

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Tese de Doutorado

**Estrutura Multiagentes para Autorrecuperação de Redes Elétricas
Inteligentes**

Bruno Silva Torres

Itajubá, Maio de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Bruno Silva Torres

**Estrutura Multiagentes para Autorrecuperação de Redes Elétricas
Inteligentes**

Tese submetida o Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Luiz Eduardo Borges da Silva
Coorientadora: Camila Paes Salomon

Itajubá, Maio de 2022

*Dedico este trabalho à minha querida família,
em especial a minha esposa **Maya**,
a mãe dos meus filhos.*

Agradecimentos

A Deus, por estar sempre presente me protegendo, iluminando meu caminho, indicando a boa direção e sabendo me perdoar quando erro.

Ao Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva pela orientação, apoio e amizade. Seus conselhos técnicos e pessoais serão levados por toda a minha vida.

A Prof.^a Dr.^a Camila Paes Salomon pela orientação, dedicação, incentivo, apoio e inestimável ajuda na confecção deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos que compreenderam todas as minhas ausências e sempre torceram pelo meu sucesso. Em especial para meu Pai que sempre me orientou, apoiou e me deu a base para que esse trabalho se tornasse realidade.

Por último, em especial, para minha esposa Mayane, que sempre me deu força e dividiu todos os momentos, bons e ruins, desse sonho comigo. Por mim, por nós e pelos nossos filhos Laura, Lucas e Victor.

Resumo

Os sistemas de distribuição de energia elétrica representam o elo final entre as empresas geradoras de energia e os consumidores. Tendo características radiais, eles apresentam uma menor confiabilidade, de forma que a falha em algum componente causa a interrupção do fornecimento de energia. Mesmo com o desenvolvimento de novas tecnologias para melhoria na operação e manutenção destes sistemas, falhas e interrupções são inevitáveis. Quando ocorre a interrupção no suprimento de energia devido a uma falha, é necessário que seja feito o restabelecimento do sistema para atender a maior quantidade de cargas, com segurança e no menor intervalo de tempo possível. A rede de distribuição atual está em um estágio de desenvolvimento conhecido como rede elétrica inteligente, utilizando os avanços das tecnologias de informação e comunicação. Esta tese apresenta uma contribuição na implementação de estratégias de autorrecuperação dos sistemas de distribuição de forma descentralizada, que traz como principais vantagens a boa relação custo-benefício, a melhoria na confiabilidade e a possibilidade de expansão incremental do sistema. O sistema proposto é baseado em uma estrutura multiagente inteligente, no qual cada agente possui uma estrutura lógica que é classificada como hierárquica e híbrida. Hierárquica, pois as ações estão divididas em quatro níveis lógicos, a saber: de instinto, de operação normal, de operação anormal e de otimização e predição. E híbrida, pois além da parte lógica, as regras podem acionar rotinas numéricas que auxiliam no processo de tomada de decisão dos agentes. Várias funções de resposta à demanda, além das de autorrecuperação, fazem parte do agente, tais como: de sobrecarga, de corte de carga, de priorização de carga e de evolução da carga. Estas funções permitem que a solução de chaveamento da autorrecuperação encontrada leve em consideração não somente a carga atual do sistema, mas a sua evolução nas próximas horas. Na estrutura multiagente proposta, os agentes só se comunicam com os agentes adjacentes a ele, reduzindo a necessidade de um sistema de comunicação mais robusto e que cubra longas distâncias. Também é proposta uma estrutura de comunicação e troca de mensagens com redundância e eficácia, mitigando os riscos de uma comunicação errônea entre agentes. Mesmo com este tipo de comunicação, a ação do agente ocorre localmente, mas baseado em dados recebido de vários agentes (mesmo não adjacentes) do sistema. Existem também funções implementadas no agente que permitem que ele interaja com os sistemas de proteção tradicionais das redes urbanas de distribuição, monitorando o funcionamento de fusíveis, religadores e seccionadores, permitindo que se tenha as vantagens de uma rede elétrica inteligente, mesmo em um sistema ainda incompleto. O sistema multiagente proposto é validado através de vários exemplos com a utilização de sistemas de distribuição de energia e também com a implementação computacional dos agentes inteligentes hierárquicos híbridos propostos trabalhando em conjunto.

Palavras chave: agente inteligente, autorrecuperação, redes elétricas inteligentes, sistema de distribuição de energia elétrica, sistemas multiagentes.

