LEIVIANE CAMARÇO BARBOSA FERREIRA

**Restauração automática de cargas em redes elétricas de distribuição
aplicando multiagentes distribuídos**

SÃO PAULO

2019

LEIVIANE CAMARÇO BARBOSA FERREIRA

**Restauração automática de cargas em redes elétricas de distribuição
aplicando multiagentes distribuídos**

Dissertação apresentada a Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas de
Potência

Orientador: Silvio Giuseppe Di Santo

SÃO PAULO

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de novembro de 2019

Assinatura do autor: Leiviane EB Ferreira

Assinatura do orientador: [assinatura]

Catálogo-na-publicação

Camarço Barbosa Ferreira, Leiviane

Restauração automática de cargas em redes elétricas de distribuição aplicando multiagentes distribuídos / L. Camarço Barbosa Ferreira -- versão corr. -- São Paulo, 2019.
71 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA 2.DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por todas as oportunidades colocadas no meu caminho.

À minha mãe, pelo apoio incondicional que deu às minhas escolhas, pelo amor e por acreditar em mim e na minha capacidade.

Ao Professor Silvio Giuseppe, por sua orientação, pelos ensinamentos passados ao longo dessa jornada, estando sempre muito disposto a ajudar e contribuir da melhor forma para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao professor Renato Monaro, pela ajuda, apoio, disponibilidade e pelas contribuições com minhas ideias.

Ao Márcio Hermany, pelo incentivo que me deu para buscar mais esse título, pelo apoio e ajuda que nunca deixou faltar.

À Renata, pela amizade e pelas horas de ajuda que foram fundamentais no desenvolvimento desse trabalho.

À Guacira, pela companhia e parceria nas horas difíceis, ajuda e muita conversa para me recolocar no eixo.

À Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização dessa pesquisa.

RESUMO

Para solucionar a problemática da recuperação dos sistemas elétricos em falta, são apresentadas na literatura várias técnicas que buscam uma topologia que tente associar o menor número de cargas desconectadas dos sistemas. Mas para sistemas cuja complexidade cresce consideravelmente com o passar dos anos, tem-se a necessidade de automatizar ações que são usualmente tomadas por pessoas, para que sejam executadas com maior rapidez e segurança. Com os sistemas mais automatizados as tarefas já formuladas são transferidas para sistemas computacionais, deixando livres as capacidades humanas para outros problemas. Nesta dissertação será mostrado o desenvolvimento de um sistema de recuperação automática para a rede elétrica de distribuição, como objetivo de restaurar cargas fora de serviço, associado às técnicas computacionais baseada em multiagentes distribuídos, aproveitando-se de características como proatividade, autonomia e racionalidade que os *softwares* agentes trazem para os componentes do sistema. Como base para o desenvolvimento do algoritmo será apresentado um estudo da literatura em busca das técnicas desenvolvidas até então, mostrando diversas estratégias, bem como as funções objetivos e limitações de cada uma. Ademais, são apresentados os principais conceitos envolvendo a metodologia a ser desenvolvida com multiagentes. A implementação dos sistemas foi realizada em Java, com as bibliotecas, métodos e classes já bem definidos do ambiente de desenvolvimento para agentes, JADE. Associado à plataforma JADE, foram simulados dois exemplos de rede de distribuição no software OpenDSS, via interface COM. Os resultados obtidos serão apresentados para validar o algoritmo, mostrando os estados de linhas de interligação e as cargas que foram reconectadas à rede pela aplicação da estratégia.

Palavras-Chave: Sistemas de restauração automática, redes inteligentes, redes elétrica de distribuição, sistema multiagentes.

ABSTRACT

In order to find a solution for the problem of recovering faulty electrical systems, several techniques are presented in the literature that propose a topology that allows to reduce number of disconnected loads of the systems. For systems whose complexity increases substantially over the years, there is a need to automate actions that are usually taken by persons so that these actions can be performed faster and more safely. With automated systems, one can transfer tasks to computer systems, leaving human capacities free for solving other issues. This dissertation presents the development of a self-healing system for the distribution electrical system, with the goal of restoring out of service loads, associating to distributed multi-agent computational techniques, and taking advantage of its mains characteristics, such as proactivity, autonomy, and rationality. For the development of the algorithm, it was studied the literature in pursuit of the techniques developed so far, presenting several strategies, as well as objective functions and limitations of each strategy. In addition, the main concepts related to the methodology developed with multiagent are presented. The system was implemented in Java, with the libraries, methods, and classes already well stated in the development environment for agents, JADE. Associated to the JADE platform, two examples of distribution networks were simulated in OpenDSS software through COM interface. The results will be presented to validate the algorithm, showing the interconnection lines states and the loads that were reconnected to the network by applying the strategy.

Keywords: Self-healing systems, smartgrid, electrical distribution networks, multiagent system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura de relação entre os agentes de Zidan, El-Saadany and El Chaar (2011)	22
Figura 2.2 – Estrutura de relação entre os agentes de Zidan and El-Saadany (2012).....	22
Figura 2.3 – Estrutura de relação entre os agentes de Souza <i>et al.</i> (2017)	23
Figura 2.4 – Estrutura de relação entre os agentes de Elmitwally <i>et al.</i> (2015).....	23
Figura 2.5 – Estrutura de relação entre os agentes de Yokoyama and Nagata (2012)	24
Figura 3.1 – Representação geral de um agente	27
Figura 3.2 – Funções do modelo BDI.....	32
Figura 4.1 – Representação da rede 1	35
Figura 4.2 - Representação da rede 2	37
Figura 4.3 – Resumo geral do método	40
Figura 4.4 – Lógica dos agentes de zona e de subestação	42
Figura 4.5 – Estrutura de relação entre os agentes	43
Figura 4.6 – Diagramas dos comportamentos a) <i>OutofService</i> e b) <i>Candidate</i> dos agentes de zonas	45
Figura 5.1 – Agente RMA da plataforma JADE	46
Figura 5.2 – Agente <i>Introspector</i> da plataforma JADE	47
Figura 5.3 – Faltas na rede 1	48
Figura 5.4 – Topologia final da rede 1 para a) Falta 1, b) Falta 2 e c) Falta 3	51
Figura 5.5 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 1 no caso da falta 1.....	53

Figura 5.6 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 1 no caso da falta 2.....	54
Figura 5.7 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 1 no caso da falta 1.....	54
Figura 5.8 – Faltas na rede 2	56
Figura 5.9 – Topologia final da rede 2 para a) Falta 1, distribuição 1 e 2; b) Falta 2, distribuição 1; c) Falta 2, distribuição 2; d) Falta 3, distribuição 1; e d) Falta 3, distribuição 2	58
Figura 5.10 - Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 1 e distribuição de cargas 1	61
Figura 5.11 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 2 e distribuição de cargas 1	61
Figura 5.12 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 2 e distribuição de cargas 2.....	62
Figura 5.13 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 3, distribuição de cargas 1	63
Figura 5.14 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 3, distribuição de cargas 2.....	63

LISTA DE SILGAS E ABREVIATURAS

ACL	Linguagem de Comunicação de Agentes
AID	Identidade de Agente
AMS	Sistemas de Gerenciamento de Agentes
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AOP	Programação Orientada a Agentes
AP	Plataforma de Agentes
BDI	Modelo <i>Belief-Desire-Intention</i>
CNP	Protocolo de interação <i>Contract Net</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor
DF	Facilitador de Diretório
DoD	Departamento de Defesa dos EUA
EPRI	Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor
FIPA	Fundação para Agentes Físicos Inteligentes
GD	Geração Distribuída
GIS	Sistema de Informação Geográfica
IDAPS	Sistema de Potência Autônomo Distribuído Inteligente
JADE	Plataforma de desenvolvimento de agentes em Java
KQML	Linguagem de Consulta e Manipulação de Conhecimento
MTS	Serviço de Transporte de Mensagens
RestOpt	Sistema de restauração <i>Optimization-based</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.2	MOTIVAÇÃO	13
2	ESTRATÉGIAS USADAS PARA OS SISTEMAS DE RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA.....	14
2.1	RESTAURAÇÃO EM MODO PREVENTIVO E MODO CORRETIVO	15
2.2	ESTRATÉGIAS POR REJEIÇÃO DE CARGAS	16
2.3	ESTRUTURAS E MÉTODOS DE CONTROLE PARA DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA	16
2.4	COMPARATIVO ENTRE AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS MÉTODOS REVISADOS	20
2.4.1	Funções objetivo e restrições.....	20
2.4.2	Agentes	21
2.4.3	Geração distribuída	24
3	SISTEMAS BASEADOS EM AGENTES	26
3.1	AGENTES INTELIGENTES.....	26
3.2	SISTEMAS MULTIAGENTES.....	28
3.3	COMUNICAÇÃO E O PADRÃO FIPA-ACL	28
3.4	PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A AGENTES.....	31
4	METODOLOGIA DO TRABALHO	34
4.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO USADO NO ESTUDO... ..	34
4.2	PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DO SISTEMA.....	38
4.2.1	Passos a serem aplicados pelo método	39
4.2.2	Algoritmo de busca e restauração das zonas fora de serviço	40
5	SIMULAÇÃO E RESULTADOS.....	46

5.1	REDE 1.....	47
5.2	REDE 2.....	55
5.3	RESULTADOS GERAIS.....	63
6	CONCLUSÕES.....	65
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

O interesse por melhores soluções de recuperação rápida e eficiente da rede de distribuição de energia elétrica vem crescendo pela busca de melhoria dos índices individuais e coletivos de qualidade dos serviços prestados e de continuidade de energia, tais como Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor e Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor (DEC e FEC). Há também uma constante busca pela automatização dos sistemas e subestações, pela segurança de bens e de pessoas, e pelo estímulo gerado com o desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitam melhores técnicas.

Os indicadores DEC e FEC são estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de forma a exigir das concessionárias um padrão na qualidade e continuidade da energia distribuída aos consumidores, além de refletir a eficiência dos serviços prestados para a população. Melhorar esses indicadores ajuda a redução dos custos por perdas técnicas e das penalidades para as empresas.

