

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ

CAMPUS DE FOZ DO IGUAÇU

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**PROCESSO AUTOMÁTICO DE RESTABELECIMENTO  
DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
MODELADO ATRAVÉS DE SISTEMAS MULTIAGENTES**

GYAN FLAVIO ANGELO MARTINS

FOZ DO IGUAÇU

2019



Gyan Flavio Angelo Martins

**PROCESSO AUTOMÁTICO DE RESTABELECIMENTO  
DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
MODELADO ATRAVÉS DE SISTEMAS MULTIAGENTES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e Computação. Área de concentração: Sistemas Dinâmicos e Energéticos.

Orientador: Adriano Batista de Almeida

Foz do Iguaçu

2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Martins, Gyan Flavio Angelo  
Processo automático de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição modelado através de sistemas multiagentes / Gyan Flavio Angelo Martins; orientador(a), Adriano Batista de Almeida, 2019.  
81 f.

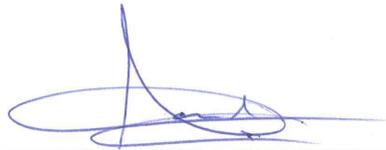
Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, 2019.

1. Restabelecimento de energia. 2. Sistemas de distribuição. 3. Sistemas multiagentes. I. Almeida, Adriano Batista de . II. Título.

**PROCESSO AUTOMÁTICO DE RESTABELECIMENTO  
DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
MODELADO ATRAVÉS DE SISTEMAS MULTIAGENTES**

Gyan Flavio Angelo Martins

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica e Computação e aprovada pela Banca Examinadora:  
Data da defesa pública: 31/05/2019.



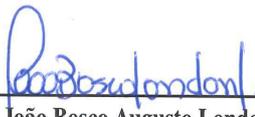
---

Prof. Dr. **Adriano Batista de Almeida** - (Orientador)  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



---

Prof. Dr. **Edgar Manuel Carreño Franco**  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE



---

Prof. Dr. **João Bosco Augusto London Junior**  
Universidade de São Paulo - USP



# Resumo

A partir de pesquisas que comprovam a fragilidade existente nos atuais Sistemas de Distribuição, há um crescente interesse dos agentes reguladores, pesquisadores e distribuidoras de energia elétrica em estudos que buscam possíveis soluções para eventos que ocasionam desligamentos nestes sistemas. Na ocorrência de uma falha na rede de distribuição, o sistema de proteção é acionado, separando o ramal de alimentação em duas partes: montante e jusante. Na parcela localizada a montante encontram-se as cargas energizadas enquanto a jusante as desenergizadas. Sob tal situação, a rede se encontra no estado em falta, sendo entendido quando pelo menos um elemento da rede está fora de serviço, portanto, diante desta situação, é de interesse para as distribuidoras restaurar as cargas prejudicadas, de preferência, em curto intervalo de tempo. Neste contexto, as distribuidoras de energia e outras agências interessadas estão continuamente em busca de melhorias dos serviços, adotando conceitos de *Smart Grids*, como, por exemplo, incentivo ao desenvolvimento de pesquisas e aquisição de tecnologias com propriedades automatizadas. Neste sentido, são perceptíveis a constante evolução e o forte investimento impulsionado pelo conceito de *Smart Grid*, que reúne soluções tecnológicas para modernização, o que desperta uma certa expectativa em relação às futuras redes. Diante destas observações, o presente trabalho tem como objetivo propor uma estratégia de restabelecimento baseada em Sistemas Multiagentes para auxiliar à busca por uma solução do problema de restabelecimento de energia de Sistemas de Distribuição. O modelo aborda as etapas sequenciais de restabelecimento de energia com a finalidade de, através da análise de relatórios técnicos e diretrizes operacionais, definir as regras, as ações e o ambiente de atuação de cada agente. Tal modelo possui como premissa a aplicação de um plano estratégico para o restabelecimento de energia com possibilidade de corte de carga, o qual aborda o mapeamento das áreas fora de serviço, a avaliação da capacidade de suprimento de cada alimentador e a maximização das cargas restauradas através de chaveamento. O modelo apresentado é aplicado a uma rede de distribuição típica por meio de simulações, e os resultados obtidos são comparados com trabalhos semelhantes, a partir de parâmetros de avaliação que incluem as tensões mínimas nas barras de carga, perdas da rede, ações de chaveamento e as cargas restauradas.

**Palavras-chave:** Sistemas de Distribuição, *Smart Grid*, Restabelecimento de Energia, Sistemas Multiagentes.

# Abstract

Based on research that demonstrates the fragility of current distribution systems, there is a growing interest of regulators, researchers and utility companies in studies seeking possible solutions to events that lead to shutdowns in these systems. In the occurrence of a fault in the distribution network, the protection system is triggered and the supply branch is separated into two parts: upstream and downstream. The portion located upstream are the energized loads while the downstream are the non-energized ones. In this situation, the network is in a state of fault, so it is important that the utilities restore the out-of-service loads, preferably in a short period of time. In this context, utilities and other interested agencies are continually seeking improvements in services, adopting Smart Grids concepts, such as encouraging research development and acquiring technologies with automated properties. In this sense, it is possible to notice the constant evolution and the strong investment driven by the Smart Grid concept, which brings technological solutions for modernization, giving rise to a certain expectation regarding future networks. In view of these observations, the present work aims to propose a restoration strategy based on Multiagent Systems to help in the search for a solution to the restoration problem in Distribution Systems. The model addresses the sequential stages of energy restoration in order to define, through the analysis of technical reports and operational guidelines, the rules, actions, and operating environment of each agent. This model considers the application of a strategic plan for energy restoration with the possibility of load shedding, which addresses the mapping of out-of-service areas, the assessment of the supply capacity of each feeder and the maximization of loads restored through switching. The presented model is applied to a typical distribution network through simulations, and the obtained results are compared with similar works, based on evaluation parameters including minimum voltages in the load buses, power losses, switching actions and the restored loads.

**Keywords:** Distribution System, Smart Grid, Network Restoration, Multiagent System.

Dedico primeiramente a Deus, meu guia,  
autor do meu destino, essencial em minha vida.

Dedico também a minha família,  
professores e amigos,  
principalmente ao meu orientador.



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como mestrando, mas em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adriano Batista de Almeida, por me receber como aluno de mestrado. Obrigado pela oportunidade, pela confiança, pelo respeito, por me ensinar, pela compreensão, principalmente pela paciência e pelos sábios conselhos sempre que o procurei para conversar.

Agradeço a Unioeste e o PGEEC, pela oportunidade de fazer o curso, e também ao seu corpo docente, direção e administração que compartilharam estes últimos anos os quais enriqueceram as minhas experiências, tanto pessoal quanto profissional.

Agradeço a todos os professores do programa de mestrado por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Agradeço a Fundação CAPES pela bolsa e apoio financeiro.

Agradeço a minha mãe Marli, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis.

Agradeço aos meus irmãos e demais familiares, que nos momentos de minha ausência dedicados aos estudos, sempre fizeram entender que o futuro é construído no presente.

Aos meus parceiros Rogério e Diego que, embora não ingressaram no ensino superior, sempre estiveram ao meu lado, ouvindo e concordando com as complexidades de engenharia, como se tudo estivesse sob controle.

Agradeço a minha namorada, que ao longo desses anos me deu não só força, mas apoio para vencer essa etapa. Obrigado, meu amor, por suportar as crises de estresse e minha ausência em diversos momentos.

Aos amigos e colegas do laboratório de geração de ideias, principalmente pelos momentos juntos divididos, que não negaram forças e ficaram na torcida, meu muito obrigado.

Aqui vão os meus agradecimentos a todos que contribuíram, de maneira direta ou indireta, formal ou informal, para que este trabalho pudesse ter chegado ao seu fim.



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Siglas e Abreviaturas</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	6
1.2.1 Geral . . . . .	6
1.2.2 Específicos . . . . .	6
1.3 Estrutura do trabalho . . . . .	6
<b>2 O Problema de Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição</b>	<b>9</b>
2.1 Introdução . . . . .	9
2.2 Aspectos gerais dos SDs . . . . .	9
2.2.1 Elementos presentes em um SD . . . . .	10
2.3 Reconfiguração de redes para a obtenção do plano de restabelecimento nos SDs	11
2.3.1 Restrições operativas . . . . .	13
2.3.2 Restabelecimento de redes de energia . . . . .	14
2.4 Exemplo ilustrativo . . . . .	17
<b>3 Sistemas Multiagentes</b>	<b>23</b>
3.1 Introdução . . . . .	23
3.2 Definição . . . . .	23
3.3 Padrão FIPA . . . . .	24
3.3.1 Framework JADE . . . . .	25
3.4 Características básicas de SMAs . . . . .	25
3.5 Benefícios de SMAs . . . . .	26
3.6 Desafios da aplicação de SMAs . . . . .	27

3.7	Aplicações de SMAs no problema de restabelecimento de energia dos SDs . . .	28
<b>4</b>	<b>Proposta de um Modelo Multiagente para o Processo de Restabelecimento de Energia dos SDs</b>	<b>31</b>
4.1	Introdução . . . . .	31
4.2	Modelo proposto . . . . .	32
4.3	Plataforma de simulação . . . . .	36
4.3.1	Estrutura de comunicação . . . . .	37
4.3.2	Fluxo de carga . . . . .	39
4.4	Descrição do modelo . . . . .	39
4.4.1	Restauração com um único chaveamento . . . . .	42
4.4.2	Recuperação através da análise de combinações . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>51</b>
5.1	Introdução . . . . .	51
5.2	Sistema teste . . . . .	51
5.3	Caso I - Comparação dos resultados com outras aplicações de SMAs . . . . .	53
5.4	Caso II - Cargas não restabelecidas . . . . .	56
5.5	Caso III - Comparação dos resultados com aplicação baseada em Q-learning . .	59
5.6	Considerações finais . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>65</b>
6.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	66
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>67</b>
<b>A</b>	<b>Dados de Entrada do SD Teste</b>	<b>77</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1:	Resultados de DEC no período de 2010 a 2018. . . . .	3
Figura 1.2:	Resultados de FEC no período de 2010 a 2018. . . . .	4
Figura 2.1:	Exemplo de uma rede de distribuição típica. . . . .	11
Figura 2.2:	Etapas do processo de restabelecimento. . . . .	15
Figura 2.3:	Estados operativos de um SD. . . . .	18
Figura 2.4:	Exemplo de uma rede de distribuição representada através de grafo. . . . .	19
Figura 2.5:	Representação do SD no Estado em Falta. . . . .	19
Figura 2.6:	Representação do SD no Estado Restaurativo. . . . .	20
Figura 2.7:	Representação do SD no Estado Restaurativo ao final da etapa 4. . . . .	20
Figura 4.1:	Arquitetura hierárquica do modelo adaptado. . . . .	32
Figura 4.2:	Divisão do SD em setores. . . . .	34
Figura 4.3:	Fluxograma do processo de restauração. . . . .	35
Figura 4.4:	Fluxograma de execução do modelo. . . . .	36
Figura 4.5:	Estrutura de comunicação entre os agentes de um SD. . . . .	37
Figura 4.6:	Exemplo ilustrativo para a elaboração da tabela de relacionamentos. . . . .	46
Figura 4.7:	Processo de mapeamento. . . . .	47
Figura 5.1:	Ilustração do SD teste. . . . .	52



# Lista de Tabelas

Tabela 4.1:	Exemplo da tabela de relacionamento. . . . .	46
Tabela 5.1:	Índices de prioridade de acordo com cada nível de cliente. . . . .	53
Tabela 5.2:	Demanda do setor em falta e dos setores a serem recuperados do Caso I. . . . .	54
Tabela 5.3:	Capacidade disponível dos alimentadores do Caso I. . . . .	54
Tabela 5.4:	Tabela de relacionamento do Caso I. . . . .	55
Tabela 5.5:	Sequência das atividades de manobra do Caso I. . . . .	55
Tabela 5.6:	Comparação dos resultados pré-falta e pós-restabelecimento do Caso I. . . . .	56
Tabela 5.7:	Demanda dos setores a serem recuperados do Caso II. . . . .	56
Tabela 5.8:	Capacidade disponível dos alimentadores do Caso II. . . . .	57
Tabela 5.9:	Tabela de relacionamento do Caso II. . . . .	57
Tabela 5.10:	Transferência de carga do alimentador 4 para o alimentador 2 do Caso II. . . . .	58
Tabela 5.11:	Restabelecimento parcial do alimentador 3 do Caso II. . . . .	58
Tabela 5.12:	Cargas não restauradas do alimentador 3 do Caso II. . . . .	58
Tabela 5.13:	Carga transferidas do alimentador 3 para o alimentador 1 do Caso II. . . . .	58
Tabela 5.14:	Resultados pós-restabelecimento do Caso II. . . . .	59
Tabela 5.15:	Carregamento pré-falta do SD do Caso III. . . . .	60
Tabela 5.16:	Demanda dos setores em falta e dos setores a serem recuperados do Caso III. . . . .	60
Tabela 5.17:	Capacidade disponível dos alimentadores do Caso III. . . . .	60
Tabela 5.18:	Tabela de relacionamento do Caso III. . . . .	61
Tabela 5.19:	Sequência das atividades de manobra do Caso III. . . . .	61
Tabela 5.20:	Comparação dos resultados pré-falta e pós-restabelecimento do Caso III. . . . .	61
Tabela A.1:	Parâmetros do fluxo de carga do SD. . . . .	77
Tabela A.2:	Parâmetros das subestações do SD. . . . .	77
Tabela A.3:	Parâmetros dos ramos do SD. . . . .	77
Tabela A.4:	Chaves de interconexão do SD. . . . .	79
Tabela A.5:	Carregamento das barras do SD. . . . .	79



# Lista de Símbolos

$B_i$	Coefficiente associado a prioridade da barra $i$
$C$	Conjunto de combinações dos setores
$CDA_{max}$	Máxima capacidade disponível do alimentador
$Comb_{max}$	Número máximo de combinações
$G_k$	Potência disponível na barra $k$
$I_{atual_j}$	Corrente instantânea do ramo $j$
$I_{CDA}$	Capacidade disponível no alimentador
$I_{DA}$	Corrente disponível no alimentador
$I_{DR_j}$	Corrente disponível no ramo
$I_{k-i}$	Corrente no ramo $k - i$
$I_{max_j}$	Corrente máxima no ramo $j$
$in_i$	Conjunto dos possíveis ramos de entrada da barra $i$
$Ip_k^i$	Índice de prioridade da barra $i$ pertencente ao setor $k$
$k$	Identificação do setor
$K$	Setores pertencentes ao conjunto $Z_{C_k}$
$L_i$	Variável de decisão
$n$	Número total de setores
$N$	Número de barras contidas no setor $k$
$N_{bus}$	Número de barras do sistema
$nc$	Número de conjuntos
$N_{chave}$	Número total de chaves
$nf$	Número total de setores fora de serviço, com exceção do setor em falta
$out_k$	Conjunto de barras que absorvem potência da barra $k$
$SC_k$	Demanda para cada combinação $Z_{C_k}$
$Setor_k$	Setor de numeração $k$
$SetorOFF$	Vetor que armazena os setores identificados como fora de serviço
$S_i$	Carga da barra $i$
$S_k$	Demanda do setor $k$
$S_k^i$	Demanda da barra $i$ pertencente ao setor $k$
$S_{k-i}$	Fluxo no ramo $k - i$

$S_{transf}$	Demanda de transferência
$t$	Tempo
$V_{atual}$	Tensão da barra que apresentar menor valor
$V_i$	Tensão na barra $i$
$V_{max}$	Valor máximo imposto pela rede (usualmente 1,05 p.u.)
$V_{min}$	Valor mínimo imposto pela rede (usualmente 0,95 p.u.)
$x_i$	Posição da chave na rede restaurada
$x_{io}$	Posição da chave imediatamente depois da falta isolada
$x_k$	Estado do ramo
$Z_C$	Possíveis combinações dos setores fora de serviço
$Z_{C_k}$	Conjunto de $k$ setores adjacentes delimitados por duas ou mais chaves, sendo ao menos uma delas de interligação
$Z_R$	Somatório das impedâncias de ramo entre a subestação e a chave de interligação do alimentador

# Lista de Siglas e Abreviaturas

AAL	Agente Alimentador
ACL	Agent Communication Languages
AD	Agente Dispositivo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AS	Agente Subestação
BFS	Backward Forward Sweep
CF	Chave Fusível
CM	Chave Manual
CR	Chave Remota
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DF	Directory Facilitator
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
IED	Intelligent Electronic Devices
IEEE	Institute of Electrical Electronics Engineers
JADE	Java Agent Development Environment
LGPL	Lesses General Public License
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
POO	Programação Orientada a Objetos
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
RA	Religador Automático
SD	Sistema de Distribuição
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMA	Sistema Multiagente
SU	Seccionadora Unipolar
UML	Unified Modeling Language



# Capítulo 1

## Introdução

Os Sistemas de Distribuição (SDs) representam a conexão final entre utilitários e consumidores, os quais são de importância inquestionável no cotidiano da população. Tradicionalmente, o SD é projetado com configuração em malha, mas opera de forma radial, com baixo custo e com sistema de proteção e coordenação afetados pela falta de investimento. Na prática, essas características resultam em baixa confiabilidade, o que não deveria acontecer devido a importância do SD. A ocorrência de uma falha em um componente qualquer da rede pode ocasionar uma interrupção na continuidade de serviço a todas as cargas a jusante deste ponto. Devido a esta fragilidade, os responsáveis pelo SD buscam novas tecnologias para agregar estes recursos as redes existentes, objetivando ampliar sua confiabilidade (Zidan, Khairalla, Abdrabou, Khalifa, Shaban, Abdrabou, Shatshat & Gaouda, 2017; Junior, Cossi, Contreras & Mantovani, 2014; Kavousi-Fard & Niknam, 2014; Coelho, Rodrigues & Silva, 2004).

As estatísticas mostram que a maioria das falhas nas redes de distribuição ocorrem por motivos como clima, desgaste de componentes e acidentes. Dependendo da duração da interrupção, a ausência no fornecimento de energia pode causar impactos negativos, sejam econômicos e/ou sociais. Dentre estes impactos, pode-se destacar a perda de produtividade em uma indústria, deterioração de matéria-prima que necessita de controle de temperatura, temperaturas desconfortáveis no trabalho e em ambientes de lazer, risco à saúde e segurança, entre outros (Linares & Rey, 2013).

De forma resumida, diante de um evento que resulte em uma falha na rede de distribuição, o sistema de proteção é acionado, levando ao bloqueio caso seja permanente. Na sequência, inicia-se o processo de localização desta falha para que possa ser isolada. Neste momento, concluída a isolação, o ramal de alimentação encontra-se dividido em duas partes, montante e jusante à falha. Na parcela localizada a montante, encontram-se as áreas energizadas, enquanto a jusante, as áreas fora de serviço. Sob essa situação, a rede se encontra em situação de emergência. Desta forma, é de interesse para as distribuidoras restaurarem as cargas prejudicadas, de preferência, em curto intervalo de tempo (Souza, 2015; Sperandio, 2008).

Desta forma, a rede necessita de uma resposta rápida, ou seja, uma ação corretiva para o cenário de emergência. Esta resposta rápida, surge devido às exigências impostas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as quais as distribuidoras de energia elétrica estão

sujeitas, visando manter um padrão de qualidade na prestação de serviço. A avaliação da qualidade de entrega de serviço pode ser verificada através dos indicadores coletivos de qualidade de energia (ANEEL, 2018). Os índices de confiabilidade são comumente usados para avaliar interrupções e o desempenho de sistemas elétricos. Índices como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) fornecem um indicador abrangente da confiabilidade do sistema de distribuição. Esses índices incluem interrupções sustentadas, que são definidas como interrupções com duração superior a 3 minutos (Souza, 2015).

Uma rede de distribuição automatizada pode reduzir o número de interrupções sustentadas, bem como acelerar a localização e isolação da falha após a desenergização do alimentador (Ghorbani, 2014). No entanto, as redes atuais são parcialmente automatizadas. Desta forma, parte do processo de restabelecimento de energia ainda é manual, o que implica diretamente na qualidade do serviço (Zidan et al., 2017). Como resultado, as distribuidoras estão investindo em soluções automatizadas.

Uma revisão na literatura mostra que a maioria dos trabalhos consideram dois estágios no processo de restabelecimento de energia dos SDs, sendo o primeiro estágio para detecção e isolamento de faltas, e o segundo estágio para restabelecimento do serviço de forma independente (Zidan & El-Saadany, 2012). As abordagens propostas, em sua maioria, apresentam funcionalidade centralizada, o que pode ser uma desvantagem. Cabe ressaltar que os sistemas centralizados estão sujeitos a complexidade, incerteza e desafios que surgem a medida que novas tecnologias são acrescentadas as redes atuais, como, por exemplo, a penetração de recursos de energia renovável, automatização da rede e a comunicação desses componentes, novas cargas (veículos elétricos, etc.), aumento de dispositivos armazenadores de energia e demanda variável (Zidan et al., 2017).

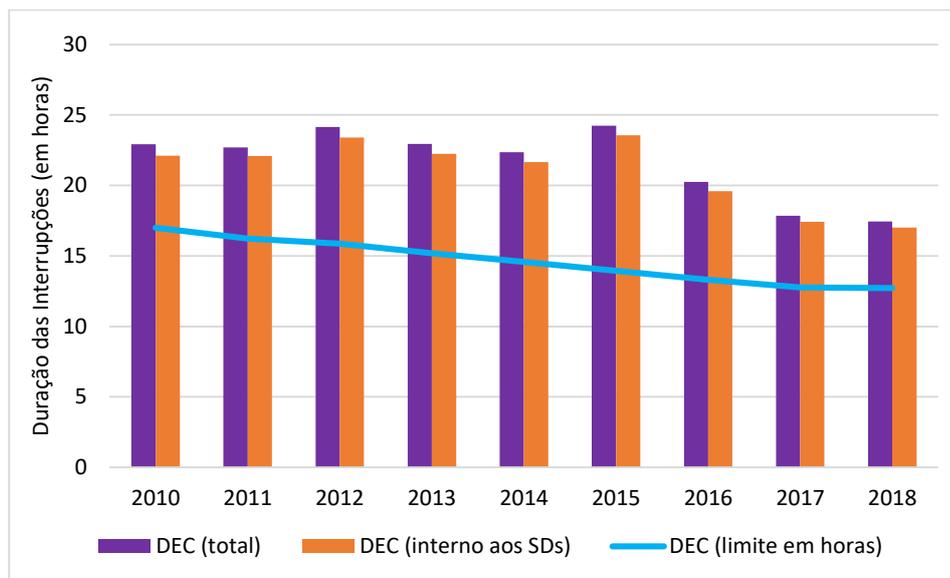
A implementação de sistemas centralizados que atendam as funcionalidades de operação das futuras redes é um ponto em discussão pela comunidade científica, sendo constantemente confrontadas por suas limitações. Desta maneira, a literatura especializada vem apostando nos controles descentralizados e distribuídos porque estes, em suas essências, prometem atender a todas as expectativas (Campos, Figueroa, Oyarzún & Baeza, 2018; Refaat, Mohamed & Kakosimos, 2018; Torres, Ferreira & Aoki, 2018; Leite & Mantovani, 2017; Moradi, Razini & Hosseinian, 2016; Elkhatib, Ahmed, Elshatshat, Salama & Shaban, 2015).

Diante disso, o presente trabalho propõe desenvolver um sistema automático para o restabelecimento das cargas fora de serviço através de uma modelagem baseada em sistemas multiagentes. Este modelo aborda as etapas sequenciais de restabelecimento de energia e questões práticas de interesse de distribuidora em que foram elaboradas as ações de cada agente, possuindo como premissa a aplicação de um plano estratégico para o restabelecimento de energia com possibilidade de corte de carga, o qual aborda o mapeamento das áreas fora de serviço, a avaliação da capacidade de suprimento de cada alimentador e a maximização das cargas restauradas através de chaveamento.

## 1.1 Justificativa

No Brasil, conforme dados da ANEEL (ANEEL, 2018), o total de duração das interrupções (tempo médio) registradas no ano de 2018 foi de 17,45 horas, considerando as mais de 82,1 milhões de unidades consumidoras atendidas em território nacional. Deste total, apenas 0,44 horas correspondem a duração das interrupções causadas externamente aos SDs, enquanto 17,01 horas são originadas internamente aos SDs. Isto significa que 97,47% da duração das interrupções ocorridas em todo o Sistema Elétrico de Potência (SEP), possuem como origem eventos decorrentes nos SDs. No caso da frequência, por unidade consumidora, foram registradas um total de 8,76 interrupções (no mesmo ano), sendo 8,07 correspondentes as interrupções causadas internamente aos SDs. Estes dados indicam que 92,12% da frequência com que ocorre as interrupções no SEP foram originadas por eventos decorrentes dos SDs.

As Figuras 1.1 e 1.2 apresentam, respectivamente, os indicadores DEC e FEC, conforme dados apresentados pela ANEEL.

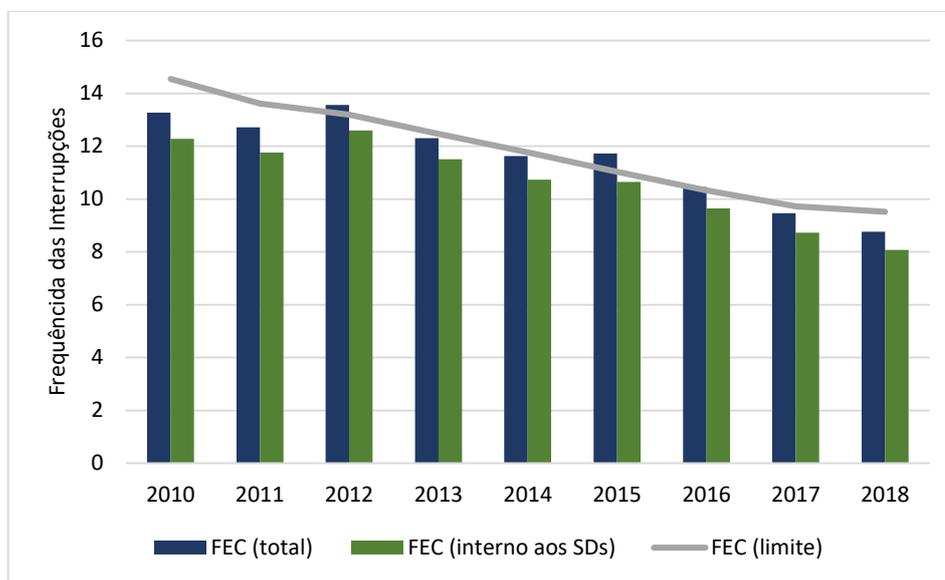


**Figura 1.1:** Resultados de DEC no período de 2010 a 2018.

A partir de dados que comprovam a vulnerabilidade existente nos SDs, há um crescente interesse dos agentes reguladores, pesquisadores e distribuidoras de energia elétrica em estudos que buscam contribuir com a redução dos índices DEC e FEC. Este crescimento tem sido potencializado à medida que a ANEEL impõe índices de qualidade cada vez mais desafiadores.