Abstract

Electricity distribution systems represent the final link between energy-generating companies and consumers. Having radial characteristics, they have lower reliability, so a failure in some components causes the interruption of the power supply. Even with the development of new technologies to improve the operation and maintenance of these systems, losses and interruptions are inevitable. When the power supply is out of the supply due to a failure, the system must be re-established to meet the largest number of loads safely and in the shortest possible time interval. The current distribution network is at a stage of development known as the smart grid, using advances in information and communication technologies. This thesis presents a contribution to implementing self-healing strategies of distribution systems in a decentralized way, which brings as main advantages the good cost-benefit ratio, the improvement in reliability, and the possibility of incremental expansion of the system. The proposed system is based on an intelligent multiagent structure, in which each agent has a logical structure that is classified as hierarchical and hybrid. Hierarchical, because the actions are divided into four logical levels: instinct, normal operation, abnormal operation, and optimization and prediction. And hybrid, because in addition to the logical part, the rules can trigger numerical routines that help in the agents' decision-making process. In addition to self-healing, several demand response functions are part of the agent, such as overload, load cutting, load prioritization, and load evolution. These functions allow the self-healing quealing solution found to consider the current system load and its evolution in the coming hours. In the proposed multiagent structure, agents only communicate with agents adjacent to it, reducing the need for a more robust communication system covering long distances. It is also proposed a structure of communication and exchange of messages with redundancy and effectiveness, mitigating the risks of erroneous communication between agents. Even with this type of communication, agent action occurs locally but is based on data received from multiple (even non-adjacent) system agents. The agent also implements functions that allow it to interact with the traditional protection systems of urban distribution networks, monitoring the operation of fuses, reclosers, and sectionalizers, allowing the advantages of an intelligent electrical network, even in a still incomplete system. The proposed multiagent system is validated through several examples using energy distribution systems and the computational implementation of the proposed hybrid hierarchical intelligent agents working together.

Keywords: intelligent agent, self-healing, smart grids, electric power distribution system, multiagent systems.

Lista de Figuras

Figura 1. Arquitetura de um agente inteligente	32
Figura 2. Trabalhos publicados nos últimos 15 anos contendo os tópicos <i>multiagent</i> e <i>power system</i> , indexados na Web of Science.....	39
Figura 3. Trabalhos publicados nos últimos 15 anos contendo os tópicos <i>multiagent</i> e <i>distribution system</i> , indexados na Web of Science.....	40
Figura 4. Componentes principais do agente inteligente proposto.....	48
Figura 5. Estrutura do agente proposto, com o acionamento de programas externos.....	56
Figura 6. Parte Lógica do Agente: Nível 2.....	60
Figura 7. Exemplo de participação das chaves nos circuitos.....	60
Figura 8. Parte Lógica do Agente: Nível 1.....	65
Figura 9. Exemplo de participação das chaves nos circuitos.....	65
Figura 10. Parte Lógica do Agente: Nível 3 – Isolamento do ramal em curto.....	67
Figura 11. Parte Lógica do Agente: Nível 3 – Restauração – Procedimentos Iniciais.....	68
Figura 12. Sistema teste 1.....	69
Figura 13. Ações operativas no sistema teste 1 na condição pré-falta	71
Figura 14. Ações operativas no sistema teste 1 na condição durante a falta.....	71
Figura 15. Ações operativas no sistema teste 1 na condição de eliminação do curto-circuito.....	72
Figura 16. Ações operativas no sistema teste 1 na condição de localização e isolamento do curto-circuito.....	74
Figura 17. Ações operativas no sistema teste 1, parte inicial do processo de restauração, verificação da capacidade remanescente no circuito 2	75
Figura 18. Ações operativas no sistema teste 1, parte intermediária do processo de restauração, retorno da capacidade remanescente no circuito 2 para a chave S5	76
Figura 19. Ações operativas no sistema teste 1, parte final do processo de restauração.....	76
Figura 20. Ações operativas no sistema teste 1, operação normal com nova configuração.....	77
Figura 21. Sistema teste 1 com nova configuração operativa	77
Figura 22. Sistema teste 2.....	78
Figura 23. Ações operativas no sistema teste 2 na condição pré-falta	79
Figura 24. Ações operativas no sistema teste 2 na condição durante a falta.....	79
Figura 25. Ações operativas no sistema teste 2 na condição de eliminação do curto-circuito.....	80

Figura 26. Ações operativas no sistema teste 2 na condição de localização e isolamento do curto-circuito	80
Figura 27. Ações operativas no sistema teste 2, busca do menor valor remanescente de corrente em cada circuito e disputa entre as chaves S5 e S12.....	83
Figura 28. Ações operativas no sistema teste 2, operação normal com nova configuração.....	83
Figura 29. Sistema teste 2 com nova configuração operativa	84
Figura 30. Sistema teste 3.....	85
Figura 31. Ações operativas no sistema teste 3 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento	86
Figura 32. Ações operativas no sistema teste 3 na condição do processo de restauração.....	88
Figura 33. Sistema teste 3, pós tentativa de restauração	88
Figura 34. Sistema teste 4.....	89
Figura 35. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento	90
Figura 36. Ações operativas no sistema teste 4 na condição do processo de restauração.....	93
Figura 37. Ações operativas no sistema teste 4 na condição pós-restauração.....	93
Figura 38. Sistema teste 4, pós restauração	94
Figura 39. Sistema teste 5.....	95
Figura 40. Ações operativas no sistema teste 5 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento	95
Figura 41. Ações operativas no sistema teste 4 na condição do processo de restauração.....	98
Figura 42. Ações operativas no sistema teste 4 na condição pós-restauração.....	98
Figura 43. Sistema teste 5, pós restauração	99
Figura 44. Estrutura de regras no agente com a implementação da Função de Restabelecimento de um Curto-Circuito	100
Figura 45. Ações operativas no sistema teste 1, parte intermediária do processo de restauração, retorno da capacidade remanescente no circuito 2 para a chave S5, no instante t+14 no em sistema de comunicação: (a) sem redundância e (b) com redundância.....	111
Figura 46. Sistema teste 4, onde o agente da chave S4 apresenta problemas na fase de isolamento do curto-circuito.	114
Figura 47. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento, quando o agente da chave S4 apresenta problemas.....	115