A automatização dos sistemas também é importante para aumentar a rapidez na operação e manutenção de equipamentos de campo, detecção e monitoramento de problemas. Além da redução de problemas e gastos, deve ser priorizada a segurança de operadores, minimizar os riscos aos quais equipes de trabalho estão sujeitas, e proteção dos próprios equipamentos. Ademais, é fundamental garantir a segurança de pessoas não especializadas e da população em geral, como em casos de faltas por queda de cabos, realizando a desenergização de parte dos sistemas, assim evitando que linhas vivas entrem em contato com postes, grades e vias públicas.

Os fatores citados acima são diretamente influenciados pelo desenvolvimento de sistemas com restauração automática, os quais estão sendo viabilizados com o desenvolvimento das tecnologias dos dispositivos de proteção, de comunicação e das técnicas computacionais, proporcionando o surgimento de uma gama de soluções.

Por outro lado, com a constante mudança de hábitos da sociedade, o setor elétrico está sendo altamente requisitado e o consumo crescente de energia foi exigindo dos sistemas elétricos cada vez mais capacidade de fornecimento, e, conseqüentemente, a complexidade desses sistemas vem também crescendo. No Brasil, ter um sistema interligado traz como vantagem a flexibilidade da rede, podendo torná-la reajustável quando necessário. Dessa forma, tem-se um ambiente propício para desenvolvimento e aplicação de técnicas de regeneração ou restauração automática, (do inglês, *self-healing*), no âmbito das redes inteligentes (*smart grids*). Outro termo utilizado também é sistema autorregenerativo, os quais usualmente utilizam técnicas que reorganizam a topologia da rede, levando em conta as características de qualidade da energia, tais como, estabilidade de tensão, restrições do sistema e prioridade de cargas. Uma vez que essas técnicas devem ser executadas em condições emergenciais, o tempo de operação torna maior a complexidade desses sistemas. Além deste, outros fatores também aumentam as dificuldades para encontrar soluções que atendam os sistemas de recuperação automática, como a multiplicidade de restrições que implicam em funções com vários objetivos, e a multidisciplinaridade requerida para desenvolver as técnicas que determinarão a topologia adequada para restauração da rede (RIBEIRO et al., 2017). No entanto, diversas estratégias vêm sendo desenvolvidas com auxílio de técnicas computacionais que ajudam a mitigar as complexidades do desenvolvimento dessas soluções.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma metodologia para a reconfiguração automática de redes de distribuição, após falhas. Além disso, esse trabalho traz uma revisão da bibliografia acerca da temática, com o intuito de mostrar como se iniciou a busca por estes sistemas e a importância dessa propriedade, de recuperação automática, para um sistema elétrico.

Como objetivo específico, pretende-se desenvolver e implementar um algoritmo para restaurar automaticamente cargas desenergizadas por conta de

faltas na rede, sendo que aquelas cargas não estejam necessariamente em falta. Para atender esse objetivo, o sistema deve fornecer uma topologia, resultante de uma negociação entre agentes, que possa atender essas cargas fora de serviço por um caminho alternativo que se conecte à subestação.

1.2 MOTIVAÇÃO

As principais motivações para o desenvolvimento deste trabalho estão:

- No impacto que a capacidade de se ampliar as redes de distribuição autorregenerativas pode trazer para o futuro dos sistemas elétricos, buscando sempre por maiores índices de qualidade da energia elétrica, como um insumo primordial no cotidiano da população, além de proporcionar maior disponibilidade e conforto para consumidores, segurança e melhoria de trabalho para pessoal envolvido na distribuição de eletricidade;
- No interesse por sistemas inteligentes e adaptativos, que além de trazer várias vantagens, vêm sendo desenvolvidos rapidamente com pesquisas sendo realizadas e estimuladas em diversas áreas de conhecimento, mostrando sua aplicabilidade e versatilidade;
- E no aproveitamento das tendências das tecnologias computacionais, proporcionando integração entre subsistemas de áreas da engenharia elétrica, passando pela comunicação, e interação entre as camadas do sistema elétrico, desde o nível de dispositivos de campo até os dispositivos de gerenciamento de informações.

2 ESTRATÉGIAS USADAS PARA OS SISTEMAS DE RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA

O desenvolvimento e a complexidade dos sistemas elétricos foram crescendo ao longo do tempo e, ainda no fim do século XX, começou-se a observar que estavam crescendo também suas vulnerabilidades a falhas e susceptibilidade a colapsos. Grandes apagões (em inglês *blackouts*) que ocorreram nos anos anteriores, como a falta que deixou a parte ocidental dos Estados Unidos e Canadá sem energia elétrica em agosto de 1996 e outras falhas em sistemas de comunicação, de segurança e de transporte, mostraram que pequenas faltas ou instabilidades podem cascatear problemas deixando milhares de clientes fora da rede, até mesmo nos sistemas de distribuição elétrica, e que tais ocorrências são difíceis e complexas de solucionar. Alguns problemas poderiam ser evitados apenas com rejeição de cargas momentaneamente, ou otimização do sistema para eliminar congestionamentos na rede elétrica. Foi nessa conjuntura que os EUA, principalmente, visualizaram que para aumentar a confiabilidade dos sistemas, estes deveriam ter capacidade de tomar decisões prevenindo assim grandes catástrofes. Surgiu a partir de então um programa de incentivo que uniu esforços de dois grandes agentes, o Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica (EPRI) e o Departamento de Defesa dos EUA (DoD), para desenvolver projetos que busquem soluções para a problemática da vulnerabilidade e confiabilidade dos sistemas. É importante ressaltar que vários sistemas estavam mostrando fragilidade, como os de segurança, sistemas de transporte e comunicação, assim as soluções buscavam abranger cada um deles. Dentre as causas para falhas, podem ser citados desastres naturais, erros humanos ou falhas técnicas do sistema e até mesmo sabotagem. Foi aí que começaram a surgir os termos relacionados a recuperação automática dos sistemas principalmente ao nível de distribuição (AMIN, 2000, 2001; EPRI; US DEPARTMENT OF DEFENSE, 2002; LIU et al., 2000).

Os riscos de apagões ainda são existentes nos sistemas, mas diversas técnicas têm sido desenvolvidas na última década e muitas pesquisas têm sido

empregadas para tentar tornar o sistema de energia elétrica mais resiliente. A seguir serão apresentados alguns conceitos e aplicação presentes na literatura.

2.1 RESTAURAÇÃO EM MODO PREVENTIVO E MODO CORRETIVO

Uma divisão básica feita em (LIU et al., 2000) que pode ser aplicada para a recuperação de uma rede é definida pelo modo de operação que o sistema se encontra, estando em falta propriamente ou fora do ponto ótimo de operação após a ação de um sistema de recuperação. No modo preventivo, uma análise determina situações que tenham alto risco de tornar o sistema altamente vulnerável sob certas condições de operação. Assim a estratégia prepara a solução adequada para localizar e solucionar o problema caso este venha a ocorrer. Quanto ao modo corretivo, ou restaurativo, trata-se de uma solução que pode ser aplicada para restaurar o sistema de forma a otimizar a operação e geralmente ocorre como resultado de uma ação do modo preventivo do sistema. Em (BUTLER-PURRY; SARMA, 2004) é mostrada uma estrutura desenvolvida para determinar as ações a serem aplicadas pelo modo corretivo/restaurativo em um sistema de potência naval. O método tem um subsistema *FAST* (do inglês, *Automatic Failure Assessment System*), que avalia automaticamente falhas no sistema, verificando anormalidade ou rejeição de cargas, e o subsistema *RestOpt* (do inglês *Optimization-based Restoration system*), que é responsável pelos comandos que levarão o sistema ao ponto ótimo de operação o qual o sistema se encontrava antes da falha. O processo de avaliação do estado pelo subsistema FAST é realizado por funções de detecção e localização de faltas utilizando dados históricos de corrente, com auxílio do Sistema de Informação Geográfica (GIS, do inglês *Geographic Information System*), e o método de reconfiguração resolve problemas de otimização linear para encontrar a solução de restauração de acordo com as restrições e condições de otimização.

Além de sistemas navais, foram também abordados na literatura problemas e soluções para os sistemas de controle e energia de aeronaves, conforme exemplo citado em (AMIN; WOLLENBERG, 2005), o qual inspirou projetos que

envolvem sistemas de potência, pela iniciativa entre DoD e EPRI. As soluções dos sistemas de aeronaves também abrangem reconfiguração e tomada de ações previstas para evitar o colapso dos sistemas como um todo. Ainda em (AMIN; WOLLENBERG, 2005), os autores propõem que para tornar-se um sistema de potência inteligente, é necessário ter processamento independente em cada componente de cada subestação e usina de geração, e sensores, para que possam comunicar-se e cooperar com outros elementos, formando uma grande rede de processamento e comunicação, além de possibilitar ações rápidas e eficazes na solução de faltas (JUNG et al., 2002).

2.2 ESTRATÉGIAS POR REJEIÇÃO DE CARGAS

Em (YOU; VITTAL; YANG, 2002) é abordada uma estratégia de rejeição de cargas para sistemas cuja estabilidade esteja comprometida por grandes distúrbios e se baseia na taxa de declínio de frequência. O sistema é dividido em ilhas de capacidade levemente reduzida, de forma a minimizar o desequilíbrio de carga e geração, para que seja facilitada a recuperação do sistema. Em resumo, trata-se de um ilhamento controlado com rejeição de cargas baseado na taxa de declínio de frequência.

Seguindo a mesma abordagem, os autores em (SEETHALEKSHMI; SINGH; SRIVASTAVA, 2011) apresentam um esquema para executar rejeição de cargas em sistemas cuja operação esteja em ponto crítico, baseado na estabilidade de tensão e frequência (BALDICK et al., 2008; JUNG et al., 2002).

2.3 ESTRUTURAS E MÉTODOS DE CONTROLE PARA DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS DE RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA

Alguns autores fazem apenas uma abordagem mais abstrata sobre os sistemas de restauração automática e projetam sistemas de controle e

estruturas que darão suporte à rede no esquema de recuperação do sistema elétrico, enquanto outros desenvolveram sistemas completos.

