é iniciado, testado uma vez, reconfigurado pelos agentes e depois testado mais vezes, sem a finalização do mesmo, significando que os agentes atuam sobre os resultados da topologia anterior, reconfigurando-a a cada nova autorrecuperação. Essa última modalidade de testes foi realizada para averiguar o comportamento do sistema durante as autorrecuperações em tempo de execução.

5.2 Resultados gerais

Após o término das simulações, foram obtidos resultados que estão resumidos nesta seção. Os resultados descritos aqui se referem a todos as simulações realizadas, tanto para a topologia *8-bus* quanto para a *33-bus*, tanto para autorrecuperações regulares quanto para consecutivas. Ao todo foram realizadas 20 simulações e os dados foram separados em duas categorias diferentes para melhorar o entendimento. Esses dados podem ser encontrados nas Tabelas 5 e 6.

Ressalta-se que as simulações 1, 4 e 18 aparecem nas duas tabelas. Isso ocorreu porque elas são as primeiras simulações de cada grupo de simulações consecutivas, o que implica que também são simulações que foram realizadas sobre a topologia regular. Dessa forma, preferiu-se utilizar seus dados para as duas categorias.

Tabela 5 – Resultados das simulações realizadas sobre topologia regular

Número da simulação	Topologia	Número de nós afetados	Tempo (ms)	Chave aberta	Chave fechada	<i>Tie lines</i> envolvidas
1	8-bus	4	552	$\overline{0, 1}$	$\overline{4, 5}$	$\{1, 2, 4, 5, 4, 7\}$
4	8-bus	4	557	$\overline{0, 1}$	$\overline{4, 7}$	$\{1, 2, 4, 5, 4, 7\}$
8	8-bus	4	470	$\overline{0, 1}$	$\overline{4, 5}$	$\{1, 2, 4, 5, 4, 7\}$
9	8-bus	2	567	$\overline{1, 4}$	$\overline{4, 5}$	$\{1, 2, 4, 5, 4, 7\}$
10	33-bus	4	662	$\overline{13, 14}$	$\overline{17, 32}$	$\{8, 14, 17, 32\}$
11	33-bus	8	579	$\overline{9, 10}$	$\overline{17, 32}$	$\{8, 14, 17, 32, 11, 21\}$
12	33-bus	12	621	$\overline{5, 6}$	$\overline{11, 21}$	$\{20, 7, 17, 32, 11, 21\}$
13	33-bus	15	660	$\overline{2, 3}$	$\overline{11, 21}$	$\{20, 7, 17, 32, 11, 21\}$
14	33-bus	4	555	$\overline{1, 18}$	$\overline{11, 21}$	$\{20, 7, 11, 21\}$
15	33-bus	7	586	$\overline{25, 26}$	$\overline{24, 28}$	$\{24, 28, 17, 32\}$
16	33-bus	7	586	$\overline{25, 26}$	$\overline{24, 28}$	$\{24, 28, 17, 32\}$
17	33-bus	7	575	$\overline{25, 26}$	$\overline{17, 32}$	$\{24, 28, 17, 32\}$
18	33-bus	11	605	$\overline{6, 7}$	$\overline{11, 21}$	$\{20, 7, 17, 32, 11, 21\}$

Fonte: O autor

Tabela 6 – Resultados das simulações consecutivas realizadas sobre as topologias *8-bus* e *33-bus*

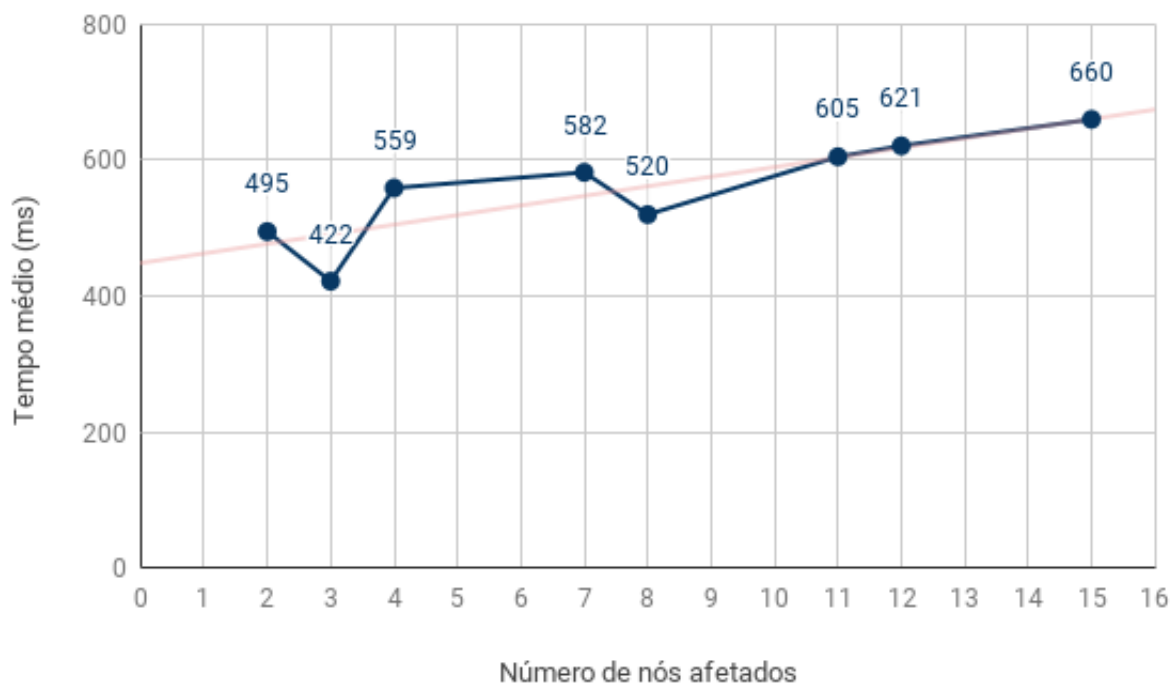
Número da simulação	Topologia	Número de nós afetados	Tempo (ms)	Chave aberta	Chave fechada	<i>Tie lines</i> envolvidas
1	8-bus	4	552	$\overline{0, 1}$	$\overline{4, 5}$	$\{1, 2, 4, 5, 4, 7\}$
2	8-bus	2	499	$\overline{1, 4}$	$\overline{1, 2}$	$\{0, 1, 1, 2, 4, 7\}$
3	8-bus	2	497	$\overline{4, 5}$	$\overline{1, 4}$	$\{0, 1, 1, 4, 4, 7\}$
4	8-bus	4	557	$\overline{0, 1}$	$\overline{4, 7}$	$\{1, 2, 4, 5, 4, 7\}$
5	8-bus	2	407	$\overline{1, 4}$	$\overline{1, 2}$	$\{0, 1, 1, 2, 4, 5\}$
6	8-bus	2	505	$\overline{1, 2}$	$\overline{0, 1}$	$\{0, 1, 1, 4, 4, 5\}$
7	8-bus	2	496	$\overline{0, 1}$	$\overline{1, 4}$	$\{1, 2, 1, 4, 4, 5\}$
18	33-bus	11	605	$\overline{6, 7}$	$\overline{11, 21}$	$\{20, 7, 17, 32, 11, 21\}$
19	33-bus	8	461	$\overline{5, 25}$	$\overline{24, 28}$	$\{24, 28, 17, 32\}$
20	33-bus	3	422	$\overline{9, 10}$	$\overline{8, 14}$	$\{8, 14, 20, 7\}$

Fonte: O autor

Em todas as simulações foram utilizados casos ideais, isto é, casos em que há pelo menos uma *tie line* disponível para que haja a autorrecuperação, já que de outra forma o sistema não avança ao passo 3 do algoritmo de autorrecuperação. Pode-se observar que em todos os casos o sistema conseguiu recuperar todos os nós afetados nas faltas utilizando-se de diferentes linhas em cada simulação. O menor número de nós afetados nas simulações é 2 e o maior número de nós afetados é 15. Observando ainda os dados das Tabelas 5 e 6, é tido como menor tempo de autorrecuperação do sistema o valor de 407 ms e o maior valor como sendo 662 ms. Como adicional, considerando separadamente os valores para cada topologia simulada, para a topologia *8-bus* tem-se como valor mínimo 407 ms e como valor máximo 567 ms, com uma média de 505,5 ms para cada processo de autorrecuperação.

Já para a topologia *33-bus*, tem-se como menor e maior valores, respectivamente, 422 ms e 662 ms, com uma média de 573,8 ms para cada autorrecuperação. O tempo médio de autorrecuperação para todas simulações realizadas foi de 543,1 ms.

Figura 18 – Gráfico do desempenho do sistema com relação ao tempo de execução *versus* número de nós afetados



Fonte: O autor

Se considerarmos a média dos tempos nas simulações em que houveram o mesmo número de nós afetados, pode-se exprimir um gráfico que retrata o desempenho do sistema baseado no tempo de autorrecuperação à medida que o número de nós afetados aumenta. A Figura 18 apresenta esse gráfico (em azul). Além desse gráfico, a figura também mostra um gráfico de uma função linear, representada pela linha em vermelho no plano de fundo, que é a linha de tendência dos valores do gráfico de desempenho. Essa linha de tendência significa que, em média, o sistema tende a se comportar de maneira linear em relação ao tempo de autorrecuperação. Isso pode ser explicado porque somente os nós afetados pela falta realmente desenvolvem as operações de autorrecuperação do sistema, confirmando o resultado esperado de se obter o tempo de execução proporcional ao número de nós envolvidos. No entanto, testes futuros podem ser aplicados para determinar o comportamento assintótico desse gráfico para valores maiores de nós afetados.

Escolheu-se mesclar os resultados das simulações com as topologias *8-bus* e *33-bus* pelo seguinte motivo: independentemente do tipo de topologia que se esteja utilizando,

somente os nós que foram afetados pela falta é que realmente executam o algoritmo de autorrecuperação. Isso significa que se o número de nós afetados nas diferentes topologias for igual, o número de agentes que executarão o algoritmo de autorrecuperação em ambas também é o mesmo.

Apesar da linha de tendência apontar para um desempenho do sistema tendendo ao linear, é necessário ressaltar com certo cuidado um aspecto deste trabalho. Em determinadas simulações, é possível observar que a relação *tempo vs número de nós afetados* não seguiu um padrão linear. Isso é explicado pelo fato de que, em cada simulação, há um peso diferente dos limiares de tempo utilizados no algoritmo. Isso porque em cada contexto os agentes respondem às requisições em tempos diferentes, o que significa dizer que os limiares de tempo podem interferir mais ou menos nos resultados finais de cada simulação, dependendo de cada contexto.

5.3 Simulações com a topologia *8-bus*

Esta seção descreve os resultados específicos para as simulações com a topologia *8-bus*. As simulações, como já descrito, têm o objetivo de avaliar duas características do SMA proposto: a capacidade de se autorrecuperar e a capacidade de se reconfigurar diversas vezes em tempo de execução. As subseções a seguir trazem esses resultados.

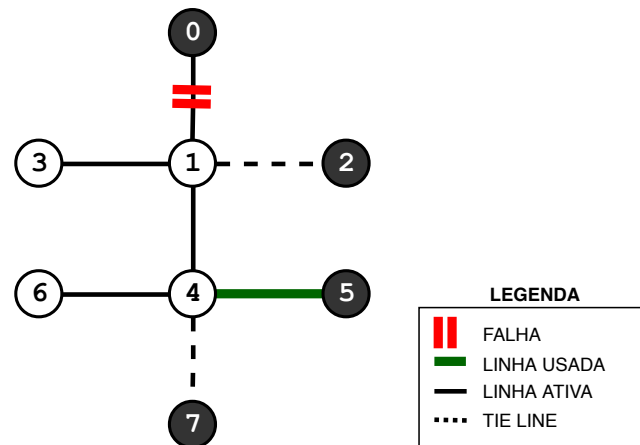
5.3.1 Autorrecuperação sobre a topologia regular

As simulações envolvendo a topologia regular *8-bus* são as simulações de 1, 4, 8 e 9. Essa é a menor parte das simulações sobre a topologia *8-bus* porque a topologia não permite uma grande gama de opções de corte de modo que se tenha *tie lines* disponíveis para autorrecuperação. De toda forma, é válido atestar a eficácia do SMA nessas condições.