Figura 48. Sistema teste 4, onde o agente da chave S4 apresenta problemas na fase de isolamento do curto-circuito.	116
Figura 49. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento, quando o agente da chave S4 apresenta problemas e S13, S14 e S16 fazem parte do mesmo circuito.....	118
Figura 50. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento, quando o agente da chave S4 apresenta problemas e S13, S14 e S16 fazem parte de outro circuito	119
Figura 51. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento, quando os agentes das chaves S3 e S4 apresentam problemas e S2 para realizar o isolamento da falta.	122
Figura 52. Sistema teste 1, com cargas mais elevadas.	133
Figura 53. Sistema teste 1, com cargas mais elevadas, com representação da capacidade remanescente de cada chave do circuito de socorro e da capacidade remanescente para as faixas 1 e 2 de sobrecarga.	134
Figura 54. Sistema teste 1, restabelecido pelo circuito 2 para uma carga de 40A.	134
Figura 55. Sistema teste 4, com sobrecarga na chave S13, com montante de corte de carga de 50A.....	138
Figura 56. Ações operativas no sistema teste 4, com sobrecarga na chave S13, com montante de corte de carga de 12A, sem circuito de socorro.	142
Figura 57. Sistema teste 4, após a eliminação da sobrecarga de 12A na chave S13, com montante de corte de carga de 15A.....	143
Figura 58. Sistema teste 4, após a eliminação da sobrecarga de 38A na chave S13, com montante de corte de carga de 45A.....	145
Figura 59. Sistema teste 1, com dados de evolução da carga.....	153
Figura 60. Sistema teste 4, com socorro pela chave S5.....	155
Figura 61. Sistema teste 4, com socorro pela chave S5, com abertura da chave S14 para eliminação da sobrecarga de S8, com corte de carga.....	157
Figura 62. Situações de atuação da proteção: (a) com coordenação e seletividade, (b) com coordenação, mas sem seletividade, e (c) sem coordenação e sem seletividade	168
Figura 63. Rede de Análise 1.....	170
Figura 64. Diagrama unifilar de um circuito de distribuição real	177
Figura 65. Fluxograma do pacote computacional de teste da função de integração	189
Figura 66. Parte do diagrama unifilar de uma rede real mostrada na Figura 64	190

Figura 67. Agente reativo	214
Figura 68. Agente reflexivo com memória.....	215
Figura 69. Agente baseado em metas	216
Figura 70. Agente baseado em satisfação.....	216
Figura 71. Sistema teste 5 da Figura 39, conforme mostrado no pacote computacional desenvolvido.	217
Figura 72. Sistema teste 5 da Figura 39, após o processo de autorrecuperação para um curto-circuito entre S3 e S4.	221
Figura 73. Sistema teste 5 da Figura 39, após o processo de autorrecuperação para um curto-circuito entre S8 e S9.	225

Lista de Tabelas

Tabela 1. Quadro comparativo sobre trabalhos selecionados de autorrecuperação de REI utilizando MAS	41
Tabela 2. Exemplos de Times	58
Tabela 3. Dados de Evolução da Carga	153
Tabela 4. Valor das Capacidades Remanescentes das Chaves e do Circuito e Evolução da Carga a ser Suprida	153
Tabela 5. Valor das Capacidades Remanescentes dos Circuitos 2 e 3 e Evolução da Carga a ser Suprida	154
Tabela 6. Valores típicos de carga para os ramais no tempo de 18h de uma sexta-feira.	172
Tabela 7. Cargas típicas no agente S8 e os fusíveis S9, S10 e S11 no tempo de 18h de uma sexta-feira.	173
Tabela 8. Cargas utilizadas no exemplo.	191
Tabela 9. Resultado de curtos-circuitos aplicados nos ramais e a lista de possíveis dispositivos operados gerados pelo agente 64.	192
Tabela 10. Resultado de curtos-circuitos aplicados nos ramais e a lista de possíveis dispositivos operados gerados pelos agentes 64 e 68.	194
Tabela 11. Resultados corretos da lista de possíveis dispositivos operados gerado pelo agente 64 (em percentagem).	195
Tabela 12. Resultados corretos da lista de possíveis dispositivos operados gerado pelos agentes 64 e 68 (em percentagem).	196