Em (MOSLEHI et al., 2005; MOSLEHI; KUMAR, 2004) é definido um conceito de controle para os sistemas *self-healing* baseado em estruturas autônomas distribuídas. São propostas arquiteturas modulares e expansíveis que poderiam ser aplicadas a pequenos sistemas, por exemplo, para modelos testes, e até em redes de dimensões continentais. A estrutura abrange controles em malha fechada e suas decisões em tempo real. Neste trabalho também são incluídos requisitos computacionais e de comunicação da estrutura. Em (MOSLEHI; KUMAR; HIRSCH, 2006) é desenvolvido estudo de viabilidade e mostrado os benefícios da estrutura, envolvendo aspectos econômicos e de mercado. De forma semelhante é feito em (BOU GHOSN et al., 2010), com o design de arquitetura multiagente para simular redes inteligentes com reconfiguração automática a fim de identificar problemas e buscar soluções.

O conceito de um Sistema de Potência Autônomo Distribuído Inteligente (IDAPS, do inglês *Intelligent Distributed Autonomous Power System*) é apresentado em (RAHMAN; PIPATTANASOMPORN; TEKLU, 2007), onde uma microrrede especializada tem a função de controlar as fontes do sistema presentes no lado do consumidor. Agentes, ou sistemas computacionais autônomos, são os elementos inteligentes distribuídos na rede capazes de se comunicar e trocar informações com outros elementos. Um dos principais objetivos é a utilização de geradores distribuídos para suprir cargas que tenham sido afetadas por falhas no sistema, sendo esses geradores o principal artifício na recuperação da rede.

Os autores em (SHENG et al., 2006) utilizaram modelos baseados em agentes para desenvolver um sistema de proteção autorregenerativo. Nessa estratégia os relés são dispositivos inteligentes distribuídos e aplicam teoria dos grafos integrados com o sistema supervisor de controle e aquisição de dados, utilizando os conceitos de zonas de proteção primária e de retaguarda na rede. Os modos preditivo e corretivo de recuperação são também aplicados neste caso.

Os sistemas multiagentes são usados em (ZIDAN; EL-SAADANY; EL CHAAR, 2011) para realizar recuperação do sistema em duas etapas, sendo a primeira para restauração de um maior número possível de cargas com prioridades, e a segunda etapa a ser executada quando em faltas prolongadas para maximizar a quantidade de cargas atendidas e otimizar a operação do sistema minimizando perdas e sobrecargas nas linhas. Já em (SOUZA et al., 2017; ZIDAN; EL-SAADANY, 2012) o sistema multiagente é projetado para localizar e isolar faltas, e em seguida enviar as operação para restauração das cargas afetadas. Com foco em microrredes, os sistemas multiagentes e seu controle descentralizado são discutidos em (COLSON; NEHRIR; GUNDERSON, 2011), e em (YOKOYAMA; NAGATA, 2012) dois grupos de agentes são definidos por: agentes de carga, os quais estariam nos consumidores, e os agentes de subestação. A configuração da solução é obtida com informações locais entre agentes adjacentes.

Em (LIU et al., 2012) também foi proposta uma estrutura de controle com sistemas multiagentes. Nesta referência são definidos quatro subcontroles, que são: controle emergencial, restaurativo, corretivo e preventivo, e respondem a cinco estados de operação diferentes, que são o estado emergencial, restaurativo, alerta, normal inseguro e normal seguro. O sistema tem três camadas de grupos de agentes, e toda a estrutura e comunicação são propostas pelos autores.

Em (KOŠT'ÁLOVÁ; CARVALHO, 2011) os autores propõem solucionar o problema de tempo de execução nos métodos que envolvem algoritmos de otimização, utilizando teoria dos grafos bipartidos representando as manobras das soluções, focando na restauração automática do sistema.

Em (AREFIFAR et al., 2013) os autores consideram as características de geradores distribuídos e a variação hora a hora das cargas. É proposto um modelo operacional para realizar ações de controle *self-healing* em duas etapas. Na primeira, o estágio de planejamento do sistema, a rede de distribuição, com inserção de Geração Distribuída (GD), é virtualmente dividida em microrredes levando em conta alocação de fontes intermitentes e variação das cargas, como ilhas autossuficientes. No segundo estágio, o operacional, as

ações de controle são planejadas de forma que comandos de emergência e restauração ou reconfiguração possam ser executados simultaneamente. Dentre as ações estão isolamento, rejeição de cargas, controle de potência de geradores distribuídos. A mesma ideia de divisão do sistema é seguida em (WANG; WANG, 2015), mas são considerados dois modos de operação do sistema, em estado normal e em estado de restauração. Para o primeiro estado, o objetivo é minimizar custo pelo despacho ótimo da GDs, enquanto para o segundo, o objetivo da estrutura é entrar em reconfiguração quando há faltas e distúrbios no sistema. No segundo estado, o processo de restauração é feito por isolamento do sistema e reestabelecendo o máximo de cargas através de GDs da região em operação normal. Múltiplas microrredes são consideradas em (WANG et al., 2016) de forma que geradores pertencentes a uma microrrede podem auxiliar cargas em outra, pois fisicamente todas as fontes distribuídas são conectadas através de um barramento comum. Assim, os autores sugerem uma arquitetura para operação ótima e autorregenerativa de microrredes autônomas interconectadas.

Em (RIVERA; FARID; YUCEF-TOUMI, 2014) é proposta uma plataforma multiagente para o estudo do modo autorregenerativo de sistemas com múltiplas microrredes, simulando no domínio do tempo a estabilidade transitória da rede.

Um algoritmo de reconfiguração de rede de transmissão baseada em redes complexas é proposto em (LIN; WEN; XUE, 2016), e diversos fatores técnicos são considerados como a capacidade de geradores, quantidade e importância de cargas, bem como distribuição e importância de cada linha do sistema. Em (ELMITWALLY et al., 2015) é aplicado sistema baseado em lógica fuzzy para dar suporte às decisões dos sistemas de controle multiagentes. Em (ZHU et al., 2016a, 2016b) é associada tecnologia Big Data aos sistemas multiagentes para alcançar identificação, localização isolamento de faltas e recuperação do sistema.

2.4 COMPARATIVO ENTRE AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS MÉTODOS REVISADOS

Nesta seção serão comentados mais detalhes de alguns artigos relevantes relacionados, considerando algumas das principais características requeridas para se implementar a reconfiguração automática no sistema.

2.4.1 Funções objetivo e restrições

Em geral a maximização da carga restaurada é função objetivo nas metodologias estudadas, embora não seja o resultado apresentado pela maioria dos autores, uma vez que há outras funções objetivos e restrições importantes que devem ser consideradas e são analisadas para verificar a eficiência da metodologia.

Em (ZIDAN; EL-SAADANY; EL CHAAR, 2011) por exemplo, tem como funções objetivo a maximização de cargas e minimização de operações, que são duas condições mutuamente restritivas, assim o maior número de cargas absoluto não será provavelmente atingido, sem considerar ainda as restrições. Em (SOUZA et al., 2017; ZIDAN; EL-SAADANY, 2012) já é acrescentada, como objetivo, a minimização de perdas durante a recomposição. A inclusão desse objetivo implica em uma solução melhor do sistema fazendo com que o procedimento seja completado de forma eficiente. Entretanto, pode acarretar em maior restrição no número de opções de soluções. Portanto, deve ser bem implementada para que este objetivo não limite a estratégia. Em ambos os artigos são consideradas as limitações da rede de tensão e corrente que não podem ser extrapolados. Outra restrição seria a manutenção da estrutura radial do sistema, mantendo assim a facilidade para localização de faltas e coordenação dos dispositivos de proteção do sistema. Em (YOKOYAMA; NAGATA, 2012) as restrições estão relacionadas à capacidade de transferência, disponibilidade e balanço de potência;

Assim, as principais funções e restrições apresentadas nas estratégias estão relacionadas abaixo.

Funções Objetivo:

- Maximizar cargas restauradas;
- Minimizar número de chaveamentos;
- Minimizar as perdas durante a restauração;

Funções de Restrição:

- Manter sistema radial;
- Limites de tensão;
- Limites de corrente ou limite de potência por ramo;
- Potência disponível por GD, quando disponível;
- Balanço de potência entre carga e fonte;

2.4.2 Agentes

Dentre os trabalhos mencionados na seção anterior percebe-se que tem se tornado ampla a aplicação de plataformas com múltiplos agentes. São definidos quatro tipos de agentes em (ZIDAN; EL-SAADANY; EL CHAAR, 2011) os quais representam barramentos, geradores distribuídos, zonas definidas no sistema e um agente geral. Cada agente tem uma função específica para se relacionar com os outros e tem uma ordem hierárquica para comunicação. As mensagens de negociação são definidas pelo protocolo de interação CNP (*Contract Net Interaction Protocol*). As funções dos agentes são denominadas de comportamentos (em inglês, *Behaviour*), que são métodos, definidos dentro de uma classe, que definem as ações de um agente.

Figura 2.1 – Estrutura de relação entre os agentes de Zidan, El-Saadany and El Chaar (2011)

Fonte: Próprio autor.

Zidan e El-Saadany (2012) usaram outra abordagem definindo os agentes em duas camadas, tendo assim agentes de zona (ZAG) e os agentes dos alimentadores (FAG). Suas tarefas são divididas em monitorar e enviar comandos para o ZAG e fazer a negociação na recomposição, além de localizar e isolar faltas. Em (SOUZA et al., 2017) essas mesmas definições de agentes são empregadas, além de agentes que representam geração distribuída e os dispositivos de proteção.

Figura 2.2 – Estrutura de relação entre os agentes de Zidan and El-Saadany (2012)

Fonte: Próprio autor.

Figura 2.3 – Estrutura de relação entre os agentes de Souza *et al.* (2017)

Fonte: Próprio autor.

O trabalho apresentado em (ELMITWALLY *et al.*, 2015) tem uma estrutura semelhante, com agentes hierarquicamente representando carga (LA), alimentador (FA) e um agente regulador (RA) em cada subestação monitorando tensão e fluxo de potência.

Figura 2.4 – Estrutura de relação entre os agentes de Elmitwally *et al.* (2015)

Fonte: Próprio autor.