5.3.2 Simulação 8

Inicialmente, a [Figura 19](#) ilustra o processo ocorrido na simulação 8, onde a linha escolhida para simular a falta é a linha $\overline{0,1}$. Nessa situação, os nós 1, 3, 4 e 6 são afetados e o sistema pode escolher entre as *tie lines* $\overline{1,2}$, $\overline{4,5}$ e $\overline{4,7}$ para religar a ilha. O sistema então escolhe a *tie line* $\overline{4,5}$ (em verde) para realizar essa tarefa. As perdas elétricas para essa escolha foram da ordem de $9.2377kW$, menor valor entre as configurações de rede possíveis. Esse valor pode ser atribuído diretamente ao valor de resistência nessa linha — que é um dos menores — e à tensão no nó alimentador (5), culminando em menor perda elétrica entre as configurações possíveis. O sistema escolhe aquela *tie line* que for mais interessante em relação aos valores de perdas elétricas. Os valores para essa simulação podem ser conferidos na [Tabela 5](#).

Figura 19 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 8

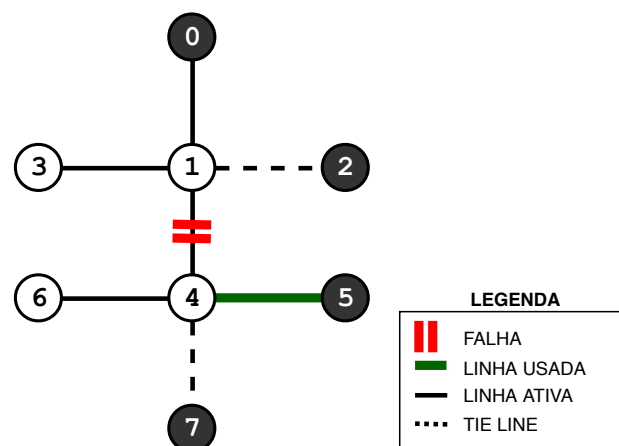


Fonte: O autor

5.3.3 Simulação 9

Observando a simulação 9, a Figura 20 ilustra como a topologia é reconfigurada após a falta. A linha escolhida para o corte é a $\overline{1,4}$, afetando os nós 4 e 6, tendo a ilha à sua disposição as *tie lines* $\overline{4,5}$ e $\overline{4,7}$. O SMA elege novamente a *tie line* $\overline{4,5}$ para realizar a recuperação, ficando a rede elétrica representada por um grafo desconexo. É interessante notar que, no contexto de múltiplas fontes, o sistema consegue alternar entre as fontes dependendo de onde ocorre a falta.

Figura 20 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 9



Fonte: O autor

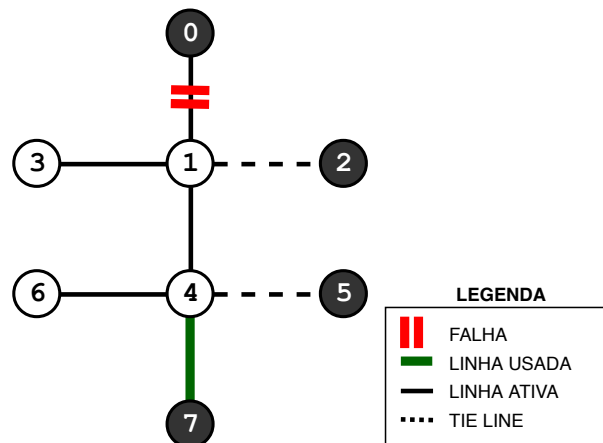
Da mesma maneira, pode-se atribuir a escolha do sistema à resistência na linha $\overline{4,5}$ que possui menor valor que a resistência na linha $\overline{4,7}$. As perdas elétricas para essa reconfiguração são da ordem de $6.9054kW$, valor menor que na simulação 8. Isso é explicado

pelo fato de, nessa simulação, ter-se apenas dois nós afetados, enquanto que na simulação 8 há quatro.

5.3.4 Simulação 4

Para averiguar a robustez no método de escolha de *tie lines* pelo sistema, é proposta uma pequena alteração na simulação 4. Nela, o valor da resistência na *tie line* $\overline{4,5}$ é aumentado em seis vezes, alcançando o valor de resistência em 0.9Ω e reatância também em 0.9Ω , ligeiramente maiores que os da *tie line* $\overline{4,7}$. O resultado está representado no grafo da Figura 21. O corte é realizado na linha $\overline{0,1}$, os nós afetados são 1, 3, 4 e 6 e o sistema elege dessa vez a *tie line* $\overline{4,7}$. Observa-se que o valor da resistência tem certa influencia na decisão do sistema quando há um pequeno número de nós afetados.

Figura 21 – Grafo da topologia *8-bus* ao final da simulação 4



Fonte: O autor

As demais simulações envolvendo a topologia *8-bus* regular podem ser verificadas através da consulta à Tabela 5 e ao Apêndice A.

5.3.5 Autorrecuperações consecutivas em tempo de execução

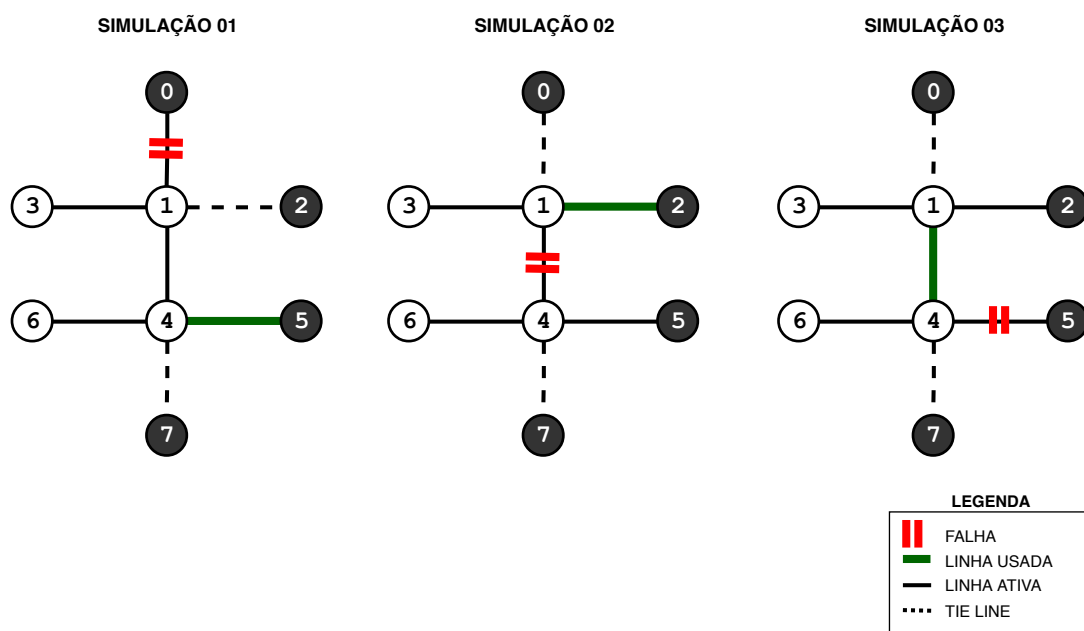
Nesta seção será discutido principalmente o caráter de autorrecuperação consecutiva do SMA proposto. Esse processo se difere das simulações regulares porque cada nova recuperação realizada pelo sistema é feita sobre a configuração anterior, o que significa que o estado da rede muda entre uma execução e outra. Entretanto, o sistema continua a utilizar os mesmos critérios para a execução do algoritmo de autorrecuperação, fluxo de potência e para escolha de *tie lines*.

Antes de iniciar a análise dos resultados obtidos para essa característica, vale pontuar uma questão importante a respeito das reconfigurações: considera-se que entre

cada processo de autorrecuperação há a reposição da linha que sofreu falta na configuração anterior da rede. Em termos práticos, significa dizer que uma linha que falha numa primeira configuração, após a recuperação dos nós afetados pelo SMA, logo é reposta ao sistema com a chave aberta, servindo como *tie line* para um novo processo de autorrecuperação.

Há dois conjuntos de simulações com autorrecuperação consecutiva para a topologia *8-bus*: o primeiro formado pelas simulações 1, 2 e 3 e o segundo formado pelas simulações 4, 5, 6 e 7.

Figura 22 – Grafos da topologia *8-bus* ao longo da autorrecuperação consecutiva nas simulações 1, 2 e 3



Fonte: O autor

A Figura 22 apresenta os grafos do primeiro conjunto de simulações. Na simulação 1, tem-se o corte na linha $\overline{0,1}$, a falta nos nós 1, 3, 4, 6 e a escolha da *tie line* $\overline{4,5}$ para recuperar o fornecimento de energia na ilha. A partir desse momento a linha $\overline{4,5}$ passa a fazer parte da configuração da rede e a linha $\overline{0,1}$ é reposta ao sistema com a chave aberta, servindo como *tie line* para um próximo processo de autorrecuperação. É importante dizer que as características da linha, como resistência, permanecem inalteradas. Ao fim da autorrecuperação, na simulação 1, a rede elétrica ativa é composta pelas linhas $\overline{1,3}$, $\overline{1,4}$, $\overline{4,5}$ e $\overline{4,6}$ e possuirá como *tie lines* as linhas $\overline{1,2}$, $\overline{4,7}$ e $\overline{0,1}$, esta última reposta após a falha.

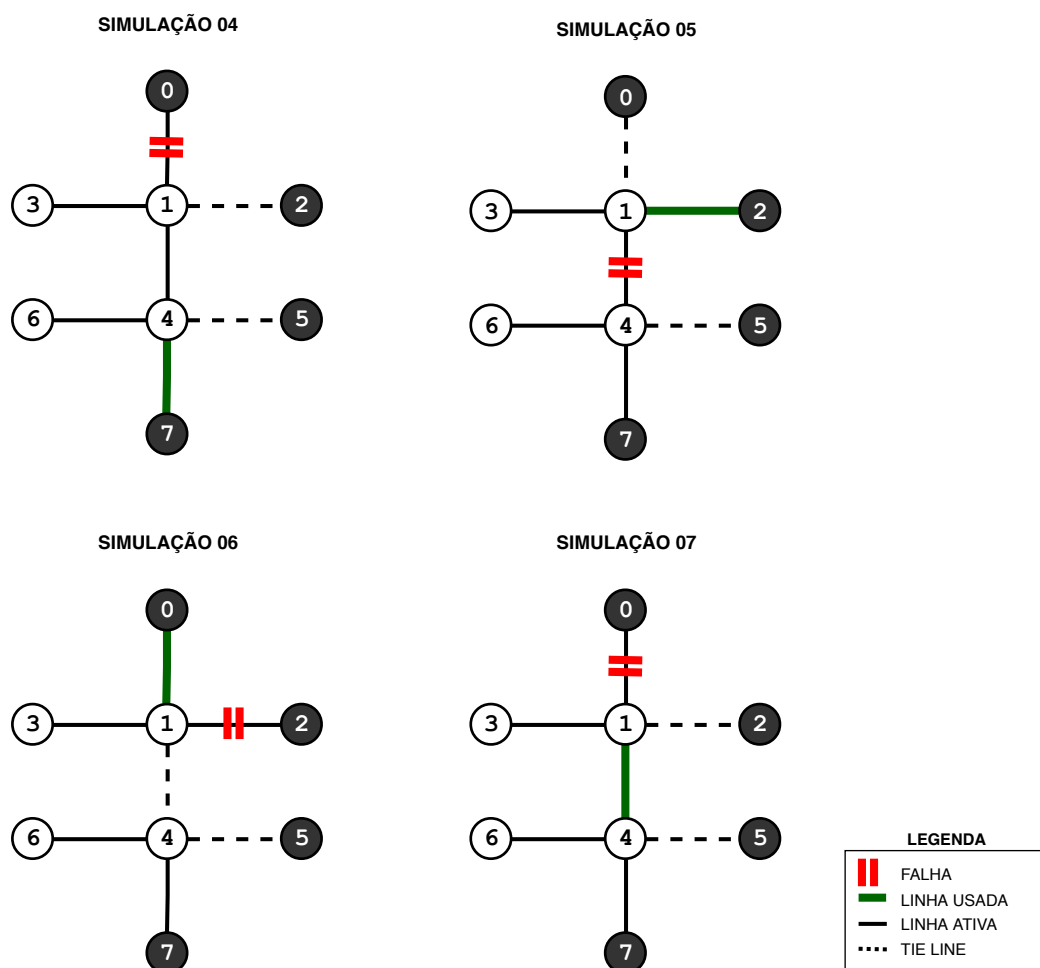
Na simulação 2, sem desligar o sistema, é provocada uma falha na linha $\overline{1,4}$, afetando os nós 1 e 3, conforme mostra a Figura 22. O sistema pode então escolher dentre as *tie lines* $\overline{0,1}$ e $\overline{1,2}$ a que apresentar menores perdas ao sistema depois da autorrecuperação. A

simulação 2 mostra que a linha escolhida é $\overline{1,2}$, deixando o grafo do sistema desconexo. Nesse momento as fontes 2 e 5 são utilizadas para alimentar as cargas do sistema.