Lista de Siglas

AI	Agente Inteligente
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CLP	Controlador Lógico Programável
CO₂	Dióxido de Carbono
CPF	Cadastro de Pessoa Física
DDG	<i>Dispatchable Distributed Generators</i>
DEC	Duração Equivalente de Continuidade
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Continuidade
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
FIPA-ACL	<i>Foundation for Intelligent Physical Agents - Agent Communication Language</i>
GD	Geração Distribuída
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Events</i>
IA	Inteligência Artificial
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE-PES	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers- Power and Energy Society</i>
ISI	<i>International Scientific Indexing</i>
KIF	<i>Knowledge Interchange Format</i>
KQML	<i>Knowledge Query and Manipulation Language</i>
LProlog	<i>Logic Programming Language</i>
MAS	<i>Multi Agent Systems</i>
NA	Normalmente Aberta
NF	Normalmente Fechada
P2P	Peer-To-Peer
PMU	<i>Phasor measurement Unit</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica

RDG	<i>Renewable Distributed Generators</i>
RED	Recurso Energético Distribuído
REI	Redes Elétricas Inteligentes
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
TC	Transformador de Corrente
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
VRs	<i>Voltage Regulators</i>

Lista de Símbolos

#	Informação de corte de carga
*	Informação de carga prioritária
?	Pergunta
A	Resposta
C	Comando
D	Diferença entre a corrente pré-falta e a corrente atual
H	Horário
I	Informação
I	Corrente no agente
I_0	Corrente inicial no agente
I_{0SWx}	Carga dos ramais em pu
I_{AtR1}	Corrente atual no ramal 1
I_{AtR2}	Corrente atual no ramal 2
I_{Atual}	Corrente atual
I_{CC}	Corrente de curto-circuito
$I_{ch\%}$	Percentual de sobrecarga na chave
$I_{ch}(t)$	Corrente registrada nesta hora na curva de carga da chave
I_{chAt}	Corrente atual na chave
I_{chN}	Capacidade nominal na chave
$I_{chPr}(t+1)$	Corrente prevista na chave
I_{PF}	Corrente pré-falta no agente
$I_{Pré-Falta}$	Corrente de pré-falta
$I_{R1}(t)$	Corrente registrada nesta hora na curva de carga do ramal 1
$I_{R2}(t)$	Corrente registrada nesta hora na curva de carga do ramal 2
$I_{SWx-novo}$	Novo conjunto de valores dos ramais de carga em pu
P	Procedimento
T	Tempo
v-f	<i>Voltage-Frequency Control</i>
Δ	Valor de carga percentual pré-estabelecido
E	Percentual da máxima variação de carga

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Descrição do Problema	21
1.2	Objetivo do Trabalho.....	22
1.3	Justificativa da Realização do Trabalho	23
1.4	Estrutura do Trabalho.....	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1	Redes Elétricas Inteligentes.....	27
2.2	Autorrecuperação.....	28
2.3	Abordagens Centralizadas e Descentralizadas.....	29
2.4	Conceito de Agente Inteligente.....	31
2.4.1	Arquitetura de um Agente Inteligente.....	31
2.4.2	Propriedades dos Agentes Inteligentes	33
2.5	Conceito de Sistema Multiagente Inteligente.....	34
2.5.1	Propriedades dos Sistema Multiagentes Inteligentes.....	34
2.5.2	Comunicação entre Agentes de um MAS.....	35
2.5.3	Sistemas Multiagente aplicados ao Sistema Elétrico de Potência	36
2.6	Utilização de MAS em Abordagens Descentralizadas	37
2.7	Análise Crítica de Trabalhos da Literatura Científica	38
2.8	Considerações Finais do Capítulo.....	46
3	PROPOSIÇÃO DA ESTRUTURA DO AGENTE INTELIGENTE.....	48
3.1	Parte Física do Agente Inteligente	48
3.1.1	Sensores e Atuadores	49
3.1.2	Sistema de Comunicação	50
3.1.3	Memória Local e Unidade de Processamento.....	51
3.2	Parte Lógica do Agente Inteligente.....	52
3.2.1	Nível 1: Nível de Instinto.....	52
3.2.2	Nível 2: Nível de Trabalho Normal	53
3.2.3	Nível 3: Nível de Trabalho Anormal	53
3.2.4	Nível 4: Nível de Otimização e Predição.....	54
3.3	Representação dos Elementos de um Agente.....	55
3.4	Agente de Subestação e Agente de Ramal.....	56