Uma outra estrutura de agentes é usada em (YOKOYAMA; NAGATA, 2012) com apenas dois tipos que representam a carga (LAG) e a subestação de distribuição (DSAG).

Figura 2.5 – Estrutura de relação entre os agentes de Yokoyama and Nagata (2012)

Fonte: Próprio autor.

Nesta seção foram expostas diferentes estruturas de agentes abordadas nos trabalhos, mostrando que cada um destes pode desenvolver sua estratégia baseado em diferentes elementos do sistema de distribuição. É importante observar também que cada uma irá desempenhar tarefas de forma diferente e com funções diferentes.

2.4.3 Geração distribuída

Como as redes inteligentes estão evoluindo para possibilitar maior inserção de geradores distribuídos, é importante que as estratégias de recuperação automática levem em conta a influência deles na dinâmica do processo. No caso de (ZIDAN; EL-SAADANY; EL CHAAR, 2011) a geração distribuída é considerada apenas como suporte à capacidade de potência para suprir a restauração das cargas em falta, possibilitando a redução da quantidade de chaveamentos e da necessidade de rejeição de cargas, enquanto em (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012) são levadas em conta a intermitência e curvas de potências das principais fontes de geração distribuída, e limitações tanto da fonte, quanto da operação do sistema com a inserção desses geradores. Os efeitos e influências da geração distribuída são estudados de forma relevante no método mostrado em (ELMITWALLY et al., 2015).

A presença de geradores distribuídos no sistema foi aplicada para restauração de cargas em uma determinada zona por meio de ilhamento

intencional pelos autores em (SOUZA et al., 2017) como contribuição para a metodologia de (ZIDAN; EL-SAADANY, 2012), tendo resultado superior com relação à quantidade de cargas restauradas.

3 SISTEMAS BASEADOS EM AGENTES

As engenharias têm buscado cada vez mais nas ciências soluções que tragam comportamentos humanos e sociais para tornar os sistemas inteligentes e autônomos. A principal característica compartilhada entre essas áreas de estudo é a capacidade de perceber, através de sensores, e tomar decisões de comandos para um determinado estímulo através de atuadores, sendo essa uma das definições dada a um agente (RUSSELL; NORVING, 1991). Para as aplicações em engenharia, e para este trabalho, é importante mencionar o conceito de agente faz referência a um software agente, sendo este um sistema computacional situado em um ambiente, capaz de realizar ações autônomas para alcançar seus objetivos de projeto (WOOLDRIDGE, 2002, p.23 apud PADGHAM; WINIKOFF, 2004, p. 1).

3.1 AGENTES INTELIGENTES

Dar autonomia aos agentes, de forma que eles tenham independência e capacidade de fazer suas próprias decisões, tornam o sistema mais descentralizado, sendo essa uma característica interessante para grande parte das aplicações de sistemas multiagentes.

Em geral, os ambientes em que os agentes inteligentes estão situados, são altamente dinâmicos e imprevisíveis. Isso exige que a capacidade de reação a mudanças ou distúrbios destes seja alta e rápida, sendo essa reatividade uma vantajosa característica dos agentes. Paralelamente, eles também devem ser proativos, buscando sempre atingir seus objetivos e realizar suas tarefas da melhor maneira possível.

Assim como em qualquer sistema situado em ambientes dinâmicos, os agentes devem ter flexibilidade, em outras palavras, devem ter alternativas para alcançarem seus objetivos em casos de falha do primeiro plano, dando robustez e confiabilidade a todo o sistema. Um agente também pode ser chamado de racional quando este busca pela melhor solução para um

determinado problema, levando em consideração diversos fatores na decisão de como e quando realizar suas ações (WOOLDRIDGE, 2009).

Para que a descentralização das soluções inteligentes seja completa, faz-se necessário que os agentes se comuniquem e, principalmente, interajam. Essa característica pode ser chamada de sociabilidade do agente, e é ela quem vai definir um sistema multiagente (PADGHAM; WINIKOFF, 2004; RUSSELL; NORVING, 1991).

Com esse conjunto principal de características, o agente pode ser dito como inteligente, sendo ele o elemento atuante dentro dos sistemas inteligentes, implementado por comportamentos definidos para eles de acordo com cada aplicação dentro da engenharia.

Ademais, o agente é constituído, de uma forma geral, por elementos, definidos fisicamente ou computacionalmente, que dão suporte à realização de seus processos. Para entrada e saída de dados, por exemplo, utiliza-se de sensores e atuadores, os quais desempenham principalmente os papéis de interação com o ambiente e com os demais agentes dentro do mesmo ambiente, e até mesmo com pessoas e operadores. Esses dois elementos são também importantes para situar o agente (“alocar” o agente dentro do ambiente), virtualmente ou não (PADGHAM; WINIKOFF, 2004).

Figura 3.1 – Representação geral de um agente

Fonte: Wooldridge (2009).

3.2 SISTEMAS MULTIAGENTES

Levando em conta a ideia de autonomia, consequentemente a descentralização, e da sociabilidade, pode-se inferir que o propósito dos sistemas inteligentes desenvolvidos tem mais sentido quando vários agentes são implementados, tendo eles comportamentos e objetivos iguais ou diferentes, porém independentes. Por outro lado, é observado por Hübner, Bordini e Vieira (2004) que o quesito de inteligência é adquirido pelo sistema multiagente devido ao comportamento social de cada indivíduo dentro do sistema, e que é importante manter um equilíbrio entre a autonomia do elemento e a interação dentre eles. Dessa forma, é mais fácil chegar ao objetivo geral de todo o sistema (“sociedade”), aplicando múltiplos agentes, podendo ser levado em conta níveis ou zonas de atuação e diferentes papéis entre eles, até mesmo hierarquia. Isso agrega às soluções de problemas atuais o sentido de colaboração e trabalho em grupo dentre os agentes do sistema a fim de chegar às melhores respostas.

As características apresentadas no tópico anterior para os agentes são fundamentais para a criação do conceito dos sistemas multiagentes tirando proveito de cada uma delas dentro de sistemas grandes e complexos. Ainda, existem outras definições de agentes na literatura, mas as propriedades descritas aqui são aquelas geralmente usadas nas mais diversas aplicações deles, e se adequam de forma satisfatória para o propósito desse trabalho de desenvolver sistemas de recuperação automática, levando em conta a dimensão, complexidade, dinâmica e escalabilidade do ambiente dos sistemas elétricos de distribuição.

3.3 COMUNICAÇÃO E O PADRÃO FIPA-ACL

Pelas razões já mostradas, para o propósito das aplicações com multiagentes é necessário que eles comuniquem entre si e com o sistema. Criou-se então um tipo de linguagem especial chamada Linguagem de

Comunicação de Agentes, do inglês *Agent Communication Language* (ACL), a qual proporciona divisão entre as ações de comunicação e as mensagens (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007). De forma prática, uma ACL define e transporta as mensagens de um agente pela rede usando um protocolo de nível mais baixo, tal como TCP/IP, IIOP, HTTP, etc. A primeira implementação de uma linguagem de agente foi a Linguagem de Consulta e Manipulação de Conhecimento, do inglês *Knowledge Query and Manipulation Language* (KQML), e foi esta quem determinou os conceitos básicos para outras linguagens que vieram. A KQML é organizada em três camadas: a do conteúdo, que é a mensagem em si e pode conter qualquer representação de linguagem, por exemplo, cadeias de caracteres em ASCII; a da comunicação, que codifica informações dos parâmetros de comunicação do nível mais a baixo, como por exemplo, identidade de remetente e destinatário do conteúdo; e a da mensagem, que determina o tipo de interação que se quer iniciar com outro agente e tem como função fornecer o ato de fala ou performativa. Em outras palavras, representa o tipo de comunicação que será interpretada pelo receptor, sendo que o conteúdo da mensagem não é importante para a transmissão dela do ponto de vista da KQML (LABROU; FININ; YUN PENG, 1999). Ato de fala (do inglês *speech act theory*) é uma teoria que trata a comunicação como objetos de ação, e são definidas da mesma forma que ações físicas pelos modelos de sistemas. Em linguagem orientada a objetos, essas mensagens, ou atos de fala, são objetos com classe e parâmetros que determinarão seu conteúdo (WOOLDRIDGE, 2009).

A chamada Fundação para Agentes Físicos Inteligentes, do inglês *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA) foi fundada em 1996 com o propósito de desenvolver padrões para as tecnologias de sistemas baseados em agentes, e determina especificações para que seja garantida a interoperabilidade entre os agentes desenvolvidos por diferentes instituições. É mantida por colaboração de membros internacionais de várias organizações, tendo a responsabilidade de manter essas especificações sempre atualizadas (FIPA, [s.d.]). Suas contribuições estão relacionadas a arquitetura, gerenciamento e comunicação dos agentes. Quanto a comunicação, ela foi responsável pelo desenvolvimento de uma linguagem de agentes, com mesmo

nome, FIPA ACL, que tem características similares à KQML, já mencionadas no parágrafo acima (WOOLDRIDGE, 2009). A principal diferença entre elas é a lista de mensagens performativas, tendo nomes diferentes, além de usar o termo atos de comunicação em vez de performativas. (LABROU; FININ; YUN PENG, 1999). Na Tabela 3.1 são mostrados alguns exemplos de tipos de mensagens padronizados pela FIPA.

Tabela 3.1 – Exemplos de tipos de Atos de comunicação FIPA

Ato de comunicação (CA) - Performativa
<i>ACCECT-PROPOSAL</i>
<i>AGREE</i>
<i>CANCEL</i>
<i>CFP</i>
<i>FAILURE</i>
<i>INFORM</i>
<i>NOT-UNDERSTOOD</i>
<i>PROPOSE</i>
<i>REFUSE</i>
<i>REJECT-PROPOSAL</i>
<i>REQUEST</i>
Fonte: (FIPA, [s.d.])