Neste contexto, as buscas por melhorias na qualidade de serviço continuam intensivamente, seja por práticas e processos, ou desenvolvimento e adoção de novas tecnologias. Neste sentido, diversos métodos têm sido propostos de modo a obter uma ferramenta computacional para auxiliar no processo, dentre os quais, por exemplo, destacam-se os baseados em sistemas especialistas (Liu, Lee & Venkata, 1988), heurísticas (Aoki, Nara, Itoh, Satoh & Kuwabara,

1989; Morelato & Monticelli, 1989; Hsu, Huang, Kuo, Peng, Chang, Chang, Yu, Chow & Kuo, 1992), meta-heurísticas (Kumar, Das & Sharma, 2008) e algoritmo evolucionário multi-objetivo (Camillo, Fanucchi, Romero, de Lima, da Silva Soares, Delbem, Marques, Maciel & London, 2016). Estes métodos, contudo, apresentam diferenças, principalmente no modelo de otimização utilizado, questões práticas consideradas e a forma de representação do SD. Em relação aos resultados, diferentes métodos implicam em diferentes soluções que, segundo Zidan & El-Saadany (2012), pode afetar a qualidade do serviço. Isto demonstra que o problema de restauração, embora tenha sido alvo de diversos pesquisadores, continua sendo uma linha de pesquisa ativa. Isso acontece porque ainda representa um grande desafio, tanto nas questões de otimização do problema quanto nas definições dos aspectos a serem considerados e forma de avaliação dos resultados (Refaat et al., 2018; Zidan et al., 2017).



**Figura 1.2:** Resultados de FEC no período de 2010 a 2018.

Sendo assim, os interessados na melhoria do serviço vêm adotando conceitos como *Smart Grids*, incentivando o desenvolvimento de pesquisas e aquisição de tecnologias com propriedades telecomandadas (Zidan et al., 2017), possibilitando executar funções automáticas (Torres et al., 2018), capazes de, automaticamente, reagir diante de situações de contingência em um curto intervalo com alto grau de precisão (Campos et al., 2018).

De acordo com Amin & Wollenberg (2005), para introduzir “inteligência” nos SDs é preciso uma unidade de processamento associada a cada componente do sistema, dispendo de sensores para monitorar as condições do ambiente em atuação, mantendo a comunicação e a cooperação entre os elementos. Conforme o grau de inteligência atribuído ao equipamento, este possui a capacidade de reagir conforme a mudança no ambiente inserido de modo a atingir seus objetivos, formando uma plataforma de processamento distribuído (El-hawary, 2014). Dito isso, conforme o respectivo avanço, em algum momento haverá uma mudança na hierarquia centralizada para uma versão descentralizada (Muhanji, Muzhikyan & Farid, 2018).

Diante desta perspectiva, aliada ao tempo necessário para a respectiva implementação, uma única rede de distribuição contemplará diversos equipamentos das mais variadas gerações de tecnologias e fabricantes distintos. Frente a esta observação, controlar e monitorar as grandezas elétricas envolvidas no processo de distribuição de energia, em vista ao cenário de *Smart Grids*, será um imenso desafio (Zidan et al., 2017; El-hawary, 2014).

Sistemas atuais operam em uma base de controle centralizada, exigindo, frequentemente, um sistema de comunicação que transfira quantidades potenciais de dados entre os dispositivos de campo e o centro de controle. Como resultado, uma única falha na unidade central pode colocar em risco todo o sistema. Além disso, volumes considerados de dados afetam o tempo de resposta em uma base centralizada, o que pode ser uma desvantagem diante da perspectiva de *Smart Grids*. Neste contexto, vários desafios podem impedir o uso de controle centralizado em redes de distribuição futuras devido ao aumento do nível de incerteza e desafios que o aguardam (Muhanji et al., 2018; Zidan et al., 2017), como, por exemplo, demanda variável, alta inserção de recursos energéticos distribuídos (Elmitwally, Elsaid, Elgamal & Chen, 2015), mudanças nas políticas de mercado (Kotilainen, Mäkinen & Järventausta, 2016), aumento da complexidade dos SDs em vista a automação de seus componentes (Torres et al., 2018) e restauração automática de serviço (Sampaio, Melo, Leão, Barroso & Bezerra, 2017).

Para lidar com esses desafios, os sistemas distribuídos e autônomos com alto grau de inteligência foram e estão, em grande medida, sendo perseguidos pela comunidade científica para aplicação em sistemas de energia (Angioni, Lu, Hooshyar, Cairo, Repo, Ponci, Giustina, Kulmala, Dedè, Monti, Rosario, Vanfretti & Garcia, 2018; Gamarra & Guerrero, 2015). Dentre as técnicas existentes para esse propósito, o Sistema Multiagente (SMA) despertou grande interesse na literatura especializada (Leite & Mantovani, 2017; Moradi et al., 2016), demonstrando ser uma técnica adequada para esta finalidade devido às suas características importantes de autonomia (McArthur, Davidson, Catterson, Dimeas, Hatziargyriou, Ponci & Funabashi, 2007a), visões locais e controle distribuído (McArthur, Davidson, Catterson, Dimeas, Hatziargyriou, Ponci & Funabashi, 2007b), sendo considerada uma das abordagens mais promissoras para o gerenciamento das futuras redes (Santos, 2018).

Pressupondo que uma rede seja completamente automatizada, deverá dispor de recursos totalmente automatizados. Na literatura especializada, os recursos oferecidos por uma rede inteligente estão associados com a capacidade que esta possui em responder e coordenar ações diante de eventos diversos, objetivando corrigir perturbações, minimizar impactos, restaurar a continuidade de serviço e melhorar a estabilidade do sistema durante distúrbios. Afirma-se ainda, que a principal funcionalidade de uma *Smart Grid* é a capacidade de recuperar suas cargas fora de serviço de maneira automática, conhecida como *Self-Healing* pela comunidade científica (Campos et al., 2018; Refaat et al., 2018; Torres et al., 2018). Este termo apresenta como premissa ações corretivas automáticas que, no contexto de restabelecimento de energia, coordena e executa ações de modo a minimizar a duração das interrupções bem como recuperar as cargas fora de serviço em favor da confiabilidade geral do sistema (Sampaio et al., 2017).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Geral

O objetivo deste trabalho é implementar uma estratégia multiagente para o problema de restabelecimento de energia dos SDs.

### 1.2.2 Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Estudar as redes de distribuição, os elementos que a constituem e os limites operativos que definem a qualidade de serviço de um sistema típico para, a partir destes conhecimentos prévios, direcionar a pesquisa de modo a obter uma compreensão aprofundada referente aos conceitos envolvidos no problema de restabelecimento de energia dos SDs;
- Estudar os conceitos envolvidos nos SMAs bem como questões complementares para o seu entendimento, como, por exemplo, características básicas, benefícios e desafios e padrão operacional de aplicação;
- Estudar a Programação Orientada a Objetos (POO) e o *framework* denominado *Java Agent Development Environment* (JADE);
- Definir as regras, as ações e o ambiente de atuação de cada agente, através da análise de relatórios técnicos e diretrizes operacionais aplicadas no problema de restabelecimento de energia dos SDs;
- Implementar um protótipo computacional multiagente utilizando o *framework* JADE com o propósito de, através da comunicação e cooperação, restabelecer o serviço de entrega de energia dos SDs.

## 1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação está dividida em seis capítulos. No Capítulo 1 é apresentado uma introdução ao assunto, contextualizando o problema de pesquisa em que, a partir do material levantado, foram destacados a importância e a justificativa de estudos direcionados para este problema. Por fim, foram estabelecidos os objetivos geral e específico deste trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma abordagem ilustrativa do problema de restabelecimento

de energia, seguida de uma revisão bibliográfica do estado da arte.

O Capítulo 3 apresenta os conceitos envolvidos em Sistemas Multiagentes, que são utilizados como base para desenvolvimento da estratégia proposta. Entretanto, para permitir uma compreensão completa desse método, são apresentadas algumas definições, padrões operacionais, características básicas, benefícios e desafios de implementação e, por fim informações sobre a aplicabilidade dessa técnica no problema de restabelecimento de energia dos SDs.

No Capítulo 4 é apresentado o método proposto para restabelecimento, descrevendo sua modelagem. Também é apresentada a formulação matemática para o problema de restabelecimento de energia em SDs, com base na representação da topologia dos SDs através de grafos.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos e as análises estabelecidas com as simulações dos sistemas testes obtidos na literatura especializada e no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões.



## Capítulo 2

# O Problema de Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição

### 2.1 Introdução

No Capítulo 1, destacou-se a importância dos estudos voltados para o SD, visto que a maioria dos problemas ocorridos no SEP estão no SD. Sendo este, a parte mais vulnerável do SEP. Esta informação pode ser verificada através dos indicadores coletivos de continuidade DEC e FEC, disponibilizados pela ANEEL (ANEEL, 2018).

Por mais que se invista em estudos que buscam a redução dos desligamentos, as interrupções são inevitáveis e na maioria das vezes imprevisíveis. Sendo assim, é imprescindível um mecanismo que restaure as cargas fora de serviço (Marques, Delbem & London, 2018).

Desta maneira, este capítulo apresentará o conteúdo necessário para o entendimento do processo de restabelecimento de energia dos SDs. Para isso, serão apresentadas algumas definições básicas do SD, sendo, a partir destas definições, direcionado para o problema de restabelecimento de energia das redes de distribuição. Como demonstrativo desses conceitos, ao final do capítulo será apresentado um exemplo ilustrativo do problema, cujo embasamento teórico é resultado da revisão bibliográfica realizada ao longo do trabalho.

Cabe ressaltar que o problema aqui tratado destaca a estratégia de restabelecimento de energia. Isso porque a complexidade do problema pode facilmente ser ampliada quando se aprofunda cada etapa que constitui a solução do problema. Em outras palavras, uma abordagem minuciosa em cada etapa do problema foge do escopo deste.

### 2.2 Aspectos gerais dos SDs

O SD brasileiro é regulado por um conjunto de regras dispostas em resoluções da ANEEL e no documento intitulado como Procedimentos de Distribuição (PRODIST), que normatizam e padronizam as atividades técnicas do funcionamento e desempenho dos SDs. Os SDs corres-

pondem a uma parcela do SEP, sendo dividido em cinco grupos, apresentados a seguir:

- Sistemas de Subtransmissão;
- Subestações de Distribuição;
- Sistemas de Distribuição Primário;
- Estações Transformadoras;
- Sistemas de Distribuição Secundário.

Dentre as divisões do SD, em particular o Sistema de Distribuição Primário, este constitui de um conjunto de equipamentos que visam a operabilidade da rede, que podem alterar a topologia do sistema. Essas observações são necessárias para uma compreensão inicial do problema de restabelecimento de energia.

### 2.2.1 Elementos presentes em um SD

Para compreender o problema de restabelecimento de energia, seja do ponto de vista prático ou teórico, deve-se, inicialmente, discriminar os elementos existentes em um SD, como ilustrado pela Figura 2.1. Cabe destacar que esta figura é apenas um ilustrativo, sendo que, em casos reais, os equipamentos que a constituem são das mais variadas gerações de tecnologia e fabricantes.

Observe que a Figura 2.1 ilustra um SD, apresentando apenas os principais elementos de um sistema típico. Tais elementos são apresentados a seguir:

- Barras: representadas por pequenos círculos preenchidos em preto. Cada barra possui uma identificação (numeração), que podem ser de dois tipos, barra de carga ou barra de passagem. A barra de carga representa os consumidores alimentados diretamente pelo Sistema de Distribuição Primário bem como os transformadores que derivam a distribuição secundária. A barra de passagem não necessariamente representa a presença de consumidores, mas pontos de conexão ou divisão da rede;
- Subestação: representada por duas linhas ligadas por intermédio de dois círculos sobrepostos;
- Chaves: tipicamente existem diferentes tipos de chaves, representadas por círculos ou por quadrados. As chaves ilustradas por quadrados possuem sua forma de operação tripolar enquanto as ilustradas por círculos são de operação monopolar. Quando preenchidos na cor verde representam o estado normalmente aberto (NA) enquanto na cor roxa o estado normalmente fechado (NF), válido para ambos os formatos, ou seja, círculos e quadrados. Convencionalmente, uma rede contém as seguintes chaves: Chave Manual (CM), Chave

Remota (CR), Religador Automático (RA), Seccionadora Unipolar (SU) e Chave Fusível (CF).

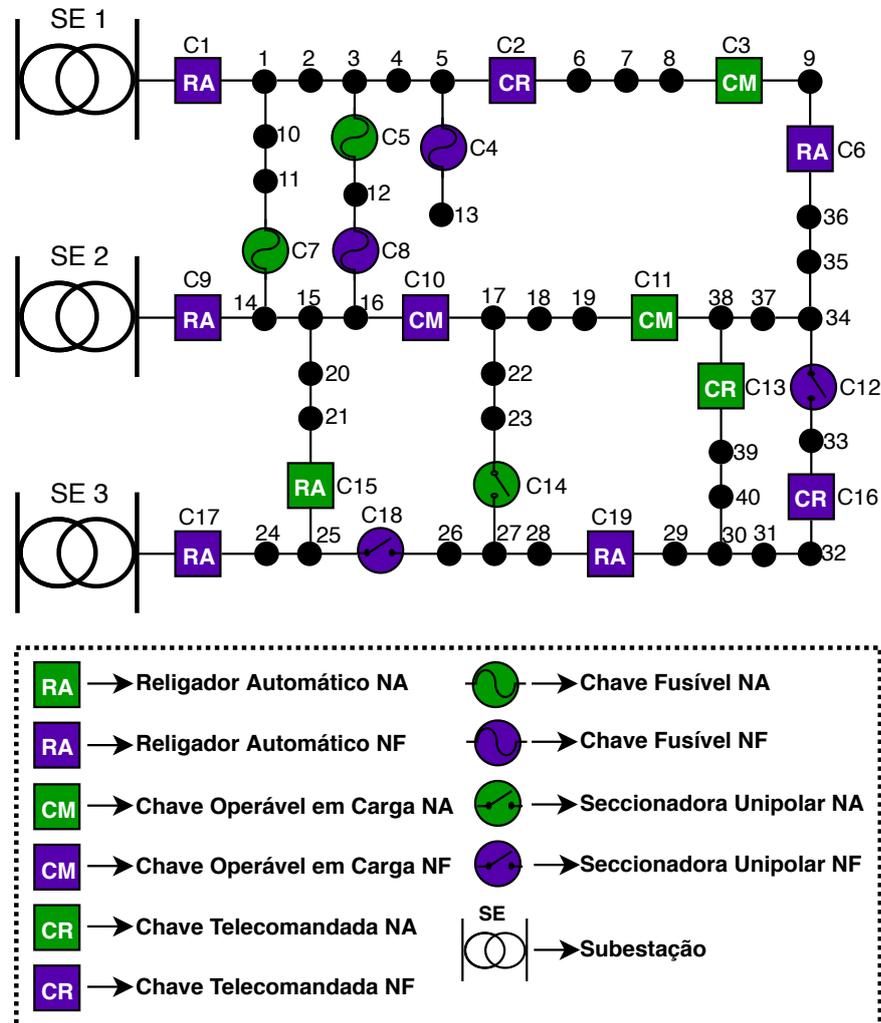


Figura 2.1: Exemplo de uma rede de distribuição típica.

## 2.3 Reconfiguração de redes para a obtenção do plano de resta-belecimento nos SDs

Identificados os elementos presentes em um SD, o próximo passo é detalhar o processo de reconfiguração a partir destes elementos. Neste sentido, o problema de reconfiguração de redes consiste em procurar uma topologia de forma a otimizar alguma função objetivo, sendo descrito por um conjunto de restrições, as quais representam os limites físicos e operacionais do SD (Cardozo, 2015).

Uma revisão bibliográfica mostra que os conceitos de reconfiguração de redes possuem vasta aplicabilidade, de acordo com os objetivos do projetista. Por definição, a reconfiguração

consiste em encontrar uma topologia que visa melhorar a operação da rede (Timossi, 2016). Tipicamente aplicada na correção do perfil de tensão, na busca por uma topologia que visa reduzir as perdas e, nos estudos de planejamento e expansão de rede (Cardozo, 2015). Já a estratégia de restabelecimento de energia, também é um dos objetivos em que os conceitos de reconfiguração de redes podem ser aplicados (Sampaio et al., 2017; Yuan, Illindala & Khalsa, 2017; Zidan et al., 2017),

Para um melhor entendimento, considere a ocorrência de um evento em que seja categorizado como permanente. Diante disso, o dispositivo de proteção é acionado e vai a bloqueio, ocasionando uma interrupção no fornecimento de energia as cargas localizadas a jusante deste equipamento (devido ao fato de os SDs operarem usualmente de forma radial) (Ledesma, 2012). Neste instante, o ramal de alimentação se encontra dividido em duas partes, montante e jusante (Chen, 2010; Junior, 2008). Na parcela localizada a montante encontram-se os setores energizados enquanto a jusante os setores fora de serviço. A parcela à jusante contém ainda uma outra subdivisão, uma referente ao setor em falta e a outra referente aos setores saudáveis situados após o setor em falta, sendo estes, aptos a serem restaurados (Souza, 2015). Os setores são definidos como agrupamento de vários pontos de carga em blocos, os quais possuem limites de extensão separados por chaves em estado aberto ou fechado.

Diante da presente situação é elaborada uma estratégia de restabelecimento que permita o isolamento do setor em falta e o restabelecimento do maior número possível de setores saudáveis. Em relação ao setor em falta, seu restabelecimento ocorrerá apenas com a devida manutenção. Portanto, este deve ser localizado e isolado para que as atividades de manutenção sejam efetivadas. Em relação aos demais setores, estes não precisam permanecer fora de serviço durante o tempo de manutenção do setor isolado. Uma vez que existe a possibilidade de restaurar o fornecimento de energia aos setores saudáveis por meio da reconfiguração da rede (Taleski & Rajjicic, 1997), isto é, manobrando as chaves disponíveis sem violar os limites operacionais (Zidan, 2013). Esta estratégia que busca alternativas para transportar energia aos consumidores prejudicados, nisso consiste o problema de restabelecimento de energia dos SDs (Ghorbani, 2014; Chen, 2010; Kumar et al., 2008; Nagata & Sasaki, 2001; Hsu et al., 1992).

No entanto, a elaboração da estratégia mencionada não é trivial. Isso porque, dependendo do cenário da falta, das condições de carregamento da rede e da quantidade de carga a ser transferida, é possível que haja o descumprimento de alguma restrição operacional por esta nova configuração (Zidan & El-Saadany, 2011; Carreno, Moreira & Romero, 2007). Desta maneira, no caso de violação em alguma restrição, podem ser necessárias manobras adicionais nas chaves para que as restrições sejam satisfeitas (Curcic, Ozveren, Crowe & Lo, 1995).

Em resumo, a reconfiguração é utilizada no processo de restabelecimento de energia, em que atribui-se o conceito às mudanças topológicas na rede original através da operação de chaveamento de modo a isolar o setor em falta, restaurar o fornecimento de energia e, por fim, retornar a topologia original da rede (Lin & Chin, 1998; Curcic et al., 1995; Civanlar, Grainger, Yin & Lee, 1988).

### 2.3.1 Restrições operativas

Compreendido que o restabelecimento de energia é uma função objetivo da reconfiguração de redes, esta subseção busca esclarecer algumas das complicações que uma alteração na topologia original pode gerar no SD durante o processo de restabelecimento de energia. Do ponto de vista técnico, para que o fornecimento de energia seja considerado de qualidade, algumas grandezas físicas devem permanecer nas faixas regimentadas pelos órgãos reguladores (Souza, 2015). Essas grandezas são denominadas de restrições do sistema e o descumprimento de uma única restrição caracteriza uma operação precária.

Os SDs aéreos por exemplo, normalmente operam com topologia radial, sendo assim, a radialidade é uma condição operacional e deve ser devidamente respeitada. Nos modelos matemáticos, sua representação ocorre por meio de equações ou inequações algébricas, e no caso das técnicas heurísticas, por meio da codificação algorítmica. No entanto, nas técnicas heurísticas, a restrição de radialidade geralmente dificulta o tratamento do problema de restabelecimento de energia, isso porque são necessárias estratégias eficientes para atender esta condição (Sousa, 2013).

Além disso, outras questões também são relevantes. Por exemplo, para evitar sobrecarga deve ser considerada a capacidade máxima de fluxo de corrente nos equipamentos e condutores. Adicionalmente, deve haver também o correto equilíbrio entre geração e consumo de energia elétrica. Deste modo, a capacidade de fornecimento das subestações também precisa ser considerada, inclusive níveis de tensão adequados, preestabelecidos pela qualidade de energia segundo a legislação aplicável (Neto, 2011; Tian, Lin, Zhang & Xu, 2009; Toune, Fudo, Genji, Fukuyama & Nakanishi, 2002).

Em condições normais de operação, as restrições estão sendo cumpridas, porém, em situações críticas, estão sujeitas a violação (Curcic et al., 1995). Por exemplo, durante o processo de restabelecimento o SD está sujeito a dois conjuntos de restrições: a restrição de carga e as restrições físicas e operacionais. A primeira exige o atendimento à demanda de carga dos consumidores, portanto, é atendida se os consumidores estão recebendo energia elétrica, sendo assim, está relacionada à geração e consumo de energia elétrica (Morelato & Monticelli, 1989). Logo, as interrupções de serviço imediatamente provocam o descumprimento desta restrição, passando a não ser mais atendida em sua totalidade. Neste cenário, parcela do sistema não recebe o fornecimento de energia, portanto, o sistema necessita de medidas restaurativas (Curcic et al., 1995). Durante o processo restaurativo, o sistema fica vulnerável, desta maneira, a falta permanente precisa ser isolada sem comprometer outras unidades consumidoras. Adicionalmente, dependendo das condições de carregamento e do cenário de falta, o pleno restabelecimento do sistema pode implicar no descumprimento de restrições físicas e operacionais (Sampaio et al., 2017).

Uma topologia que descumpra uma única restrição é considerada inviável. Em proble-

mas reais, podem ser encontradas diversas soluções, portanto, devido a este alto número de possibilidades (relacionadas ao número de chaves), existe uma probabilidade de a estratégia de restabelecimento propor uma solução infactível. Adicionalmente, esta topologia de solução pode gerar outras falhas na rede, o que implica na adição de novas manobras para contornar o problema. Nesta situação, o processo de restabelecimento precisa ser reiniciado (Junior et al., 2014). Como observação final, o corte de carga ou o não restabelecimento de cargas desligadas também é uma opção, porém, em último caso (Souza, 2015).

### 2.3.2 Restabelecimento de redes de energia

O restabelecimento de energia é um processo que busca uma solução para as cargas fora de serviço, as quais foram prejudicadas em virtude de uma falta ocasionada na rede. Adicionalmente, devido ao cenário de emergência, as agências reguladoras impõem severas penalizações para essa situação, portanto, espera-se que a atividade de restabelecimento de energia seja efetivada em um curto intervalo de tempo (Neto, 2011).

No entanto, a expectativa diverge da realidade, isso porque geralmente na presença de um evento que prejudique o suprimento de energia elétrica, espera-se que a continuidade de serviço seja restabelecida rapidamente, o que normalmente não acontece na prática. Tradicionalmente, para restabelecer a rede após uma falta, a distribuidora responsável disponibiliza uma equipe a campo de modo a isolar a área afetada e restaurar o sistema através de uma sequência de manobras utilizando as chaves espalhadas ao longo da rede. Este processo, normalmente manual, demanda tempo e custos operacionais expressivos (Kleinberg, Miu & Chiang, 2011; Chen, 2010; Tian et al., 2009).

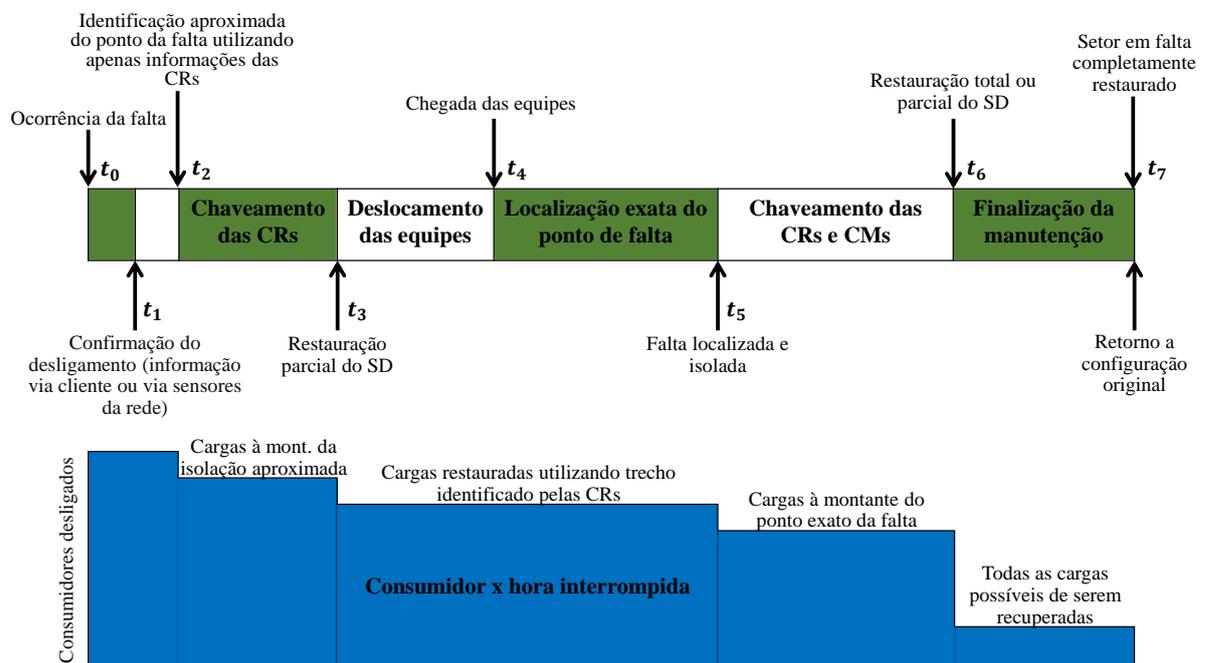
Nesse sentido, uma solução encontrada para melhorar os indicadores de continuidade do sistema, sem incorrer em gastos excessivos, foi a fragmentação da rede em pequenas parcelas, ou seja, agrupando vários pontos de carga em blocos, chamados na literatura científica de setores (Sanches, Junior & Delbem, 2014; Chen, 2010; Shin, Kim, Kim, Choo & Singh, 2004). Estes setores possuem limites de extensão, sendo separados por chaves em estado aberto ou fechado. Sendo assim, através do conceito de reconfiguração de redes (Campos et al., 2018; Botea, Rintanen & Banerjee, 2012; Chen, 2010; Shirmohammadi, 1992; Aoki et al., 1989; Liu et al., 1988), é possível isolar trechos da rede em defeito e realizar a troca de cargas de setores saudáveis entre alimentadores e subestações.

O processo de restabelecimento de energia não é uma tarefa fácil. Isso porque, conforme apresentado pela Figura 2.1 (Subseção 2.2.1), o SD atual é parcialmente automatizado, portanto, algumas operações são manuais enquanto outras automáticas. Isso faz com que certas atividades demandem tempo, o que contribui em uma contabilização negativa dos índices DEC e FEC. Neste contexto, as distribuidoras de energia e interessados estão buscando alternativas na automação e monitoramento dos SDs para melhorar a qualidade no fornecimento de energia

e disponibilidade do serviço (Souza, 2015).