3.5	A Definição de Time	57
3.6	Procedimentos de Operação Normal	59
3.7	Considerações Finais do Capítulo	60
4	PROCEDIMENTOS PARA A FUNÇÃO RESTABELECIMENTO DE UM CURTO-CIRCUITO	63
4.1	Procedimentos de Eliminação do Curto-Circuito	63
4.2	Procedimentos de Isolamento do Curto-Circuito	65
4.3	Procedimentos de Restauração do Circuito	67
4.3.1	Primeiro Exemplo: Verificação da Capacidade de um Circuito	69
4.3.2	Segundo Exemplo: Disputa entre Circuitos	77
4.3.3	Terceiro Exemplo: Sem auxílio de outro Circuito	84
4.3.4	Quarto Exemplo: Disputa Indireta entre Circuitos	89
4.3.5	Quinto Exemplo: Disputa Interna entre Circuitos	94
4.4	Sumarizando a Estrutura do Agente com o Restabelecimento de um Curto-Circuito	99
4.4.1	Repasse do Cálculo da Capacidade Remanescente	101
4.4.2	Cálculo da Capacidade Remanescente	101
4.4.3	Cálculo da Capacidade Remanescente de Outros Circuitos	102
4.4.4	Processo de Tomada de Decisão sobre a Alimentação por Outro Circuito ...	103
4.5	Considerações Finais do Capítulo	105
5	PROPOSIÇÃO DO SISTEMA DE COMUNICAÇÃO E DA FUNÇÃO DE RETAGUARDA	108
5.1	Proposição de um Sistema de Troca de Mensagens para o Agente	108
5.1.1	Estrutura de uma Mensagem	108
5.1.2	Proposição de uma Redundância no Sistema de Comunicação	110
5.1.3	Exemplo de uma Troca de Mensagens	111
5.2	Procedimentos para a Função de Retaguarda	112
5.2.1	Etapas do Procedimento	112
5.2.2	Parte Inicial do Procedimento	116
5.2.3	Situação de Problema no Agente que Comanda a Ação	120
5.3	Sumarizando a Estrutura do Agente com as Regras deste Capítulo	123
5.3.1	Sistema de Troca de Mensagens	123
5.3.2	Sistema de Redundância de Comunicação	123
5.3.3	Sistema de Verificação da Integridade Local	124
5.3.4	Sistema de Reenvio de Mensagens	125

5.3.5	Verificação de Chaves de Retaguarda	126
5.3.6	Procedimentos com os “Novos” Agentes Adjacentes	127
5.4	Considerações Finais do Capítulo.....	128
6	PROCEDIMENTOS PARA AS FUNÇÕES RELATIVAS À RESPOSTA À	
	DEMANDA	130
6.1	Função de Sobrecarga.....	130
6.1.1	Acionamento através do Nível 2.....	131
6.1.2	Acionamento através do Nível 3 durante uma Restauração	132
6.1.3	Obtenção das Faixas de Sobrecarga de um Circuito.....	133
6.1.4	Procedimento da Função de Sobrecarga	135
6.2	Função de Subtensão.....	136
6.3	Função de Corte de Carga.....	137
6.3.1	Acionamento Inicial da Função pelo Agente em Sobrecarga.....	137
6.3.2	Prosseguimento da Atuação da Função de Corte de Carga	138
6.4	Função de Priorização de Cargas	147
6.5	Função de Evolução da Carga.....	149
6.5.1	Regras para o Nível 2.....	150
6.5.2	Regras para os Níveis 3 e 4.....	150
6.5.3	Primeiro Exemplo: Solução de um Problema com Evolução da Carga.....	151
6.5.4	Segundo Exemplo: Disputa entre Circuitos com Evolução da Carga.....	154
6.5.5	Terceiro Exemplo: Disputa Indireta entre Circuitos com Evolução da Carga	155
6.6	Sumarizando a Estrutura do Agente com as Regras deste Capítulo.....	157
6.6.1	Modo de Acionamento da Função de Sobrecarga	158
6.6.2	Cálculo das Novas Capacidades Remanescentes.....	159
6.6.3	Verificação do Corte de Carga pelo próprio Agente em Sobrecarga.....	160
6.6.4	Regras de Montagem de Valores e de Priorização	161
6.6.5	Cálculo das Cargas Horárias	162
6.6.6	Cálculo da Previsão das Cargas Horárias	163
6.7	Considerações Finais do Capítulo.....	164
7	PROCEDIMENTOS DE INTEGRAÇÃO DOS AGENTES INTELIGENTES	
	COM OS DISPOSITIVOS DAS REDES TRADICIONAIS	166
7.1	Dispositivos Tradicionais de Proteção e as REIs.....	167
7.2	Função de Atuação com Fusíveis	169
7.2.1	Procedimento de Verificação do Fusível com Problema.....	170
7.2.2	Exemplo da Integração de Fusíveis com as REIs	172