Outro grupo de especificações da FIPA diz respeito ao gerenciamento de agentes. Seu modelo de gerenciamento estabelece diretrizes para criação, registro, alocação e operação dos agentes. O termo Plataforma de Agentes, do inglês *Agent Platform* (AP), é a referência para a infraestrutura física onde os agentes existem, e é formada pela máquina e o sistema operacional, os componentes da estrutura e outros complementos. Os componentes da estrutura desenvolvida para multiagentes de acordo com suas especificações devem ser pelo menos os seguintes (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007):

- Agente: é o programa computacional propriamente, referenciado por uma Identidade de Agente (AID), que publica seus serviços e descrição no DF e no AMS;
- Facilitador de Diretório (DF): É quem mantém uma lista de informações atualizadas sobre os agentes, e os serviços disponibilizados por eles nas chamadas “páginas amarelas”. Em geral esse serviço é opcional, mas algumas plataformas o trazem já implementados;
- Sistemas de Gerenciamento de Agentes (AMS): É responsável pelo gerenciamento da plataforma, dos agentes na plataforma, como criação e exclusão dos agentes, e é único dentro de todas as plataformas dentro do mesmo sistema e é mandatória a existência dele na arquitetura. É no AMS que é registrada e determinada a AID;
- Serviço de Transporte de Mensagens (MTS): É um serviço fornecido pela AP para realizar o transporte de mensagens FIPA ACL entre agentes de qualquer plataforma do sistema, com parâmetros cujas informações identificam, por exemplo, destinatário, tipo da mensagem e etc.;

3.4 PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A AGENTES

O Modelo desenvolvido baseado em características humanas como crenças, desejo e intenção, ou modelo BDI, do inglês *Belief-Desire-Intention model*, é uma ideia constantemente presente no paradigma de Programação Orientada a Agentes, do inglês *Agent-Oriented Programming* (AOP), e nos leva a pensar em um programa computacional como se eles possuísem uma “condição mental” com aquelas mesmas características. Por “crenças”, pode-se entender como as informações que o agente tem a respeito do ambiente em que ele habita. Por “desejos”, pode-se entender como um estado ou objetivo que o agente deve querer atingir, mas não necessariamente vai agir para tal, são opções adicionais que o agente possui. Quanto a “intenções”, são os

estados que os agentes decidiram atingir por alguma razão, ou a que eles são destinados a cumprir. Pode ser também, por exemplo, uma opção dentre algumas que ele escolheu realizar, de acordo com seus métodos definidos. A Figura 3.2 mostra as principais funções que trabalham com essas características.

Figura 3.2 – Funções do modelo BDI

Fonte: Adaptado de Wooldridge (2009).

Algumas vantagens para serem usadas linguagens AOP são: a facilidade de entendimento da programação em si, que se assemelha à linguística a qual estamos acostumados no nosso dia a dia, sem a necessidade de treinamento técnico para entender o comportamento de sistemas complexos; e o aspecto de programação pós-declarativa da AOP, que traz a ideia de declarar objetivos, e assim os métodos embutidos se encarregam de achar o meio de alcançar esses objetivos (BORDINI; HUBNER; WOOLDRIDGE, 2007).

Existem algumas linguagens de programação orientada a objetos que fornecem bibliotecas e estruturas, as quais são também referenciadas como plataformas e devem ser considerados seus aspectos para a escolha de qual delas usar para o desenvolvimento de um sistema multiagente. Essas linguagens são divididas em três classes em geral, e a linguagem, ou plataforma, que será usada nesse trabalho é a *Java Agent DEvelopment*

framework (JADE), que está em uma das classe que foca na comunicação entre agentes, dando bastante suporte a soluções distribuídas. As outras duas classes são direcionadas para agentes internos e planos de suporte, e agentes móveis (PADGHAM; WINIKOFF, 2004).

4 METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia desenvolvida nessa dissertação foi baseada em alguns artigos estudados abordando os sistemas multiagentes para recuperação de cargas no sistema elétrico de distribuição, e dentre eles, foi estudada a metodologia aplicada nas referências (SOUZA et al., 2017; ZIDAN; EL-SAADANY, 2012; ZIDAN; EL-SAADANY; EL CHAAR, 2011). Nos artigos os autores focaram em desenvolver um sistema multiagente para recuperação automática em sistemas de distribuição, utilizando conceitos e tecnologias de redes inteligentes, bem como de sistemas multiagentes.

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO USADO NO ESTUDO

As redes exemplos usadas nesse trabalho foram modeladas e simuladas no software OpenDSS, um programa livre para modelagem, simulação e cálculo de fluxo de potência, desenvolvido para sistemas elétricos de distribuição, com recursos para estudos envolvendo fontes de energia distribuída (“www.epri.com”, [s.d.]). O programa foi útil para o desenvolvimento desse trabalho, pois ele tem interface COM (em inglês, *Component Object Model*) com outras linguagens de programação como C++, Python, VBA e Java, que é a linguagem da plataforma JADE de desenvolvimento de sistemas baseados em agentes.

Para o desenvolvimento do método foi utilizado como base uma rede, como na Figura 4.1, com seis zonas, representadas pelas barras (ZN01 a ZN06), linhas de transmissão representadas pelas impedâncias (LINE1 a LINE6). Elas estão divididas em três alimentadores a partir de uma subestação, representada pela barra SUBBUS. Lembrando que o conceito de zona aqui é um grupo de cargas e consumidores conectados ao sistema de distribuição delimitadas por chaves religadoras.

Figura 4.1 – Representação da rede 1

Fonte: Próprio autor.

A rede mostrada na Figura 4.1, foi modelada no software OpenDSS com os parâmetros dispostos nas tabelas 4.1 e 4.2. As linhas foram modeladas com duas capacidades de carga diferentes, que estão descritos abaixo como modelo 1 e 2. As linhas que interligam a subestação e a primeira zona do alimentador é do modelo 1, enquanto as linhas entre a primeira e a segunda zona do alimentador são do modelo 2. Todas as linhas de interligação são do modelo 1. O carregamento das zonas foi distribuído de forma a induzir as ações requeridas para testar o algoritmo, ou seja, foram forçadas a ter a capacidade superada caso conecte-se a alguma outra zona. Além da rede 1, foi testado uma segunda rede com um maior número de zonas e com diferentes distribuições de cargas.

Tabela 4.1 – Ampacidade das linhas na rede 1

Modelo da linha	Ampacidade	Linhas
Modelo 1	250 A	LINE1, LINE3 e LINE5
Modelo 2	160 A	LINE2, LINE4 e LINE6

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.2 – Distribuição de cargas na rede 1

Zona	Potência [kW]
ZN01	1000,0
ZN02	2000,0
ZN03	1000,0
ZN04	2000,0
ZN05	1000,0
ZN06	1000,0

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.2 - Representação da rede 2

Fonte: Próprio autor.

Para a rede 2 os parâmetros são apresentados na Tabela 4.3 e Tabela 4.4. Assim como na rede 1, foram consideradas capacidades de corrente diferentes para os dois modelos.

Tabela 4.3 - Ampacidade das linhas na rede 2

Modelo da linha	Ampacidade	Linhas
Modelo 1	200 A	LINE1, LINE3 e LINE6
Modelo 2	160 A	LINE2, LINE4, LINE5, LINE7, LINE8 e LINE9

Fonte: Próprio autor.

Na distribuição das cargas foram considerados dois casos. Para o caso 1, todas as barras foram distribuídas com carga de 1000,0 kW e para o caso 2, foram atribuídos diferentes valores para cada carga, conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Distribuição de cargas na rede 2

Zona	Potência [kW]	Potência [kW]
	Distribuição 1	Distribuição 2
ZN01	1000,0	2000.0
ZN02	1000,0	1500.0
ZN03	1000,0	1000.0
ZN04	1000,0	1000.0
ZN05	1000,0	500.0
ZN06	1000,0	2000.0
ZN07	1000,0	1000.0
ZN08	1000,0	500.0
ZN09	1000,0	200.0

Fonte: Próprio autor.

4.2 PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DO SISTEMA

O objetivo primário da proposta é encontrar um caminho alternativo para uma determinada zona do sistema, cujo fornecimento de energia foi cortado por conta de uma falta a montante.

Uma metodologia de *self-healing* decorre de um processo de tentativa bem-sucedida de restauração do sistema em resposta a uma falha, que pode ser resolvido por variadas técnicas, conforme literatura já apresentada. Neste tópico do trabalho serão detalhadas as etapas do processo responsável pela recuperação e restabelecimento das cargas desconectadas num trecho não afetado pela falta.

Um ponto importante que deve ser estudado para implementação de um sistema como esse é o meio de comunicação e transmissão de dados, uma vez que o sistema depende da troca de mensagens entre os elementos atuantes na técnica. Assim, é de extrema importância ter conhecimento da confiabilidade e rapidez no envio dessas informações.

4.2.1 Passos a serem aplicados pelo método

O primeiro passo no processo é identificar o ponto onde a falta ocorreu e verificar se o trecho ou zona foi devidamente isolado. Esse procedimento, no sistema real, é realizado pelos meios de comunicação de dispositivos de proteção e chaves, podendo ser auxiliado pelo sistema supervisor, que possibilitam o envio de informação sobre seu status.

O segundo passo consiste em, a partir do conhecimento da zona que foi afetada, identificar as zonas que ficaram fora de serviço, e em geral são as zonas que se localizam a jusante do trecho isolado. Essa informação sobre a topologia normal da rede deve estar contida previamente nos dados conhecidos pelos agentes, mas podem ser verificadas através dos status dos dispositivos a fim de fazer uma verificação do isolamento. Aqui devem ser também identificadas as linhas de interligação (*TIE switches*) vicinais às zonas identificadas no passo anterior.

A partir desse ponto do procedimento, será realizada uma sequência de troca de mensagens simultaneamente entre o agente que está fora de serviço e cada um de seus vizinhos que tenham possibilidade de se conectar.

A Figura 4.3, apresenta um resumo geral do processo. Nos tópicos que seguem serão mostrados mais detalhes do algoritmo.

Figura 4.3 – Resumo geral do método

Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Algoritmo de busca e restauração das zonas fora de serviço

No algoritmo de busca e restauração das zonas fora de serviço, foi desenvolvida uma lógica com o objetivo de encontrar o estado das chaves de interligação respeitando-se as restrições da rede. Para este trabalho, as restrições consideradas foram a capacidade de corrente das linhas entre as zonas e o nível de tensão em p.u.