## Etapas do processo de restabelecimento

Conhecida a aplicação dos conceitos de reconfiguração de redes no problema de restabelecimento de energia, é importante conhecer de forma geral como tratar o problema diante de uma abordagem cronológica. Sendo assim, esta subseção apresentará a divisão do problema em etapas sequenciais e distintas, baseando-se nos trabalhos de Zidan et al. (2017) e Ghorbani (2014). A Figura 2.2 ilustra a sequência das atividades a serem executadas.



**Figura 2.2:** Etapas do processo de restabelecimento.

Fonte: Adaptado de Zidan et al. (2017).

Antes de contextualizar as etapas e a respectiva sequência com que devem ser executadas, alguns conceitos precisam ser definidos. Estes conceitos também foram extraídos dos trabalhos de Zidan et al. (2017) e Ghorbani (2014), bem como de (Curcic et al., 1995), sendo apresentados a seguir:

- Identificação do local de falta:** os SDs estão sujeitos à diferentes cenários de falta, sendo em muitas ocasiões inevitáveis e imprevisíveis. Portanto, a rede deve estar preparada para localizar o local defeituoso, mesmo que sua origem não possa ser identificada. Esta atividade pode ocorrer através de sinalizadores, ou seja, equipamentos instalados ao longo do alimentador que contribuem como indicadores de falta, sendo, por exemplo, obtidos com a leitura das chaves remotas e de equipamentos específicos para sinalização, ou ainda através da inspeção visual das equipes a campo. Analisando a Figura 2.2, a identificação

do local de falta ocorre em dois momentos distintos: em  $t_2$ , utilizando somente informações dos indicadores (localização aproximada), e em  $t_5$ , utilizando informações das equipes a campo (localização exata);

- **Isolação da falta:** através da análise da topologia da rede e das diretrizes impostas pela distribuidora responsável, os operadores conseguem identificar o ponto de falta. Na primeira ação aplicada, o ponto localizado é abrangente, ou seja, a região isolada contém o setor em falta bem como alguns setores vizinhos. Isso ocorre porque na primeira manobra usam-se apenas chaves remotas na isolação, que, normalmente, estão consideravelmente afastadas uma das outras. Posteriormente o ponto exato da falta é encontrado. Este feito normalmente ocorre através de uma inspeção minuciosa pelas equipes a campo. Para facilitar o entendimento dessas notações, observe que na Figura 2.2 a isolação da falta ocorre em dois momentos distintos: em  $t_2$ , considerando somente a abertura de chaves do tipo remota, e em  $t_5$ , utilizando as chaves mais próximas do local da falta, indiferente do seu tipo;
- **Estimação da capacidade do SD:** estimar a capacidade do SD significa prever a variação de demanda para que a transferência de carga entre os alimentadores não viole as características operacionais do SD. Cabe destacar que a topologia obtida com a estratégia de restabelecimento é uma solução temporária, portanto, deve suportar a variação de demanda durante um período limitado, tempo necessário para que seja efetivado as atividades de manutenção no setor defeituoso. A Figura 2.2 ilustra a estimação de capacidade do SD, a qual ocorre após a isolação da falta e antes da realização das manobras para o restabelecimento dos setores saudáveis que foram desligados;
- **Restabelecimento de Energia:** identificado e isolado o setor em falta, o operador deve restabelecer a maior parte possível do SD sem violar os limites operacionais do sistema. Para isso, necessita das informações da estimação da capacidade do SD para então determinar para qual alimentador as cargas desligadas, ou parte delas, deverão ser transferidas. Analisando a Figura 2.2, nota-se que o restabelecimento de energia ocorrem em dois momentos, sendo em  $t_3$ , para os trechos com chaves remotas, e no instante  $t_6$ , para os demais trechos do SD;
- **Retorno à configuração original:** concluída a manutenção do setor em falta, a rede pode retornar à configuração original. Este passo ocorre de tal forma que, ao seu final, todas as chaves estejam em sua posição original, ou seja, anterior à ocorrência da falta (configuração pré-falta).

Compreendido os conceitos apresentados, a seguir serão apresentadas as etapas sequenciais do processo de restabelecimento de energia, conforme mencionado anteriormente:

- **Etapa 1 - Identificação e isolação da falta:** o processo é iniciado no período entre  $t_1$  e  $t_2$ , compreendendo a identificação e isolação do trecho em falta. Neste primeiro passo, as

atividades corretivas utilizam informações de leitura obtidas com os dispositivos a campo, para então, a partir da análise destes dados, identificar a região aproximada e operar as chaves remotas mais próximas. Com isso, obtém-se uma isolação aproximada, contendo o setor em falta e os setores saudáveis vizinhos, situados entre as chaves remotas utilizadas na isolação;

- **Etapa 2 - Restabelecimento da energia através de chaves telecomandadas:** etapa realizada no período entre  $t_2$  e  $t_3$ , considerando, unicamente, as topologias provenientes da operação das chaves remotas. Esta etapa, compreende ainda, a atividade de estimação da capacidade do SD para que as manobras não violem alguma restrição;
- **Etapa 3 - Isolação exata da falta:** etapa realizada no período entre  $t_3$  e  $t_5$ , sendo efetivada através da operação das chaves mais próximas, indiferente do tipo. Para que haja sucesso nesta etapa, é necessário fazer uso dos recursos disponíveis e suas combinações, como, por exemplo, sinalização das chaves remotas, indicação dos sinalizadores de rede, informações de consumidores, inspeção visual das equipes de campo, etc.;
- **Etapa 4 - Restabelecimento do restante do SD:** etapa realizada no período entre  $t_5$  e  $t_6$ , compreendendo a atividade de estimação de demanda do SD e o conjunto de manobras para o restabelecimento de todos os possíveis setores, exceto os setores em falta, pois estes retornam apenas com a devida manutenção. Pode ocorrer de alguns setores situados à jusante do setor isolado não possuírem conexão elétrica, ou ainda, quando a capacidade do alimentador vizinho não possa suportar a transferência dessas cargas, portanto, não há meios de recuperá-los;
- **Etapa 5 - Retorno à configuração inicial:** etapa realizada no período após  $t_7$ , o qual compreende as atividades que retornem o SD à configuração original, executadas apenas após a conclusão da manutenção do setor em falta. Cabe destacar que estas manobras não precisam ocorrer imediatamente após a conclusão da manutenção. Isso porque pode acontecer de outras situações necessitarem da atenção das equipes a campo.

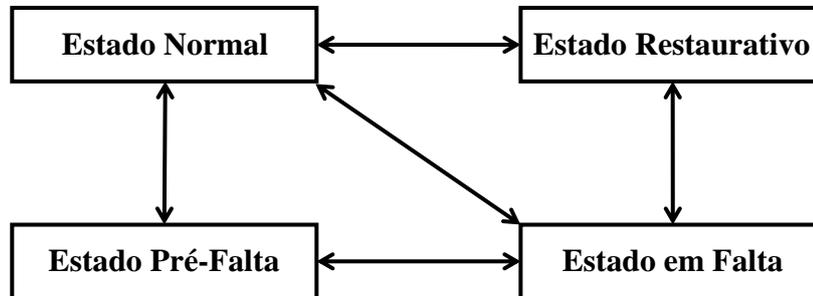
## 2.4 Exemplo ilustrativo

Este exemplo ilustrativo tem como objetivo esclarecer o processo de restabelecimento de energia de acordo com os conceitos que foram apresentados nas seções anteriores.

Para compreender o problema de restabelecimento de energia é preciso descrever os estados de operação do sistema e a representação do mesmo através de grafos. Para isso, em Curcic et al. (1995), o autor relata que para se analisar o problema devem ser considerados quatro estados de operação para o SD, como ilustrado pela Figura 2.3.

O estado normal de operação, conhecido como a configuração usual, ou ainda, a configuração original, segundo Curcic et al. (1995), é aquele pré-estabelecido pelos estudos de pla-

nejamento da distribuidora responsável. Esta configuração visa um estado de eficiência operacional, podendo ainda, priorizar alguns objetivos de interesse pela própria distribuidora, como, por exemplo, uma configuração que atenda a redução das perdas, o equilíbrio de carga entre os alimentadores, entre outros interesses.



**Figura 2.3:** Estados operativos de um SD.

Fonte: Adaptado de Curcic et al. (1995).

Segundo Curcic et al. (1995), um sistema está no estado pré-falta quando as restrições operacionais estão próximas aos limites estabelecidos. Um exemplo aplicado aos SDs, de acordo com a observação do autor, é quando um elemento da rede tende à situação de sobrecarga, podendo ser removido de serviço com a atuação do sistema de proteção. Portanto, quando de fato este elemento é retirado, o sistema entra no estado em falta. Este estado ocorre quando pelo menos um elemento está fora de serviço.

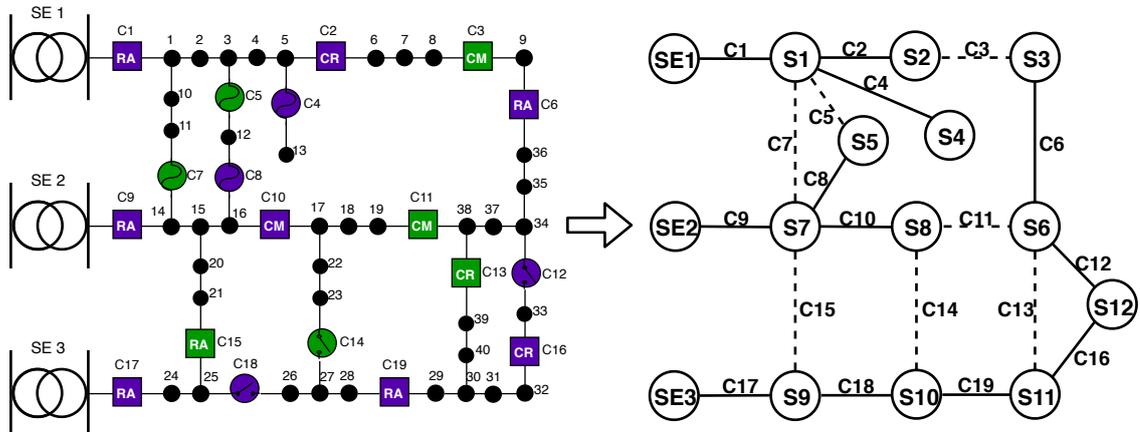
A respeito dos consumidores situados a jusante do elemento removido, na condição de não existir sobrecarga ou algum defeito, podem ser recuperados através da transferência de carga entre os alimentadores. Neste momento, a rede passa a operar no estado restaurativo.

Durante o estado restaurativo, segundo Curcic et al. (1995), a configuração de solução deve ser entendida como temporária, mantendo-se em operação apenas durante o período em que a manutenção é prestada no setor isolado. Concluída a manutenção, o SD pode retornar ao estado normal.

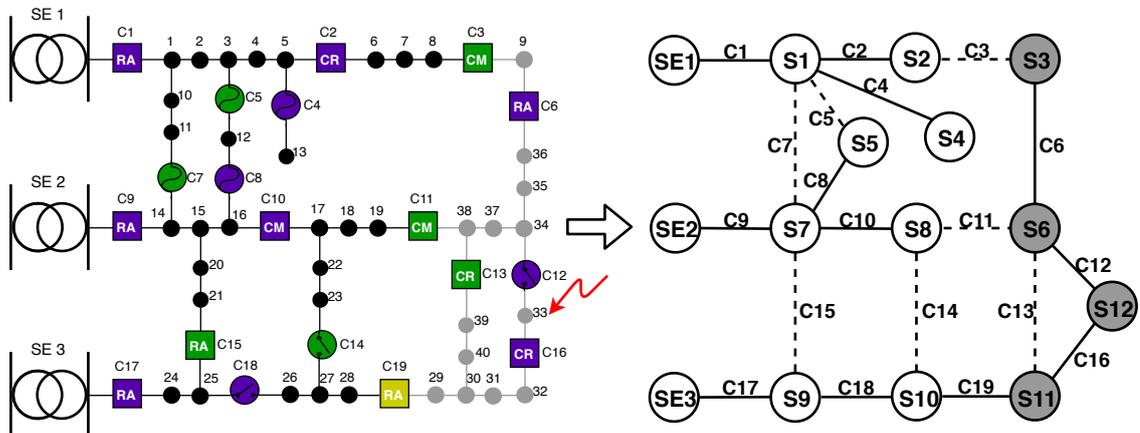
Para problemas que abordam conceitos que manipulam a topologia de rede, o SD pode ser visto como um conjunto de setores interconectados por chaves seccionadoras, sendo comumente representado através de grafos. A Figura 2.4 ilustra essa representação, em que os nós representam os setores e as arestas as chaves seccionadoras. Em relação as arestas, na forma tracejada representam o estado NA enquanto na forma contínua o estado NF.

Para ilustrar o problema considera-se a Figura 2.4 como sendo seu estado normal de operação. Inicialmente, para fins ilustrativos, considera-se a ocorrência de uma falta na barra 33. Nessa situação, o equipamento de proteção mais próximo a montante da falta é o RA C19, o qual atua indo a bloqueio. Nesta condição, o SD entra no estado em falta retirando de serviço todos os setores à jusante do equipamento bloqueado, conforme representada pela Figura 2.5. Observe que na mesma figura a chave com estado alterado é sinalizada através da cor amarela e as seções desligadas estão destacadas na cor cinza. Ainda na mesma figura, o

grafo correspondente apresenta os nós desligados que também são identificados pela cor cinza.



**Figura 2.4:** Exemplo de uma rede de distribuição representada através de grafo.



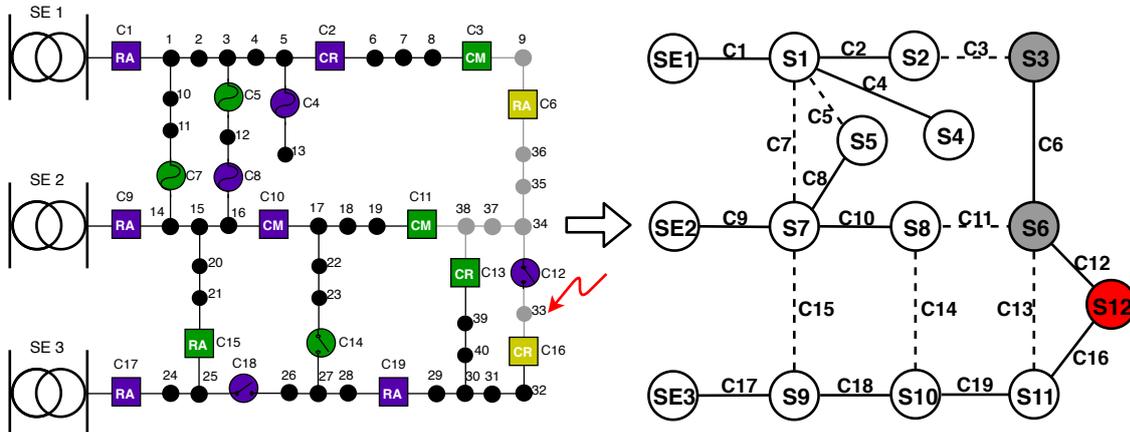
**Figura 2.5:** Representação do SD no Estado em Falta.

A identificação e isolamento da falta, correspondente a etapa 1 do problema, ocorre a partir da sinalização originada pelas chaves remotas. Observe que, para este exemplo, o operador da rede possui apenas a informação de que o religador RA C19 está aberto. Sendo assim, a partir da análise da topologia da rede e normatizações próprias da distribuidora, é identificado que a falta está à jusante de CR C16 e à montante de RA C6, isso porque CR C16 sinalizou a passagem da corrente de falta. Desta forma, efetiva-se a abertura das chaves CR C16 e RA C6 para isolamento da região em falta.

Na sequência, é identificado a existência de uma região saudável à montante de CR C16 e à jusante de RA C19, correspondendo ao setor S11. Neste instante, observe que o setor S11 possui duas opções de conexão, porém, apenas RA C19 é viável. Isso porque CR C13 deve, nesta ocasião, operar junto com CM C11. Isso faz com que o setor em falta seja transferido para a subestação SE2. Sendo assim, o operador comanda o fechamento do RA C19 (não houve a necessidade de estimar a demanda, porque, inicialmente, S11 já pertencia à SE3). Estes passos compreendem a etapa 2 do problema. Neste momento, observe que o SD passa a operar no estado restaurativo, conforme ilustrado pela Figura 2.6. Nesta mesma figura os nós em falta são

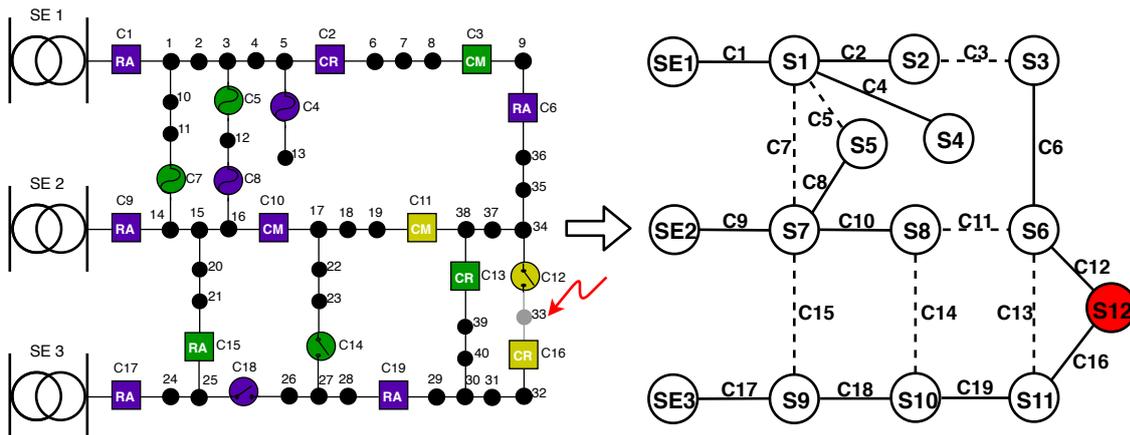
identificados pela cor vermelha.

Em seguida, o operador autoriza a inspeção visual de uma ou mais equipes para os trechos ainda desligados, relativos aos setores S6 e S12. Após a inspeção das equipes, o operador analisa novamente a topologia e ordena a abertura da chave C12, isolando o setor da falta. Estes passos compreendem a etapa 3 do problema.



**Figura 2.6:** Representação do SD no Estado Restaurativo.

Na sequência, o operador identifica o setor S6 e S3 como saudáveis e ainda fora de serviço. Assim, com base na estimativa da capacidade do SD, o operador identifica se há ou não possibilidade de restabelecer o referido trecho e solicita o fechamento das chaves CM C11 e RA C6. Estes passos contemplam a etapa 4 do problema, sendo ilustrada pela Figura 2.7. Observe que somente o setor S12 continua desligado e permanecerá assim até a conclusão da manutenção do defeito.



**Figura 2.7:** Representação do SD no Estado Restaurativo ao final da etapa 4.

Concluída as atividades de reparo no setor S12, o operador solicita a realização de manobras que retornem o SD à configuração normal. Estes passos compreendem a etapa 5 do problema.

Como observação final, cabe destacar que a abordagem ilustrativa buscou tratar o problema do ponto de vista didático. Como observação, ao abordar casos reais presentes nos SDs,

a complexidade do problema de restabelecimento é muito maior quando comparada ao exemplo ilustrativo. Por exemplo, uma quantidade elevada de possibilidades para o restabelecimento, ou ainda, um carregamento elevado nos alimentadores, impossibilitam a realização de manobras diretas. Estes desafios exigem um grande esforço para serem solucionados.



# Capítulo 3

## Sistemas Multiagentes

### 3.1 Introdução

O Capítulo 2 apresentou o problema de restabelecimento de energia dos SDs do ponto de vista didático, dividindo-o em etapas sequencias e distintas, apresentando como principal objetivo a estratégia de restabelecimento de energia. A ideia em analisar diante dessa perspectiva é justamente para que possa ser compreendido a tomada de decisão e extrair, a partir dessas observações, informações que servirão como base para o desenvolvimento deste trabalho.

Entretanto, para obter uma compreensão completa da proposta deste trabalho, deve-se também compreender os conceitos envolvidos em Sistemas Multiagentes (SMAs), uma vez que a proposta deste trabalho é implementar uma estratégia multiagente para o problema de restabelecimento de energia dos SDs. Para isso, o presente capítulo tem como objetivo apresentar estes conceitos, os quais abordam a definição, padrões operacionais, características básicas, benefícios, desafios de aplicação e, por fim, contribuições da literatura referente a aplicação de SMAs no problema de restabelecimento de energia dos SDs.

### 3.2 Definição

Os SMAs são sistemas desenvolvidos sob uma “filosofia de pensamento”, sendo um paradigma para aplicação em sistemas distribuídos, denominado na literatura de Programação Orientada a Agentes (Santos, 2018). Afirma-se ainda, que esse paradigma seria a evolução da Programação Orientada a Objetos. Neste novo paradigma, o componente conhecido como agente é caracterizado por uma série de atributos, dentre os quais se destacam a flexibilidade, extensibilidade, reatividade, interação social e autonomia (Bellifemine, Caire & Greenwood, 2007).

Na literatura, ainda não há um consenso sobre a definição de SMAs, como também não há uma definição para o que seria um agente (Santos, 2018). Isto ocorre devido a sua larga aplicabilidade, atingindo as mais variadas e distintas áreas (Moradi et al., 2016). Para demons-

trar essa diversidade, algumas áreas, como, por exemplo, robótica, jogos eletrônicos, teoria de probabilidades, logística, pesquisa operacional (Barbati, Bruno & Genovese, 2012), estudos sociotécnicos (Nikolic & Ghorbani, 2011), gerenciamento de informações, inovação tecnológica (Ma & Nakamori, 2005), economia e engenharias, fazem uso desta tecnologia.

Embora existam diversas definições para SMAs é possível perceber traços convergentes entre as principais definições encontradas, apontando quase sempre para entidades de *software* ou *hardware* inseridas em algum ambiente com autonomia para reagir e interagir com o mesmo. Entende-se por ambiente toda estrutura externa ao agente, podendo ser físico ou digital, que precisa ser completamente ou parcialmente observável e alterável pelos agentes. A atribuição de autonomia surge devido a característica de um único agente possuir a capacidade de programar e realizar ações com base em observações do ambiente ao qual está inserido (Shoham & Leyton-Brown, 2009; McArthur et al., 2007a; Wooldridge, Jennings & Kinny, 1999).

O SMA é uma área de estudo voltada para aplicações de controle com característica distribuída, portanto, não necessitam de uma “central” para tomar as decisões. Isso porque cada agente do sistema opera de forma autônoma. Nas definições encontradas, os agentes apresentam duas características essenciais: serem capazes de agir de forma autônoma tomando decisões de modo a satisfazer seus objetivos e serem capazes de interagir com outros agentes utilizando protocolos de interação social e negociação (Santos, 2018; Melo, 2015; Trujillo, 2010).

Um único agente não traz consigo a representação completa de um sistema, contudo, vários agentes são capazes de descrever todo um sistema. Para alcançar esta representação completa, os arquitetos devem avaliar os objetivos locais de cada agente que, associados uns aos outros, correspondem a essa “intenção maior” (McArthur et al., 2007a). Em outras palavras, cada agente limitado por sua fronteira de atuação, coleta informações locais e realizam suas atividades enquanto se comunicam com outros agentes para realizar o compartilhamento de informações ou solicitar alguma atividade fora do seu ambiente de atuação.

### 3.3 Padrão FIPA

Com o propósito de padronizar alguns aspectos dos SMAs, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) decidiu criar uma organização vinculada com a sociedade de computação do IEEE para gerenciar os detalhes relacionados a padronização, atribuindo-lhe o nome de *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA).

A FIPA, conforme mencionado, é uma organização vinculada ao IEEE que possui como objetivo definir padrões operacionais para as tecnologias baseadas em SMAs. Ela promove um conjunto de tecnologias para diferentes áreas de aplicação para que os desenvolvedores possam integrá-las e criar sistemas complexos com um alto grau de interoperabilidade. Além disso, define outras questões relativas a agentes, como, por exemplo, a comunicação, formato da troca de

mensagens, protocolos de comunicação, arquitetura, gerenciamento, entre outros (FIPA, 2019).

Os documentos da FIPA definem regras que permitem uma sociedade de agente existir, operar e ser gerenciada. A partir desses princípios, a FIPA define um modelo de referência de gerenciamento de agente que define um quadro de trabalho para a criação, registro, localização, comunicação, migração e desativação de agentes. Este modelo contempla elementos essenciais para o funcionamento de plataformas de agentes. Um exemplo de plataforma é o *framework* JADE que segue o padrão FIPA, bastante utilizado nos trabalhos que envolvem SMAs.

### 3.3.1 Framework JADE

O JADE é um *framework* implementado na linguagem Java, o qual disponibiliza um conjunto de recursos que auxiliam e simplificam a implementação de sistemas multiagente através de um *middleware*, assegurando o cumprimento das normas através de um conjunto abrangente de serviços que atende às especificações do padrão FIPA. Possui ainda, um conjunto de ferramentas gráficas que suportam a depuração e implantação dos agentes bem como a interceptação de mensagens ACL (do inglês, *Agent Communication Languages*) e as mostram graficamente usando uma notação semelhante aos diagramas de sequência UML (do inglês, *Unified Modeling Language*) (Bellifemine et al., 2007).

Além da abstração do agente, o JADE fornece um modelo de composição e execução de tarefas simples, como, por exemplo, a comunicação de agente *peer-to-peer* baseada no paradigma de mensagem assíncrona, um serviço de páginas amarelas que fornece um mecanismo de busca por serviços publicados pelos agentes e muitos outros recursos que facilitam o desenvolvimento.

Um SMA implementado em JADE pode ser distribuído entre diversas máquinas, mesmo com sistema operacional diferente, podendo ainda, alterar até mesmo em tempo de execução, movendo agentes de uma máquina para outra, quando necessário.

O JADE é um *software* livre em código aberto, desenvolvido pela Telecom Italia sob os termos e condições da licença LGPL (do inglês, *Lesser General Public License*). Além da equipe dos desenvolvedores, existe uma comunidade onde interessados podem contribuir compartilhando comentários e sugestões bem como expondo correções e outras formas de contribuições.

## 3.4 Características básicas de SMAs

A seguir são apresentadas algumas características comuns atribuídas aos agentes (Bellifemine et al., 2007):

- Podem ser físicos ou virtuais;
- Representação parcial, ou ainda, inexistente do ambiente;
- Objetivos locais, podem ou não serem divergentes;
- Possuem níveis de autonomia;
- Possuem habilidade social, podendo se comunicar uns com os outros coordenando ações e subdividindo atividades.

O conceito de autonomia é visto como a principal característica que torna um agente diferente de outros sistemas, referindo-se quase sempre à capacidade em controlar as próprias ações, o que significa que podem iniciar ou agendar ações. Em Santos (2018), o autor relata que este conceito vai além, exigindo que não sejam apenas ações pré-definidas, mas sim uma resposta natural dos agentes a alterações sofridas neste ambiente. Assim, a definição de autonomia pode ser expandida para uma autonomia flexível (McArthur et al., 2007a,b; Wooldridge et al., 1999).