7.3	Função de Atuação com Religadores e Seccionalizadores.....	173
7.3.1	Procedimento da Função de Integração com Religadores e Seccionalizadores 174	
7.3.2	Incorporação do Agente Proposto em Religadores e Seccionalizadores	176
7.4	Aplicação da Função de Integração Proposta com Dispositivos da Proteção Tradicional	176
7.4.1	Exemplo Ilustrativo 1: Curto-circuito no Ramal 82-83	178
7.4.2	Exemplo Ilustrativo 2: Curto-circuito no Ramal 70-71	178
7.4.3	Exemplo Ilustrativo 3: Curto-circuito no Ramal 74-76	179
7.4.4	Exemplo Ilustrativo 4: Atuação errada da Proteção Tradicional	179
7.5	Sumarizando a Estrutura do Agente com as Regras deste Capítulo.....	180
7.5.1	Verificação da Atuação de um Dispositivo de Proteção Tradicional	180
7.5.2	Verificação da Veracidade de Conclusão	181
7.6	Considerações Finais do Capítulo.....	182
8	RESULTADOS COMPUTACIONAIS DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	184
8.1	Testes na Função de Autorrecuperação	184
8.1.1	Estrutura do Pacote Computacional de Autorrecuperação	184
8.1.2	Simulações de Autorrecuperação.....	185
8.2	Teste da Função de Integração com a Proteção Tradicional	188
8.2.1	Estrutura do Programa de Teste da Função de Integração.....	188
8.2.2	Resultado de Testes.....	190
8.2.3	Validação Estatística da Função de Integração.....	195
9	CONCLUSÕES	198
9.1	Realizações da Tese	198
9.2	Contribuições da Tese	202
9.3	Trabalhos Futuros.....	203
10	REFERÊNCIAS	207
APÊNDICE A – TIPOS DE AGENTES.....		214
A.1	Agentes Reativos.....	214
A.2	Agentes Reflexivos com Memória	214
A.3	Agentes Baseados em Metas	215
A.4	Agentes Baseados em Satisfação	216
APÊNDICE B – RESULTADO PASSO A PASSO DAS SIMULAÇÕES		217
B.1	Curto-circuito entre as Chaves S3 e S4	217

B.2	Curto-circuito entre as Chaves S8 e S9	221
------------	---	------------

1 Introdução

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento da sociedade moderna e para a manutenção de suas atividades diárias. A prosperidade econômica, a segurança pública e a saúde das pessoas dependem diretamente deste insumo. Comunidades que carecem de energia elétrica, mesmo que por curtos períodos, têm dificuldades em atender às necessidades humanas, mesmo aquelas mais básicas. E mais, a eletricidade tem a capacidade única de transmitir energia e informação, gerando uma gama cada vez maior de produtos, serviços e aplicações. A eletricidade é tão fundamental que uma das formas de se medir o desenvolvimento social de um país é através do consumo per capita de energia entre a sua população [1].

No contexto de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, pode-se afirmar que atualmente, o setor elétrico brasileiro (SEB) enfrenta uma série de desafios, incluindo infraestrutura envelhecida, falta de investimentos em certas áreas, um crescimento quase contínuo na demanda e a crescente demanda de integração de um crescente número de fontes renováveis de energia. Fato semelhante também ocorre em outras partes do mundo, com desafios idênticos e outros diferenciados, como utilização mais extensiva de veículos elétricos [2]. Assim torna-se necessário melhorar a segurança do provisionamento de energia, e também, devido aos protocolos ambientais, reduzir as emissões de gás carbônico (CO₂). É nesse processo de modernização que surgem as redes elétricas inteligentes (REI, do inglês, *smart grid*), oferecendo maneiras não apenas de enfrentar esses desafios, mas também para desenvolver uma matriz energética eficiente mais limpa, acessível e sustentável [3].

O termo *smart grid*, ou REI, refere-se a um novo conceito que começou a ser abordado no setor elétrico que abarca integração e aplicação de monitoramento em tempo real, sensoriamento, comunicação e controle. Isso de forma a possibilitar o fluxo dinâmico de energia e informação com a finalidade de aumentar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, minimizando o custo da energia para os consumidores, e facilitando a interligação de novas fontes de geração à rede [2], [4], [5].

A crescente demanda da sociedade por um fornecimento de energia mais confiável e com mais qualidade têm levado as concessionárias de energia a estabelecer novos procedimentos operacionais, novos esquemas de automação e infraestruturas mais flexíveis. As REI aparecem neste contexto, para atender às demandas dos consumidores de forma mais eficiente, com alto grau de continuidade e qualidade [6]. As infraestruturas de REI têm permitido uma área existente nos estudos de sistemas elétricos de potência (SEP), denominada

restauração sistêmica [7], ser aprimorada com a introdução de novas fontes de energia e automação de redes elétricas.

1.1 Descrição do Problema

O maior desafio que o SEP enfrenta é responder às rápidas mudanças nas necessidades dos clientes. Necessidades essas que com o avanço da tecnologia da informação reduziram a tolerância a interrupções de energia, flutuações nas tensões, variações nos níveis de frequência e outros distúrbios na qualidade de energia elétrica (QEE). Além disso, com o crescente número de fontes de geração distribuída e dispositivos de armazenamento de energia, existe a necessidade de se fazer uma análise confiável do SEP realizando uma integração da tecnologia da informação e comunicação com o SEP, alcançando um aumento da eficiência, confiabilidade e estabilidade do sistema [8].