Para realização da restauração foram definidos dois agentes. Um agente que representa a subestação e um que representa a zona. Aqui foram determinados os elementos agentes para então ser desenvolvido o algoritmo. Mas outras técnicas pode interpretar os agentes de formas diferentes. Elementos como chaves ou cargas inteligentes podem assumir o papel de agente, e assim um outro algoritmo pode ser desenvolvido.

- Agente Subestação (AgSubstation): Este agente tem apenas um comportamento principal e cíclico, que realiza apenas três ações. Iniciar o OpenDSS para carregar a rede a ser simulada e observar se a rede está em falta. Ao detectar que a rede está em falta e, por consequência, qual (ou

quais) zona está desenergizada, esse agente também é responsável por enviar um sinal, em formato de *ACLmessage*, para esta zona, de forma que ela inicie o processo de solicitação. Para sistemas mais complexos com várias subestações, nos quais cargas de uma determinada subestação podem ser realocadas para outra, esse agente terá maiores funções. No entanto, aqui foi priorizado o agente zona para manter um certo nível de distribuição e autonomia do sistema.

- Agente Zona (AgZone): Este é o agente principal da estratégia, e é ele quem executa e realiza o processo para a recuperação automática.

Os comportamentos dos agentes zonas são dois: zona fora de serviço (*OutOfService*) e zona candidata (*Candidate*). Esses, como os nomes indicam, representam as zonas que, recebendo a mensagem de falta, realizarão o procedimento de pedido de conexão para restauração, ou as zonas que poderão se conectar às anteriores para fornecer energia a elas.

Alguns parâmetros da topologia da rede foram fornecidos ao sistema por meio de um agente executado pelo script principal do Java para que os agentes de cada tipo, dentre aqueles definidos anteriormente, fossem criados automaticamente. Esse agente foi chamado de *SettingGrid* e tem o único objetivo de configurar a plataforma Jade e não tem função no algoritmo de restauração propriamente.

Em geral, o processo de restauração das zonas fora de serviço ocorre da seguinte forma:

1. Os agentes são criados, um para cada zona e para a subestação.
2. Os agentes de zonas ficam em estado de espera até serem reativados pelo recebimento de uma mensagem
3. O agente da subestação fica verificando a variável de estado da restauração.
4. Uma vez que um agente recebe um sinal de falta, que na simulação é feito também por envio de mensagem, este agente sinaliza ao sistema que está em falta.
5. A subestação envia mensagens para os agentes fora de serviço

6. Os agentes fora de serviço iniciam a troca de mensagens com os agentes vizinhos até serem atendidos por algum deles ou serem rejeitados.

O resultado da técnica para a solução do problema deve ser o estado de cada linha entre as zonas, inclusive das linhas de interligação (TIE).

A Figura 4.4 mostra o diagrama para os agentes de zona e subestação e a Figura 4.5 representa como eles se interagem.

Figura 4.4 – Lógica dos agentes de zona e de subestação

a)

b)

Fonte: Próprio autor.

Figura 4.5 – Estrutura de relação entre os agentes

Fonte: Próprio autor.

A seguir serão explicados como funcionam os comportamentos (*Behaviours*) de cada agente para determinação dos estados das chaves da rede.

4.2.2.1 Comportamento de zona fora de serviço (*OutOfService*)

O comportamento *OutOfService* é criado quando um agente Zona recebe uma mensagem *ACL* do tipo *FAILURE*. Neste comportamento, o primeiro passo realizado é o envio de solicitação para as zonas já identificadas como vizinhas por uma mensagem *ACL* do tipo *CFP*, e então ele se mantém em espera. O passo seguinte é a leitura de uma mensagem, assim que a recebe, e identificá-la como aceite (*AGREE*) ou recusa (*REFUSE*). Em caso de aceite do pedido, o agente finaliza o procedimento. Em caso de recusa, o agente realizará mais duas tentativas de envio de mensagens *CFP*, antes de indicar que não é possível realizar conexão para restauração da zona. É importante observar que o agente é quem inicia o processo, uma vez que ele recebe indicação que está fora de serviço e busca sempre estar conectado à rede para fornecer energia a seus consumidores e na Figura 4.6a a lógica do comportamento *OutOfService*.

4.2.2.2 Comportamento de zona candidata (*Candidate*)

O comportamento *Candidate* é criado quando um agente de zona recebe uma mensagem do tipo *CFP*. Quando executando esse comportamento, o agente de zona realiza uma série de funções da classe do OpenDSS que altera uma variável com os estados das chaves TIE, realiza o cálculo do fluxo de potência e verifica se é possível realizar aquela conexão entre esta zona e a zona que solicitou essa operação. O diagrama para este comportamento está apresentado na Figura 4.6b.

Figura 4.6 – Diagramas dos comportamentos a) *OutOfService* e b) *Candidate* dos agentes de zonas

Fonte: Próprio autor.

5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Conforme exposto no capítulo anterior, o sistema de restauração automática foi desenvolvido na plataforma de agentes JADE, realizando cálculos de fluxo de potência no OpenDSS. A programação dos agentes foi feita conforme descrito no item 4.2.2. A seguir estão apresentados os resultados produzidos pelas simulações.

Ao executar o programa, três agentes nativos dele são instanciados para permitir que os resultados fossem mais bem analisados e verificados. São os agentes “*rma*”, “*Introspector*” e “*Sniffer*”. O RMA (do inglês, *Remote Management Agent*) é criado quando executada a plataforma para que o usuário possa realizar ações com os agentes em tempo de execução, caso necessário, como criar e finalizar agentes ou enviar mensagens. A Figura 5.1 mostra o agente *rma*.

Figura 5.1 – Agente RMA da plataforma JADE

Fonte: Próprio autor.

O agente *Sniffer* foi instanciado pelo programa para que a mensagens trocadas entre os agentes fossem visualizadas. A interface dele é como mostrado na Figura 5.5 no tópico a seguir. Já o agente *Introspector*, também instanciado pelo programa, permite visualizar a classe, estado do agente, os comportamentos que ele possui e o estados desses comportamentos, mensagens enviadas, recebidas e pendentes, além de permitir também ações pelo usuário, como finalizar comportamentos e alterar o estado do agente. A Figura 5.2 mostra a interface do agente *Introspector*.

Figura 5.2 – Agente *Introspector* da plataforma JADE

Fonte: Próprio autor.

5.1 REDE 1

No cenário da rede exemplo 1, conforme mostrando na Figura 4.2, foram consideradas as cargas das zonas ZN02 e ZN04 mais pesadas de forma que no caso da falta 1, Figura 5.3, o alimentador AL2 não pode assumir as cargas de ZN02, um vez que a linha LINE2 ficaria sobrecarregada. Assim, para solução desse cenário, as zonas ZN03 e ZN04 não serão fornecedoras para ZN02, e estas assumirão o papel de requisitar conexão para suas respectivas

vizinhas. Para ZN03 não é possível, pois esta não possui zonas vizinhas além da própria ZN02. Enquanto isso, a ZN04 envia pedidos de conexão para ZN05 e ZN06, as quais poderão assumir a carga desta e em seguida a ZN03 poderá assumir a ZN02. Para as faltas 2 e 3 o caso fica mais simplificado, pois as zonas vizinhas imediatas poderão assumir as cargas fora de serviço.

Figura 5.3 – Faltas na rede 1

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os valores das correntes durante o processo de solicitação das zonas e depois de restauradas na topologia final para ilustrar melhor como o agente interpreta os dados. Pode se observar que a capacidade de corrente das linhas LINE3 e LINE4 foi ultrapassada com o fechamento da linha SW_LINE_24. Ao final, a solução foi encontrada com o fechamento das linhas SW_LINE_23 e SW_LINE_46, e a abertura da linha LINE4.

Tabela 5.1 – Correntes nas linhas da rede 1 durante o processo de restauração para falta 1

	Capacidade	Etapa 1	Etapa 2	Final
Elemento	I_{fase} (A)			
LINE1	250	0,00	0,00	0,00
LINE2	160	0,00	0,00	0,00
LINE3	250	255,64	154,22	153,54
LINE4	160	204,21	0,00	0,00
LINE5	250	102,87	103,33	204,97
LINE6	160	51,43	51,66	153,54
SW_LINE_23	250	0,00	102,56	102,11
SW_LINE_24	250	102,11	0,00	0,00
SW_LINE_45	250	0,00	0,00	0,00
SW_LINE_46	250	0,00	0,00	102,11

Fonte: Próprio autor.

Neste trabalho a decisão entre, por exemplo, as zonas ZN05 e ZN06, é feita de acordo com a ordem de retenção de uma chave da *thread* pelas respectivas instâncias do *AgZone*. Assim, não há prioridade ou avaliação de qual deles deve atender ao pedido, de acordo com algum critério como, por exemplo, queda de tensão. Em um melhoramento do sistema, esses casos poderiam usar os cálculos do OpenDSS para decidir qual destas duas zonas deveriam assumir a zona 2. Assim, melhorando a eficiência da solução encontrada para o caso dessa falta. Neste trabalho, as tensões nas barras não interferiram como restrição para a solução. Para a simulação da falta 1, por exemplo, o valor de tensão para as barras das zonas foram iguais a 0,985 p.u, não apresentando queda significativa para ser avaliada, devido à simplicidade da rede. Além disso, podem ser consideradas as cargas prioritárias. Assim, havendo prioridade de carga de alguma zona, o pedido deve ser enviado com esta informação, a qual deve ser tratada no algoritmo.

A seguir são apresentados os dados de saída, Tabela 5.2, mostrando os estados das linhas representados por 0 (aberta) e 1 (fechada). E na Figura 5.4 como ficou a topologia final da rede.