Conforme McArthur et al. (2007a), para satisfazer os objetivos de um projeto de agente inteligente que possua autonomia flexível, três características devem ser apresentadas:

- **Reatividade:** capacidade de percepção de seu ambiente e reagir a este conforme as modificações sofridas, sendo capaz, a partir destas alterações, modificar suas ações de modo a cumprir com seus objetivos;
- **Proatividade:** capacidade de executar ações sem estímulos externos. Em outras palavras, deve ser capaz de tomar uma iniciativa e alterar, quando necessário, seu comportamento em respeito a seus objetivos;
- **Sociabilidade:** habilidade de interagir com outros agentes, não restringindo apenas a simples troca de dados entre *software* e entidades de *hardware*, mas, sim, alcançar níveis além desta intenção, atingindo a capacidade de cooperatividade.

A operação de um SMA consiste em três fases, percepção, tomada de decisão e ação. A percepção é feita através da coleta de dados no ambiente, seja monitorando a situação atual ou prevendo o futuro, enquanto a tomada de decisão e a ação são, respectivamente, conduzidas por raciocínio inteligente e alterando o ambiente autonomamente. As decisões podem ser *offline* ou *online*, afetando fisicamente ou não o seu ambiente (Moradi et al., 2016; Kantamneni, Brown, Parker & Weaver, 2015; Kremers, de Durana & Barambones, 2013).

### 3.5 Benefícios de SMAs

Geralmente, os SMAs propostos possuem como objetivos básicos a flexibilidade e a extensibilidade. Entende-se por flexibilidade a característica dos agentes em lidar com situações

dinâmicas, tendo em vista possíveis soluções e ajustando seu comportamento para a solução mais apropriada no momento e traçando novos planos, se necessário. Com relação a extensibilidade, entende-se como sendo a capacidade de extensão ou ampliação de uma rede existente. Neste caso, não há necessidade de reimplementá-lo, basta simplesmente adicionar novos agentes, agregando novas funcionalidades.

Quando os atributos dos agentes são combinados com habilidades de reutilização, reimplantação e comunicação independente, intensificam a habilidade de flexibilidade e extensibilidade do sistema, permitindo a reconfiguração e integração do sistema através da adoção de novas tecnologias (Moradi et al., 2016; Wooldridge et al., 1999). Além disso, o SMA permite melhorar a robustez e a confiabilidade, principalmente quando acrescentado com agentes redundantes, devido às características de operação nos casos de falha em algum componente (Kantamneni et al., 2015; Kremers et al., 2013; McArthur et al., 2007a).

Os agentes não precisam ser implementados usando uma mesma linguagem de programação, desde que a linguagem de mensagens utilizada seja entendida por todos. Isso é possível utilizando-se arquiteturas abertas de SMA, implementadas seguindo padrões pré-estabelecidos, como os definidos pela FIPA (Santos, 2018; Kantamneni et al., 2015; Bellifemine et al., 2007).

Em relação a aplicação, vários agentes podem trabalhar em conjunto para melhor explorar a estrutura descentralizada de uma determinada tarefa e acelerar sua conclusão, visto que suas atividades são operadas de maneira paralela. Além disso, não precisam rodar em uma mesma máquina física, desde que essas máquinas rodem instâncias de uma mesma plataforma. Agentes rodando nessas máquinas distintas podem se localizar e cooperar (Santos, 2018; McArthur et al., 2007a).

## 3.6 Desafios da aplicação de SMAs

Como toda nova tecnologia a ser explorada, os métodos distribuídos receberam uma atenção significativamente elevada, representando oportunidades de pesquisa. Contudo, os SMAs ainda apresentam limitações que impedem o seu uso (Angioni et al., 2018; Santos, 2018; Zhu, Duan, Yang, Yin & Chen, 2016; Su, Lan, Chou & Chen, 2015; Ren, Zhang & Sutanto, 2013; Wang, Zhang, Wang, Dinavahi, Chang, Martinez, Davoudi, Mehrizi-Sani & Abhyankar, 2013; Kezunovic, 2011). A seguir são apresentados alguns desafios levantados no trabalho de Moradi et al. (2016):

- **Formulação do problema:** falta de ferramentas para formular os problemas do sistema de potência como SMA, para que as características sejam compreendidas e então projetar uma arquitetura apropriada para agentes;
- **Padronização:** embora exista o padrão de referência FIPA, a linguagem de comunicação e protocolos relevantes para a interação entre os agentes são considerados um desafio.

Isso implica na interceptação da troca de informações, comunicação e negociação do agente. Como a seleção de protocolos e da linguagem afetam a habilidade social e a interoperabilidade, adicionalmente, também comprometem o desempenho e a funcionalidade do sistema, portanto, a padronização é um dilema que precisa ser abordado;

- **Comunicação:** o desenvolvimento de sistemas de comunicação enfrenta desafios como perdas de pacotes de dados, latência de rede e existência de dados com ruído. A segurança da comunicação em uma arquitetura aberta também é considerada como outro desafio, pelo fato de atores externos possuírem a capacidade de influenciar na comunicação entre os agentes;
- **Coerência:** a ausência de coerência na tomada de decisão pode apresentar resultados imprevisíveis, principalmente quando os agentes possuem certos níveis de autonomia, bem como em situações particulares em que uma decisão local pode influenciar o restante do sistema;
- **Escalabilidade:** embora a escalabilidade dos agentes seja promissora, sua aplicação em sistemas reais com grande diversidade de agentes e implementados em diferentes plataformas, ainda é pouco compreendida;
- **Implementação:** a grande maioria dos testes com SMAs utilizam emulações por *software*, o qual popularizou-se do ponto de vista acadêmico, contudo, a sua adoção em escala comercial ainda é uma lacuna a ser preenchida. Isto porquê a seleção de uma plataforma de tecnologia apropriada, fornecendo a disponibilidade de serviços *on-line*, garantindo flexibilidade e extensibilidade em uma arquitetura aberta, identificando restrições práticas bem como o desenvolvimento de SMAs em *hardware* reais, são considerados como principais desafios de implementação;
- **Segurança:** o uso crescente da infraestrutura inteligente aumenta os riscos de segurança e violações de privacidade provocados por atores externos.

Embora a evolução gradual dos SMAs o torna cada vez mais atrativo, as incertezas inerentes à crescente complexidade de *software*, incompatibilidades de *hardware* e riscos de segurança gerados, limitam sua adoção mais ampla. Somente testes rigorosos em protótipos reais envolvendo sistemas de múltiplos fornecedores poderão demonstrar a sua viabilidade (Santos, 2018; Ghorbani, Choudhry & Feliachi, 2016; Kantamneni et al., 2015; Su et al., 2015).

### 3.7 Aplicações de SMAs no problema de restabelecimento de energia dos SDs

Na engenharia, sistemas baseados em agentes vêm sendo explorados em uma variedade de aplicações, como, por exemplo, despacho de potência reativa (Ansari, Gholami & Kazemi,

2015), monitoramento da qualidade do serviço (Dominguez, Junior, Dominguez, Frias & Iglesias, 2015), proteção adaptativa (Daryani, Karkevandi & Usta, 2018; Nascimento & Rolim, 2013), controle de microrredes (Dou, Lv, Zhao, Ji & Li, 2015); gerenciamento de energia em microrredes (Santos, 2018), mercado de energia (Shafie-khah & Catalão, 2015) e restabelecimento de energia (Souza, 2015).

A atribuição de “ideal” para as funcionalidades de um SD operado com agentes está associada com a capacidade que esta possui em responder e coordenar ações diante de eventos diversos, objetivando corrigir perturbações, minimizar impactos, restaurar a continuidade de serviço e melhorar a estabilidade do sistema durante distúrbios. Dentre essas funcionalidades, alguns autores afirmam que o principal serviço entregue por estas redes é a capacidade de recuperar suas cargas fora de serviço de maneira automática, conhecida como *Self-Healing* pela comunidade científica (Refaat et al., 2018; Torres et al., 2018; Leite & Mantovani, 2017; Sampaio et al., 2017; Elmitwally et al., 2015).

Nos últimos anos, diversas pesquisas foram publicadas na literatura com o objetivo de contribuir em avanços na utilização do recurso *Self-Healing* modelado como SMA. Abaixo são apresentados alguns desses trabalhos:

- Um modelo baseado em múltiplos agentes que localiza e isola os setores com falhas em SDs com inserção de geração distribuída foi proposto em Zidan (2013). O autor propôs uma estrutura de SMAs baseada em sistema especialista com dois níveis hierárquicos para monitorar, calcular e negociar durante o processo de restabelecimento de energia. As ações dos agentes foram projetadas através de diretrizes extraídas de relatórios e manuais técnicos disponibilizados na literatura;
- Em Souza (2015), a arquitetura proposta é realizada em quatro etapas: a identificação e o isolamento da falha, correspondendo a primeira etapa; processo de negociação para transferência das cargas fora de serviço, referindo-se a segunda e terceira etapa; o ilhamento e o corte de carga, caso necessário, sendo a última etapa. Ao contrário de outros autores, ele implementa o processo de ilhamento com corte seletivo de carga considerando a presença de geração distribuída, e o processo de identificação/isolamento da falta é realizado por um agente específico, denominado Agente Dispositivo. Ressalta ainda características físicas necessárias que o Agente Dispositivo deve possuir do ponto de vista prático;
- Em Ghorbani et al. (2016), é apresentado uma proposta para localização, isolamento e restauração de cargas em SDs. Nesta abordagem, é proposto uma estratégia de coordenação hierárquica com três níveis, que integram as vantagens tanto de controle centralizado quanto descentralizado. Nesta estrutura, a estratégia utiliza algoritmos existentes para o problema, a qual é acrescentada de um algoritmo de aprendizagem, chamado de “Q-learning”, introduzido para apoiar na tomada de decisão. Consiste ainda da implementação de um protótipo para localização e isolamento de faltas;
- Em Sampaio et al. (2017) foi desenvolvido um protótipo para o problema de restauração

de redes, sendo aplicado em uma bancada de testes experimentais. Nesta proposta, os agentes foram implementados na linguagem aberta JADE e inseridos em *hardware*, integrado ao simulador via protocolo TCP/IP. Nos testes, o autor comprova que os agentes podem transitar de um *container* para outro em diferentes máquinas virtuais sem interferir nos resultados.

Para Zidan et al. (2017), a grande maioria dos estudos propostos na literatura não apresentam uma estrutura de controle bem definida, devido a isso, ainda há grande espaço para pesquisa em problemas de restabelecimento de energia dos SDs modelados como SMA. O mesmo autor afirma que uma estrutura de controle bem definida deve apresentar:

- Uma arquitetura bem projetada e apropriada, e mecanismo computacional a ser implementado em cada agente de controle;
- Coordenação e comunicação adequada entre os agentes de controle de forma distribuída;
- O comportamento dos agentes deve seguir “um procedimento geral de restabelecimento de energia” que seja capaz de ser aplicado em qualquer rede de distribuição, sem regras exclusivas para um sistema específico;
- Os agentes devem ser capazes de estimar a variação de demanda ao longo do dia, com isso, verificar as prioridades dos clientes e o despacho das unidades de geração distribuída de modo a manter a integridade das restrições operacionais.

# Capítulo 4

## Proposta de um Modelo Multiagente para o Processo de Restabelecimento de Energia dos SDs

### 4.1 Introdução

O presente capítulo apresenta a proposta deste trabalho, detalhando o modelo de SMA proposto. Este modelo é resultado de uma revisão bibliográfica, pesquisa ao qual foi dividida em duas partes, uma referente ao entendimento do problema e a outra a respeito da aplicação dos SMAs, as quais deram origem aos Capítulos 2 e 3 deste documento bem como informações complementares, por exemplo, a justificativa da proposta apresentada no Capítulo 1.

A partir desta revisão bibliográfica, obteve-se um modelo matemático que foi complementado com conceitos provenientes da filosofia de SMA, dando origem a uma arquitetura multiagente para o processo de restabelecimento de energia das redes de distribuição.

Com base no entendimento do problema de restabelecimento de energia e questões práticas levantadas a partir dos interesses de distribuidora, foram elaboradas as ações de cada agente. Tais ações possuem como premissa a aplicação de um plano estratégico para o restabelecimento de energia com possibilidade de corte de carga, o qual aborda o mapeamento das áreas fora de serviço, a avaliação da capacidade de suprimento de cada alimentador e a maximização das cargas restauradas através de chaveamento. De maneira geral, este modelo é uma versão adaptada dos trabalhos apresentados por Souza (2015), Ghorbani (2014) e Zidan (2013).

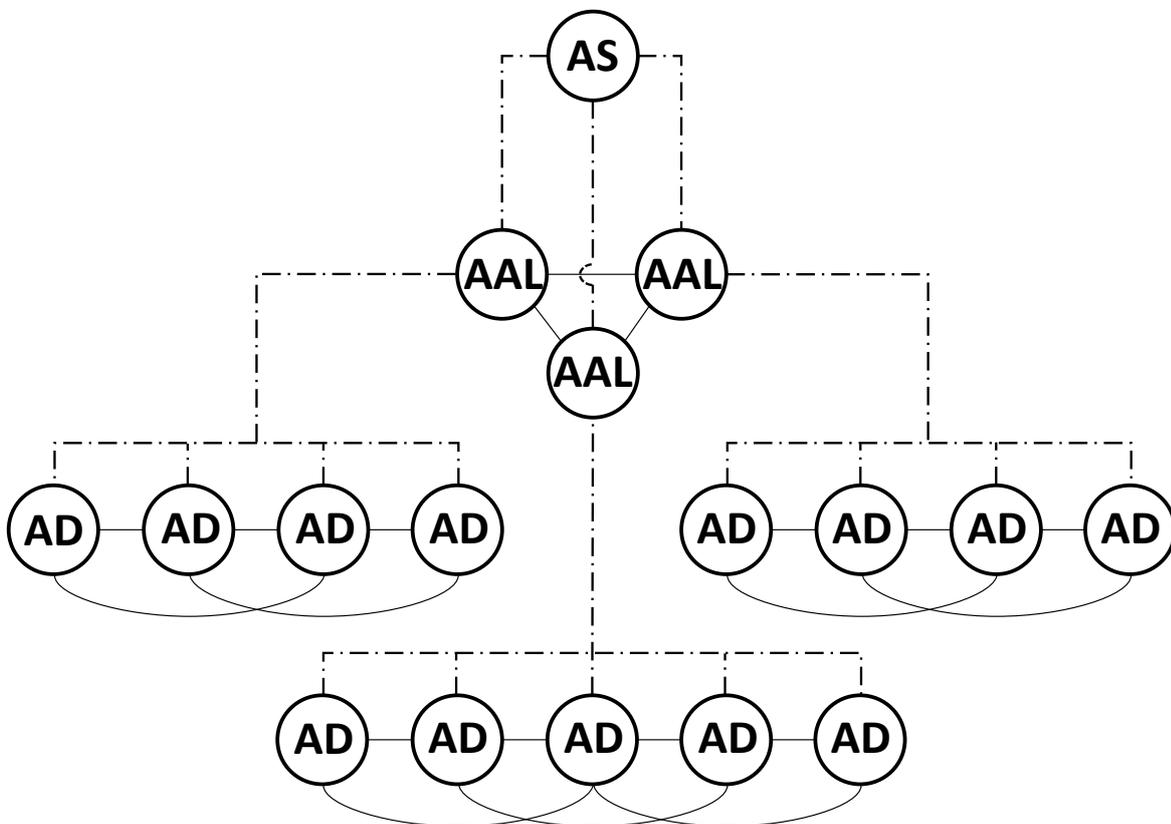
A arquitetura multiagente implementada assume que a rede é fragmentada e que, cada parcela, corresponde ao ambiente de atuação designado a um agente específico. Este agente está inserido em uma comunidade que contém outros agentes, os quais são responsáveis pelas demais parcelas do sistema, ou seja, os demais ambientes de atuação. Nesta comunidade, o bom funcionamento do projeto necessita de um mecanismo robusto de comunicação seguido de protocolos que objetivam garantir a interoperabilidade entre os agentes. Nas simulações, a plataforma utilizada garante a comunicação, contudo, a logística envolvida no ato comunicativo,

o conteúdo das mensagens e como os receptores devem interpretar este conteúdo são questões definidas pelo projetista do modelo.

## 4.2 Modelo proposto

O modelo proposto é baseado em sistemas multiagentes para resolver o problema de restauração das cargas fora de serviço. Os agentes desenvolvidos neste trabalho possuem característica de agentes reativos, ou seja, reagem de acordo com a percepção do ambiente ao qual estão inseridos.

A Figura 4.1 ilustra a arquitetura proposta, dividida em três níveis. O primeiro nível é composto por Agente Subestação (AS), o segundo por Agente Alimentador (AAL) e terceiro por Agente Dispositivo (AD). Basicamente, os Agentes Dispositivos habitam a camada de nível inferior da cadeia hierárquica, cujo papel é monitorar informação local da rede e executar a abertura das chaves quando solicitada. Os Agentes Alimentadores, situados no nível intermediário, são responsáveis pela atividade de negociação, sendo realizada a partir da informação compartilhada, em que avaliam e negociam a capacidade disponível em seus alimentadores. Por último, localizado na parte superior da cadeia hierárquica, encontra-se o Agente Subestação, responsável pela tomada de decisão.



**Figura 4.1:** Arquitetura hierárquica do modelo adaptado.

Observe que na Figura 4.1 a arquitetura apresentada é análoga aos SDs radiais, em que o Agente Subestação representa a própria subestação, e em sua saída, encontram-se os Agentes Alimentadores, sendo representados pelos dispositivos de proteção situados no início de cada alimentador. Nota-se também, que para cada Agente Alimentador existe um conjunto de Agentes Dispositivos, os quais representam as chaves automáticas espalhadas ao longo da rede. Existe ainda, um outro tipo de Agente Dispositivo, responsável pela interligação entre os alimentadores e por iniciar o mapeamento dos caminhos a serem restaurados.

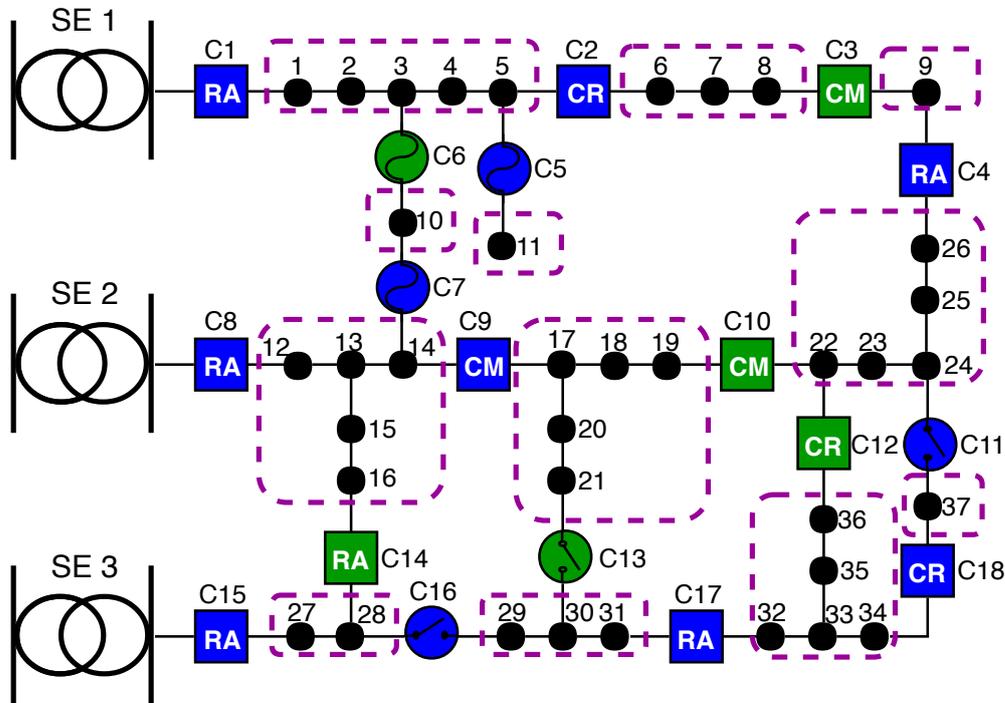
Na literatura, existem diversas propostas em relação a estrutura de organização dos agentes, dos quais se destacam as estruturas centralizadas, descentralizadas e totalmente distribuídas. Para o problema de restabelecimento, o maior volume de publicação aborda a estrutura hierárquica. Isto ocorre devido ao nível de flexibilidade apresentado, podendo operar de maneira centralizada ou descentralizada, ou ambos, sendo possível aproveitar as vantagens das duas abordagens (Ghorbani, 2014). Nas estruturas hierárquicas publicadas, a funcionalidade é descentralizada, em que cada agente que compõe o sistema possui diferentes responsabilidades (Sharma, Srinivasan & Trivedi, 2018; Cao, Wang, Liu, Azizipanah-Abarghooee & Terzija, 2017; Leite & Mantovani, 2017; Sampaio et al., 2017; Ghorbani et al., 2016; Souza, 2015; Zidan, 2013). Portanto, para esta proposta, optou-se também por uma arquitetura hierárquica com funcionalidade descentralizada.

A fragmentação da rede provém da filosofia descentralizada, sendo um artifício adotado, o qual visa dividir a rede de distribuição em pequenas áreas, chamadas de “*Load Zone*” pela literatura, cujo objetivo é facilitar o plano de restabelecimento, conceito difundido na literatura (Ghorbani et al., 2016; Elkhatib et al., 2015; Zendejdel & Yazdi, 2015; Zidan & El-Saadany, 2012; Tsai, 2008; Huang, Chen & Lin, 2005; Kato, Kanamori, Suzuoki & Funabashi, 2005). Em teoria, esta ideia de divisão provém da literatura clássica, artifício adotado para que possa ser aproveitado os conceitos de reconfiguração no processo de restabelecimento, dividindo a rede em setores, conforme mencionado na Seção 2.3.2. Cada setor possui uma demanda, um fator de prioridade, estados (energizado/desenergizado) e posicionamento das chaves (aberto ou fechado). Essas informações são coletadas e compartilhadas entre os agentes para que se possa dar início ao plano estratégico de restauração das cargas fora de serviço.

Os alimentadores são divididos em setores, respeitando como delimitação a posição dos equipamentos interruptores instalados ao longo da rede, como ilustra as linhas pontilhadas em roxo da Figura 4.2. O conjunto de cargas existentes entre dois interruptores fazem parte de um setor específico (dependendo da topologia, um setor pode estar contido entre três ou mais interruptores). Estes equipamentos que delimitam a extensão do setor, representam os agentes dispositivos. A Figura 4.2 é apenas uma ilustração desta divisão.

A partir da estrutura apresentada, o modelo proposto deverá, ao final do processo, restaurar o maior número possível de cargas fora de serviço. Para isso, o processo será descrito em quatro etapas, conforme ilustrado pela Figura 4.3.

Para esta proposta, assume-se que a primeira etapa referente a identificação e isolamento da falta é executada pelos próprios dispositivos. Concluída esta etapa, inicia-se a restauração das cargas fora de serviço, o que é obtido com a execução das demais etapas, de acordo com os objetivos da estratégia de restauração.

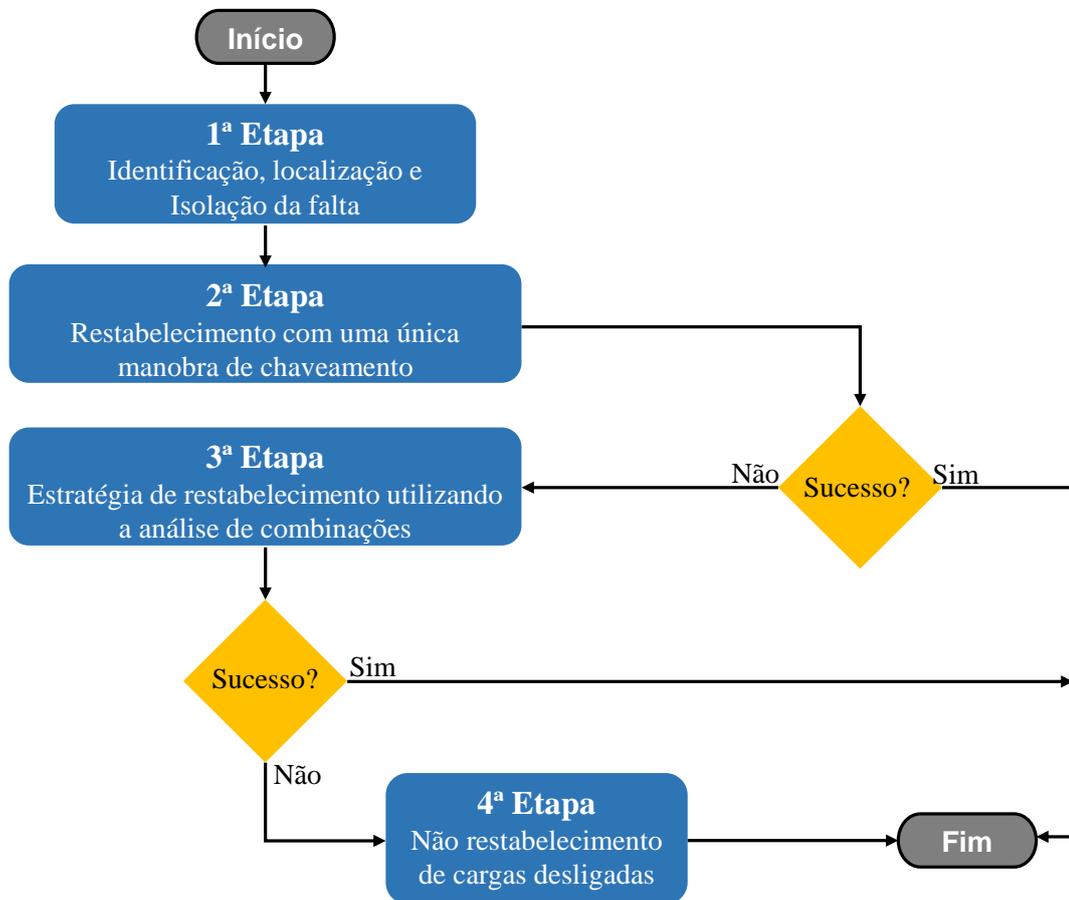


**Figura 4.2:** Divisão do SD em setores.

Na segunda etapa, inicia-se a estratégia de restauração com um único chaveamento, sendo o Agente Alimentador responsável por esta atividade. Basicamente, é uma tentativa de restauração local, realizada através de uma negociação entre os Agentes Alimentadores mais próximos, envolvendo apenas o Agente Alimentador afetado pela falta (chamado de iniciador) e os demais Agentes Alimentadores com quem esse iniciador possui meios físicos de conexão. Esta negociação possui como objetivo encontrar algum alimentador vizinho cuja capacidade disponível possa assumir todas as cargas fora de serviço. Caso nenhum alimentador possua condições de assumir todas as cargas através de um único chaveamento, inicia-se a terceira etapa referente a análise de combinações.

Na terceira etapa, o Agente Alimentador (iniciador) responsável pela negociação envia uma mensagem ao Agente Subestação para assumir as próximas decisões. Esta atividade possui como objetivo a construção de uma tabela em que os setores saudáveis fora de serviço são organizados de modo a combiná-los em grupos. A formação dos grupos deve respeitar o limite de carregamento dos alimentadores aos quais serão conectados. Caso não seja possível restaurar todas as cargas, isto significa que um ou mais setores não participaram da formação dos grupos, portanto, ainda nesta etapa, inicia-se uma nova negociação, conhecida como “subcontrato”, que por sua vez, possui como objetivo aliviar o carregamento dos alimentadores vizinhos para que possam assumir as cargas que não participaram da formação do grupos. Caso ainda não seja

possível recuperar todos os setores, inicia-se a última etapa, referente ao não restabelecimento de cargas que se encontram desligadas.