Cada vez mais os consumidores de energia elétrica demandam serviços com os mais elevados padrões de qualidade. Um desses padrões exigidos é a continuidade dos serviços, bem como a recuperação rápida após uma queda de energia. Com o advento das REI, os problemas nos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEEs) são atacados e os índices de confiabilidade sistêmica são aprimorados. Isso ocorre em decorrência da automação que vem ocorrendo nesses sistemas [9].

Um dos objetivos da REI é detectar, analisar de forma contínua e, se possível, restabelecer elementos da rede através de um processo de autorrecuperação, ou seja, restaurar os componentes ou seções da rede, quando da ocorrência de falha ou interrupção programada [10]. A autorrecuperação ajuda a manter a confiabilidade, segurança, acessibilidade, qualidade de energia e eficiência da rede, melhorando os índices de continuidade, restaurando o serviço rapidamente e trazendo benefícios tanto ao consumidor de energia quanto para as concessionárias [11]. Enfim, este presente trabalho apresenta uma contribuição nessa direção para os SDEEs, com a finalidade de aumentar a qualidade de serviço e operação, fazendo com que um sistema automático possa vir a resolver o problema de restabelecimento dos ramais de distribuição logo após a detecção e interrupção de um curto-circuito. A intenção é tentar, sempre que possível, que a reconfiguração sistêmica seja feita com o menor número de chaves operadas, mas levando em consideração um chaveamento próximo ao evento e que possa perdurar pelo tempo necessário à correção do curto-circuito no ramal atingido. Estes três

aspectos são igualmente importantes, pois os dois primeiros (número de chaves operadas e suas posições no sistema) refletem a maneira de agir do operador, que sempre pensa em atuar localmente; enquanto a terceira (tempo de correção do problema) é fundamental para que possa se ter uma operação sem maiores riscos. A solução de reconfiguração, que não levasse em consideração este último aspecto, pode levar a sobrecargas em tempos seguintes, por exemplo, pelo aumento natural das cargas, e, com isto, a necessidade de novos chaveamentos na rede, enquanto o ramal afetado pelo curto ainda está inoperante.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é que os componentes da REI possuem um custo de aquisição e instalação e que as concessionárias que energia não conseguem implementá-los de uma só vez, mesmo que se trate de apenas uma parte da rede ou de um circuito. Assim, existe um tempo, que pode ser longo, de convivência entre estes componentes e os componentes dos sistemas de proteção tradicionais (já existentes na rede, como fusíveis, religadores e seccionadores). Assim, devem existir estratégias operativas de convivência entre estes dois sistemas que têm características diversas e que devem coexistir, operando em conjunto.

1.2 Objetivo do Trabalho

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma proposta de solução distribuída multiagente para autorrecuperação de REI, com a finalidade de contribuir para a melhoria da confiabilidade dos sistemas de distribuição.

Para tal, será proposta uma estrutura de agente inteligente híbrido, que poderá, de forma local e através de um sistema totalmente descentralizado com vários desses agentes operando em conjunto, efetuar chaveamento nas redes de distribuição urbana visando melhorar os índices de continuidade e qualidade de energia dessas redes.

Estes agentes comandarão chaves e se comunicarão somente com os agentes adjacentes a ele, mas através de sua parte lógica, poderão interferir em ações de agentes (e chaves) elétrica e fisicamente distantes a ele.

Os objetivos específicos são:

- Realizar a análise crítica dos trabalhos envolvendo autorrecuperação de REI utilizando sistemas multiagentes;
- Propor, implementar e testar a estrutura multiagente, utilizando agentes inteligentes;

- Propor, implementar e testar agentes inteligentes nas estruturas hierárquicas e híbridas;
- Sugerir métodos de análise temporal do funcionamento do agente de forma isolada e conjunto (como multiagentes);
- Montar funções que permitam realizar o processo de autorrecuperação para as redes de distribuição;
- Construir funções para problemas de resposta à demanda;
- Estabelecer um processo de comunicação confiável e com redundância entre os agentes;
- Construir funções de relacionamento dos agentes com os componentes dos sistemas de proteção tradicionais das redes urbanas;
- Criar um ambiente de teste dos sistemas multiagentes, onde poderão ser verificadas as respostas temporais dos agentes; e
- Validar o sistema multiagente proposto em simulações em uma sistema real.