Tabela 5.2 – Dados de saída exibidos no Eclipse (Java)

Linha	Falta 1	Falta 2	Falta 3
1	Aberta [0]	Fechada [1]	Fechada [1]
2	Aberta [0]	Fechada [1]	Fechada [1]
3	Fechada [1]	Aberta [0]	Fechada [1]
4	Aberta [0]	Aberta [0]	Fechada [1]
5	Fechada [1]	Fechada [1]	Aberta [0]
6	Fechada [1]	Fechada [1]	Aberta [0]
23	Fechada [1]	Aberta [0]	Aberta [0]
24	Aberta [0]	Aberta [0]	Aberta [0]
45	Aberta [0]	Aberta [0]	Aberta [0]
46	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.4 – Topologia final da rede 1 para a) Falta 1, b) Falta 2 e c) Falta 3

c)

Fonte: Próprio autor.

As figuras a seguir mostram a troca de mensagens entre os agentes para chegar aos estados para restauração das zonas fora de serviço.

Como pode ser observado na Figura 5.5, as mensagens são simbolizadas pelas setas entre as zonas. A seta de cor roxa enviada no instante 1 do agente “Other” para ZN01 representa uma mensagem enviada pelo usuário da interface do JADE. Esta mensagem simboliza um sinal de alerta recebido pelo agente da zona que está em falta, e pode ser produzido por leitura das grandezas nos dispositivos inteligentes que envolvem esta zona. Em seguida, o agente da subestação envia mensagens de falha (FAILURE) para as zonas que ele identificou que estão fora de serviço devido à falta em ZN01, que neste caso é ZN02. A partir de então, ocorre a sequência de mensagens enviadas conforme descrito no algoritmo descrito no item 4.2. Na sequência, pode-se verificar o envio das mensagens de solicitação (CFP) para ZN03 e ZN04, que foram rejeitadas (REFUSE). Logo, ZN04 faz pedido para as suas zonas vizinhas, ZN05 e ZN06, sendo que ZN06 responde com aceite (AGREE) e ZN05 rejeita, pois não pode fechar malha na rede. Na segunda tentativa de

solicitação de ZN02, ZN04 já está conectada ao terceiro alimentador, permitindo que ZN02 se conecte à ZN03.

Figura 5.5 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 1 no caso da falta 1

Fonte: Próprio autor.

Seguindo a mesma lógica, na Figura 5.6, ZN04 envia três mensagens de solicitação, sendo que ZN06 responde com aceite e as demais rejeitam para não fechar a malha. Na Figura 5.7, ocorre da mesma forma, sendo que a negociação acontece apenas entre ZN06 e ZN04.

Figura 5.6 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 1 no caso da falta 2

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.7 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 1 no caso da falta 1

Fonte: Próprio autor.

5.2 REDE 2

No cenário da rede 2, foram simuladas três faltas, tendo dois casos diferentes de distribuição das cargas nas zonas, conforme mostrado na Tabela 4.4.

Para falta 1, levando em conta a distribuição 1, as cargas de ZN02 não poderiam ser atendidas pela zona ZN05 devido à limitação de corrente no alimentador AL2. Com o prosseguimento do algoritmo, as zonas ZN05 e ZN08 serão redirecionadas para ZN09, no entanto ZN02 continuará desconectada por limitação de corrente no alimentador AL4. Essa solução não deve ser considerada, pois não se mostra eficiente, uma vez que o resultado não aumentará o número de cargas restauradas e ela apenas oferece realocação de zonas para o alimentador 4, sem necessidade.

No caso da falta 2 com a distribuição 1, Figura 5.8, o alimentador AL1 seria capaz de alimentar a zona fora de serviço ZN05. Assim, seria apenas realocada para este fechando a linha SW_LINE_25.

Para a falta 2, com distribuição 2, em que o alimentador AL1 estaria mais carregado com a linha LINE 1 no limite de corrente, a zona ZN02 não seria capaz de suprir essa carga e a ZN05 segue a solicitação para as demais zonas vizinhas. O alimentador 3, em seu estado normal, não conseguiria suprir a carga de ZN02. Assim, a única solução para este caso seria a transferência das cargas da zona ZN08 para o alimentador AL4, e em seguida, quando a ZN05 realizasse mais uma tentativa de conexão, a ZN08, agora conectada ao alimentador AL4, poderia conectar a ZN05 novamente à rede, finalizando o processo.

Para a falta 3, considerando a distribuição 1, a restauração poderia ser feita conectando-se as zonas ZN07 e ZN08 ao alimentador AL4, executando assim o procedimento da melhor forma possível. No entanto, como pode ser verificada nos dados de saída, a zona ZN07 não é reconectada, sendo apenas a ZN08 restaurada. Pode-se considerar que o processo teve sucesso, pois houve restauração de cargas, reduzindo o número de consumidores fora de serviço, sendo esse o objetivo da metodologia.

A Figura 5.8, bem como as tabelas 5.2 e 5.3 mostra a localização das faltas e os resultados de saída.

Figura 5.8 – Faltas na rede 2

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.3 – Dados de saída exibidos no Eclipse (Java) para rede 2, faltas 1 e 2

Linha	Falta 1, distrib. 1	Falta 1, distrib. 2	Falta 2, distrib. 1
1	Aberta [0]	Aberta [0]	Fechada [1]
2	Aberta [0]	Aberta [0]	Fechada [1]
3	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]
4	Fechada [1]	Fechada [1]	Aberta [0]
5	Aberta [0]	Aberta [0]	Aberta [0]
6	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]
7	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]

(Continua)

Tabela 5.3 – Dados de saída exibidos no Eclipse (Java) para rede 2, faltas 1 e 2 (Continuação)

Linha	Falta 1, distrib. 1	Falta 1, distrib. 2	Falta 2, distrib. 1
8	Aberta [0]	Aberta [0]	Fechada [1]
9	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]
25	Aberta [0]	Aberta [0]	Fechada [1]
58	Fechada [1]	Fechada [1]	Aberta [0]
89	Fechada [1]	Fechada [1]	Aberta [0]

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.4 - Dados de saída exibidos no Eclipse (Java) para rede 2, faltas 2 e 3

Linha	Falta 2, distribuição 2	Falta 3, distribuição 1	Falta 3, distribuição 2
1	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]
2	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]
3	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]
4	Aberta [0]	Fechada [1]	Fechada [1]
5	Aberta [0]	Aberta [0]	Fechada [1]
6	Fechada [1]	Aberta [0]	Aberta [0]
7	Fechada [1]	Aberta [0]	Aberta [0]
8	Aberta [0]	Aberta [0]	Aberta [0]
9	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]
25	Aberta [0]	Fechada [1]	Aberta [0]
58	Aberta [0]	Aberta [0]	Aberta [0]
89	Fechada [1]	Fechada [1]	Fechada [1]

Fonte: Próprio autor.

A topologia final para cada resultado pode ser visualizada na Figura 5.9.

Figura 5.9 – Topologia final da rede 2 para a) Falta 1, distribuição 1 e 2; b) Falta 2, distribuição 1; c) Falta 2, distribuição 2; d) Falta 3, distribuição 1; e d) Falta 3, distribuição 2

a)

b)

c)

d)

e)

Fonte: Próprio autor.

As mensagens trocadas entre os agentes da rede ilustrada pela Figura 5.9 estão mostradas nas figuras abaixo. A Figura 5.10, mostra as mensagens no caso da falta 1, na ZN01. Pode-se observar a negociação entre ZN02 e ZN05 e depois entre ZN05 e ZN08.

Figura 5.10 - Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 1 e distribuição de cargas 1

Na Figura 5.11, pode ser observado que a zona ZN04 recebe a mensagem de falha, e então a zona ZN05 recebe sinalização de que está fora de serviço. Assim, esta envia mensagens CFP e em seguida já recebe um aceite (AGREE), encerrando o procedimento.

Figura 5.11 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 2 e distribuição de cargas 1

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.12, no caso 2 da distribuição de cargas, pode-se ver que a zona ZN05 recebe rejeição para os dois pedidos, em seguida ZN08 envia uma

mensagem de CFP para a zona ZN09, que aceita o pedido. Na segunda tentativa de solicitação da zona ZN05, ZN02 continua respondendo com mensagem de rejeição e ZN08 envia a mensagem de aceite encerrando o processo.

Figura 5.12 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 2 e distribuição de cargas 2

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.13 e Figura 5.14 podem ser observadas as mensagens trocadas entre ZN08 e suas zonas vizinhas. Quanto a ZN07, o agente não pode se reconectar.

Figura 5.13 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 3, distribuição de cargas 1

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.14 – Mensagens trocadas entre os agentes da rede 2 no caso da falta 3, distribuição de cargas 2

Fonte: Próprio autor.

5.3 RESULTADOS GERAIS

Os resultados apresentados acima mostram duas redes de distribuição divididas em zonas, demonstrando casos diferentes de faltas pela localização e pelo carregamento das zonas. O algoritmo executou as tarefas com sucesso,

no entanto, mostrou algumas limitações que podem ocorrer de acordo com o caso.

Para o caso da falta 3, em que a ZN07 permaneceu fora de serviço, a causa foi a premissa de que as zonas vizinhas, as quais podem ser requisitadas para se conectarem, foram consideradas apenas aquelas que tem linhas de interligação (TIE), como por exemplo SW_LINE_25. Como a proposta de recuperação de cargas foi atingida de alguma forma, esse caso não foi considerado com erro.

6 CONCLUSÕES

No presente documento foram apresentados conceitos e princípios básicos de um sistema de distribuição elétrica com característica autorregenerativa, revisando os principais trabalhos na área para chegar aos métodos que têm sido utilizados ultimamente na academia. Visando a automatização dos sistemas, agentes inteligentes têm sido empregados por motivos, discutidos neste trabalho, que incluem a capacidade de dar autonomia para os agentes de acordo com as necessidades do projeto e a capacidade de “socializar” com outros agentes para atingir um objetivo individual, hierarquicamente, ou de todo o grupo de agentes. Aplicando esses princípios a ferramentas destinadas à criação de sistemas multiagentes, podem ser projetados sistemas elétricos *self-healing* colocando em prática grande parte dos objetivos dos sistemas elétricos inteligentes.