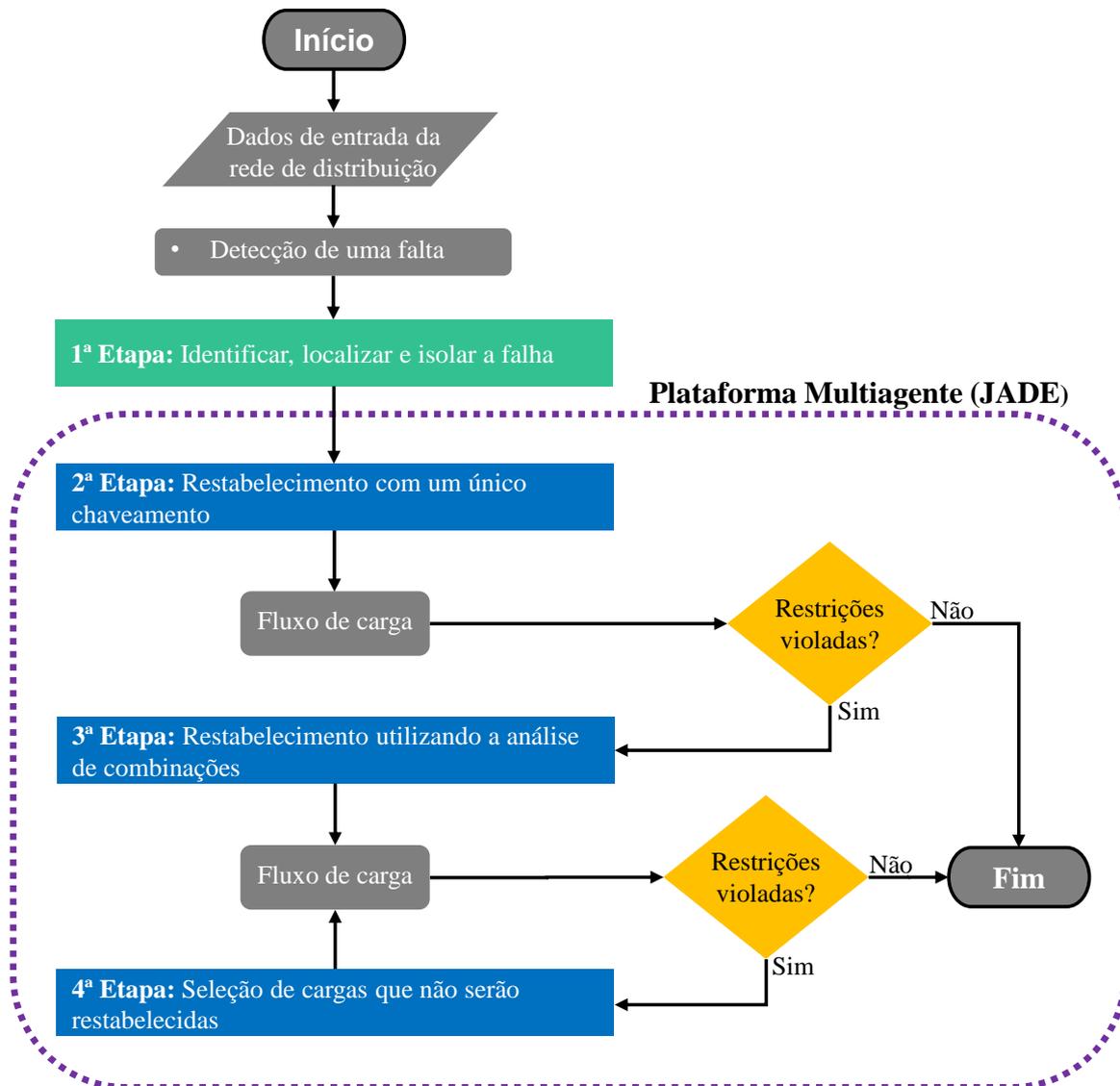


**Figura 4.3:** Fluxograma do processo de restauração.

No modelo proposto, há um método de fluxo de carga implementado no Agente Subestação de modo a verificar se a solução apresentada pelos agentes está em cumprimento com os limites operacionais permitidos. A Figura 4.4 ilustra a execução do modelo, o qual é iniciado com os dados de entrada da rede de distribuição, em seguida, é considerada a aplicação de uma falta e o setor submetido a este evento é isolado (não são consideradas múltiplas faltas). Na sequência, as demais atividades seguem a estratégia implementada no modelo, em que, a partir da informação local, os dados são compartilhados, negociados e gerenciados de acordo com os objetos de cada agente da estrutura hierárquica. A partir disso, a tomada de decisão é aplicada e a solução obtida é avaliada pelo Agente Subestação através do fluxo de carga, cujo objeto é analisar as restrições do sistema.

Ao final de cada solução apresentada pelos agentes é executado o fluxo de carga para verificar se os resultados apresentados cumprem com os limites operacionais impostos. Em caso de violação, o processo pula para a etapa seguinte, com exceção da primeira etapa. Por exemplo, a estratégia de restauração inicia pela segunda etapa, em que, caso a solução apresentada viole alguma restrição, o processo pula para a terceira etapa que, por sua vez, uma nova solução é obtida e submetida a avaliação, e se também descumprir alguma restrição, o processo pula para

a quarta etapa. Contudo, ao chegar na quarta etapa, sempre que uma restrição não for atendida, seleciona-se a carga de menor prioridade e retira-se do conjunto das cargas candidatas a serem restauradas e executa-se novamente o fluxo de carga, até que as restrições sejam satisfeitas.



**Figura 4.4:** Fluxograma de execução do modelo.

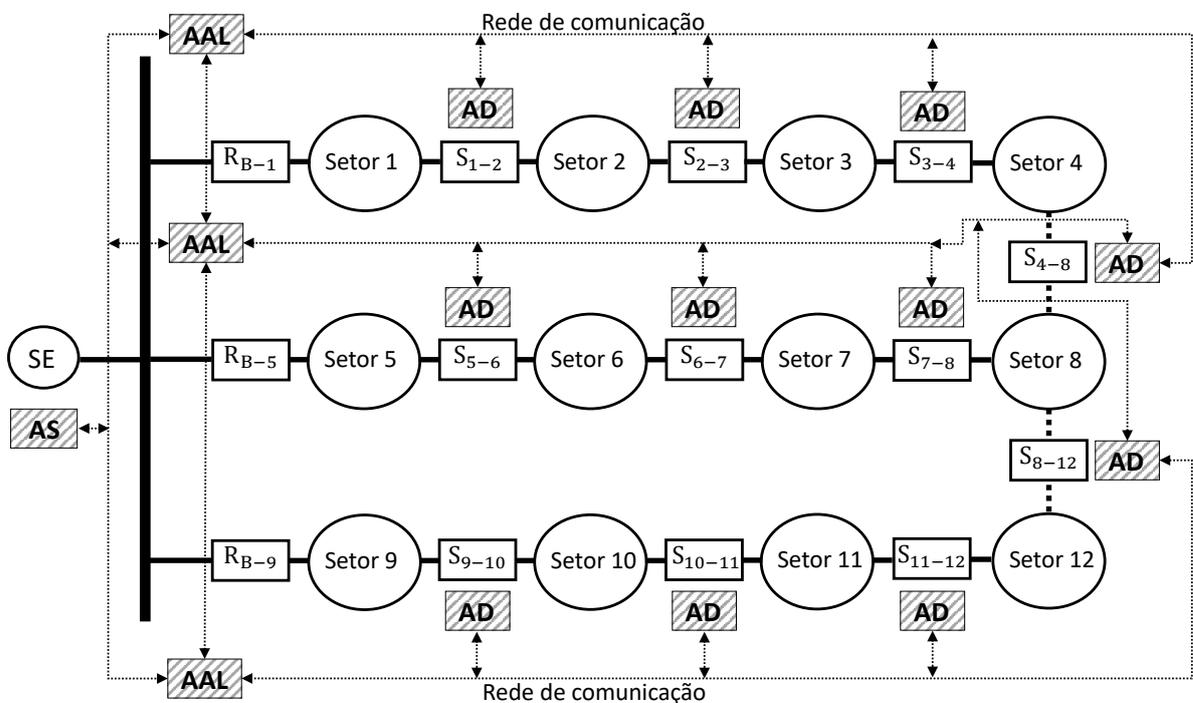
### 4.3 Plataforma de simulação

O modelo foi implementado no *framework* JADE, o qual foi apresentado na Subseção 3.3.1 do Capítulo 3. Para obter os resultados foi necessário modelar a rede de distribuição em Java. A partir desta rede é obtido o ponto de operação pré-falta, em seguida, estes dados são distribuídos para os demais agentes da rede através do conjunto de serviços disponibilizados pelo próprio *framework*, conhecido como páginas amarelas, sendo este um recurso implementado em um agente chamado de *Directory Facilitator* (DF). Este recurso é utilizado apenas no iní-

cio da simulação para que os agentes, quando inicializados, saibam as respectivas posições e inicializem com uma bagagem inicial de informação (pré-falta). As demais atividades do modelo são realizadas através da comunicação entre os agentes, e as soluções obtidas são avaliadas com o fluxo de carga. A seguir, nas Subseções 4.3.1 e 4.3.2, são apresentadas a estrutura de comunicação e o fluxo de carga.

### 4.3.1 Estrutura de comunicação

A arquitetura mencionada na Seção 4.2 possui uma estrutura em três níveis, cada uma com seus objetivos e funções a desempenhar na estrutura. A Figura 4.5 ilustra a troca de mensagens entre os agentes.



**Figura 4.5:** Estrutura de comunicação entre os agentes de um SD.

Fonte: Adaptado de Souza (2015).

A estrutura de comunicação foi implementada no *framework* JADE, o qual, como já mencionado, segue o padrão FIPA, disponibilizando recursos que facilitam o desenvolvimento da comunicação entre os agentes. Dentre os recursos disponíveis, utilizou-se o padrão FIPA *Contract Net*. Basicamente, é uma comunicação descentralizada de duas vias onde os participantes afirmam um contrato de modo a garantir a interoperabilidade. Essa necessidade surge devido aos níveis de autonomia dos agentes, pois estes possuem condições de negar uma solicitação, seja uma informação ou atividade, causando um não-determinismo no sistema. Desta maneira, não é interessante que uma solicitação seja negada, portanto, o *framework* disponibiliza uma série de protocolos que auxiliam a interoperabilidade.

A Figura 4.5 ilustra um SD com três alimentadores, sendo conectados na mesma barra na saída da subestação. Cada alimentador é dividido em setores separados por chaves. Os equipamentos instalados ao longo dos alimentadores podem ser religadores automáticos e chaves automatizadas, podendo ou não estar no modo função seccionizador (Souza, 2015). Nesta figura, os equipamentos com a sigla  $R_B$  representam os religadores situados no início de cada alimentador, enquanto aqueles com a sigla  $S$  podem ser chaves automatizadas ou religadores automáticos, com possibilidade de operar em modo chave. Quando estas chaves se encontram no estado NF, possuem a função de efetivar manobras no SD enquanto no estado NA possibilitam a interligação entre alimentadores.

Na literatura existem poucas abordagens a respeito da implementação física dos agentes. A grande maioria das publicações assumem que os agentes funcionam como uma função interna aos Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED, do inglês *Intelligent Electronic Devices*) (Souza, 2015; Zidan, 2013; Higgins, Vyatkin, Nair & Schwarz, 2011; Saleem, Honeth & Nordström, 2010), ou ainda, consideram que os agentes são entidades de *software* inseridos em *hardware* externo ao IED. Em Ling, Liu, Lu, Du & Pan (2014) é proposto uma expansão no modelo IEC 61850 em relação ao recurso *self-healing* descentralizado, apontando a inclusão de novos requisitos construtivos para os IEDs, de modo a padronizar algumas funções e auxiliar a implementação dos agentes em plataformas experimentais. No trabalho de Ghorbani (2014) é desenvolvido um protótipo para localizar e isolar a falha, aplicando-o em um caso real. Os agentes foram implementados em medidores de energia e computadores, os quais se comunicam por meio de links de comunicação serial e TCP/IP. A bancada de teste de *hardware* foi construída pelo grupo *Advanced Power and Electricity Research Center*, o qual fornece uma plataforma de validação e demonstração para o algoritmo de localização e isolamento de falhas baseado em SMA distribuído. Em Sampaio et al. (2017), os agentes foram implementados em *hardware* externo, com aplicativo SMA desenvolvido na plataforma JADE, os quais foram integrados através de uma WLAN usando o protocolo TCP/IP, tornando o SMA independente das tecnologias e protocolos atuais dos IEDs.

A comunicação em aplicações que envolvam SMAs é comumente tratada a níveis complexos. Isso acontece devido aos níveis de confiabilidade exigidos, pois o bom funcionamento de um sistema composto por agentes depende da interoperabilidade entre eles. Portanto, muitas pesquisas vêm sendo direcionadas para as arquiteturas organizacionais e protocolos de comunicação. Adicionalmente, outras questões também são alvos de pesquisa, como, por exemplo, meio físico de comunicação, perdas de pacote de dados, latência de rede, interferências externas no meio de comunicação e outros desafios que o sistema de comunicação em si já enfrenta. Embora muitas pesquisas foram publicadas, continua sendo uma linha ativa (Moradi et al., 2016; Ghorbani, 2014; Niyato, Dong, Wang & Hossain, 2013; Biagi, Greco & Lampe, 2012; Cherukuri & Nahrstedt, 2011; Li, Mao, Lai & Qiu, 2010; Kumar et al., 2008; McArthur et al., 2007a).

No presente trabalho, assume-se que todos os equipamentos possuem *hardware* acopla-

dos externamente que lhes proporcionam as funções esperadas dos agentes, sem interferir nas funcionalidades do próprio equipamento.

### 4.3.2 Fluxo de carga

Como mencionado na Subseção 4.2, o Agente Subestação executa um fluxo de carga para verificar se algum limite operacional foi violado. Neste trabalho, adotou-se o *Backward Forward Sweep* (BFS) por ser um método simples e eficiente, bastante consolidado em estudos que necessitam da solução do fluxo de carga em SDs.

O método BFS utiliza um esquema de varredura que parte do princípio do teorema de grafos, compondo uma estrutura de dados em formato de árvore para então iniciar as varreduras que verificam o cumprimento das leis de Kirchhoff. Em resumo, executa-se uma varredura iniciada pela soma das correntes injetadas a partir dos nós terminais até a subestação da rede, na sequência, são calculadas as quedas de tensões partindo dos nós mais próximos da subestação até os nós terminais. Este processo refere-se a uma única iteração, sendo realizada várias vezes, até que a tolerância de convergência seja satisfeita (Hameed, Hosani & Zeineldin, 2019; Alinjak, Pavic & Stojkov, 2017; Chang, Chu & Wang, 2007).

Em Schulz (2015), o autor propõe uma arquitetura orientada a objetos que parte do princípio do método BFS para aplicações de fluxo de potência em SDs. A partir do trabalho de Schulz (2015), foi implementado um algoritmo por meio de modelagem e programação orientada a objetos capaz de solucionar o fluxo de potência em SDs operado de forma radial. Sendo este método, atribuído ao Agente Subestação como uma de suas atividades a serem executadas no contexto de restabelecimento de energia. Esta funcionalidade é uma maneira de verificar se a solução obtida pelos agentes do sistema cumprem com os limites operacionais impostos.

## 4.4 Descrição do modelo

O modelo proposto se baseia em algumas condições importantes relacionadas às práticas operacionais do problema de restabelecimento de energia dos SDs, as quais são apresentadas a seguir:

- Para não prejudicar o funcionamento do sistema de proteção, é importante manter a rede radial durante o processo de restabelecimento (Huang, Hsieh & Wang, 2011; Kumar et al., 2008; Aoki et al., 1989);
- Para evitar a ocorrência de novas falhas durante o processo de restabelecimento de energia, é importante manter as restrições de tensão e corrente em seus limites (Souza, 2015; Zidan & El-Saadany, 2012);

- O tempo necessário para a execução do restabelecimento de energia está diretamente associado ao número de operações de comutação (Chen, 2010), o qual deve ser mantido o menor possível (Marques et al., 2018). Tipicamente, uma rede real consiste de diversos tipos de chaves, o que implica no restabelecimento, visto que há uma diferença no tempo de operação das chaves. Por exemplo, o tempo de operação das chaves remotas são de 30s a 40s (Copel, 2017), enquanto as chaves manuais são de 1200s a 1500s (Nagata & Sasaki, 2001), aproximadamente. Além disso, conforme Zidan & El-Saadany (2012), um número baixo de manobras reduz a possibilidade de surtos de comutação, distúrbios de transitórios devido as comutações, risco de novas interrupções, bem como, o custo operacional de manutenção do equipamento (isto é, o custo dos técnicos de manutenção e os custos associados à vida útil do equipamento);
- A estratégia de restabelecimento busca como solução uma nova topologia que possui caráter temporário, tempo no qual são realizadas as atividades de manutenção no setor em falta. Após seu término, o SD deve retornar a sua topologia original, portanto, uma estratégia que apresente uma topologia próxima a original, facilita a sequência de operação para retornar a topologia original (Zidan & El-Saadany, 2012);
- Uma estratégia que possui como um dos objetivos minimizar o número de chaveamento está associada com o interesse por uma solução que reduza tanto o tempo quanto os custos operacionais envolvidos nas atividades de manobra, adicionalmente, esta solução encontra-se próxima da topologia original. Portanto, alguns autores propõe que a possibilidade de restauração através de um único chaveamento deve ser avaliada (Zidan & El-Saadany, 2012; Miu, Chiang & McNulty, 2000; Lin & Chin, 1998; Liu et al., 1988). Caso não seja possível, pode-se ainda, combinar os setores fora de serviço em grupos, realocando-os nos alimentadores adjacentes, o que ainda está aliada aos interesses por uma solução próxima a original (Souza, 2015; Zidan, 2013);
- Caso não seja possível recuperar todas os setores fora de serviço, a ação corretiva resulta em uma restauração parcial (Kumar et al., 2008). Neste contexto, seleciona-se cargas para não serem restauradas obedecendo o grau de prioridade das cargas (Huang et al., 2005).

A partir das condições apresentadas, foram obtidas as equações matemáticas que regem o comportamento do modelo proposto, conforme apresentado a seguir:

### 1. Função Objetivo

- a) Maximizar o número de cargas atendidas, levando em conta a prioridade das cargas:

$$Max \sum_{i=1}^{Nbus} B_i * L_i * S_i \quad (4.1)$$

Onde:  $S_i$  é a carga da barra  $i$ ,  $L_i$  é a variável de decisão ( $L_i = 1$  para restaurado e  $L_i = 0$  para não restaurado),  $B_i$  é o coeficiente associado a prioridade da barra  $i$  e  $Nbus$  é o número de barras do sistema.

- b) Minimizar o número de operações de chaveamento para reduzir tanto o tempo de restauração quanto o custo operacional:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{Nchave} |x_i - x_{io}| \quad (4.2)$$

Onde:  $Nchave$  é o número total de chaves;  $x_i$  é a posição da chave na rede restaurada e  $x_{io}$  é a posição da chave imediatamente depois da falta isolada, sendo igual a 1 em modo fechado e 0 em modo aberto.

## 2. Restrições

- a) As tensões em todas as barras devem permanecer em seus limites:

$$V_{min} \leq |V_i| \leq V_{max} \quad (4.3)$$

Onde:  $V_i$  é a tensão na barra  $i$ ,  $V_{max}$  e  $V_{min}$  são as tensões máximas e mínimas aceitáveis nas barras.

- b) O fluxo de corrente nos ramos não devem ultrapassar o limite máximo permitido:

$$|I_{k-i}| \leq I_{max} \quad (4.4)$$

Onde:  $I_{k-i}$  é a corrente no ramo  $k - i$ , e  $I_{max}$  é a corrente máxima aceitável neste trecho.

- c) A soma dos fluxos que saem da fonte de alimentação não deve exceder a sua capacidade total disponível:

$$\sum_{i \in out_k} (S_{k-i}) \leq G_k \quad (4.5)$$

Onde:  $S_{k-i}$  é o fluxo no ramo  $k - i$ ;  $G_k$  é a potência disponível na barra  $k$  e  $out_k$  é o conjunto de barras que absorvem potência da barra  $k$ .

- d) Durante a operação de chaveamento, a topologia apresentada não deve formar malha, portanto, para satisfazer esta condição, cada setor deve ser alimentado por um único ramo.

A partir das funções objetivo e restrições apresentadas, foi implementado um plano estratégico de restauração de cargas em que as ações dos agentes foram projetadas individualmente de modo a garantir essa intensão maior, no caso, a estratégia. As informações referentes a estas aplicações serão apresentadas nas próximas subseções deste capítulo.

#### 4.4.1 Restauração com um único chaveamento

Nesta etapa, o AAL iniciador avalia a possibilidade de recuperar os setores saudáveis fora de serviço com um único chaveamento através da negociação com os agentes que representam os alimentadores mais próximos. Na ausência de sucesso, devido a violação da capacidade máxima de carregamento dos alimentadores participantes da negociação, finaliza-se esta etapa e inicia-se a próxima. Caso contrário, o AAL conclui esta etapa ordenando aos ADs candidatos a alterarem a posição de suas chaves e solicita ao AS a execução do fluxo de carga. A seguir é apresentado passo a passo a execução desta etapa:

1. O AAL faz o levantamento dos setores fora de serviço (exceto o setor em falta). Para isso, envia uma mensagem *request* a todos os ADs em seu respectivo ramal de alimentação, solicitando seu estado. Após a identificação destes setores, o AAL solicita as respectivas demandas para o AS.

O levantamento dos setores fora de serviço pode ser representado pela Equação 4.6.

$$SetorOFF = Setor_k * x_k \quad k = 1, \dots, n \quad (4.6)$$

onde:  $Setor_k$  é o setor avaliado;  $x_k$  é o estado deste setor (0 para energizado e 1 para desenergizado);  $k$  é a identificação do setor;  $n$  é o número total de setores e  $SetorOFF$  é um vetor que armazena os setores identificados como fora de serviço.

O cálculo das demandas por setor é realizado utilizando a Equação 4.7.

$$S_k = \sum_{i=1}^N S_k^i \quad (4.7)$$

onde:  $S_k$  é a demanda do setor  $k$ ;  $S_k^i$  é a demanda da barra  $i$  pertencente ao setor  $k$  e  $N$  é o número total de barras do setor  $k$ .

2. A partir destes dados, é feita a somatória das demandas dos setores fora de serviço, a qual é comparada com as ofertas provenientes da negociação, de modo a verificar a possibilidade de restauração com um único chaveamento. Para isso, o AAL iniciador envia uma chamada de proposta *Call for Proposal* para os AALs, sendo este um convite para uma negociação. Esta chamada é enviada apenas aos agentes mais próximos, entendidos como os alimentadores que possuem meio físico de conexão direta ao que fez a chamada, definidos como “opção 1”. Nesta chamada, a capacidade disponível dos alimentadores é comparada com a demanda total dos setores fora de serviço, que pode ser representado pela Equação 4.8.

$$CDA_{max} \geq \sum_{i=1}^k S_k \quad k = 1, \dots, nf - 1 \quad (4.8)$$

onde:  $CDA_{max}$  é a máxima capacidade disponível do alimentador;  $S_k$  é a demanda do setor  $k$  e  $nf$  é o número total de setores fora de serviço, com exceção do setor em falta, sendo representado por  $nf - 1$ .

3. Caso haja compatibilidade, a chamada é respondida com *Accept-Proposal* acrescentada com o valor disponível. Caso mais de um AAL possa assumir as cargas, o AAL iniciador escolhe aquele que possuir maior capacidade disponível, na sequência, envia uma mensagem ao AD de interligação para fechar seus contatos. Em seguida, notifica o AS a respeito da conclusão das atividades de restauração.
4. Caso não haja compatibilidade, a chamada é respondida com *Reject-Proposal*. Em seguida, o AAL iniciador notifica o AS a respeito da falha da tentativa de recuperação com um único chaveamento, portanto, o AS assume as próximas atividades.

#### 4.4.2 Recuperação através da análise de combinações

Caso as atividades da etapa anterior não tenham sido bem-sucedidas, inicia-se um novo procedimento, sendo o AS incumbido desta tarefa. As ações desta etapa resultam em uma tabela em que os setores fora de serviço são organizados em grupos, formados através de combinações. Cada grupo formado (combinação de setores) possui uma demanda e uma prioridade associada a um alimentador, ao qual será alocada a carga bem como as chaves envolvidas em sua transferência.

Construída a tabela, a estratégia de restabelecimento desta etapa segue os seguintes passos:

1. A partir da tabela, os grupos formados são analisados com a capacidade disponível nos alimentadores (opção 1). Basicamente, a ideia consiste em escolher um conjunto para cada alimentador (opção 1), respeitando como critério a capacidade disponível dos alimentadores participantes.
2. Na ausência de sucesso do item anterior, devido a insuficiência de suprimento dos alimentadores ou pela violação de alguma restrição, o AS envia uma mensagem aos AALs (opção 1), solicitando que “subcontrate” outros alimentadores, definidos como “opção 2”. Este subcontrato é uma solicitação de negociação, ofertada aos vizinhos “indiretos” do AAL iniciador, ou seja, “vizinho do vizinho”. Esta negociação possui como objetivo transferir parte da carga do vizinho direto (opção 1) para o vizinho indireto (opção 2), desta forma, aumentando a capacidade disponível do vizinho direto (opção 1). A tabela é então atualizada e reavaliada, o que pode resultar em dois cenários, descritos a seguir:
  - O aumento da capacidade do alimentador é o suficiente para assumir todas as cargas fora de serviço, portanto, o restabelecimento é finalizado.

- Caso mesmo com o aumento de capacidade do alimentador não seja suficiente, inicia-se o processo de não restabelecimento de cargas que se encontram desligadas. Pode-se ainda, no decorrer da subcontratação, ocorrer uma rejeição de negociação, condição em que o alimentador vizinho indireto (opção 2) esteja operando em carregamento máximo, portanto, não existe a possibilidade de assumir parte do carregamento do vizinho direto (opção 1). Diante desta situação, também se inicia a seletividade de cargas desligadas que não serão restabelecidas.