O processo segue analogamente para a simulação 3, onde a linha cortada é a $\overline{4,5}$, ilhando os nós 4 e 6, sendo escolhida a *tie line* $\overline{1,4}$ para recuperação e assumindo o sistema mais uma vez uma nova configuração. Nessa última, a fonte 5 deixa de ser utilizada tornando o grafo conexo novamente.

Essas consecutivas reconfigurações mostram que o SMA é capaz de se adaptar à novas configurações em tempo de execução, dispensando intervenção externa para que se consiga autorrecuperação em novas topologias de rede elétrica. Essa funcionalidade do SMA proposto abre precedentes para adaptação e portabilidade, características importantes para sistemas distribuídos.

Figura 23 – Grafos da topologia 8-bus ao longo da autorrecuperação consecutiva nas simulações 4, 5, 6 e 7



Fonte: O autor

No conjunto de simulações 4, 5, 6 e 7 o processo acontece de forma análoga, porém uma alteração é realizada no valor de resistência e reatância da linha $\overline{4,5}$. Como descrito na

subseção 5.3.4, o valor é aumentado para 0.9Ω de resistência e 0.9Ω de reatância. Devido a essa alteração, o comportamento do sistema é diferente em relação à escolha das *tie lines* em cada configuração, iniciando pela escolha da *tie line* $\overline{4,7}$ em lugar da $\overline{4,5}$. A Figura 23 mostra como o sistema se comportou depois dessa alteração. Nota-se que o sistema não escolhe mais a *tie line* $\overline{4,5}$ em nenhuma das configurações porque há um aumento da perda elétrica ao se utilizar aquela *tie line*.

5.4 Simulações com a topologia 33-bus

Com o objetivo de verificar o comportamento do SMA proposto frente à um sistema elétrico de distribuição com maior número de nós e, conseqüentemente, mais operações transversais ao algoritmo de autorrecuperação, foi realizada uma série de testes com a topologia 33-bus. Novamente os resultados são divididos em duas categorias, primeiramente avaliando a eficácia do sistema sobre a topologia regular e, num segundo momento, sobre as várias configurações da topologia 33-bus após consecutivas autorrecuperações.

5.4.1 Autorrecuperação sobre a topologia regular

As simulações que envolvem a autorrecuperação sobre a topologia regular 33-bus são as simulações de 10 a 17. Devido a eficácia do sistema já ter sido verificada para múltiplas autorrecuperações nas simulações com a topologia 8-bus, foi dedicado uma maior parte das simulações para a topologia regular 33-bus a fim de observar as escolhas das *tie lines* pelos agentes do sistema.

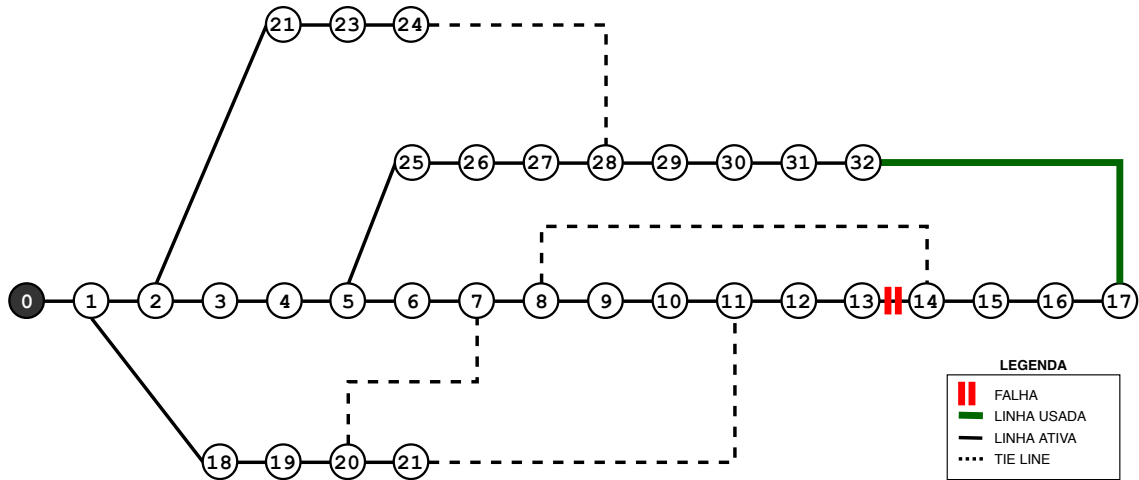
5.4.2 Simulação 10

Primeiramente observa-se os valores da simulação 10. Foi simulado um corte na linha $\overline{13,14}$, afetando os nós 14, 15 e 16. As *tie lines* envolvidas nesse contexto são $\overline{8,14}$ e $\overline{17,32}$, sendo escolhida pelo agente ativo a linha $\overline{17,32}$ por apresentar perdas elétricas no valor de $9,0502kW$, menor valor entre as configurações da rede possíveis. Nesse contexto, pode-se atribuir novamente essa escolha ao menor valor de resistência da linha $\overline{17,32}$ em relação à linha $\overline{8,14}$, já que há um pequeno número de nós afetados. A Figura 24 traz o grafo que resume a configuração da rede após a simulação 10.

5.4.3 Simulação 11

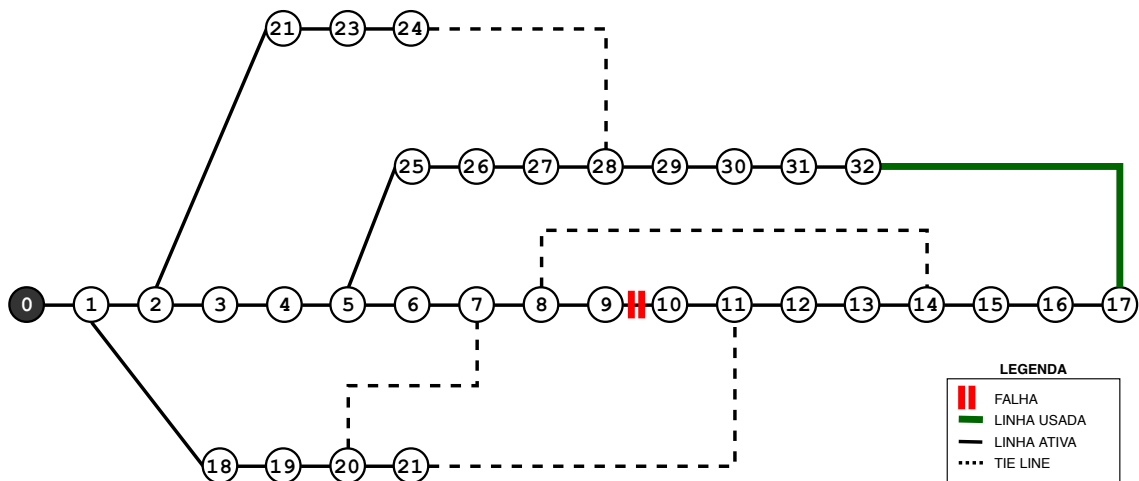
Analisando a simulação 11, tem-se uma falha simulada na linha $\overline{9,10}$, afetando as cargas de 10 a 17, conforme mostra a Figura 25. Nessa situação há a inclusão da *tie line* $\overline{11,21}$ ao conjunto de *tie lines* disponíveis na simulação 10. Observa-se que a linha escolhida continua sendo a *tie line* $\overline{17,32}$.

Figura 24 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 10



Fonte: O autor

Figura 25 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 11



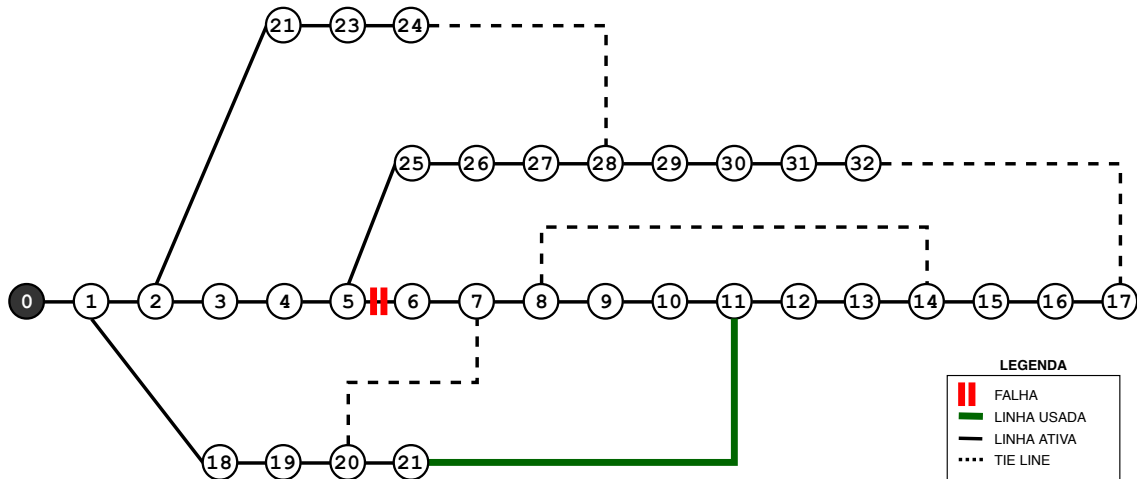
Fonte: O autor

Observando este contexto, percebe-se que uma das configurações possíveis é a partir da escolha da *tie line* $\overline{8,14}$. Nesse caso, a ilha pode ser modelada como uma árvore com raiz no nó 8. Dessa forma, a árvore seguiria com os nós 8, 14, para a esquerda com 13, 12, 11 e 10, e para a direita com 15, 16 e 17. Essa árvore possui profundidade 6. Entretanto, o sistema escolhe a *tie line* $\overline{17,32}$, que, de modo análogo, pode ser modelada como uma árvore com raiz no nó 32, seguindo os nós 17, 16, 15, 14, 13, 12, 11 e 10. Essa árvore, por sua vez, possui profundidade 9. Tecnicamente, as perdas elétricas no primeiro caso deveriam ser menores devido a menor profundidade da árvore da ilha, porém observa-se que o sistema decide religar a ilha pela *tie line* $\overline{17,32}$. Isso ocorreu porque a resistência na linha $\overline{17,32}$ é menor que a resistência na linha $\overline{8,14}$, fator influencia no cálculo de perdas

elétricas utilizado pelo sistema e, conseqüentemente, na decisão dos agentes. Nessa breve análise desconsidera-se a *tie line* $\overline{11, 21}$, pois possui um alto valor de resistência e a uma árvore de ilha de profundidade maior quando comparado à *tie line* $\overline{8, 14}$.