Nessa dissertação o objetivo foi aplicar um algoritmo adequado para execução em multiagentes, que estão locados em rede, de forma a realizar uma negociação entre eles para que se recoloquem sempre que necessário. Cada um desses agentes representando uma zona de cargas elétricas de um sistema de distribuição, que estão em rede radial. Assim, foram determinados dois agentes: um representando a subestação, com intenção apenas de verificar eventuais zonas fora de serviço e informá-las para que elas iniciem o procedimento, e outro para representar as próprias zonas, com seus comportamentos para execução da negociação. Em cada situação, cada zona pode assumir dois comportamentos que lhes determinam as ações que devem tomar quando estão fora de serviço, ou quando são solicitados para se conectar à zona fora de serviço.

O sistema multiagentes foi implementado na plataforma de desenvolvimento de agentes em Java (JADE), a qual já dispõe de todo ferramental para criação dos comportamentos, envio de mensagens e demais métodos executados por um agente. Além de todos os pacotes para programação dos agentes, o JADE já fornece as bibliotecas para o envio e recebimento das mensagens de acordo com as diretrizes da FIPA. Uma outra vantagem do JADE são as suas

interfaces gráficas que ajudam a encontrar e analisar erros ocorridos durante a execução dos agentes, além de facilitar a visualização das trocas de mensagens entre eles.

Para validação do sistema, foram testadas duas redes simplificadas, simuladas no OpenDSS, software para simulação de sistemas de distribuição. Nele são calculadas correntes e tensões na rede com a carga determinada. Assim, esses dados foram exportados para serem avaliados pelo sistema e permitir ou não que a topologia fosse mudada, conforme descrito os algoritmos nessa dissertação. Os resultados apresentados mostram que a metodologia encontrou o resultado satisfatório para alguns exemplos simulados.

Entretanto, algumas falhas no desenvolvimento podem ser melhoradas, e devem ser modificadas algumas premissas do código. Por exemplo, para determinar as zonas vizinhas, devem ser consideradas aquelas que estão conectadas originalmente. No código atual, apenas as zonas conectadas por linhas de interligação são consideradas como vizinhas.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para aperfeiçoar a implementação desse algoritmo, podem ser realizadas as alterações citadas anteriormente a respeito da vizinhança de zonas, ampliando a informações sobre a rede, dando mais “conhecimento” ao agente.

No que diz respeito a validação da solução em cada caso rodado, podem ser inseridos métodos para verificar a eficiência do resultado, como foi citado no caso da rede 2, falta 1. Assim, alteração na topologia da rede que não propusessem redução de cargas fora de serviço devem ser descartadas. Pois numa aplicação real esse resultado deve ser enviado diretamente para os dispositivos de campos de forma a chavear as linhas.

Ainda no ambiente de simulação, podem ser levadas em conta outras redes com maior complexidade, incluído mais de uma subestação, permitindo por exemplo a realocação de zonas ou alimentadores para uma segunda subestação.

Para continuação e complementação desse trabalho, poderiam ser colocadas cargas como geradores distribuídos nas zonas, de forma que a potência gerada permitisse alguma conexão impedida devido ao fluxo de potência em sentido único. Ou seja, um gerador distribuído aliviaria a carga em uma zona limitada pela capacidade de corrente no alimentador, permitindo que ela conectasse outra zona fora de serviço. Seguindo a mesma ideia, podem ser considerados armazenadores de energia e verificar sua contribuição da mesma forma que uma geração distribuída.

REFERÊNCIAS

AMIN, M. Toward self-healing infrastructure systems. **Computer**, v. 33, n. 8, p. 44–53, ago. 2000.

AMIN, M. Toward self-healing energy infrastructure systems. **IEEE Computer Applications in Power**, v. 14, n. 1, p. 20–28, 2001.

AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 3, n. 5, p. 34–41, set. 2005.

AREFIFAR, S. A. et al. Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 4, p. 4192–4200, 2013.

BALDICK, R. et al. **Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems IEEE PES CAMS task force on understanding, prediction, mitigation and restoration of cascading failures**. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. **Anais...IEEE**, jul. 2008Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4596430/>>

BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. **Developing multi-agent systems with JADE**. Chinchester: John Wiley and Sons, 2007.

BORDINI, R. H.; HUBNER, J. F.; WOOLDRIDGE, M. **Programming Multi-Agente Systems in AgentSpeak using Jason**. [s.l.] John Wiley and Sons, 2007.

BOU GHOSN, S. et al. **Agent-Oriented Designs for a Self Healing Smart Grid**. 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. **Anais...IEEE**, out. 2010Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5622085/>>

BUTLER-PURRY, K. L.; SARMA, N. D. R. Self-healing reconfiguration for restoration of naval shipboard power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 2, p. 754–762, 2004.

COLSON, C. M.; NEHRIR, M. H.; GUNDERSON, R. W. Distributed multi-agent microgrids: A decentralized approach to resilient power system self-healing. **Proceedings - ISRCS 2011: 4th International Symposium on**

Resilient Control Systems, p. 83–88, 2011.

ELMITWALLY, A. et al. A Fuzzy-Multiagent Self-Healing Scheme for a Distribution System With Distributed Generations. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 5, p. 2612–2622, set. 2015.

EPRI; US DEPARTMENT OF DEFENSE. **Complex Interactive Networks / Systems Initiative : Final Summary Report: Overview and Summary Final Report for Joint EPRI U.S. Department of Defense University Research Initiative**. Palo Alto, CA: [s.n.].

FIPA. **Foundation for Intelligent Physical Agents**. Disponível em: <<http://www.fipa.org/about/index.html>>. Acesso em: 22 maio. 2018.

HÜBNER, J.; BORDINI, R.; VIEIRA, R. Introdução ao desenvolvimento de sistemas multiagentes com Jason. **XII Escola de Informática da SBC**, n. May 2014, p. 36, 2004.

JUNG, J. et al. Adaptation in load shedding under vulnerable operating conditions. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 4, p. 1199–1205, nov. 2002.

KOŠT'ÁLOVÁ, A.; CARVALHO, P. M. S. Towards self-healing in distribution networks operation: Bipartite graph modelling for automated switching. **Electric Power Systems Research**, v. 81, n. 1, jan. 2011.

LABROU, Y.; FININ, T.; YUN PENG. Agent communication languages: the current landscape. **IEEE Intelligent Systems**, v. 14, n. 2, p. 45–52, mar. 1999.

LIN, Z.; WEN, F.; XUE, Y. A Restorative Self-Healing Algorithm for Transmission Systems Based on Complex Network Theory. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 4, p. 2154–2162, 2016.

LIU, C. C. et al. The Strategic Power Infrastructure Defense (SPID) System: A Conceptual Design. **IEEE Control Systems**, v. 20, n. 4, p. 40–52, 2000.

LIU, H. et al. The control and analysis of self-healing urban power grid. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1119–1129, 2012.

MOSLEHI, K. et al. Framework for a self-healing power grid. **IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005**, n. June, p. 2816–2823, 2005.

MOSLEHI, K.; KUMAR, A. B. R.; HIRSCH, P. **Feasibility of a self-healing grid - part II benefit models and analysis**. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. **Anais...IEEE**, 2006Disponível em:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1709397>

MOSLEHI, K.; KUMAR, R. Control Approach for SelfHealing Power Systems: A Conceptual OverviewTitle. **Electricity Transmission in Deregulated Markets: Challenges, Opportunities, and Necessary Research and Development**, n. Carnegie Mellon University, p. 1–10, 2004.

PADGHAM, L.; WINIKOFF, M. **Developing Intelligente Agent Systems: A pratical guide**. [s.l.] John Wiley and Sons, 2004.

RAHMAN, S.; PIPATTANASOMPORN, M.; TEKLU, Y. Intelligent Distributed Autonomous Power Systems. **Proceedings of Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE**, p. 1–8, 2007.

RIBEIRO, R. et al. An Advanced Software Tool to Simulate Service Restoration Problems: a case study on Power Distribution Systems. **Procedia Computer Science**, v. 108, p. 675–684, 2017.

RIVERA, S.; FARID, A. M.; YUCEF-TOUMI, K. A multi-agent system transient stability platform for resilient self-healing operation of multiple microgrids. **2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2014**, p. 0–4, 2014.

RUSSELL, S. J.; NORVING, P. **Artificial Intelligence**. [s.l.] Prentice Hall, 1991.

SEETHALEKSHMI, K.; SINGH, S. N.; SRIVASTAVA, S. C. A synchrophasor assisted frequency and voltage stability based load shedding scheme for self-healing of power system. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 2, n. 2, p. 221–230, 2011.

SHENG, S. et al. Agent-Based Self-Healing Protection System. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 2, p. 610–618, abr. 2006.

SOUZA, F. A. DE et al. A Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms Considering Priority-Based Load Shedding and Islanding with Distributed Generation in Smart Distribution Grids. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, n. 4, p. 632–638, abr. 2017.

WANG, Z. et al. Networked microgrids for self-healing power systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 1, p. 310–319, 2016.

WANG, Z.; WANG, J. Self-healing Resilient Distribution Systems based on Sectionlization into Microgrids. **IEEE Transactions Power Systems**, v. 30, n.

6, p. 3139–3149, 2015.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to Multiagent Systems**. Segunda ed. [s.l.] John Wiley and Sons, 2009.

www.epri.com, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.epri.com/#/pages/sa/openss?lang=en>>

YOKOYAMA, T.; NAGATA, T. A Multi-agent Restoration method for Distribution Network. **Energy Procedia**, v. 14, p. 726–731, 2012.

YOU, H.; VITTAL, V.; YANG, Z. Self-Healing in Power Systems: An Approach Using Islanding and Rate of Frequency Decline Based Load Shedding. **IEEE Power Engineering Review**, v. 22, n. 12, p. 62–62, dez. 2002.

ZHU, Z. et al. A Multi-agent and Big Data Self-Healing Scheme for Active Distribution Network With Inverter-Based Distributed Generators. p. 972–977, 2016a.

ZHU, Z. et al. Self-healing of active distribution network with inverter-based distributed generators based on big data. **2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)**, n. 61170191, p. 1–5, 2016b.

ZIDAN, A.; EL-SAADANY, E. F. A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 3, p. 1525–1539, 2012.

ZIDAN, A.; EL-SAADANY, E. F.; EL CHAAR, L. A cooperative agent-based architecture for self-healing distributed power systems. **2011 International Conference on Innovations in Information Technology, IIT 2011**, p. 100–105, 2011.