## Construção da tabela

O procedimento apresentado neste trabalho para a construção da tabela é uma adaptação dos trabalhos de Souza (2015), Tsai & Pan (2011), Pan & Tsai (2009) e Tsai (2008). A construção da tabela é obtida com a execução dos seguintes passos:

1. Identificar os setores fora de serviço com as respectivas demandas e prioridades.
2. Construir uma tabela de relacionamento de chaves, setores e demanda. Para isso, deve-se inicialmente conhecer as combinações dos setores, dadas pela Equação 4.9, em que o número máximo de combinações é representado pela Equação 4.10. Na sequência, deve-se encontrar a demanda para cada combinação e a respectiva prioridade por combinação, dadas pelas Equações 4.11 e 4.12.

$$Z_C = \left\{ Z_{C_k} = \bigcup_{i=1}^k \text{SetorOFF}_k \right\} \quad k = 1, \dots, nf - 1 \quad (4.9)$$

onde:  $Z_C$  representa as possíveis combinações dos setores fora de serviço, sendo muito menor que o número obtido na Equação 4.10 devido às restrições topológicas;  $nf$  é o número total de setores fora de serviço; cada elemento  $Z_{C_k}$  é um conjunto de  $k$  setores adjacentes delimitados por duas ou mais chaves, sendo ao menos uma delas de interligação; o setor que sofreu a falta não entra nas combinações, representado por  $nf - 1$ .

$$Comb_{max} = \sum_{i=1}^{nc} C_i \quad (4.10)$$

onde:  $Comb_{max}$  representa o número máximo de combinações;  $C$  é conjunto de combinações dos setores e  $nc$  é o número de conjuntos.

$$S_{C_K} = \sum_{i=1}^k S_i \quad (4.11)$$

onde:  $S_{C_k}$  é a demanda para cada combinação  $Z_{C_k}$

$$Prioridade_{C_k} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N Ip_k^i * S_k^i \quad (4.12)$$

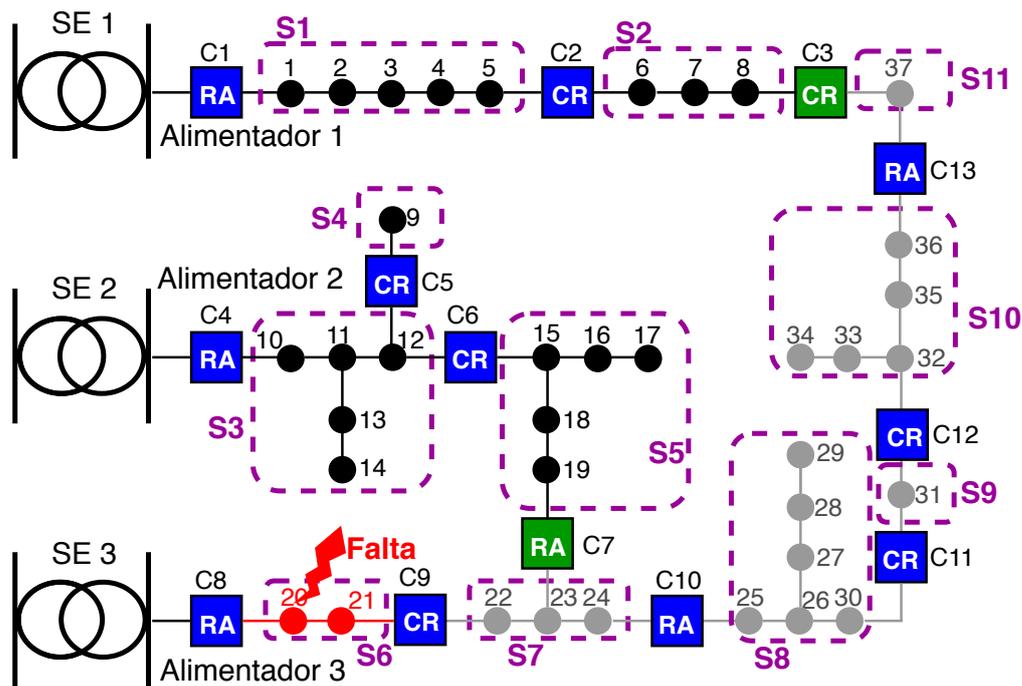
onde:  $Ip_k^i$  é o índice de prioridade da barra  $i$  pertencente ao setor  $k$ ;  $S_k^i$  é a demanda desta barra;  $N$  é o número de barras contidas no setor  $k$ ;  $k$  é a identificação do setor e  $K$  representa os setores pertencentes ao conjunto  $Z_{C_k}$ .

3. O AS analisa as combinações, escolhendo, dentre elas, o somatório de carga de acordo com a capacidade disponível nos alimentadores (opção 1).
4. Atualizar a tabela de relacionamento, verificando os seguintes itens:
  - Caso a tabela esteja vazia, indica que nenhum setor ficou fora das combinações, portanto, executam-se os chaveamentos, finalizando-se o restabelecimento.
  - Caso a tabela não esteja vazia, indica que um ou mais setores não participaram das combinações, portanto, não foram restauradas devido a insuficiência de suprimento.
5. No caso de um ou mais setores não serem restaurados, o AS envia uma mensagem para o AAL iniciador, autorizando a negociação por subcontrato. Nesta negociação, o AAL iniciador envia uma mensagem aos AALs (opção 1), solicitando que negociem com os AALs vizinhos indiretos (opção 2). Esta negociação possui como objetivo transferir parte da carga do alimentador (opção 1) para o alimentador (opção 2), de modo a aumentar a capacidade disponível no alimentador (opção 1). Concluído este passo, reinicia-se os passos 2, 3 e 4. Caso ainda reste combinações na tabela e/ou algumas restrições forem violadas, inicia-se o processo seletivo de cargas que não serão restabelecidas.

Um exemplo da construção da tabela de relacionamento é apresentado pela Tabela 4.1, construída a partir do exemplo ilustrativo da Figura 4.6, sendo uma adaptação da versão apresentada em Souza (2015). Nesta figura, é aplicada uma falta no setor S6, supondo que os alimentadores 1 e 2 não possuem capacidade para assumirem todas as cargas fora de serviço. As barras em falta estão ilustradas na cor vermelha e as barras fora de serviço estão na cor cinza.

A tabela de relacionamento contém colunas com as seguintes informações: A identificação dos alimentadores; a combinação dos setores  $Z_{C_k}$ , expressa pela Equação 4.9; a demanda para cada combinação  $Z_{C_k}$ , expressa pela Equação 4.11; as chaves que delimitam cada combinação  $Z_{C_k}$ , sendo organizada aos pares, em que uma delas é a chave de interligação e a outra varia conforme o ponto extremo do conjunto; por fim, a prioridade para cada combinação  $Z_{C_k}$ , expressa pela Equação 4.12.

A informação contida na segunda coluna da Tabela 4.1 é obtida com o processo de mapeamento realizado pelos ADs, de modo a representar a expressão apresentada pela Equação 4.9. Esta atividade busca mapear as áreas fora de serviço para que, a partir da informação mapeada, os caminhos sejam conhecidos e os setores possam ser recuperados.



**Figura 4.6:** Exemplo ilustrativo para a elaboração da tabela de relacionamentos.

**Tabela 4.1:** Exemplo da tabela de relacionamento.

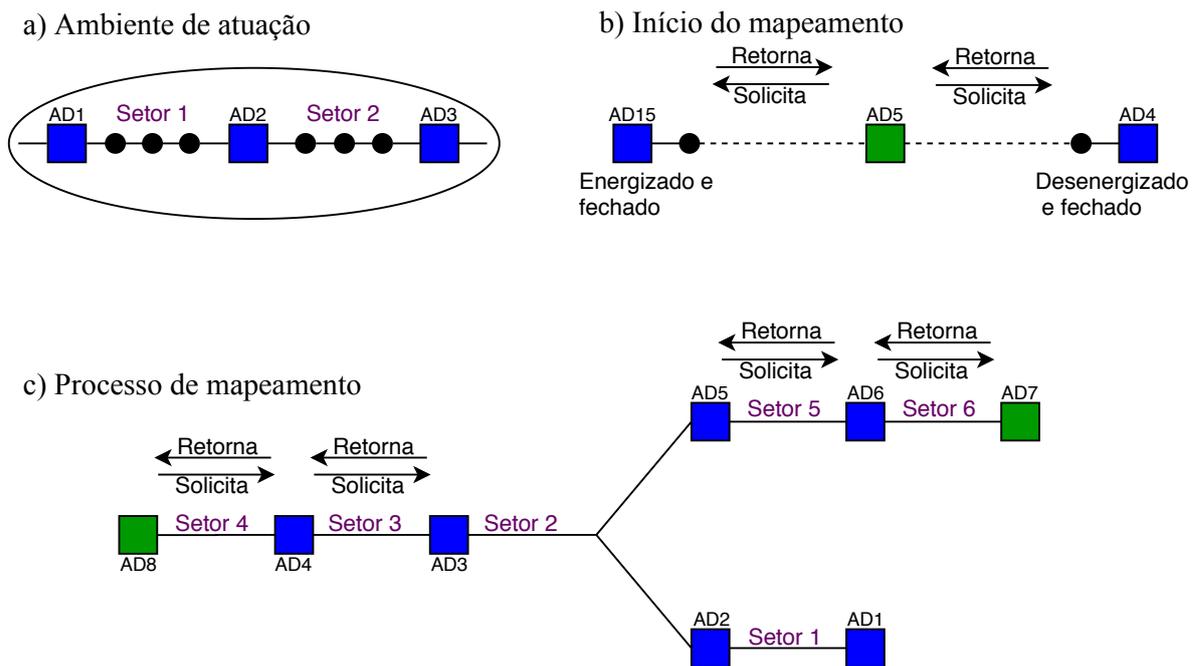
<i>Alimentador</i>	<i>Setor</i>	<i>Demanda <math>S_{C_k}</math> (MVA)</i>	<i>Chaves</i>	<i>Prioridade<math>_{C_k}</math></i>
Alimentador 1	S11	0,012	C3, C13	0,0015
	S11, S10	0,04	C3, C12	0,005
	S11, S10, S9	0,0505	C3, C11	0,0063125
	S11, S10, S9, S8	0,0855	C3, C10	0,0106875
Alimentador 2	S7	0,0175	C7, C10	0,0021875
	S7, S8	0,0525	C7, C11	0,0065625
	S7, S8, S9	0,063	C7, C12	0,007855
	S7, S8, S9, S10	0,091	C7, C13	0,0011375

Fonte: Adaptado de Souza (2015).

Cada AD possui um ambiente de atuação delimitado por outros ADs, conhecidos como vizinhos, conforme ilustra a Figura 4.7a. Como pode ser observado nesta figura, o ambiente de atuação do AD2 é limitado, compreendendo os setores 1 e 2, bem como os vizinhos AD1 e AD3, ou seja, qualquer informação que exista além desta fronteira, AD2 desconhece. A informação local pertencente ao ambiente de atuação de cada AD é utilizada no processo de mapeamento.

O mapeamento é iniciado quando o AS necessitar desta informação, portanto, para iniciá-lo, o AS solicita aos ADs de interligação para que inicie o mapeamento. Esta mensagem é enviada apenas àqueles que possuem conexão com o alimentador defeituoso.

Ao receber a solicitação de mapeamento, o AD de interligação envia uma mensagem aos seus vizinhos, perguntando o posicionamento da chave (aberto ou fechado) e seu estado (energizado/desenergizado). Com base nas respostas, os caminhos a serem mapeados são iden-



**Figura 4.7:** Processo de mapeamento.

tificados.

Quando o AD de interligação inicia o mapeamento, gera uma reação em cadeia entre os ADs pertencentes ao alimentador defeituoso, fazendo com que se comuniquem entre si. Conforme se propaga a comunicação, os ADs posteriores carregam a informação de seus antecessores, com isso, os caminhos são traçados e os setores organizados de forma a se obter grupos candidatos a restauração.

A Figura 4.7b ilustra esse início. O AD5 representa o dispositivo de interligação enquanto os demais são chaves comuns. Nesta ilustração, considera-se que o AD15 pertence ao alimentador não afetado pela falta, sendo assim, sua chave se encontra energizada e fechada. Em relação ao AD4, este pertence ao alimentador defeituoso, portanto, sua chave se encontra fechada porém desenergizada, o que indica que é o caminho a ser percorrido. Com base nas respostas do AD15 e do AD4, é identificado para qual alimentador que a busca irá se propagar. Como observação, as chaves energizadas e abertas não indicam caminho, isso porque podem ser o próprio dispositivo de interligação ou o dispositivo utilizado na isolação do setor em falta mais próximo da subestação. O outro dispositivo usado na isolação se encontra um pouco mais afastado da subestação, portanto, sua chave está aberta e desenergizada, o que indica que também não é um caminho a ser percorrido.

Normalmente, há mais de uma chave de interligação que conecta o alimentador defeituoso com os demais alimentadores. Portanto, o mapeamento é realizado em ambas direções, ou seja, os caminhos a serem recuperados são mapeados a partir de cada chave de interligação, de forma a obter uma formação de grupo para cada alimentador vizinho, grupo o qual contém cargas candidatas a serem restauradas, como ilustra a Figura 4.7c.

Como critério de parada do mapeamento, sempre que não houver caminho a ser percorrido, o AD envia toda a informação reunida para AS. No entanto, pode acontecer de mais de um AD enviar mensagem ao AS, portanto, como condição de parada, apenas os ADs pertencentes ao tronco principal indicam o fim do mapeamento.

## Seleção de cargas para o não restabelecimento

As regras adotadas para o não restabelecimento de carga foram baseadas no trabalho de Huang et al. (2005), o qual propõe uma divisão em quatro níveis, de acordo com o grau de importância para cada categoria de cliente. A seguir são apresentados as respectivas divisões:

- Nível 1: São clientes residenciais;
- Nível 2: São clientes comerciais, escolas, instalações esportivas e de entretenimento, etc.;
- Nível 3: São clientes industriais, cuja ausência de fornecimento pode resultar em sérios danos financeiros (bancos, refinarias de petróleo, fábricas, etc.);
- Nível 4: São clientes que o impacto direto pode causar riscos à segurança (hospitais, delegacias, quartéis de bombeiros, sistemas de telecomunicações, etc.).

Cada barra de carga possui seu próprio índice de prioridade, conforme identificado pela variável  $I_p$  da Equação 4.12. Nas situações em que houver violação da capacidade do alimentador ou afundamento da tensão e não for possível resolver com as estratégias de transferência de carga entre os alimentadores, o não restabelecimento de carga deve ser executado, iniciando pelas barras menos prioritárias.

Com base na identificação dos níveis de prioridade, inicia-se a seleção de carga que se encontra desligada para não ser restabelecida. Contudo, em um SD existem diversas barras com os mesmos índices de prioridade, portanto, para diferenciá-las, Souza (2015) propõe multiplicar o índice de prioridade pela respectiva demanda.

Desta maneira, o AS realiza a remoção de carga do conjunto candidato a ser restaurado, inicia o fluxo de potência e atualiza a coluna referente a demanda da tabela de relacionamento. Este ciclo é repetido até que a tabela esteja vazia. Assim que estiver, finaliza-se o processo de restauração.

## Cálculo da capacidade disponível no alimentador

O cálculo da capacidade disponível é realizado pelo AAL, quando solicitada esta informação, por exemplo, nas atividades de recuperação com um único chaveamento e com a análise

de combinações, em que os agentes envolvidos efetivam os cálculos necessários e devolvem este valor como conteúdo da mensagem.

Este cálculo estima a capacidade em MVA que o alimentador pode assumir de cargas de outros alimentadores na condição pré-falta. Contudo, a topologia de solução encontrada com a estratégia de restabelecimento é temporária, portanto, a demanda sofre uma variação ao longo do tempo. Para representar este fenômeno, adotou-se uma variação de 10% para o carregamento da rede.

No instante da solicitação, o AAL (opção 1) realiza os seguintes cálculos:

a) Cálculo da corrente disponível no ramo:

$$|I_{DR_j}| = |I_{max_j}| - |I_{atual_j}| \quad (4.13)$$

onde:  $I_{max_j}$  representa a corrente máxima no ramo  $j$  e  $I_{atual_j}$  representa a corrente pré-falta deste mesmo ramo.

b) Cálculo da corrente disponível no alimentador (Zidan, 2013; Ciric & Popovic, 2000):

$$|I_{DA}| = \frac{|V_{atual}| - |V_{min}|}{|Z_R|} \quad (4.14)$$

onde:  $V_{atual}$  é a tensão da barra que apresentar menor valor,  $V_{min}$  é o valor mínimo imposto pela rede (usualmente 0,95 p.u.) e  $Z_R$  é a somatória das impedâncias de ramo entre a subestação e a chave de interligação do alimentador.

c) Cálculo da capacidade disponível no alimentador:

$$I_{CDA} = \min(I_{DR}, I_{DA}) \quad (4.15)$$

O menor valor apresentado entre as Equações 4.13 e 4.14 corresponde a corrente  $I_{CDA}$ . A partir deste valor, calcula-se a capacidade disponível no alimentador, conforme a Equação 4.16:

$$CDA_{max} = |V_{min}| * |I_{CDA}| \quad (4.16)$$

Na ausência de sucesso da tentativa de recuperação das combinações com os vizinhos diretos, inicia-se a atividade de subcontrato, objetivando contratar o vizinho indireto para aumentar a capacidade do vizinho direto. Nesta negociação, o vizinho direto calcula o quanto de carga precisa transferir para o vizinho indireto, sendo expresso pela Equação 4.17:

$$S_{transf} = S_{C_K} - CDA_{max} \quad (4.17)$$

onde:  $S_{transf}$  representa a demanda de transferência,  $S_{C_K}$  é a demanda da combinação a ser

transferida e  $CDA_{max}$  é a capacidade disponível no alimentador.

Conhecida a demanda apresentada pela Equação 4.17, o vizinho direto seleciona os setores a serem transferidos. Para isso, ele seleciona os setores próximos da chave de interligação cuja somatória de carga deve ser compatível a apresentada pela equação.

No instante da negociação por subcontrato, o AAL (opção 2) realiza os mesmos cálculos apresentados pelas Equações 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16.

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da estratégia proposta. Os resultados obtidos foram divididos em três casos, sendo utilizada a mesma rede teste em todos os casos.

O Caso I tem como objetivo comparar os resultados das simulações com outras propostas que também empregaram SMAs para solucionar o problema de restabelecimento de energia dos SDs. Para este caso, adotou-se os trabalhos de Souza (2015) e Zidan (2013). Os resultados deste caso são baseados em uma falta aplicada no setor S29 do alimentador 4. Cabe destacar que estes autores serviram de base para a implementação do método proposto neste trabalho.

O Caso II tem como objetivo avaliar os resultados obtidos diante de uma situação crítica. Para isso, alterou-se o carregamento do alimentador 4 e aplicou-se uma falta no setor S19 do alimentador 3. Adicionalmente, objetivando representar a variação de demanda durante o Estado Restaurativa, adotou-se um acréscimo de 10% no carregamento do SD, isto é, em relação ao instante pré-falta.

O Caso III tem como objetivo comparar os resultados com trabalho atual que não utiliza modelo de SMAs para solucionar este problema. Para isso, optou-se pelo trabalho de Ribeiro, Enembreck, Guisi, Casanova, Teixeira, de Souza & Borges (2017), pois este, além de utilizar o mesmo sistema teste do Caso I e II, apresenta informações suficientes para realização da comparação. O cenário de falta é diferente em relação aos casos anteriores, sendo aplicada no ramo que liga as barras 52 e 57 do alimentador 4.

### 5.2 Sistema teste

Os dados do SD são apresentados no Apêndice A, os quais foram retirados do trabalho de Das (2006). Esse SD é composto por duas subestação e quatro alimentadores, apresentando um total de 70 barras e 68 ramos, contendo um total de 72 chaves de manobras, sendo apenas

quatro delas de interligação. A Figura 5.1 ilustra a rede teste.

No entanto, cabe destacar que o ponto de operação, em relação aos dados iniciais do apêndice, indica que algumas barras possuem seus limites operativos violados, portanto, para os três casos, houve alteração no carregamento da rede. Na respectiva seção de cada caso é descrita a alteração realizada.

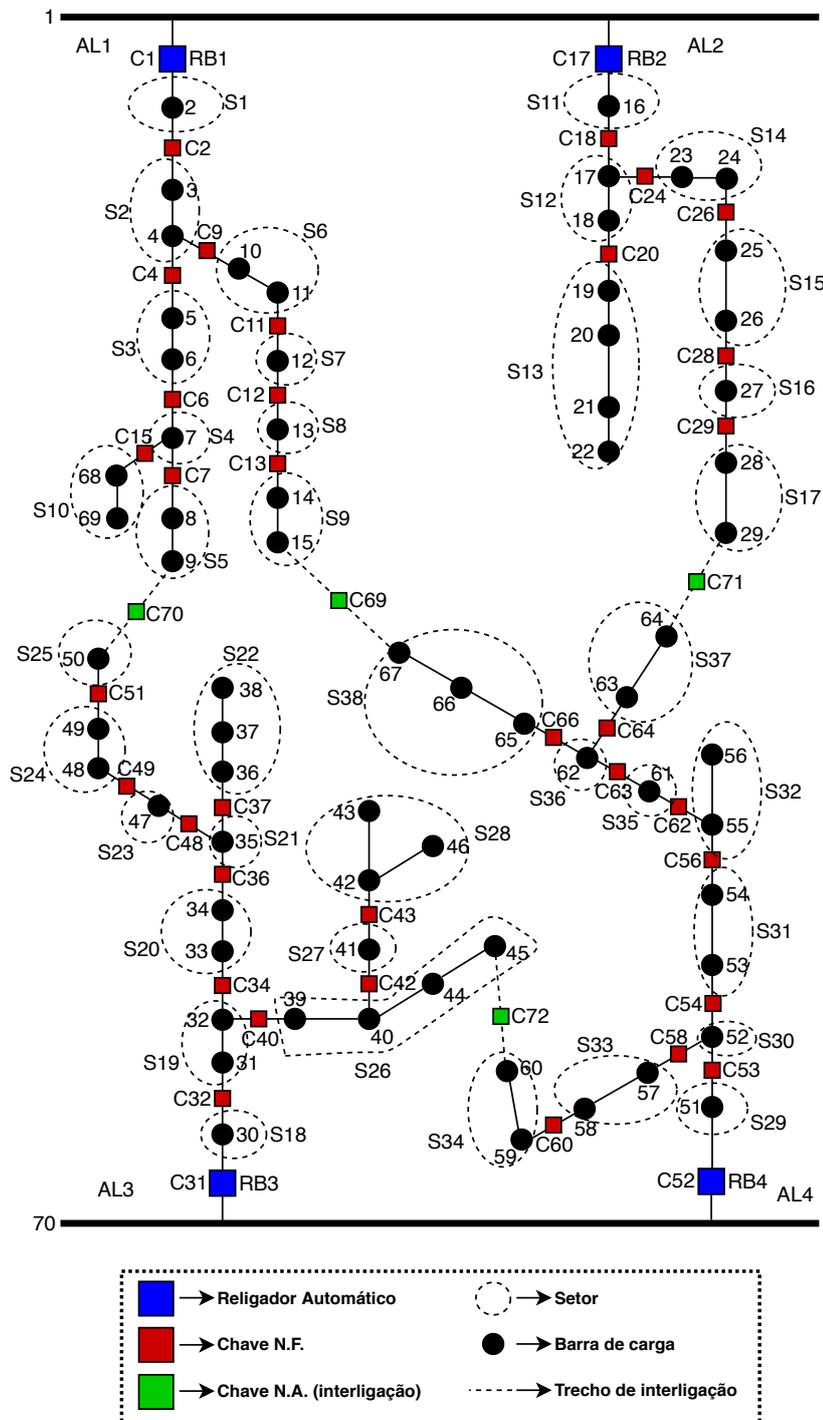


Figura 5.1: Ilustração do SD teste.

Em relação a seleção de cargas para não serem restabelecidas, este é baseado na prioridade

do tipo de carga de cada barra. Para o SD teste, adotou-se as prioridades propostas por Huang et al. (2005), de acordo com o grau de importância de cada categoria de cliente apresentado na Tabela 5.1. O grau de importância de cada barra do SD teste é apresentado no Apêndice A.

**Tabela 5.1:** Índices de prioridade de acordo com cada nível de cliente.

<i>Grau de importância</i>	<i>Índice de prioridade - Ip</i>
Nível 1	0,125
Nível 2	0,25
Nível 3	0,5
Nível 4	1

Fonte: Huang et al. (2005).

As cargas selecionadas para não serem restabelecidas são desligadas diretamente da barra em que estão conectadas. No entanto, no SD adotado nos testes existem barras com as mesmas prioridades. Para diferenciá-las, Souza (2015) propõe multiplicar o índice de prioridade pela respectiva demanda, o que também foi adotado neste trabalho.

### 5.3 Caso I - Comparação dos resultados com outras aplicações de SMAs

O Caso I, como já mencionado, tem como objetivo comparar os resultados obtidos com a solução apresentada por outros autores que também desenvolveram uma aplicação de SMA para o problema de restauração nos SDs. Neste Caso I, os resultados foram comparados com os trabalhos de Zidan (2013) e Souza (2015), os quais serviram de base para a implementação do modelo proposto. Para fins de análise, os resultados apresentados pelo trabalho de Zidan (2013) foram denominados de “Método Base I”, os resultados de Souza (2015) foram denominados de “Método Base II” e os resultados deste trabalho foram denominados de “Método proposto”.

Nos testes, os autores relatam que foram realizadas modificações no carregamento, sem apresentar a respectiva alteração, contudo, ao analisar os resultados apresentados, percebeu-se que os testes para este caso foram realizados com o carregamento a 75% em relação ao apresentado no apêndice. Os resultados do caso comparativo são baseados em uma falta aplicada no setor S29 do alimentador 4.

Após aplicar uma falta no setor S29 do alimentador 4, a isolação ocorre com a abertura das chaves C52 e C53. A Tabela 5.2 apresenta a demanda do setor em falta (isolado) e dos setores a serem recuperados para os três métodos.

Como pode ser observado na Tabela 5.2, as demandas do setor isolado e dos setores fora de serviço apresentadas pelo Método Proposto são próximas as apresentadas pelos outros

autores. Essa pequena diferença surge devido a arredondamentos adotados nos valores das cargas, visto que os setores fora de serviço são os mesmos.

**Tabela 5.2:** Demanda do setor em falta e dos setores a serem recuperados do Caso I.

<i>Método</i>	<i>Setor isolado</i>	<i>Demanda do setor isolado (MVA)</i>	<i>Setores fora de serviço</i>	<i>Demanda dos setores fora de serviço (MVA)</i>
Base I	S29	0,0648	S30 ao S38	1,316
Base II	S29	0,0648	S30 ao S38	1,316
Proposto	S29	0,0649	S30 ao S38	1,322

Ao analisar a capacidade disponível dos alimentadores 1, 2 e 3, apresentada pela Tabela 5.3, valores obtidos através da Equação 4.15, observe-se que estes alimentadores não possuem condições de assumir com um único chaveamento o carregamento dos setores fora de serviço apresentados pela Tabela 5.2, portanto, iniciou-se o plano de recuperação que envolve as combinações dos setores em grupos.

**Tabela 5.3:** Capacidade disponível dos alimentadores do Caso I.

$CDA_{max}$ (kVA)	
Alimentador 1	560,159
Alimentador 2	559,340
Alimentador 3	904,168

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam a tabela de relacionamento e as atividades de manobra para os três métodos, respectivamente. Na solução apresentada pelo Método Base I, foi realizada transferência do setor S25 do alimentador 3 para o alimentador 1 com a abertura da chave C51 e o fechamento da chave C70. Na sequência, o alimentador 1 assume o setor S38 do alimentador 4 com a abertura da chave C66 e fechamento da chave C69. Em seguida, o alimentador 2 assume os setores S37 e S36 do alimentador 4 ao abrir a chave C63 e fechar a chave C71. Por fim, o alimentador 3 assume os demais setores do alimentador 4 ao fechar a chave C72. A respeito do Método Base II, a solução obtida é semelhante à anterior, exceto a manobra de transferência de carga do alimentador 3 para o alimentador 1, ou seja, o alimentador 3 assume todos os setores contidos entre a chave C72 e a chave C63, na sequência, o alimentador 1 assume o setor S38 ao abrir a chave C66 e fechar a chave C69, por fim, o alimentador 2 assume os setores S37 e S36 com o fechamento da chave C71. Em relação ao Método Proposto, a solução difere do Método Base II apenas em relação ao setor S35, sendo que o alimentador 2 assume essa carga e não o alimentador 3. As linhas destacadas em cinza da Tabela 5.4 referem-se a solução obtida pelo Método Proposto.