5.4.4 Simulação 12

Figura 26 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 12



Fonte: O autor

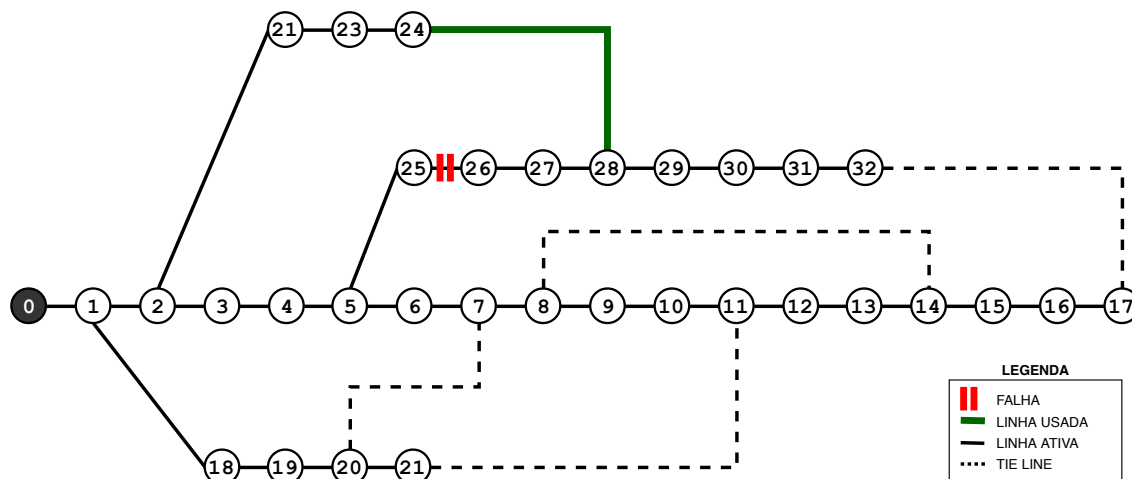
Considerando ainda alguns aspectos da simulação 11, a [Figura 26](#) ilustra o processo ocorrido na simulação 12 cujos contextos são semelhantes. O corte, dessa vez, é feito na linha $\overline{5, 6}$, afetando as cargas de 6 a 17 da topologia. Para essa falta, o AA da ilha considera as *tie lines* $\overline{20, 7}$, $\overline{11, 21}$ e $\overline{17, 32}$. Ressalta-se que, diferentemente da simulação 11, a *tie line* $\overline{8, 14}$ não é considerada porque o nó 14 deixa de ser um nó externo, já que o nó 8 também é afetado pela falta. Levando em conta as considerações feitas na [subseção 5.4.3](#), observa-se que o sistema agora escolhe a *tie line* $\overline{11, 21}$ por proporcionar uma perda elétrica menor que os valores de perdas elétricas obtidos para as outras configurações de rede possíveis, mesmo que o valor de resistência desta linha seja quatro vezes maior que o da linha $\overline{17, 32}$.

5.4.5 Simulação 15 e 16

Analisando agora uma outra característica das escolhas feitas pelo SMA proposto na topologia 33-bus, considera-se as simulações 15, 16 e 17. Todas as essas simulações foram realizadas a partir da topologia regular do sistema 33-bus, isto é, o sistema foi reiniciado toda vez que cada uma delas chegou ao fim. Na simulação 15 tem-se uma falha na linha $\overline{25, 26}$, afetando os nós de 26 a 32, conforme retrata o [Figura 27](#). As linhas possíveis por onde podem vir fluxos de corrente para a ilha são as *tie lines* $\overline{24, 28}$ e $\overline{17, 32}$, linhas que,

nesse contexto, possuem os valores de resistência iguais. De acordo com os objetivos do sistema, é escolhida a *tie line* $\overline{24,28}$ para realizar a recuperação da falta.

Figura 27 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 15 e 16



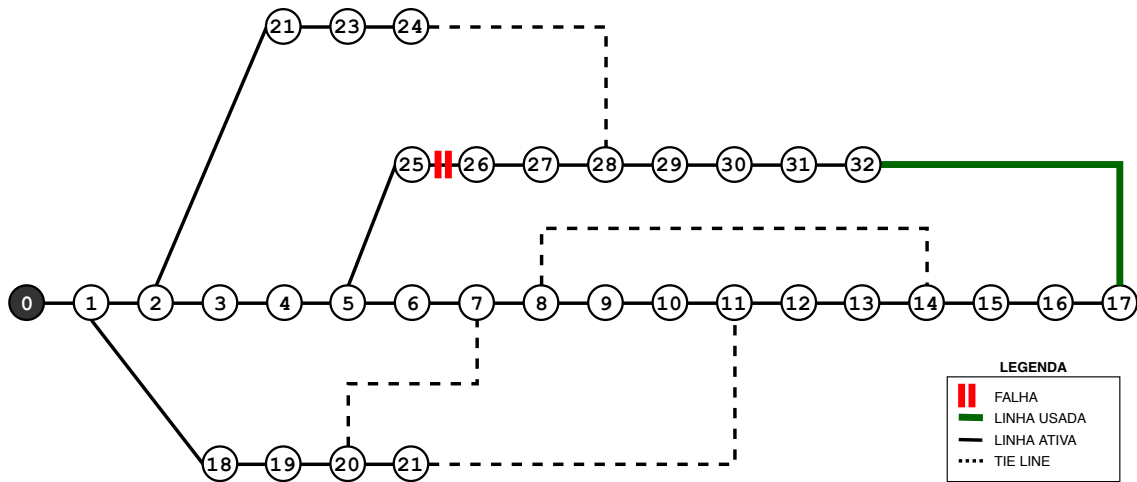
Fonte: O autor

Para averiguar a robustez do método de escolha das *tie lines* pelo sistema, na simulação 16 aumentou-se em 50% o valor de resistência na linha $\overline{24,28}$ — alcançando o valor de $0,75\Omega$ de resistência e reatância — e reiniciou-se a simulação. Sob as mesmas condições de corte e ilha, a simulação 16 apresentou os resultados muito próximos aos da simulação 15, principalmente pelo fato de, ao final, apresentarem exatamente o mesmo grafo como solução, diferindo apenas nos valores de perdas elétricas que são maiores para a simulação 16 devido ao aumento de resistência na linha $\overline{24,28}$. O grafo resultante para as simulações 15 e 16 é apresentado na [Figura 27](#).

5.4.6 Simulação 17

Ainda sob a mesma perspectiva das simulações 15 e 16, apresentadas na [subseção 5.4.5](#), na simulação 17 ([Figura 28](#)) aumentou-se a resistência na linha $\overline{24,28}$ em duas vezes, alcançando o valor de 1Ω de resistência e reatância. Após isso o sistema foi reiniciado e simulada a falha novamente na linha $\overline{25,26}$, porém dessa vez o AA da ilha elegeu a linha $\overline{17,32}$ como a mais interessante para religar os nós em falta.

Observa-se então que há algum valor de resistência entre $0,75\Omega$ e 1Ω para o qual as perdas elétricas no sistema passam a ser maiores para a configuração de rede pela *tie line* $\overline{24,28}$ do que para a configuração de rede por $\overline{17,32}$. Essa característica salienta que o sistema proposto é capaz de responder adequadamente às mudanças que podem ocorrer na rede depois de algumas reconfigurações ou até mesmo após a adição de novos nós à topologia em tempo de execução. Isso é importante para sistemas que não podem ser

Figura 28 – Grafo da topologia *33-bus* ao final da simulação 17

Fonte: O autor

desativados e ainda assim precisam acompanhar as mudanças que ocorrerem ao longo do seu funcionamento.

Os dados das demais simulações envolvendo a topologia regular *33-bus* podem ser consultados na [Tabela 5](#) e no [Apêndice A](#).

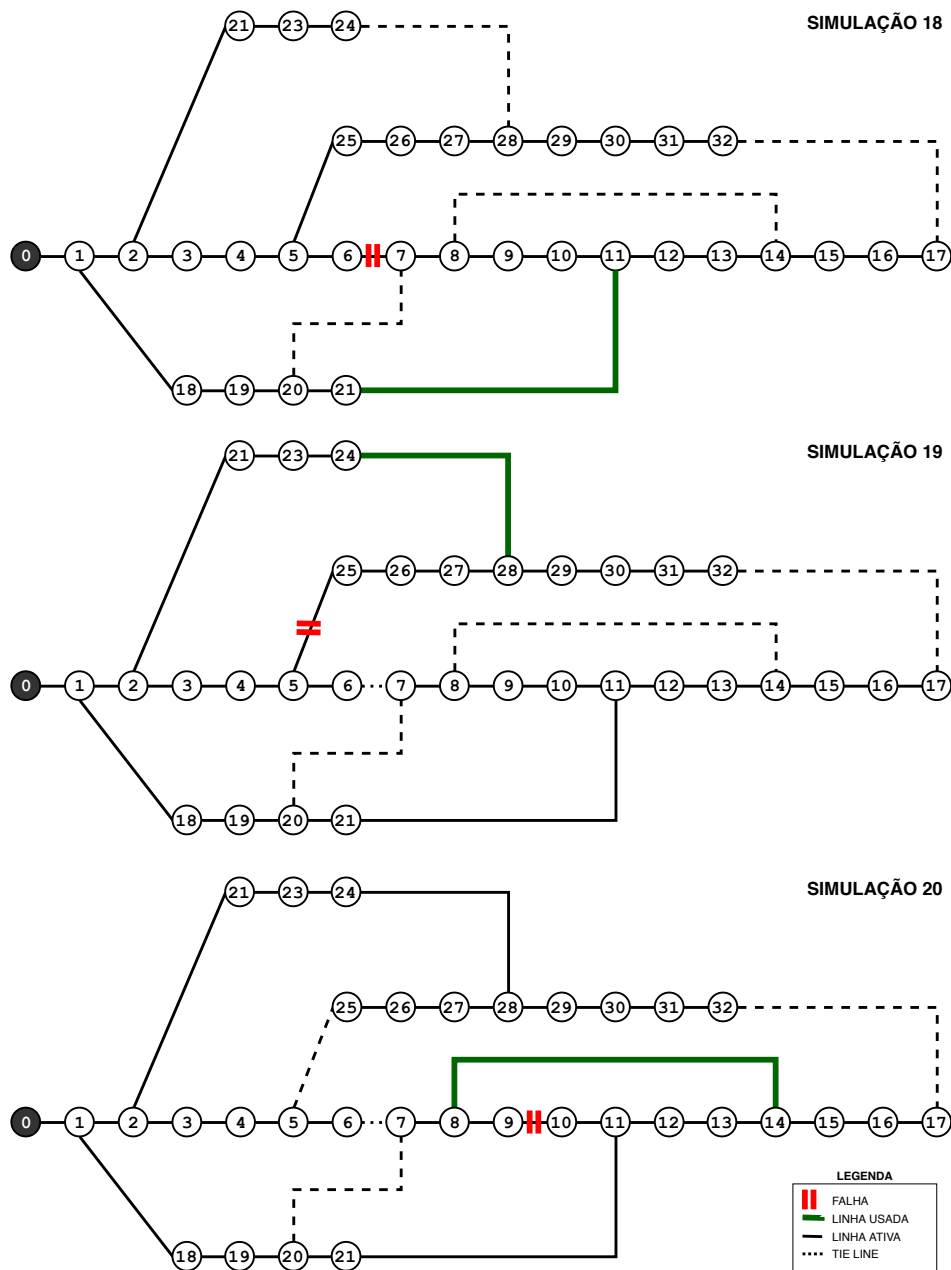
5.4.7 Autorrecuperações consecutivas em tempo de execução

Sob os mesmos critérios definidos na [subseção 5.3.5](#), nesta seção são apresentados e analisados os resultados das simulações que envolvem consecutivas autorrecuperações do sistema, dessa vez sobre a topologia *33-bus*. A única sequência de simulações realizadas com essa característica é composta pelas simulações 18, 19 e 20.

Inicia-se a análise pela simulação 18, onde é realizado um corte na linha $\overline{6,7}$, afetando os nós de 7 a 17. O sistema executa o algoritmo de autorrecuperação e elege a linha $\overline{11,21}$ para religar os nós da ilha, deixando a rede configurada como ilustra a figura [Figura 29](#), simulação 18. A partir daí o sistema considera a linha afetada $\overline{6,7}$ como reposta, isto é, serve como *tie line* no caso de nova falha na rede.