Devido a pequena diferença entre as atividades de manobra apresentadas pelos três métodos, uma pequena diferença no ponto de operação é observada. A Tabela 5.6 apresenta uma

**Tabela 5.4:** Tabela de relacionamento do Caso I.

<i>Alimentador</i>	<i>Setor</i>	<i>Demanda <math>S_{C_k}</math> (kVA)</i>	<i>Chaves</i>
AL 1	S38	364,1104	C69, C66
	S38, S36	542,7553	C69, C64, C63
	S38, S36, S35	552,8176	C69, C64, C62
	S38, S36, S35, S32	632,4554	C69, C64, C56
	S38, S36, S35, S32, S31	716,3954	C69, C64, C54
	S38, S36, S35, S32, S31, S30	736,9383	C69, C64, C58
	S38, S36, S35, S32, S31, S30, S33	1.063,34	C69, C64, C60
AL 2	S37	84,9285	C71, C64
	S37, S36	263,5734	C71, C66, C63
	S37, S36, S35	273,6357	C71, C66, C62
	S37, S36, S35, S32	353,2735	C71, C66, C56
	S37, S36, S35, S32, S31	437,2135	C71, C66, C54
	S37, S36, S35, S32, S31, S30	457,7564	C71, C66, C58
	S37, S36, S35, S32, S31, S30, S33	784,1575	C71, C66, C60
AL 3	S34	174,0907	C72, C60
	S34, S33	500,4918	C72, C58
	S34, S33, S30	521,0347	C72, C54
	S34, S33, S30, S31	604,9747	C72, C56
	S34, S33, S30, S31, S32	684,6125	C72, C62
	S34, S33, S30, S31, S32, S35	694,6748	C72, C63
	S34, S33, S30, S31, S32, S35, S36	873,3197	C72, C66, C64

**Tabela 5.5:** Sequência das atividades de manobra do Caso I.

<i>Atividade</i>	<i>Método Base I</i>	<i>Método Base II</i>	<i>Método Proposto</i>
1	Abre 51	Abre 63	Abre 66
2	Fecha 70	Fecha 72	Fecha 69
3	Abre 63	Abre 66	Abre 62
4	Abre 66	Fecha 69	Fecha 72
5	Fecha 72	Fecha 71	Fecha 71
6	Fecha 71	-	-
7	Fecha 69	-	-

comparação entre os pontos de operação no instante pré-falta e pós-restabelecimento, sendo avaliados apenas as perdas e a menor tensão do sistema.

A partir da Tabela 5.6, nota-se que o Método Proposto quando comparado ao Método Base II, apresentou melhor solução, obtendo melhor tensão e menores perdas. Em relação ao Método Base I, o Método Proposto apresentou melhor tensão, porém, maiores perdas. Essa diferença nas perdas é devida ao alívio do carregamento do alimentador 3, o qual transfere parte da carga para o alimentador 1. Embora tenha apresentado menores perdas, apresentou tensão inferior, o

**Tabela 5.6:** Comparação dos resultados pré-falta e pós-restabelecimento do Caso I.

<i>Parâmetros</i>	<i>Pré-falta</i>	<i>Pós-restabelecimento</i>		
		<i>Método Base I</i>	<i>Método Base II</i>	<i>Método Proposto</i>
Tensão Vmin (p.u.)	0,937	0,9071	0,908	0,9131
Perdas (MW)	0,175	0,2626	0,287	0,2857
Perdas (Mvar)	0,148	0,2297	0,239	0,2332

que pode ser um problema na condição de variações positivas no carregamento durante o Estado Restaurativo. Além disso, o Estado Restaurativo é uma situação de emergência e temporária, portanto, a prioridade é atender o maior número possível de consumidores, adicionalmente, melhores níveis de tensão possibilitam o alimentador assumir maiores carregamentos, visto que a tensão, dentre as restrições, normalmente possui seus limites violados antes das demais.

## 5.4 Caso II - Cargas não restabelecidas

O Caso II tem como objetivo avaliar os resultados obtidos diante de uma situação crítica. Para isso, adotou-se a mesma rede utilizada no Caso I, porém, com algumas alterações. A simulação é baseada em uma falta aplicada no setor S19 do alimentador 3. Além disso, aumentou-se em 20% o carregamento do alimentador 4 enquanto os demais alimentadores permaneceram com o mesmo carregamento. Por fim, objetivando avaliar o impacto que a variação de carga durante o Estado Restaurativo causa na tomada de decisão, adotou-se uma variação de 10% no carregamento do SD em relação ao instante pré-falta.

Aplicada a falta, a isolamento do setor S19 ocorre com a abertura das chaves C32, C34 e C40. Esta ação corretiva faz com que apenas o setor S18 continue sendo atendido pelo alimentador 3, enquanto os demais setores, exceto o em falta, necessitem de manobras adicionais para serem restabelecidos. A Tabela 5.7 apresenta os setores a serem recuperados bem como as respectivas demandas.

**Tabela 5.7:** Demanda dos setores a serem recuperados do Caso II.

<i>Setor isolado</i>	<i>Setores fora de serviço</i>	<i>Demanda dos setores fora de serviço (MVA)</i>	<i>Demanda dos setores fora de serviço considerando a variação de 10% (MVA)</i>
S19	S20 ao S28	1,37816	1,51597

Na sequência, o AAL 3 inicia as atividades de restabelecimento ao se comunicar com os agentes alimentadores opção 1, que neste caso são os AAL1 e AAL4. Nesta comunicação, o AAL1 apresentou maior capacidade disponível, no entanto, é insuficiente para assumir todas

as cargas fora de serviço. Desta maneira, o AAL3 solicita para que o AS assuma as próximas atividades. A Tabela 5.8 apresenta a capacidade disponível dos alimentadores, considerando o acréscimo de 10% do carregamento.

**Tabela 5.8:** Capacidade disponível dos alimentadores do Caso II.

$CDA_{max}$ (kVA)	
Alimentador 1	521,95232
Alimentador 2	498,63361
Alimentador 4	153,20212

Ao avaliar a tabela de combinações, apresentada pela Tabela 5.9, os alimentadores 1 e 4 apresentam capacidade insuficiente para assumir os setores fora de serviço. Informação esta, também verificada a partir da Tabela 5.8, que ao somar as capacidades disponíveis, não atingem a demanda apresentada pela Tabela 5.7. Desta maneira, o AS solicita ao AAL4 para que subcontrate outros alimentadores.

**Tabela 5.9:** Tabela de relacionamento do Caso II.

<i>Alimentador</i>	<i>Setor</i>	<i>Demanda <math>S_{C_k}</math> (kVA)</i>	<i>Chaves</i>
AL 1	S25	164,7688	C70, C51
	S25, S24	405,8895	C70, C49
	S25, S24, S23	518,7668	C70, C48
	S25, S24, S23, S21	567,1047	C70, C37, C36
	S25, S24, S23, S21, S22	726,6553	C70, C36
	S25, S24, S23, S21, S22, S20	802,9741	C70
AL 4	S26	376,607	C72, C42
	S26, S27	514,1422	C72, C43
	S26, S27, S28	713,0023	C72

Durante esta negociação, o agente AAL4 inicia a subcontratação com o AAL1, porém, sem sucesso, isso porque o alimentador 1 já está negociando para assumir cargas do alimentador 3, portanto, qualquer solicitação por subcontratação será negada enquanto não concluir as atividades com o alimentador 3. Na sequência, a subcontratação é iniciada com o AAL2, obtendo sucesso. Deste modo, parte do carregamento do alimentador 4 é transferido para o alimentador 2. A Tabela 5.10 apresenta a referida transferência.

Concluído o alívio de carregamento, o alimentador 4 possui condições de assumir parte do carregamento do alimentador 3. Tal decisão se refere a última linha do AL 4, combinação destacada em cinza na Tabela 5.9. A Tabela 5.11 apresenta as manobras aplicadas e a demanda restabelecida.

As manobras de recuperação envolvidas com o alimentador 4 não necessitaram da ativi-

**Tabela 5.10:** Transferência de carga do alimentador 4 para o alimentador 2 do Caso II.

<i>Setor transferido</i>	<i>Demanda do setor transferido (MVA)</i>	<i>Sequência de operação</i>	
		<i>Abre</i>	<i>Fecha</i>
S37	0,1121056	C64	C71

**Tabela 5.11:** Restabelecimento parcial do alimentador 3 do Caso II.

<i>Setores restabelecidos</i>	<i>Demanda dos setores restabelecidos (MVA)</i>	<i>Sequência de operação</i>	
		<i>Abre</i>	<i>Fecha</i>
S26, S27 e S28	0,713002	C40	C72

dade de seleção de carga para o não restabelecimento, isso porque as cargas existentes entre o setor isolado e a chave de interligação com o alimentador 4 foram recuperadas. O que não foi possível com o alimentador 1. Ao avaliar a tabela de combinações (última linha do AL 1, destacado em cinza), o conjunto restante ultrapassa consideravelmente a capacidade do alimentador 1. Adicionalmente, o alimentador 1 está impossibilitado de aliviar seu carregamento, pois os alimentadores vizinhos estão indisponíveis. Deste modo, iniciou-se a seletividade de carga para não ser restabelecida. As Tabelas 5.12 e 5.13 apresentam os resultados obtidos.

A decisão de não restabelecimento foi baseada na prioridade de cada barra. O índice de prioridade, conforme apresentado no Capítulo 4, foi o critério utilizado. Basicamente, cada barra apresenta um índice, apresentado na Tabela 5.1, sendo este parâmetro multiplicado pela respectiva demanda desta barra. A partir disso, os menores valores encontrados foram candidatos a serem desligados.

**Tabela 5.12:** Cargas não restauradas do alimentador 3 do Caso II.

<i>Cargas não restabelecidas</i>	<i>Demanda (kVA)</i>
Barras: 33, 34, 35, 36, 38 e 47	347,5846

**Tabela 5.13:** Carga transferidas do alimentador 3 para o alimentador 1 do Caso II.

<i>Cargas restauradas</i>	<i>Demanda (kVA)</i>	<i>Sequência de operação</i>	
		<i>Abre</i>	<i>Fecha</i>
Barras: 37, 48, 49 e 50	455,3895	C40	C72

Concluída as atividades de restabelecimento, foi executado um fluxo de potência para verificar o ponto de operação da rede. Os valores obtidos com o fluxo de potência são apresentados na Tabela 5.14. Cabe destacar que o carregamento pós-restabelecimento inclui a variação

de 10%.

**Tabela 5.14:** Resultados pós-restabelecimento do Caso II.

Parâmetros	Pós-restabelecimento		
	Alimentador 1	Alimentador 2	Alimentador 4
Tensão Vmin (p.u.)	0,91629	0,94020	0,90149
Perdas (MW)	0,0853	0,0582	0,1712
Perdas (Mvar)	0,0784	0,0436	0,1505
Demanda (MVA)	1,50114	1,24478	2,41795

Com base na Tabela 5.14, o alimentador 4 está operando próximo ao limite enquanto o alimentador 2 possui melhores níveis de tensão. Aparentemente, o alimentador 2 tem condições de assumir maior carregamento. No entanto, isso não foi possível, pois, para assumir o setor S36 deveria também assumir o setor S38, caso contrário, a transferência de apenas o setor S36 resultaria em um desligamento do setor S38. O resultado apresentado pelo fluxo de potência demonstrou que o acréscimo de carga referente aos setores S36 e S38 resultaram em uma violação de tensão do alimentador 2. Desta maneira, o alimentador 2 não pode assumir maiores cargas do alimentador 4.

## 5.5 Caso III - Comparação dos resultados com aplicação baseada em Q-learning

O Caso III compara os resultados obtidos com os apresentados no trabalho de Ribeiro et al. (2017). Neste trabalho o autor desenvolve uma ferramenta de *software Self-Healing* baseado em “*Q-learning*”, técnica difundida na literatura para trabalhos que utilizam algoritmos de auto aprendizagem.

Os testes foram realizados no mesmo SD apresentado na Figura 5.1. A diferença em relação aos Casos I e II está no carregamento da rede e no local da aplicação da falta. Além disso, Ribeiro et al. (2017) retirou a chave C58 do alimentador 4, fazendo com que os setores S33 e S30 se transformassem em um único setor, posteriormente, aplicou-se uma falta neste setor, precisamente no ramo que liga as barras 52 e 57, ou seja, no ramo em que a chave removida se encontrava. Sob essas condições, a respectiva isolamento ocorre com a abertura das chaves C53, C54 e C60. Os resultados do Caso III foram obtidos com carregamento de 83% do apresentado no apêndice A.

A Tabela 5.15 apresenta os valores de demanda pré-falta. Tais são referentes ao carregamento antes da ocorrência da falta. Para fins de análise, os resultados apresentados pelo trabalho de Ribeiro et al. (2017) foram denominados de “Método Base III” e os resultados deste trabalho

foram denominados, assim como no Caso I, de “Método proposto”.

**Tabela 5.15:** Carregamento pré-falta do SD do Caso III.

<i>Simulação</i>	<i>Pré-falta</i>	
	<i>Método Base III</i>	<i>Método proposto</i>
Demanda (MW)	4,47	4,4612
Perdas (MW)	0,2311	0,227
Tensão Vmin (p.u.)	Barra 67 = 0,9267	Barra 67 = 0,92779

Observa-se que os dados da Tabela 5.15 apresentam uma pequena diferença entre o Método Base III e o proposto. Assim como no Caso I, essa pequena diferença se deve a arredondamentos adotados nos valores das cargas.

Após aplicar uma falta no que liga as barras 52 e 57 do alimentador 4 (considerando a remoção da chave C58), a isolação ocorre com a abertura das chaves C53, C54 e C60. A Tabela 5.16 apresenta os setores isolados e os setores a serem recuperados.

**Tabela 5.16:** Demanda dos setores em falta e dos setores a serem recuperados do Caso III.

<i>Setores isolados</i>	<i>Demanda do setor isolado (kVA)</i>	<i>Setores fora de serviço</i>	<i>Demanda dos setores fora de serviço (kVA)</i>
S30 e S33	383,98996	S31, S32, S34 ao S38	1079,56706

Ao analisar a capacidade disponível dos alimentadores 1, 2 e 3, apresentada pela Tabela 5.17, verificou-se que estes não possuem condições de assumir com um único chaveamento o carregamento, portanto, iniciou-se o plano de recuperação que envolve as combinações dos setores em grupos. As Tabelas 5.18 e 5.19 apresentam a tabela de relacionamento e as atividades de manobra para os dois métodos.

**Tabela 5.17:** Capacidade disponível dos alimentadores do Caso III.

<i>CDA<sub>max</sub> (kVA)</i>	
Alimentador 1	519,41035
Alimentador 2	498,35934
Alimentador 3	789,43647

Na solução apresentada pelo Método Base III, foi realizada transferência do setor S34 do alimentador 4 para o alimentador 3 com a abertura da chave C60 e o fechamento da chave C72. Na sequência, o alimentador 1 assume o setor S38 do alimentador 4 com a abertura da chave C66 e fechamento da chave C69. Em seguida, o alimentador 2 assume o setor S37 do alimentador 4 ao abrir a chave C64 e ao fechar a chave C71. Estas atividades resultaram em não

restabelecimento dos setores S31, S32, S35 e S36. Em relação ao Método Proposto, a solução é semelhante, diferenciando em relação ao alimentador 2, porque este, quando comparado ao Método Base III, assumiu maiores cargas, referentes aos setores S35 e S36. Isto significa que as carga não alimentadas foram reduzidas, deixando apenas os setores S31 e S32 sem alimentação. As linhas destacadas em cinza da Tabela 5.18 referem-se a solução obtida pelo Método Proposto.

**Tabela 5.18:** Tabela de relacionamento do Caso III.

<i>Alimentador</i>	<i>Setor</i>	<i>Demanda <math>S_{C_k}</math> (kVA)</i>	<i>Chaves</i>
AL 1	S38	402,98933	C69, C66
	S38, S36	600,70953	C69, C64, C63
	S38, S36, S35	611,84626	C69, C64, C62
	S38, S36, S35, S32	699,98758	C69, C64, C56
	S38, S36, S35, S32, S31	792,89045	C69, C64, C54
AL 2	S37	93,99701	C71, C64
	S37, S36	291,71721	C71, C66, C63
	S37, S36, S35	302,853946	C71, C66, C62
	S37, S36, S35, S32	390,9953134	C71, C66, C56
	S37, S36, S35, S32, S31	483,89818	C71, C66, C54
AL 3	S34	192,6796	C72, C60

**Tabela 5.19:** Sequência das atividades de manobra do Caso III.

<i>Atividade</i>	<i>Método Base III</i>	<i>Método Proposto</i>
1	Abre 60	Abre 66
2	Abre 66	Fecha 69
3	Abre 64	Abre 60
4	Fecha 72	Fecha 72
5	Fecha 69	Abre 62
6	Fecha 71	Fecha 71

A Tabela 5.20 apresenta uma comparação entre os pontos de operação no instante pré-falta e pós-restabelecimento, sendo avaliadas apenas as perdas ativa e a menor tensão do sistema.

**Tabela 5.20:** Comparação dos resultados pré-falta e pós-restabelecimento do Caso III.

<i>Parâmetros</i>	<i>Pós-restabelecimento</i>	
	<i>Método Base III</i>	<i>Método Proposto</i>
Tensão $V_{min}$ (p.u.)	Barra 65 = 0,9065	Barra 65 = 0,90665
Perdas (MW)	0,2461	0,2675
Barras não restauradas	53, 54, 55, 56, 61 e 62	53, 54, 55 e 56

Embora o Método Proposto tenha recuperado maiores cargas, observa-se que a menor tensão de barra é praticamente a mesma encontrada pelo Método Base III. Isso ocorre porque as manobras no alimentador 1 foram iguais nos dois métodos e a barra 65 pertence ao alimentador 1. Em relação as perdas, houve uma diferença, isso porque o alimentador 2 assumiu maiores cargas, conseqüentemente, houve um aumento na corrente o que levou a esse aumento em relação as perdas.

## 5.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados os testes e os resultados obtidos com a simulação, dividida em três casos, aplicados no mesmo sistema teste disponível na literatura. Para realizar os experimentos, o SD teste foi modelado em Java, o qual, para cada caso, houve alterações no carregamento e no local de aplicação da falta. As análises dos resultados apresentados são referentes às tensões mínimas do SD, perdas, ações de chaveamento, cargas restauradas e as não restabelecidas.

Em relação ao Caso I, os resultados foram comparados com outras propostas que também implementaram SMAs para solucionar o problema de restabelecimento de energia, os quais serviram de base para a implementação do modelo proposto. Observa-se pelos resultados, que o método proposto apresenta resultados similares aos outros trabalhos. No entanto, apresenta um ganho com relação ao perfil de tensão, o que pode possibilitar o alimentador assumir um maior carregamento.

Já no Caso II, elevou-se o carregamento do alimentador 4 a níveis críticos, adicionalmente, adotou-se uma variação no carregamento do SD em relação ao instante pré-falta. Estas modificações no sistema teste possuem o intuito de verificar o quão boa a solução pode ser diante de uma situação crítica. Nos resultados, percebe-se que o não restabelecimento de certas cargas atuou de forma correta, de acordo com as respectivas prioridades.

Nos testes do Caso III, os resultados foram comparados com trabalho atual que utiliza modelo baseado em *Q-learning* para solucionar o problema de restabelecimento de energia. O cenário de falta se difere em relação aos casos anteriores. Percebe-se que o modelo proposto obteve uma solução melhor que a referência comparada, resultando em um maior número de setores restaurados. Cabe destacar que a solução, em relação a opção de não restabelecer certas cargas, não ocorreu diretamente nas barras. Isso porque os agentes não optaram em adicionar os setores S32 e S31 as combinações, visto que, ao adicionar o setor S32, ocorre uma violação na restrição de tensão, portanto, como as cargas deste setor são de baixa prioridade, os agentes decidiram não adicioná-las as combinações. Além disso, para adicionar o setor S31 deve-se, primeiro, adicionar o setor S32, o que leva ao descumprimento da restrição de tensão, portanto, o setor S31 não chega a ter sua prioridade avaliada.

Embora os resultados do modelo foram satisfatórios, este possui suas limitações, apresentadas a seguir:

- O processo de mapeamento deve ser investigado, sendo submetido a testes que envolvam topologias mais complexas, pois se ocorrer de alguns trechos não serem mapeados, consequentemente, setores saudáveis e candidatos a serem restaurados podem não aparecer na tabela de relacionamento;
- Embora a etapa de localização e isolamento faça parte do problema de restabelecimento, o modelo apresentado não realiza esta tarefa;
- A estimação de demanda é uma das etapas do processo de restabelecimento de energia, portanto, para representá-la adotou-se a variação de 10% em relação o instante pré-falta, o que do ponto de vista prático não é simples. Para de fato prever a variação de carga, deve ser implementado nos agentes algum algoritmo que faça essa previsão, ou ainda, caso seja conhecida a curva de demanda, a decisão deve ser tomada com base nesta curva. Estas informações fazem parte do problema, as quais também não foram abordadas no modelo proposto;
- Quanto maior o número de chaves de interligação, maior são as possibilidades de combinação, consequentemente, a complexidade também é maior. Nos testes realizados, o SD apresenta poucas chaves de interligação, portanto, a dinâmica do modelo não foi submetida a testes com alto número de chaves de interligação, o que também pode ser uma limitação do modelo.



# Capítulo 6

## Conclusão

Este trabalho apresentou o estudo do problema de restabelecimento de energia dos SDs, o qual, como técnica de solução, implementou um modelo de SMAs.

Inicialmente, fez-se o levantamento bibliográfico apresentando o panorama atual dos SDs, demonstrando a partir de dados, a vulnerabilidade dos SDs, destacando-se a importância de estudos voltados para estes sistemas. Neste levantamento, foram abordadas algumas definições básicas dos SDs, os elementos que o constituem e os limites operativos de um sistema típico, sendo, a partir destes conhecimentos prévios, direcionados para o problema de restabelecimento de energia dos SDs. Em seguida, apresentou-se o problema de pesquisa do ponto de vista didático, dividindo-o em etapas sequenciais e distintas, apresentando como principal objetivo a estratégia de restabelecimento. A ideia em analisar diante dessa perspectiva é justamente para que possa ser compreendido a tomada de decisão e extrair, a partir dessas observações, informações que serviram como base para o desenvolvimento deste trabalho.

Discorreu-se, em seguida, sobre as principais estratégias de solução do problema apresentadas na literatura. Foram apresentadas as vantagens do uso das plataformas de SMAs nas estratégias descentralizadas de solução, e porque o paradigma de desenvolvimento multiagente vem sendo visto como o mais promissor para as futuras soluções descentralizadas.

Apresentou-se um breve resumo dos principais conceitos do paradigma multiagente, abordando, como questões complementares, algumas definições, características básicas, benefícios e desafios, padrão FIPA e o *framework* JADE. Foram brevemente discutidos os principais algoritmos de solução utilizados com SMAs para o problema de restabelecimento de energia dos SDs, sendo estas, abordagens implementadas pelos pesquisadores da área.

Em seguida, foram analisados relatórios técnicos e diretrizes operacionais aplicadas no problema de restabelecimento, sendo, a partir desses materiais, definidas as regras, as ações e o ambiente de atuação de cada agente.

Em seguida, através dos resultados da revisão bibliográfica, desenvolveu-se um modelo de restabelecimento de energia com estratégia descentralizada, tomando como base uma arquitetura de SMA em três níveis hierárquicos. O modelo foi desenvolvido avaliando-se as técnicas mais consolidadas e mais utilizadas.

Para que a implementação fosse possível, estudou-se a programação orientada a objetos e o *framework* denominado JADE. Em seguida, implementou-se um protótipo computacional multiagente utilizando o JADE com o propósito de restaurar o serviço de entrega de energia dos SDs, destacando a aplicação de um plano estratégico para o restabelecimento de energia com possibilidade de corte de carga, abordando, por exemplo, o mapeamento das áreas fora de serviço, a avaliação da capacidade de suprimento de cada alimentador e a maximização das cargas restauradas através de chaveamento. O modelo é aplicado a um SD típico por meio de simulações, e os resultados obtidos são comparados com trabalhos semelhantes, a partir de parâmetros de avaliação que incluem as tensões mínimas nas barras de carga, perdas da rede, ações de chaveamento e as cargas restauradas.

Os resultados mostraram que o modelo proposto é capaz de restabelecer o sistema com poucos chaveamentos e de forma automática, apenas com a comunicação entre seus agentes. As expectativas em relação às futuras redes estão associadas com a capacidade que estas possuem em responder e coordenar ações, objetivando manter a integridade de suas cargas e restaurar a continuidade de serviço durante distúrbios. Tais entregas de serviços se tratam de pontos importantes sobretudo para a realização das futuras *Smart Grids* porque, dentre os recursos oferecidos, uma das principais funcionalidades esperadas é a capacidade de recuperar suas cargas fora de serviço de maneira automática.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se os seguintes itens:

- Desenvolver uma estratégia em que as ações dos agentes devem seguir “uma diretriz geral de restabelecimento de energia”, capaz de ser aplicada em qualquer SD, sem regras exclusivas para um sistema específico;
- Verificar a restrição de radialidade em redes que, devido a sua topologia, apresentem alta probabilidade de as soluções formarem malhas;
- Verificar a dinâmica dos agentes em sistemas testes com múltiplas falhas;
- Implementar a técnica Nó-Profundidade utilizando SMAs para mapear os setores fora de serviço;
- Implementar um modelo de SMAs capaz de estimar a variação de demanda ao longo do dia, verificando as prioridades dos clientes e o despacho, caso houver, das unidades de geração distribuída sem comprometer as restrições operacionais;
- Desenvolver um modelo de SMAs capaz de realizar o restabelecimento sem a necessidade da comunicação, ou seja, utilizando apenas a informação local do ambiente de atuação sem a necessidade de compartilhá-la.

# Referências Bibliográficas

- Alinjak, T., Pavic, I. & Stojkov, M. (2017). Improvement of backward/forward sweep power flow method by using modified breadth-first search strategy, *IET Generation, Transmission Distribution* **11**(1): 102–109. Citado na página 39.
- Amin, S. M. & Wollenberg, B. F. (2005). Toward a smart grid: power delivery for the 21st century, *IEEE Power and Energy Magazine* **3**(5): 34–41. Citado na página 4.
- ANEEL, A. N. E. E. (2018). Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC). Acesso em: outubro/2018.  
**URL:** <http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade> Citado 3 vezes nas páginas 2, 3 e 9.
- Angioni, A., Lu, S., Hooshyar, H., Cairo, I., Repo, S., Ponci, F., Giustina, D. D., Kulmala, A., Dedè, A., Monti, A., Rosario, G. D., Vanfretti, L. & Garcia, C. C. (2018). A distributed automation architecture for distribution networks, from design to implementation, *Sustainable Energy, Grids and Networks* **15**: 3 – 13. Technologies and Methodologies in Modern Distribution Grid Automation. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 27.
- Ansari, J., Gholami, A. & Kazemi, A. (2015). Holonic structure: a state-of-the-art control architecture based on multi-agent systems for optimal reactive power dispatch in smart grids, *IET Generation, Transmission Distribution* **9**(14): 1922–1934. Citado na página 28.
- Aoki, K., Nara, K., Itoh, M., Satoh, T. & Kuwabara, H. (1989). A new algorithm for service restoration in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **4**(3): 1832–1839. Citado 3 vezes nas páginas 3, 14 e 39.
- Barbati, M., Bruno, G. & Genovese, A. (2012). Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review, *Expert Systems with Applications* **39**(5): 6020 – 6028. Citado na página 24.
- Bellifemine, F., Caire, G. & Greenwood, D. (2007). *Developing multi-agent systems with JADE*, John Wiley & Sons. <http://jade.tilab.com/>. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 27.
- Biagi, M., Greco, S. & Lampe, L. (2012). Neighborhood-knowledge based geo-routing in plc, *2012 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, pp. 7–12. Citado na página 38.
- Botea, A., Rintanen, J. & Banerjee, D. (2012). Optimal reconfiguration for supply restoration with informed a\*search, *IEEE Transactions on Smart Grid* **3**(2): 583–593. Citado na página 14.
- Camillo, M. H., Fanucchi, R. Z., Romero, M. E., de Lima, T. W., da Silva Soares, A., Delbem, A. C. B., Marques, L. T., Maciel, C. D. & London, J. B. A. (2016). Combining exhaustive search and multi-objective evolutionary algorithm for service restoration in large-scale distribution systems, *Electric Power Systems Research* **134**: 1 – 8. Citado na página 4.
- Campos, R. M., Figueroa, C. C., Oyarzún, H. V. & Baeza, J. M. (2018). Self-healing of elec-

- tric distribution networks: A review, *2018 7th International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)*, pp. 63–70. Citado 4 vezes nas páginas 2, 4, 5 e 14.
- Cao, X., Wang, H., Liu, Y., Azizipanah-Abarghooee, R. & Terzija, V. (2017). Coordinating self-healing control of bulk power transmission system based on a hierarchical top-down strategy, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **90**: 147 – 157. Citado na página 33.
- Cardozo, R. F. A. (2015). *Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando Sistemas Imunológicos Artificiais*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- Carreno, E. M., Moreira, N. & Romero, R. (2007). Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm, *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1–6. Citado na página 12.
- Chang, G. W., Chu, S. Y. & Wang, H. L. (2007). An improved backward/forward sweep load flow algorithm for radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **22**(2): 882–884. Citado na página 39.
- Chen, W. (2010). Quantitative decision-making model for distribution system restoration, *IEEE Transactions on Power Systems* **25**(1): 313–321. Citado 3 vezes nas páginas 12, 14 e 40.
- Cherukuri, N. & Nahrstedt, K. (2011). Cooperative congestion control in power grid communication networks, *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 587–592. Citado na página 38.
- Ciric, R. & Popovic, D. (2000). Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **22**(7): 497 – 505. Citado na página 49.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H. & Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery* **3**(3): 1217–1223. Citado na página 12.
- Coelho, A., Rodrigues, A. B. & Silva, M. G. D. (2004). Distribution network reconfiguration with reliability constraints, *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004.*, Vol. 2, pp. 1600–1606 Vol.2. Citado na página 1.
- Copel, C. P. E. (2017). Operação das redes de distribuição - módulo: Operação das chaves fusíveis, seccionadoras, seccionadores, grampos de linha viva e religadores automáticos monofásicos, *Technical report*, COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. Acesso em: julho/2018. Citado na página 40.
- Curcic, S., Ozveren, C., Crowe, L. & Lo, P. (1995). Electric power distribution network restoration: a survey of papers and a review of the restoration problem, *Electric Power Systems Research* **35**(2): 73 – 86. Citado 5 vezes nas páginas 12, 13, 15, 17 e 18.
- Daryani, M. J., Karkevandi, A. E. & Usta, O. (2018). Multi-agent approach to wide-area integrated adaptive protection system of microgrid for pre- and post-contingency conditions, *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pp. 1–6. Citado na página 29.
- Das, D. (2006). Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **28**(5): 331 – 338. Citado 4

vezes nas páginas 51, 77, 79 e 81.

- Dominguez, J. S., Junior, A. J. C., Dominguez, D. S., Frias, D. & Iglesias, S. M. (2015). Using a multi-agent system for monitoring indicators of quality of service in power distribution networks, *IEEE Latin America Transactions* **13**(4): 1048–1054. Citado na página 29.
- Dou, C., Lv, M., Zhao, T., Ji, Y. & Li, H. (2015). Decentralised coordinated control of microgrid based on multi-agent system, *IET Generation, Transmission Distribution* **9**(16): 2474–2484. Citado na página 29.
- El-hawary, M. E. (2014). The smart grid? State-of-the-art and future trends, *Electric Power Components and Systems* **42**(3-4): 239–250. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- Elkhatib, M., Ahmed, M., Elshatshat, R., Salama, M. & Shaban, K. B. (2015). Distribution system restoration based on cooperative multi-agent approach, *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, pp. 42–46. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 33.
- Elmitwally, A., Elsaid, M., Elgamal, M. & Chen, Z. (2015). A fuzzy-multiagent self-healing scheme for a distribution system with distributed generations, *IEEE Transactions on Power Systems* **30**(5): 2612–2622. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 29.
- FIPA (2019). The Foundation for Intelligent Physical Agents. Acesso em: janeiro/2019.  
**URL:** <http://www.fipa.org> Citado na página 25.
- Gamarra, C. & Guerrero, J. M. (2015). Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **48**: 413 – 424. Citado na página 5.
- Ghorbani, J. (2014). *A Multi-Agent Design for Power Distribution Systems Automation, Thesis Doctor of Philosophy*, Thesis doctor of philosophy, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, West Virginia University, Morgantown, United States of America. Citado 6 vezes nas páginas 2, 12, 15, 31, 33 e 38.
- Ghorbani, M. J., Choudhry, M. A. & Feliachi, A. (2016). A multiagent design for power distribution systems automation, *IEEE Transactions on Smart Grid* **7**(1): 329–339. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 33.
- Hameed, F., Hosani, M. A. & Zeineldin, H. H. (2019). A modified backward/forward sweep load flow method for islanded radial microgrids, *IEEE Transactions on Smart Grid* **10**(1): 910–918. Citado na página 39.
- Higgins, N., Vyatkin, V., Nair, N. C. & Schwarz, K. (2011). Distributed power system automation with iec 61850, iec 61499, and intelligent control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* **41**(1): 81–92. Citado na página 38.
- Hsu, Y. ., Huang, H. ., Kuo, H. ., Peng, S. K., Chang, C. W., Chang, K. J., Yu, H. S., Chow, C. E. & Kuo, R. T. (1992). Distribution system service restoration using a heuristic search approach, *IEEE Transactions on Power Delivery* **7**(2): 734–740. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 12.
- Huang, C.-M., Hsieh, C.-T. & Wang, Y.-S. (2011). Evolution of radial basic function neural network for fast restoration of distribution systems with load variations, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **33**(4): 961 – 968. Citado na página 39.

- Huang, M. Y., Chen, C. S. & Lin, C. H. (2005). Innovative service restoration of distribution systems by considering short-term load forecasting of service zones, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **27**(5): 417 – 427. Citado 4 vezes nas páginas 33, 40, 48 e 53.
- Junior, B. R. P., Cossi, A. M., Contreras, J. & Mantovani, J. R. S. (2014). Multiobjective multistage distribution system planning using tabu search, *IET Generation, Transmission Distribution* **8**(1): 35–45. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 14.
- Junior, L. C. S. (2008). *Sequenciamento ótimo da recomposição de sistemas elétricos utilizando algoritmos genéticos*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande. Citado na página 12.
- Kantamneni, A., Brown, L. E., Parker, G. & Weaver, W. W. (2015). Survey of multi-agent systems for microgrid control, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **45**: 192 – 203.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197615001529> Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- Kato, T., Kanamori, H., Suzuoki, Y. & Funabashi, T. (2005). Multi-agent based control and protection of power distributed system - protection scheme with simplified information utilization -, *Proceedings of the 13th International Conference on, Intelligent Systems Application to Power Systems*, pp. 49–54. Citado na página 33.
- Kavousi-Fard, A. & Niknam, T. (2014). Optimal distribution feeder reconfiguration for reliability improvement considering uncertainty, *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**(3): 1344–1353. Citado na página 1.
- Kezunovic, M. (2011). Smart fault location for smart grids, *IEEE Transactions on Smart Grid* **2**(1): 11–22. Citado na página 27.
- Kleinberg, M. R., Miu, K. & Chiang, H. (2011). Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers, *IEEE Transactions on Power Systems* **26**(3): 1110–1117. Citado na página 14.
- Kotilainen, K., Mäkinen, S. J. & Järventausta, P. (2016). Understanding prosumers' intrinsic and extrinsic motivations to become active participants in smart grid innovation ecosystem, *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pp. 1–6. Citado na página 5.
- Kremers, E., de Durana, J. G. & Barambones, O. (2013). Multi-agent modeling for the simulation of a simple smart microgrid, *Energy Conversion and Management* **75**: 643 – 650.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413004214> Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- Kumar, Y., Das, B. & Sharma, J. (2008). Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers, *IEEE Transactions on Power Delivery* **23**(1): 261–270. Citado 5 vezes nas páginas 4, 12, 38, 39 e 40.
- Ledesma, J. J. G. (2012). *Uma Metodologia para Análise de Coordenação e Seletividade da Proteção de Sistemas de Distribuição*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. Citado na página 12.
- Leite, J. B. & Mantovani, J. R. S. (2017). Development of a self-healing strategy with multiagent systems for distribution networks, *IEEE Transactions on Smart Grid* **8**(5): 2198–2206.

Citado 4 vezes nas páginas 2, 5, 29 e 33.

- Li, H., Mao, R., Lai, L. & Qiu, R. C. (2010). Compressed meter reading for delay-sensitive and secure load report in smart grid, *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 114–119. Citado na página 38.
- Lin, W.-M. & Chin, H.-C. (1998). A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery* **13**(3): 870–875. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 40.
- Linares, P. & Rey, L. (2013). The costs of electricity interruptions in Spain. Are we sending the right signals?, *Energy Policy* **61**: 751 – 760. Citado na página 1.
- Ling, W., Liu, D., Lu, Y., Du, P. & Pan, F. (2014). Iec 61850 model expansion toward distributed fault localization, isolation, and supply restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery* **29**(3): 977–984. Citado na página 38.
- Liu, C. C., Lee, S. J. & Venkata, S. S. (1988). An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **3**(2): 619–626. Citado 3 vezes nas páginas 3, 14 e 40.
- Ma, T. & Nakamori, Y. (2005). Agent-based modeling on technological innovation as an evolutionary process, *European Journal of Operational Research* **166**(3): 741 – 755. Advances in Complex Systems Modeling. Citado na página 24.
- Marques, L. T., Delbem, A. C. B. & London, J. B. A. (2018). Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence, *IEEE Transactions on Smart Grid* **9**(3): 2359–2370. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 40.
- McArthur, S. D. J., Davidson, E. M., Catterson, V. M., Dimeas, A. L., Hatziargyriou, N. D., Ponci, F. & Funabashi, T. (2007a). Multi-agent systems for power engineering applications? part i: Concepts, approaches, and technical challenges, *IEEE Transactions on Power Systems* **22**(4): 1743–1752. Citado 5 vezes nas páginas 5, 24, 26, 27 e 38.
- McArthur, S. D. J., Davidson, E. M., Catterson, V. M., Dimeas, A. L., Hatziargyriou, N. D., Ponci, F. & Funabashi, T. (2007b). Multi-agent systems for power engineering applications? part ii: Technologies, standards, and tools for building multi-agent systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **22**(4): 1753–1759. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 26.
- Melo, L. S. (2015). *Desenvolvimento de uma Plataforma para Implementação de Sistemas Multiagentes com Aplicação para Recomposição Automática de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Citado na página 24.
- Miu, K. N., Chiang, H. D. & McNulty, R. J. (2000). Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks, *IEEE Transactions on Power Systems* **15**(3): 1001–1007. Citado na página 40.
- Moradi, M. H., Razini, S. & Hosseinian, S. M. (2016). State of art of multiagent systems in power engineering: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **58**: 814 – 824. Citado 6 vezes nas páginas 2, 5, 23, 26, 27 e 38.
- Morelato, A. L. & Monticelli, A. J. (1989). Heuristic search approach to distribution system restoration, *IEEE Transactions on Power Delivery* **4**(4): 2235–2241. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 13.

- Muhanji, S. O., Muzhikyan, A. & Farid, A. M. (2018). Distributed control for distributed energy resources: Long-term challenges and lessons learned, *IEEE Access* **6**: 32737–32753. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.
- Nagata, T. & Sasaki, H. (2001). An efficient algorithm for distribution network restoration, *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, Vol. 1, pp. 54–59 vol.1. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 40.
- Nascimento, L. L. & Rolim, J. G. (2013). Multi-agent system for adaptive protection in microgrids, *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, pp. 1–8. Citado na página 29.
- Neto, W. P. M. (2011). *Restauração automática de redes de distribuição de energia elétrica de grande porte com geração distribuída*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- Nikolic, I. & Ghorbani, A. (2011). A method for developing agent-based models of socio-technical systems, *2011 International Conference on Networking, Sensing and Control*, pp. 44–49. Citado na página 24.
- Niyato, D., Dong, Q., Wang, P. & Hossain, E. (2013). Optimizations of power consumption and supply in the smart grid: Analysis of the impact of data communication reliability, *IEEE Transactions on Smart Grid* **4**(1): 21–35. Citado na página 38.
- Pan, Y. & Tsai, M. (2009). Development a bdi-based intelligent agent architecture for distribution systems restoration planning, *2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, pp. 1–6. Citado na página 44.
- Refaat, S. S., Mohamed, A. & Kakosimos, P. (2018). Self-healing control strategy; challenges and opportunities for distribution systems in smart grid, *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*, pp. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas 2, 4, 5 e 29.
- Ren, F., Zhang, M. & Sutanto, D. (2013). A multi-agent solution to distribution system management by considering distributed generators, *IEEE Transactions on Power Systems* **28**(2): 1442–1451. Citado na página 27.
- Ribeiro, R., Enembreck, F., Guisi, D. M., Casanova, D., Teixeira, M., de Souza, F. A. & Borges, A. P. (2017). An advanced software tool to simulate service restoration problems: a case study on power distribution systems, *Procedia Computer Science* **108**: 675 – 684. International Conference on Computational Science, ICCS 2017, 12-14 June 2017, Zurich, Switzerland. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 59.
- Saleem, A., Honeth, N. & Nordström, L. (2010). A case study of multi-agent interoperability in iec 61850 environments, *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, pp. 1–8. Citado na página 38.
- Sampaio, R. F., Melo, L. S., Leão, R. P. S., Barroso, G. C. & Bezerra, J. R. (2017). Automatic restoration system for power distribution networks based on multi-agent systems, *IET Generation, Transmission Distribution* **11**(2): 475–484. Citado 6 vezes nas páginas 5, 12, 13, 29, 33 e 38.
- Sanches, D. S., Junior, J. B. A. L. & Delbem, A. C. B. (2014). Multi-objective evolutionary algorithm for single and multiple fault service restoration in large-scale distribution systems, *Electric Power Systems Research* **110**: 144 – 153. Citado na página 14.

- Santos, A. Q. O. (2018). *Gerenciamento Ótimo de Energia em Microrredes Inteligentes em Modo Conectado*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu. Citado 7 vezes nas páginas 5, 23, 24, 26, 27, 28 e 29.
- Schulz, J. E. (2015). *Sistema Especialista Baseado na Orientação a Objetos para Suporte à Análise de Redes Aéreas de Média Tensão*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu. Citado na página 39.
- Shafie-khah, M. & Catalão, J. P. S. (2015). A stochastic multi-layer agent-based model to study electricity market participants behavior, *IEEE Transactions on Power Systems* **30**(2): 867–881. Citado na página 29.
- Sharma, A., Srinivasan, D. & Trivedi, A. (2018). A decentralized multi-agent approach for service restoration in uncertain environment, *IEEE Transactions on Smart Grid* **9**(4): 3394–3405. Citado na página 33.
- Shin, D.-J., Kim, J.-O., Kim, T.-K., Choo, J.-B. & Singh, C. (2004). Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-tabu algorithm, *Electric Power Systems Research* **71**(2): 145 – 152. Citado na página 14.
- Shirmohammadi, D. (1992). Service restoration in distribution networks via network reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery* **7**(2): 952–958. Citado na página 14.
- Shoham, Y. & Leyton-Brown, K. (2009). *Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*, Cambridge University Press. Citado na página 24.
- Sousa, J. (2013). *Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de programação linear inteiro misto (PLIM)*., Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. Citado na página 13.
- Souza, F. A. (2015). *Modelo baseado em sistema multiagente para autorrecuperação com corte seletivo de carga e ilhamento com geração distribuída para redes elétricas inteligentes*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Citado 19 vezes nas páginas 1, 2, 12, 13, 14, 15, 29, 31, 33, 37, 38, 39, 40, 44, 45, 46, 48, 51 e 53.
- Sperandio, M. (2008). *Planejamento da Automação de Sistemas de Manobra em Redes de Distribuição*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Citado na página 1.
- Su, C., Lan, C., Chou, T. & Chen, C. (2015). Performance evaluation of multiagent systems for navy shipboard power system restoration, *IEEE Transactions on Industry Applications* **51**(4): 2769–2779. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- Taleski, R. & Rajcic, D. (1997). Distribution network reconfiguration for energy loss reduction, *IEEE Transactions on Power Systems* **12**(1): 398–406. Citado na página 12.
- Tian, Y., Lin, T., Zhang, M. & Xu, X. (2009). A new strategy of distribution system service restoration using distributed generation, *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, pp. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.
- Timossi, M. S. (2016). *Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Considerando Variáveis Multiatributo no Desenvolvimento de Novas Topologias*, Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa. Citado na página 12.
- Torres, B. S., Ferreira, L. R. & Aoki, A. R. (2018). Distributed intelligent system for self-

- healing in smart grids, *IEEE Transactions on Power Delivery* **33**(5): 2394–2403. Citado 4 vezes nas páginas 2, 4, 5 e 29.
- Toune, S., Fudo, H., Genji, T., Fukuyama, Y. & Nakanishi, Y. (2002). Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **17**(1): 173–181. Citado na página 13.
- Trujillo, J. D. M. (2010). *Aplicações de Sistemas Multiagentes na Previsão Espacial de Demanda Elétrica em Sistema de Distribuição*, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. Citado na página 24.
- Tsai, M. (2008). Development of an object-oriented service restoration expert system with load variations, *IEEE Transactions on Power Systems* **23**(1): 219–225. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 44.
- Tsai, M. S. & Pan, Y. T. (2011). Application of bdi-based intelligent multi-agent systems for distribution system service restoration planning, *European Transactions on Electrical Power* **21**: 1783 – 1801. Citado na página 44.
- Wang, X., Zhang, P., Wang, Z., Dinavahi, V., Chang, G., Martinez, J. A., Davoudi, A., Mehrizi-Sani, A. & Abhyankar, S. (2013). Interfacing issues in multiagent simulation for smart grid applications, *IEEE Transactions on Power Delivery* **28**(3): 1918–1927. Citado na página 27.
- Wooldridge, M., Jennings, N. R. & Kinny, D. (1999). A methodology for agent-oriented analysis and design, *Proceedings of the Third Annual Conference on Autonomous Agents, AGENTS '99*, ACM, New York, NY, USA, pp. 69–76.  
**URL:** <http://doi.acm.org/10.1145/301136.301165> Citado 3 vezes nas páginas 24, 26 e 27.
- Yuan, C., Illindala, M. S. & Khalsa, A. S. (2017). Modified viterbi algorithm based distribution system restoration strategy for grid resiliency, *IEEE Transactions on Power Delivery* **32**(1): 310–319. Citado na página 12.
- Zendehdel, N. & Yazdi, R. A. G. (2015). Robust agent based distribution system restoration with uncertainty in loads in smart grids, *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* **3**(1): 1–22. Citado na página 33.
- Zhu, Z., Duan, B., Yang, Z., Yin, Q. & Chen, J. (2016). A multi-agent and big data self-healing scheme for active distribution network with inverter-based distributed generators, *2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)*, pp. 972–977. Citado na página 27.
- Zidan, A. A. A. (2013). *Reconfiguration and self-healing mechanisms in distribution systems with high distributed generation penetration*, Thesis doctor of philosophy, University of Waterloo, Ontario, Canada. Citado 9 vezes nas páginas 12, 29, 31, 33, 38, 40, 49, 51 e 53.
- Zidan, A. & El-Saadany, E. F. (2011). Service restoration in balanced and unbalanced distribution systems with high dg penetration, *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8. Citado na página 12.
- Zidan, A. & El-Saadany, E. F. (2012). A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems, *IEEE Transactions on Smart Grid* **3**(3): 1525–1539. Citado 5 vezes nas páginas 2, 4, 33, 39 e 40.
- Zidan, A., Khairalla, M., Abdrabou, A. M., Khalifa, T., Shaban, K., Abdrabou, A., Shatshat, R. E. & Gaouda, A. M. (2017). Fault detection, isolation, and service restoration in dis-

tribution systems: State-of-the-art and future trends, *IEEE Transactions on Smart Grid* **8**(5): 2170–2185. Citado 7 vezes nas páginas 1, 2, 4, 5, 12, 15 e 30.



# Apêndice A

## Dados de Entrada do SD Teste

Os dados da rede de distribuição utilizados nos testes são apresentados a seguir.

**Tabela A.1:** Parâmetros do fluxo de carga do SD.

<i>Tensão base</i>	<i>Nº de barras</i>	<i>Potência base</i>	<i>Tensão máxima</i>	<i>Tensão mínima</i>
11 kV	70	1 MVA	1,05 p.u.	0,90 p.u.

Fonte: Das (2006).

**Tabela A.2:** Parâmetros das subestações do SD.

<i>Subestação</i>	<i>Barra</i>	<i>P. máx (MW)</i>	<i>Q. máx (Mvar)</i>
1	11	6,00	2,00
2	70	6,00	2,00

Fonte: Das (2006).

**Tabela A.3:** Parâmetros dos ramos do SD.

<i>Alimentador</i>	<i>Setor</i>	<i>Nº Ramo</i>	<i>De (Barra)</i>	<i>Para (Barra)</i>	<i>R(ohms)</i>	<i>X(ohms)</i>	<i>I máx.(A)</i>	<i>Nº da chave</i>	<i>Estado da chave</i>
1	1	1	1	2	1,097	1,074	270	1	1
1	2	2	2	3	1,463	1,432	270	2	1
1	2	3	3	4	0,731	0,716	270	-	-
1	3	4	4	5	0,366	0,358	270	4	1
1	3	5	5	6	1,828	1,790	270	-	-
1	4	6	6	7	1,097	1,074	270	6	1
1	5	7	7	8	0,731	0,716	270	7	1
1	5	8	8	9	0,731	0,716	270	-	-



4	29	52	70	51	0,366	0,358	270	52	1
4	30	53	51	52	1,436	1,432	270	53	1
4	31	54	52	53	1,463	1,432	270	54	1
4	31	55	53	54	0,914	0,895	270	-	-
4	32	56	54	55	1,097	1,074	270	56	1
4	32	57	55	56	1,097	1,074	270	-	-
4	33	58	52	57	0,270	0,183	208	58	1
4	33	59	57	58	0,270	0,183	208	-	-
4	34	60	58	59	0,810	0,550	208	60	1
4	34	61	59	60	1,296	0,881	208	-	-
4	35	62	55	61	1,188	0,807	208	62	1
4	36	63	61	62	1,188	0,807	208	63	1
4	37	64	62	63	0,810	0,550	208	64	1
4	37	65	63	64	1,620	1,101	208	-	-
4	38	66	62	65	1,080	0,734	208	66	1
4	38	67	65	66	0,540	0,367	208	-	-
4	38	68	66	67	1,080	0,734	208	-	-

Fonte: Das (2006).

**Tabela A.4:** Chaves de interconexão do SD.

<i>De (Barra)</i>	<i>Para (Barra)</i>	<i>Nº Ramo</i>	<i>R (ohms)</i>	<i>X (ohms)</i>	<i>Nº da chave</i>	<i>Estado</i>
67	15	69	0,454	0,363	69	0
9	50	70	0,681	0,545	70	0
29	64	71	0,681	0,545	71	0
45	60	72	0,254	0,203	72	0

Fonte: Das (2006).

**Tabela A.5:** Carregamento das barras do SD.

<i>Alimentador</i>	<i>Barra</i>	<i>Potência ativa (kW)</i>	<i>Potência reativa (Kvar)</i>	<i>Prioridade</i>
1	2	120,0	108,0	1
1	3	72,0	48,0	0,5
1	4	180,0	156,0	0,125
1	5	90,0	60,0	0,125
1	6	21,6	13,0	0,125
1	7	21,6	17,0	0,125
1	8	15,6	12,0	0,125
1	9	19,0	13,0	0,125
1	10	24,0	12,0	1
1	11	19,2	11,0	0,25
1	12	60,0	48,0	0,5

1	13	126,0	108,0	0,5
1	14	30,0	18,0	1
1	15	48,0	30,0	0,25
1	68	120,0	72,0	1
1	69	48,0	36,0	1
2	16	72,0	36,0	0,5
2	17	48,0	30,0	0,125
2	18	18,0	11,0	0,125
2	19	15,6	8,4	0,125
2	20	36,0	24,0	0,125
2	21	108,0	60,0	0,125
2	22	60,0	36,0	0,125
2	23	72,0	48,0	1
2	24	120,0	96,0	0,25
2	25	96,0	78,0	0,5
2	26	120,0	72,0	0,5
2	27	120,0	66,0	1
2	28	144,0	84,0	0,25
2	29	126,0	84,0	1
3	30	96,0	60,0	0,5
3	31	72,0	48,0	0,125
3	32	15,6	9,6	0,125
3	33	19,2	11,8	0,125
3	34	60,0	36,0	0,125
3	35	48,0	33,6	0,125
3	36	72,0	48,0	0,125
3	37	48,0	36,0	1
3	38	36,0	30,0	0,25
3	39	180,0	120,0	0,5
3	40	72,0	42,0	0,5
3	41	144,0	84,0	1
3	42	108,0	72,0	0,25
3	43	21,6	12,0	0,25
3	44	19,2	12,0	0,25
3	45	120,0	60,0	0,25
3	46	72,0	48,0	0,25
3	47	108,0	84,0	0,25
3	48	122,4	79,2	0,25
3	49	120,0	84,0	0,25
3	50	168,0	108,0	0,25
4	51	72,0	48,0	0,25
4	52	24,0	13,0	0,25

4	53	48,0	36,0	0,25
4	54	43,2	28,8	0,25
4	55	36,0	24,0	0,25
4	56	51,6	36,0	0,25
4	57	96,0	60,0	0,25
4	58	288,0	144,0	1
4	59	150,0	132,0	0,5
4	60	30,0	12,0	1
4	61	12,0	6,0	0,125
4	62	180,0	156,0	0,125
4	63	60,0	36,0	0,125
4	64	36,0	24,0	1
4	65	156,0	144,0	0,5
4	66	180,0	156,0	0,5
4	67	30,0	18,0	0,5

Fonte: Das (2006).