A partir dessa configuração de rede, sem reiniciar o sistema, é simulada uma falta na linha $\overline{5,25}$, ilhando os nós 25 até o 32. O sistema então pode escolher entre as *tie lines* $\overline{24,28}$ e $\overline{17,32}$, optando pela linha $\overline{24,28}$ sob circunstâncias análogas às descritas na [subseção 5.4.5](#) para a simulação 15. A configuração do sistema então passa a ser como a descrita na [Figura 29](#), simulação 19. Novamente a linha que falhou ($\overline{5,25}$) é reposta ao sistema e, em seguida, é realizado um corte na linha $\overline{9,10}$, afetando os nós 7, 8 e 9. Sob essas circunstâncias, o AA da ilha pode escolher entre as *tie lines* $\overline{20,7}$ e $\overline{8,14}$, optando pela linha $\overline{8,14}$ para restaurar a energia elétrica aos nós afetados, única vez em que essa *tie*

Figura 29 – Grafos da topologia 33-bus ao longo da autorrecuperação consecutiva nas simulações 18, 19 e 20



Fonte: O autor

line é escolhida durante as simulações realizadas. A escolha dela nesse contexto se justifica pelo fato de a árvore formada com a raiz no nó 14 ter uma profundidade menor que a árvore formada com a raiz no nó 20.

Essa análise se torna importante porque, como já concluído, demonstra o poder de adaptação que o sistema proposto tem em relação às mudanças da rede em tempo de execução. Outro fato importante de se relevar, por mais que esteja implícito nas simulações discutidas, é que durante cada processo de autorrecuperação um novo LA é eleito como

AA da ilha, ou seja, as decisões realizadas sobre o sistema sempre são feitas por agentes diferentes, indicando que todo LA precisa ser capaz de realizar os procedimentos de um AA.

5.5 Considerações do capítulo

Neste capítulo, foram descritos os métodos utilizados para realizar as simulações, o ambiente no qual ocorreram e os resultados obtidos. Com base nos resultados, pode-se observar algumas características importantes do modelo sugerido. A primeira delas é que o SMA proposto consegue se recuperar de falhas na rede utilizando um número constante de operações de chaveamento, que são dois nos casos de sucesso. Operações desse tipo são custosas ao sistema e por isso se torna interessante reduzi-las ao máximo.

Uma outra característica é a utilização do atributo distribuído dos sistemas multiagente em favor do sistema elétrico, o que, na proposta deste trabalho, significa que somente as cargas que foram afetadas que de fato trabalham para o restabelecimento da energia à ilha, evitando uma carga desnecessária de processamento e de uso da rede de comunicação em nós que não estão diretamente ligados ao contexto da falha. Isso explica porque o sistema tende a se comportar de maneira semelhante em redes com poucos ou com muitos nós, dependendo o desempenho da autorrecuperação exclusivamente do número de nós afetados pela falta. O gráfico na [Figura 18](#) ratifica essa tendência.

Um outro ponto a se observar é o dinamismo do sistema, tendo a capacidade de acompanhar as mudanças que ocorrem na rede em tempo de execução. Na verdade, essa é uma característica intrínseca à natureza dos agentes, que aliada à capacidade de coordenação mútua, permite ao SMA se reconfigurar diversas vezes com o objetivo de manter e continuar mantendo o fornecimento de energia elétrica aos nós do sistema elétrico.

Em contraponto, é possível observar que o limiar de espera para a eleição do agente ativo da ilha afeta diretamente resultados obtidos para as topologias de rede. Pressupõe-se que esse limiar aumente cada vez que o sistema crescer em número de nós. Além disso, em situações onde a transmissão de informações pela rede seja precária, esse tempo pode estourar e causar a eleição de mais de um agente ativo no sistema. Dessa forma, é desejável que haja outras formas de lidar com a eleição de agentes distribuídas de maneira que não seja mais necessário utilizar esse limiar de tempo.

Um outro ponto a ser destacado é a não-interrupção do algoritmo de autorrecuperação. Em termos práticos, uma vez que o sistema inicia a execução do algoritmo de autorrecuperação ele não é parado até que se conclua com ou sem a restauração dos nós afetados pela falta. Isso significa que, durante o processo, se a energia for restabelecida pela linha onde foi detectada a falta, o sistema continuará a executar o algoritmo, desligará esta linha e escolherá uma outra *tie line* para religar a ilha.

Por fim, cabe destacar também a dependência do modelo à boa organização das *tie lines* no sistema. De acordo com o algoritmo proposto, caso não haja *tie lines* disponíveis para autorrecuperação, o sistema fica inerte aguardando uma ação externa para que aconteça a recuperação. Obviamente o sucesso da recuperação da rede elétrica está intimamente relacionado ao problema de alocação de dispositivos pela rede, campo que é estudado por outras pesquisas na área.

6 Conclusões

Em últimas linhas, este trabalho abordou conceitos que fundamentam aspectos do sistema elétrico de potência, da modalidade dos *smart grids* e do problema de autorrecuperação de redes elétricas de distribuição. Através disso foi possível formular uma base teórica sobre a qual muitas pesquisas são conduzidas com o fim de desenvolver a área dos *smart grids* e a sua habilidade de autorrecuperação. De forma semelhante foram discutidos conceitos de inteligência artificial e de sistemas multiagente, técnica da área da inteligência artificial distribuída que é muito utilizada para abordar o problema de autorrecuperação de redes elétricas de distribuição devido ao seu caráter distribuído (SARAIVA, 2015).

O trabalho propôs uma abordagem para atacar o problema da autorrecuperação de redes elétricas de distribuição que é baseada num sistema multiagente, o qual é composto basicamente por dois tipos de agente: agentes de carga e agentes de chave. Esses agentes executam um algoritmo de quatro passos que consistem no isolamento da área em falta, eleição de um agente ativo para a ilha, mapeamento da ilha e tomada de decisão baseada no algoritmo de fluxo de potência. Para que fosse possível averiguar a eficácia do SMA proposto foi necessário definir e se utilizar de duas topologias de rede elétrica de distribuição: a topologia *8-bus* e *33-bus*, ambas com características próprias com o objetivo de expor o SMA à ambientes com diferenças consideráveis.

O trabalho também descreveu a metodologia utilizada para validar a proposta, que consistiu em simulações computacionais das topologias de rede, sobre as quais o SMA proposto opera identificando variações no ambiente e reagindo a elas de acordo com os objetivos submetidos a eles. As simulações se deram através de estímulos realizados no sistemas de arquivos do sistema operacional da máquina utilizada, os quais foram percebidos e interpretados pelo SMA, produzindo resultados que foram descritos e analisados.

Entre os resultados foi possível observar algumas características do SMA proposto. Primordialmente se destaca que o sistema conseguiu se autorrecuperar em todas as simulações realizadas em ambiente ideal, mostrando ser eficaz no que se propõe a realizar. Também se destaca o número de operações de chaveamento necessários para realizar a recuperação nos casos de sucesso, que é de 2 (dois). Esse é um número muito bom, levando em conta que essa são operações dispendiosas ao sistema. Isso é possível graças à análise em ambiente virtual das configurações possíveis pelo AA, realizando de fato somente aquelas operações que realmente são necessárias à recuperação da ilha. O sistema também conta com a característica de isolamento de faltas, fazendo o algoritmo de autorrecuperação ser executado apenas pelos nós que foram afetados diretamente pela falta. Além disso, o sistema também é capaz de se reconfigurar e seguir acompanhando as mudanças do

ambiente sem a necessidade de ser reiniciado. Por fim, obteve-se também uma média de tempo razoável para os processos de autorrecuperação, atingindo a marca de 543,1 ms.

Obviamente ainda há um longo caminho de testes a ser percorrido pelo SMA proposto para que seja utilizado em um sistema elétrico real, porém os experimentos conduzidos por essa pesquisa apontam para um bom direcionamento nessa questão, abrindo possibilidades para a implementação de novas funcionalidades a esse sistema.

6.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros derivados dessa pesquisa, planeja-se especialmente realizar simulações com o modelo em sistemas embarcados, de modo a colher resultados que expressem melhor o comportamento do sistema em um ambiente mais próximos a sistemas pervasivos e *smart grids*.

Ainda como trabalhos futuros podem ser adotadas técnicas para considerar a inclusão de fontes de geração distribuídas ao longo da rede, já que essa é uma tendência no campo dos *smart grids*. Além disso o SMA proposto abre possibilidades para ser testado em sistemas elétricos com maior número de cargas averiguando a sua capacidade de reconfiguração adaptável e analisando o seu desempenho em sistemas que requerem maior esforço para se recuperar.

Em relação a melhorias locais no SMA atual, é visado escolher um método mais robusto de eleger o agente ativo da ilha, levando em conta que, para sistemas com maior número de nós, o limiar de espera para que todos os agentes externos se candidatem deverá ser cada vez maior, sacrificando o desempenho do sistema. Aqui, a técnica de *timeout*, muito utilizada em sistemas distribuídos assíncronos (COULOURIS et al., 2013), pode ser uma forte candidata para resolver essa questão, mas não dispensa o uso de outras técnicas, como a de múltipla concorrência com ordem de chegada, ou ainda outras.

Como adicional, também é visado aumentar o alcance do sistema em relação à escolha das *tie lines*, que atualmente é limitada apenas à perdas elétricas. Questões como os limites de tensão mínimos e máximos nas cargas, intensidade da corrente elétrica nas linhas e análise das árvores formadas nas ilhas também podem ser adicionadas à tomada de decisão, de modo que o sistema ofereça uma escolha mais robusta. Ainda como inclusões nessa tomada de decisão, é interessante levar em conta o balanceamento de cargas afetadas, considerando possíveis desmembramentos da ilha de forma a utilizar diferentes fontes para diminuir a saturação de linhas e as chances de ocorrer sobrecargas.

Por fim, ainda como melhorias futuras, poderá ser aplicado ao SMA um agente monitor da rede, que seria o responsável por desenvolver papéis centralizadores, como o da subestação ou de sub-regiões do sistema. Esse agente poderá melhorar alguns aspectos no

SMA, como por exemplo manter o sistema com um fluxo de potência atualizado, executando essa verificação a partir do nó da subestação toda vez que o sistema se autorrecupera. Além disso, um agente desse tipo poderá melhorar a comunicação entre agentes que estão muito distantes entre si no sistema, aprimorando o desempenho no processo de troca de mensagens em sistemas muito grandes.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Banco de Informações de Geração: Capacidade de geração do brasil*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 05 nov. 2018. Citado na página 16.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Indicadores coletivos de continuidade (DEC e FEC): Brasil - anual - concessionárias*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>>. Acesso em: 09 nov. 2018. Citado na página 17.
- BANSAL, H. O.; MATHUR, H. D. *Distributed generation integration in smart grid technologies*. India, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Hari_Bansal/publication/316989999_Distributed_Generation_Integration_in_Smart_Grid_Technologies/links/591c332f0f7e9b7727da0598/Distributed-Generation-Integration-in-Smart-Grid-Technologies.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989. Citado 8 vezes nas páginas 7, 8, 20, 21, 48, 50, 51 e 96.
- BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. *Developing multiagent systems with JADE*. Liverpool: Jhon Wiley & Sons, 2007. Citado 7 vezes nas páginas 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43.
- BLUME, S. W. *Electric power systems basics for the nonelectrical professional*. 2. ed. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 23, 24, 28, 30 e 31.
- CAIRE, G. *JADE tutorial: Jade programing for beginners*. India, 2009. Disponível em: <<http://jade.tilab.com/doc/tutorials/JADEProgramming-Tutorial-for-beginners.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45 e 46.
- CAMPOS, I. R.; SARAIVA, F. O. Proposta de modelo de autorrecuperação de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando sistemas multiagente. In: 12TH WORKSHOP-SCHOOL ON AGENTS, ENVIRONMENTS AND APPLCATIONS. Fortaleza, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 48.
- COULOURIS, G. et al. *Sistemas distribuídos: Conceitos e projetos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Tradução de João Eduardo Nóbrega Tortello. Citado 4 vezes nas páginas 41, 46, 62 e 80.
- EDDY, Y. S. F.; GOOI, H. B.; CHEN, S. X. Multi-agent system for distributed management of microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 30, n. 1, p. 24–34, Jan 2015. ISSN 0885-8950. Citado na página 43.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018: Capacidade instalada de geração elétrica no brasil (mw)*. [S.l.], 2018.

Disponível em: <<http://http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 09 nov. 2018. Citado na página 27.

FERREIRA, L. R. et al. Solução do problema de self-healing para redes de distribuição radiais através de otimização via algoritmo genético. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE 2013. Fortaleza, 2013. Citado na página 18.

FREE SOFTWARE FOUNDATION. *GNU Lesser General Public License*. v.2.1. [S.l.], 1999. Disponível em: <<http://jade.tilab.com/support/license/>>. Acesso em: 08 nov. 2018. Citado na página 21.

FREITAS, F. D. *Introdução aos Sistemas Elétricos de Potência*. Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.gsep.ene.unb.br/osem/damasceno/ASP-2-2009/Notas-de-aula/caps_1_2_3.pdf>. Acesso em: 05 set. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 26, 29 e 30.

GEBRAN, A. P. *Manutenção e Operação de Equipamentos de Subestações*. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. Citado 8 vezes nas páginas 16, 23, 24, 25, 26, 27, 29 e 30.

HALLIDAY, D.; R, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física: Eletromagnetismo*. 9. ed. [S.l.]: LTC, 2012. Citado na página 24.

JADE. *Java Agent Development Framework (version 4.5.0)*. 2017. <<http://jade.tilab.com/>>. Citado 4 vezes nas páginas 21, 36, 39 e 43.

JIA, D.; MENG, X.; SONG, X. Study on technology system of self-healing control in smart distribution grid. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED POWER SYSTEM AUTOMATION AND PROTECTION. Beijing, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 35.

LARIK, R. M.; MUSTAFA, M. W. Technologies used in smart grid to implement power distribution system. *TELKOMNIKA Indonesian journal of electrical engineering*, v. 16, n. 2, p. 232–237, nov 2015. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.

LEE, R.; LIU, J. ijade weatherman: a weather forecasting system using intelligent multiagent-based fuzzy neuro network. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, v. 34, n. 3, p. 369–377, aug 2004. ISSN 1094-6977. Citado na página 43.

LUO, Y.; LIU, K.; DAVIS, D. N. A multi-agent decision support system for stock trading. *IEEE Network*, v. 16, n. 1, p. 20–27, jan 2002. ISSN 0890-8044. Citado na página 43.

MAUAD, F. F.; FERREIRA, L. C.; TRINDADE, T. C. G. *Energia renovável no Brasil: análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras*. 1. ed. São Carlos: EESC/USP, 2017. Citado na página 16.

ORACLE. *Java (version 10.0.1)*. 2018. <<https://java.com/en/>>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 43.

PRACA, I. et al. Mascem: a multiagent system that simulates competitive electricity markets. *IEEE Intelligent Systems*, v. 18, n. 6, p. 54–60, nov 2003. ISSN 1541-1672. Citado na página 43.

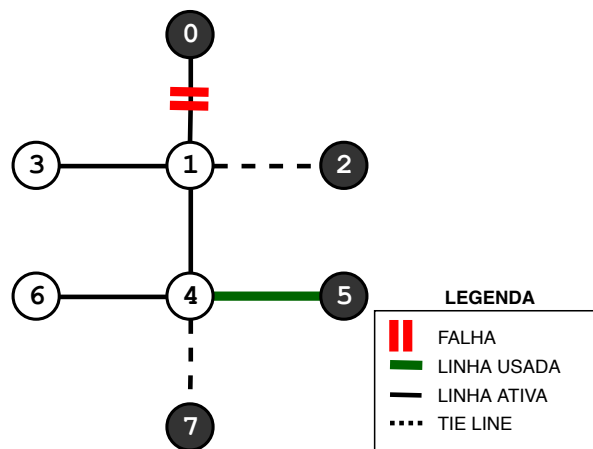
- PRAMIO, J. T. *Estudo sobre self healing: conceitos, metodologias, e aplicações em redes de distribuição de energia elétrica*. 93 p. Monografia (TCC) — Departamento acadêmico de eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Citado na página 17.
- RAUF, S. B. *Electrical engineering for non-electrical engineers*. 2. ed. United States: The Fairmont Press, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 25, 29 e 30.
- REIS, L. P. *Coordenação em sistemas multi-agente: aplicações na gestão universitária e futebol robótico*. Tese (Doutorado) — Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2003. Citado na página 17.
- RICH, E.; KNIGHT, K.; NAIR, S. B. *Artificial intelligence*. 3. ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2009. Citado na página 36.
- RUSSEL, S.; NORVIG, P. *Artificial intelligence: A modern approach*. 3. ed. New Jersey: Pearson, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- SARAIVA, F. O. *Aplicações híbridas entre sistemas multiagentes e técnicas de inteligência artificial para redes inteligentes de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, nov 2015. Citado 14 vezes nas páginas 9, 17, 19, 20, 31, 32, 34, 36, 38, 40, 41, 57, 58 e 79.
- SARMA, M. S. *Introduction to electrical engineering*. Nova York: Oxford University Press, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 16, 27 e 29.
- SHARMA, A.; SRINIVASAN, D.; TRIVEDI, A. A decentralized multi-agent approach for service restoration in uncertain environment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 4, p. 3394–3405, jul 2018. Citado na página 18.
- SOUZA, F. A. *Modelo baseado em sistema multiagente para autorrecuperação com corte seletivo de carga e ilhamento com geração distribuída para redes elétricas inteligentes*. 147 p. Monografia (Dissertação) — Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- TANEMBAUM, A.; STEEN, M. *Sistemas Distribuídos: Princípios e paradigmas*. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2008. Tradução de Arlete Simille Marques. Citado na página 21.
- THE FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS. *Standard Status Specifications*. [S.l.], 2002. Disponível em: <<http://www.fipa.org/repository/standardspecs.html>>. Acesso em: 22 nov. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 46.
- WANG, Z. et al. Networked microgrids dor self-healing power systems. *IEEE Transaction on Smart Grids*, v. 7, n. 1, p. 310–319, jan 2016. Citado na página 18.
- WEISS, G. *Multiagent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence*. London: The MIT Press, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- WOOLDRIDGE, M. *An introduction to multiagent systems*. 2. ed. Liverpool: Jhon Wiley & Sons, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 39.

Apêndices

APÊNDICE A – Grafos das simulações

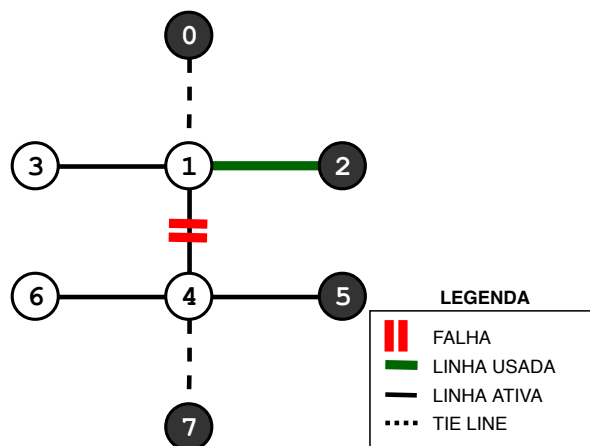
Para efeito de esclarecimento e consulta, passam a ser colocados, em ordem, todos os grafos produzidos por essa pesquisa como parte complementar dos resultados alcançados. As figuras com os grafos são divididas em dois grupos, um para cada tipo de topologia utilizada nas simulações.

Figura 30 – Grafo da topologia *8-bus* ao final da simulação 1



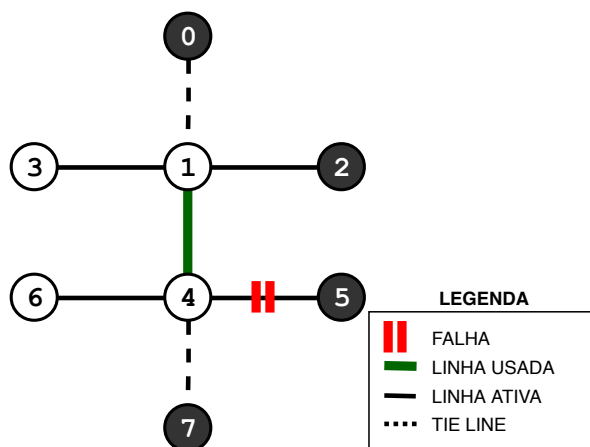
Fonte: O autor

Figura 31 – Grafo da topologia *8-bus* ao final da simulação 2



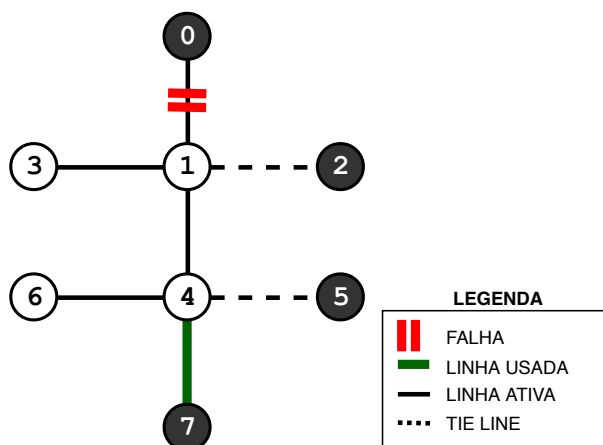
Fonte: O autor

Figura 32 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 3



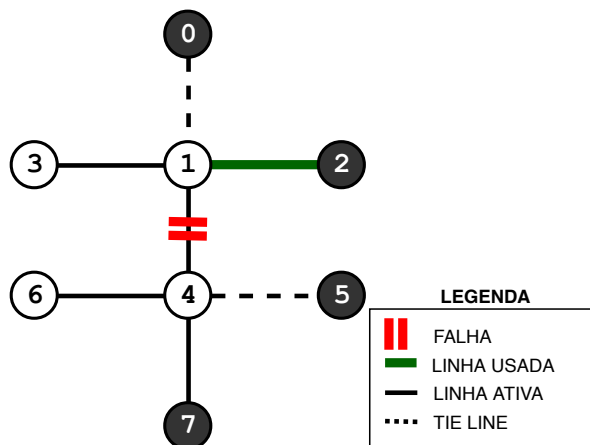
Fonte: O autor

Figura 33 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 4



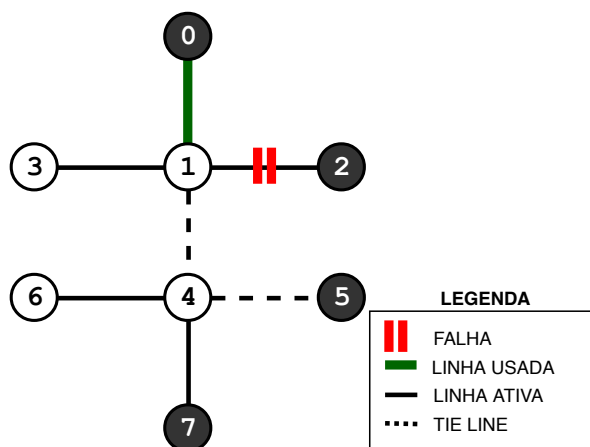
Fonte: O autor

Figura 34 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 5



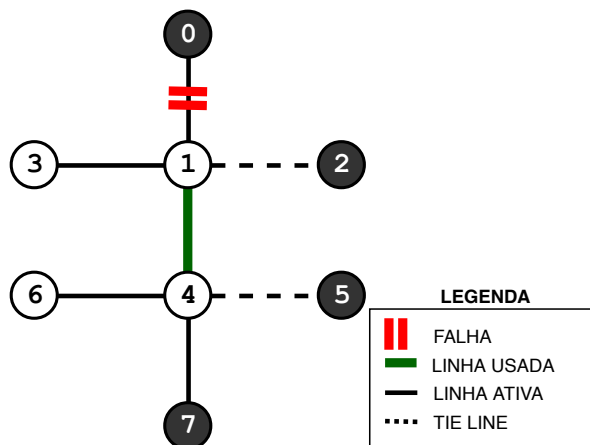
Fonte: O autor

Figura 35 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 6



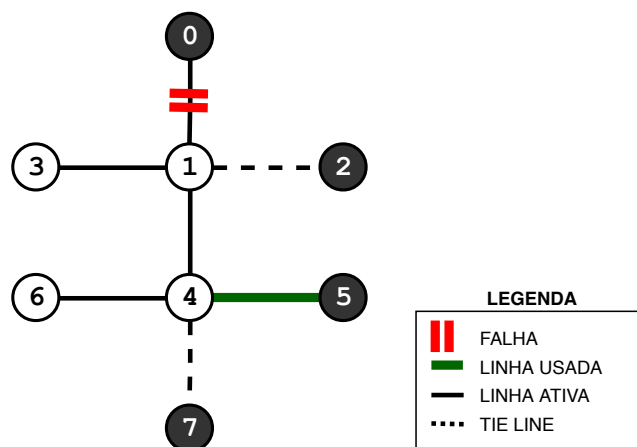
Fonte: O autor

Figura 36 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 7



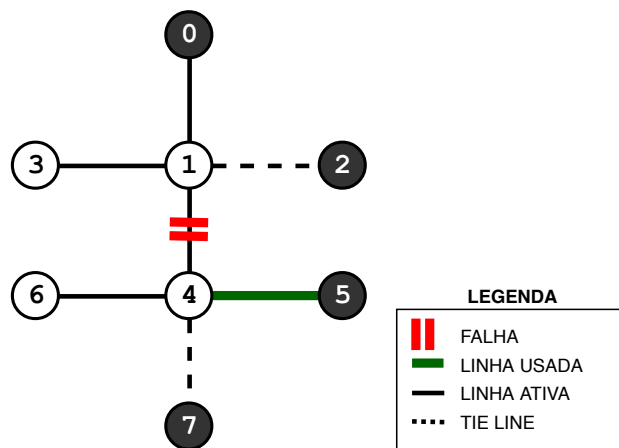
Fonte: O autor

Figura 37 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 8



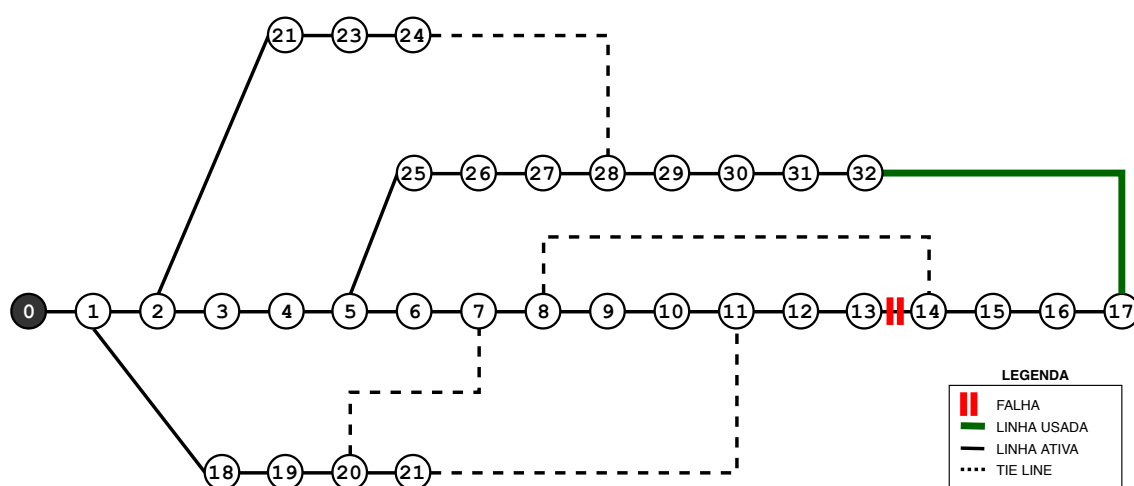
Fonte: O autor

Figura 38 – Grafo da topologia 8-bus ao final da simulação 9



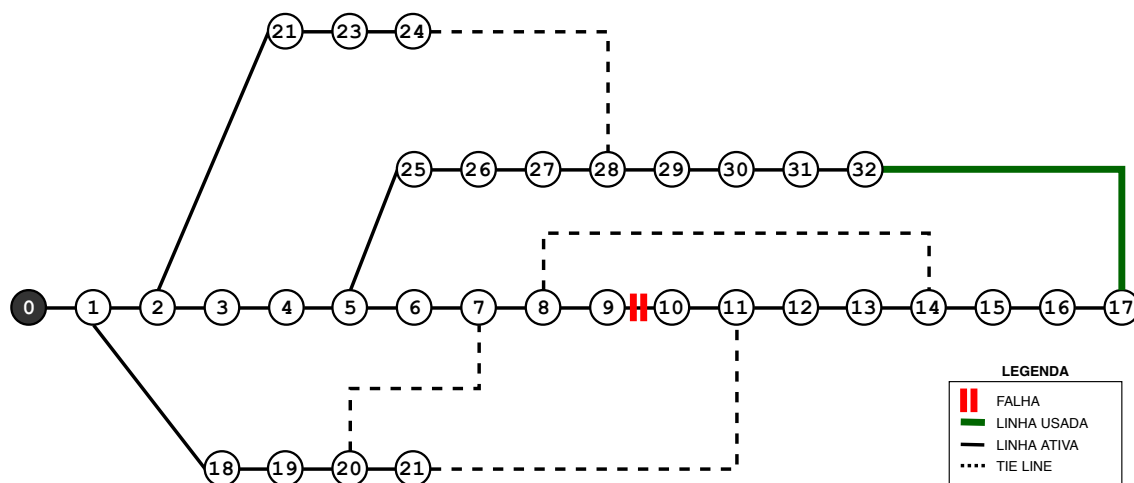
Fonte: O autor

Figura 39 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 10



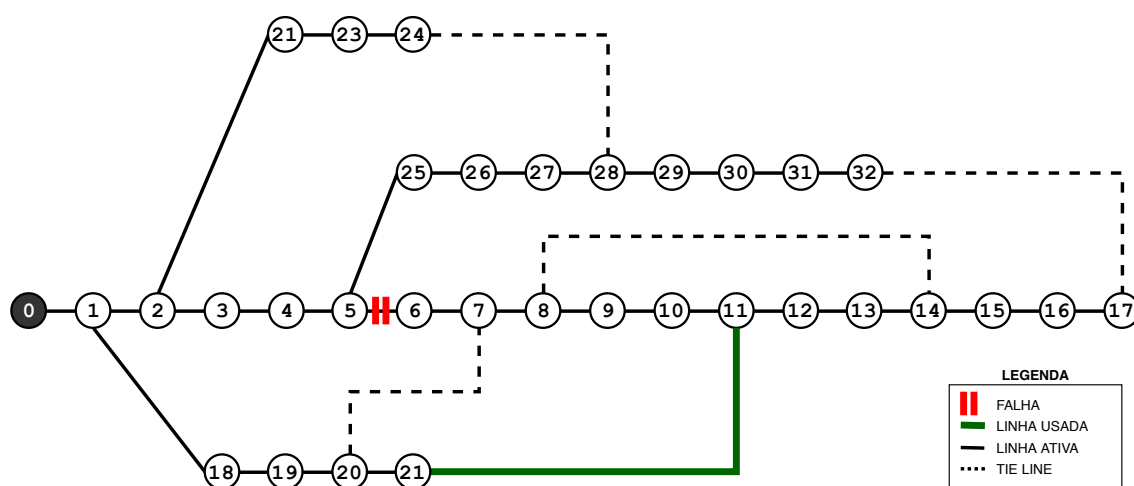
Fonte: O autor

Figura 40 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 11



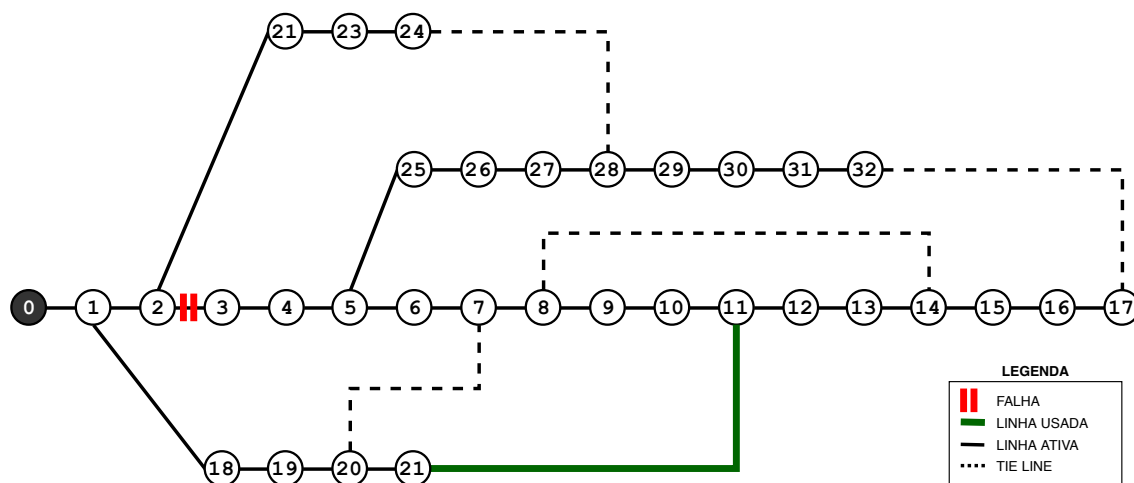
Fonte: O autor

Figura 41 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 12



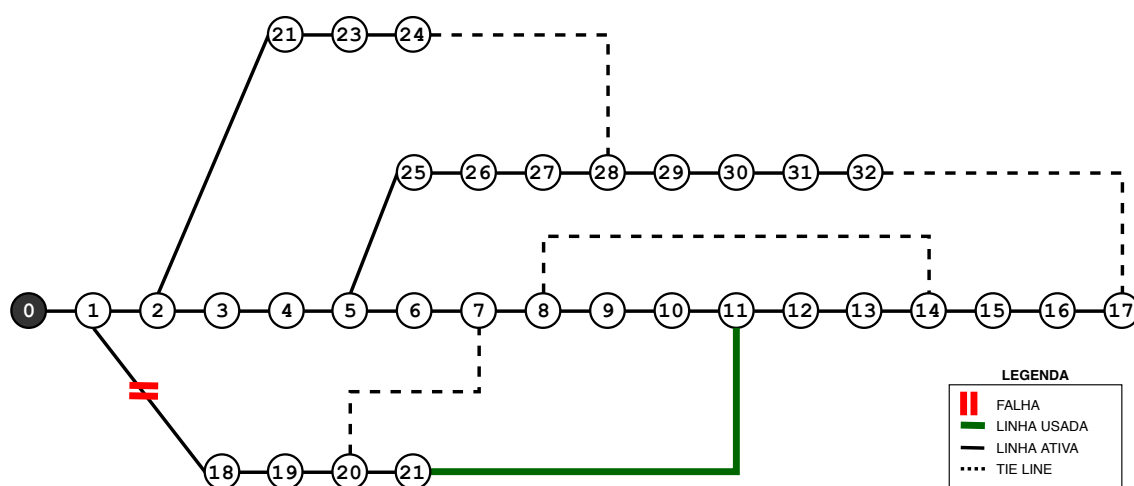
Fonte: O autor

Figura 42 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 13



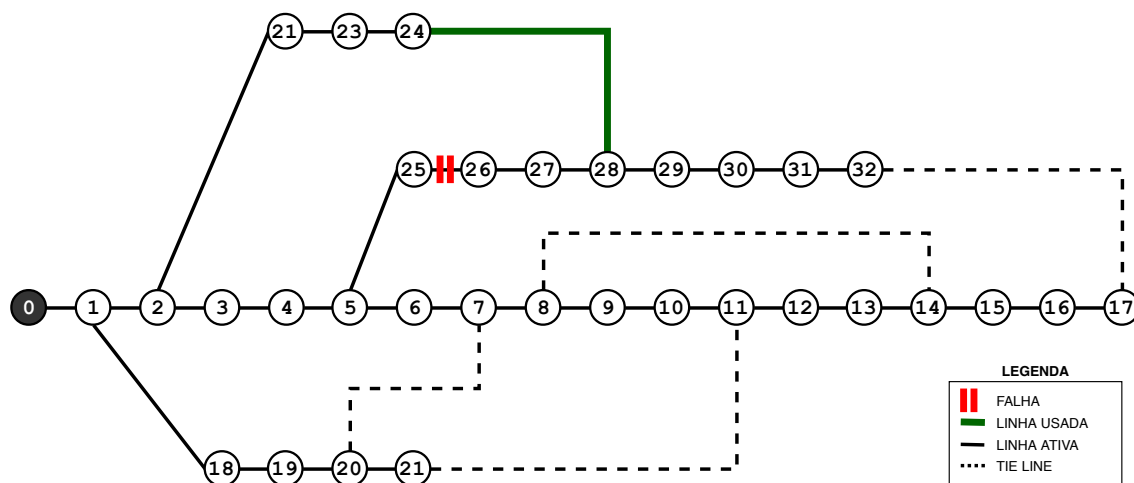
Fonte: O autor

Figura 43 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 14



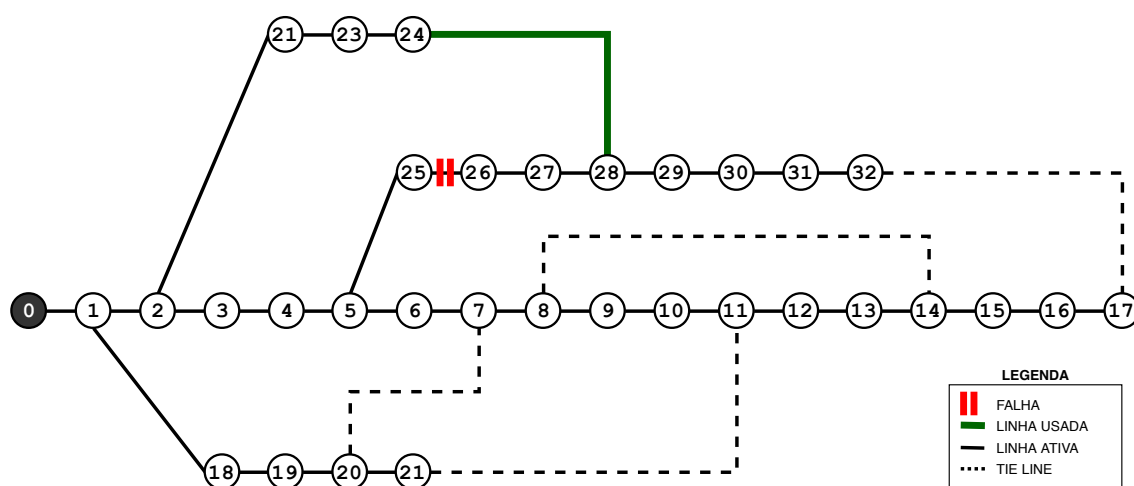
Fonte: O autor

Figura 44 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 15



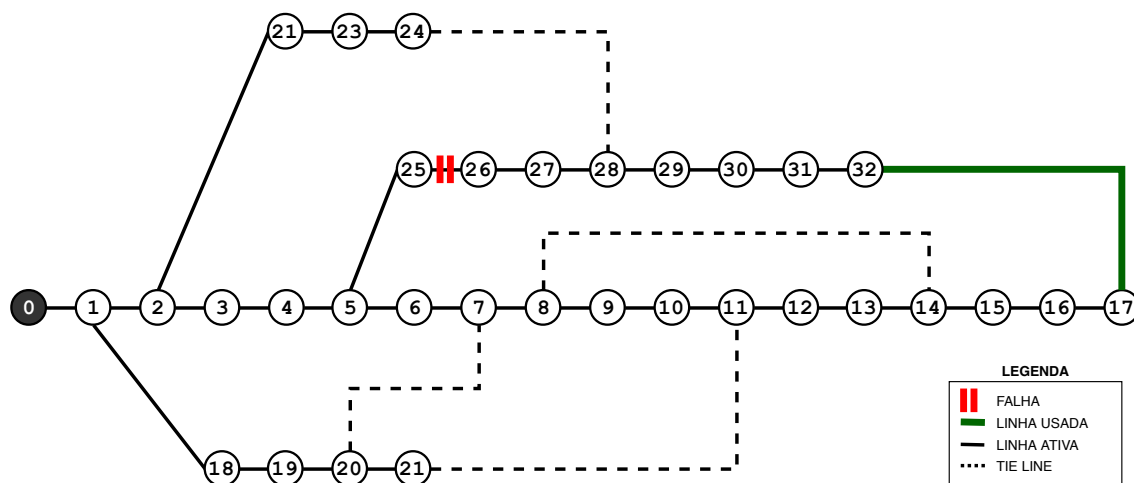
Fonte: O autor

Figura 45 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 16



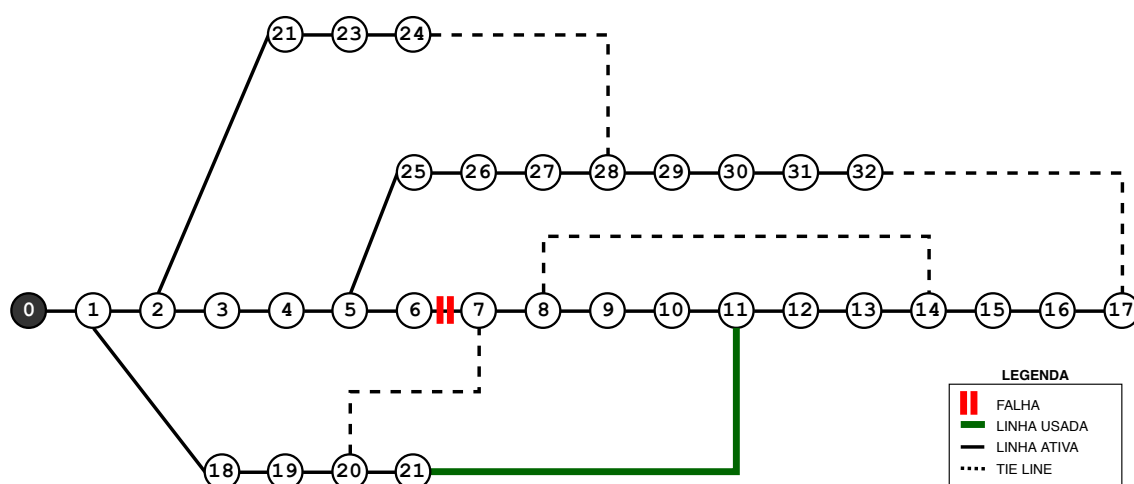
Fonte: O autor

Figura 46 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 17



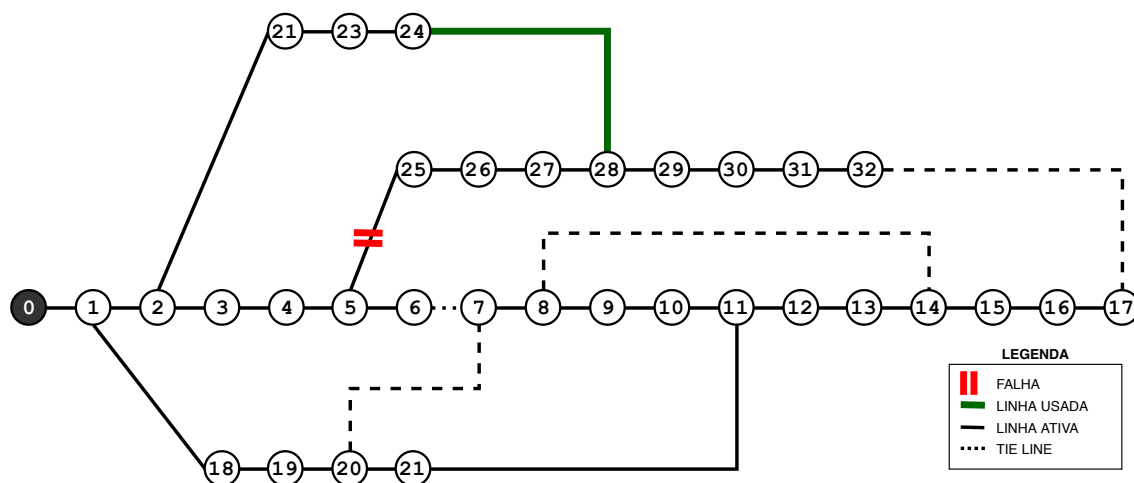
Fonte: O autor

Figura 47 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 18



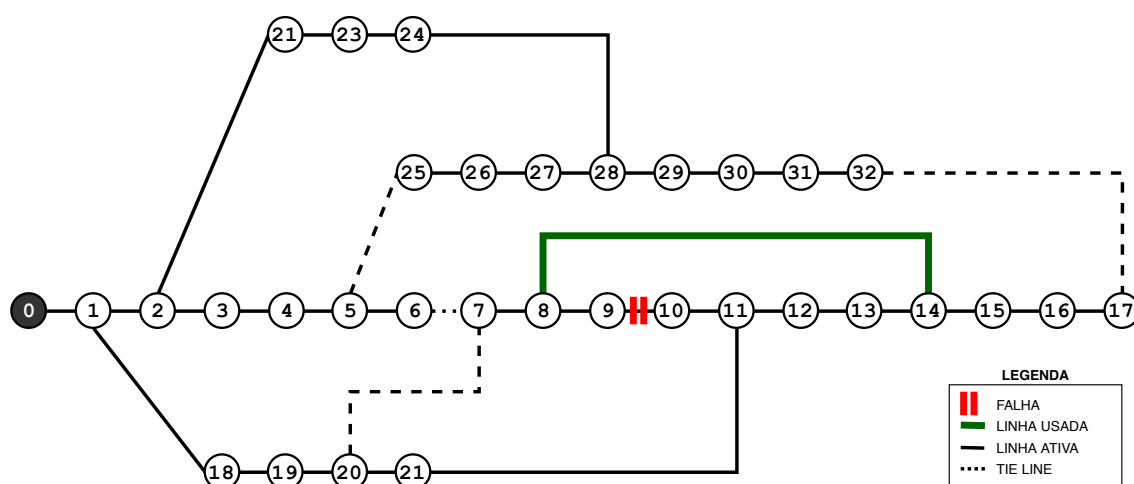
Fonte: O autor

Figura 48 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 19



Fonte: O autor

Figura 49 – Grafo da topologia 33-bus ao final da simulação 20



Fonte: O autor

APÊNDICE B – Resistências das linhas na topologia *33-bus*

Para efeito de consulta, abaixo segue uma tabela adaptada de [Baran e Wu \(1989\)](#) que detalha as resistências nas linhas da topologia *33-bus*.

Tabela 7 – Valores de resistência e reatância nas linhas da topologia *33-bus*

Linha	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
$\overline{0,1}$	0.0922	0.0470
$\overline{1,2}$	0.4930	0.2511
$\overline{2,3}$	0.3660	0.1864
$\overline{3,4}$	0.3811	0.1941
$\overline{4,5}$	0.8190	0.7070
$\overline{5,6}$	0.1872	0.6188
$\overline{6,7}$	1.7114	1.2351
$\overline{7,8}$	1.0300	0.7400
$\overline{8,9}$	1.0440	0.7400
$\overline{9,10}$	0.1966	0.0650
$\overline{10,11}$	0.3744	0.1238
$\overline{11,12}$	1.4680	1.1550
$\overline{12,13}$	0.5416	0.7219
$\overline{13,14}$	0.5910	0.5260
$\overline{14,15}$	0.7463	0.5450
$\overline{15,16}$	1.2890	1.7210
$\overline{16,17}$	0.7320	0.5740
$\overline{1,18}$	0.1640	0.1565
$\overline{18,19}$	1.5042	1.3554
$\overline{19,20}$	0.4095	0.4784
$\overline{20,21}$	0.7089	0.9373
$\overline{2,22}$	0.4512	0.3083
$\overline{22,23}$	0.8980	0.7091
$\overline{23,24}$	0.8960	0.7011
$\overline{5,25}$	0.2030	0.1034
$\overline{25,26}$	0.2842	0.1447
$\overline{26,27}$	1.0590	0.9337
$\overline{27,28}$	0.8042	0.7006
$\overline{28,29}$	0.5075	0.2585
$\overline{29,30}$	0.9744	0.9630
$\overline{30,31}$	0.3105	0.3619
$\overline{31,32}$	0.3410	0.5302
$\overline{7,20}$	2.0000	2.0000
$\overline{8,14}$	2.0000	2.0000
$\overline{11,21}$	2.0000	2.0000
$\overline{17,32}$	0.5000	0.5000
$\overline{24,28}$	0.5000	0.5000

Fonte: Retirado de [Baran e Wu \(1989\)](#)