1.3 Justificativa da Realização do Trabalho

A interrupção no fornecimento de energia elétrica sempre causa um transtorno a sociedade, que mais recentemente passou a poder ser contabilizado através do custo de interrupção de energia para os consumidores, industriais, comerciais e residenciais [12], [13]. Assim, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem estabelecido normas, condutas e procedimentos para as concessionárias de energia elétrica. Especificadamente para o SDEE, foram elaborados os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), procedimentos que garantem que as concessionárias operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade, regulamentando os procedimentos técnicos, quanto à expansão, operação, medição e qualidade da energia elétrica [14].

Deste modo, as concessionárias de energia elétrica são constantemente avaliadas em diversos aspectos no fornecimento de energia elétrica, sob pena de serem multadas pelos órgãos reguladores. Entre eles, está a qualidade do serviço e do produto oferecidos aos consumidores. Além disso, existe a necessidade de as concessionárias atenderem aos índices de QEE definidos pela ANEEL, tanto coletivos quanto individuais. Os indicadores coletivos são o DEC (Duração Equivalente de Continuidade), que registra quantas horas em média por ano o consumidor fica

sem energia elétrica, e o FEC (Frequência Equivalente de Continuidade), que indica quantas vezes em média faltou energia para os consumidores. Os indicadores individuais são o DIC (Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora), que medem, respectivamente, a duração e a frequência das interrupções do fornecimento de energia em cada unidade consumidora. O outro indicador individual é o DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora), que mede o tempo máximo que uma unidade consumidora permaneceu sem energia no intervalo de tempo de apuração.

Assim é possível vislumbrar uma melhoria, principalmente, dos indicadores DEC e FEC, com o avanço e a recente utilização de tecnologias de autorrecuperação das REI nos SDEE, pois quando é aplicada a tecnologia das REI na forma de automação nos alimentadores do SDEE, a recomposição dos segmentos livres de falta ocorre em um tempo menor do que sem a utilização deste recurso (ou seja, com o envio de operadores a campo), evitando assim, penalidades e multas.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este documento está estruturado em dez capítulos conforme descritos a seguir. No capítulo 1 foi apresentada a aplicação de REI para o SEP, bem como a definição do problema que é tratado ao longo deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão dos principais conceitos de REI, onde são mostrados alguns conceitos importantes para este trabalho das REIs e os tipos de abordagens (centralizado e descentralizado) de solução de problemas de autorrecuperação de redes urbanas. São também apresentados neste capítulo os conceitos de agente e de sistema multiagente; bem como é feita uma análise crítica dos principais trabalhos existentes aplicados a autorrecuperação de SDEE na literatura.

O capítulo 3 apresenta a proposição inicial do agente inteligente (AI) hierárquico híbrido. Ele é apresentado, didaticamente, em duas partes: uma física e a outra lógica. A parte física é a responsável por seu relacionamento com o mundo exterior (através de sensores, atuadores e de seu sistema de comunicação) e por abrigar os elementos da parte lógica do agente (em sua memória local e na sua unidade de processamento). A parte lógica do agente trabalha com níveis hierárquicos, distintos em suas funções, mas perfeitamente integrados com o

objetivo de solucionar o problema de autorrecuperação das redes urbanas. Neste capítulo também é apresentado o conceito de time e as regras para os procedimentos normais de operação, com a análise temporal do funcionamento.

O capítulo 4 apresenta as regras da função de autorrecuperação. Estas regras podem ser divididas em eliminação do curto-circuito, isolamento da parte afetada pelo curto e processo de restauração dos demais ramais sem energia e que não foram afetados pelo curto-circuito. Para que este último processo de tomada de decisão de quais chaves devem ser operadas seja feito é necessária uma intensa troca de mensagens entre os agentes e o cálculo de diversos valores. Essa análise temporal do funcionamento no processo de autorrecuperação é mostrada em detalhe neste capítulo.

O capítulo 5 apresenta a proposição do sistema de comunicação e de troca de mensagens. Ele tem características de ser expedito e simples, mas com redundância e eficiência. Um vocabulário é estabelecido e funções de verificação são acionadas para constatar se a mensagem é correta ou não. Neste capítulo também é apresentada a função de retaguarda, que é acionada quando um agente falha, tanto na operação de sua chave quanto em seu sistema de comunicação, fazendo que outro agente assuma seu lugar.

O capítulo 6 apresenta as funções relacionadas à resposta à demanda. São construídas quatro funções, a saber: de sobrecarga, de corte de carga, de priorização de carga e de evolução da carga. A primeira contém regras que tentam eliminar possíveis sobrecargas da rede, que surgem tanto no processo de restabelecimento, quanto na evolução da carga. As regras da função de corte de carga são aplicadas quando limites operativos são extrapolados e não existe possibilidade do remanejamento de carga para outro circuito. As regras de priorização de carga indicam as cargas prioritárias de atendimento, fazendo com que elas sejam atendidas possivelmente em detrimento de outras cargas. As regras de evolução da carga são utilizadas para que se conheça a carga prevista para os ramais a curtíssimo-prazo, ou seja, dentro do tempo previsto para reparos na rede.

O capítulo 7 apresenta as regras da função de integração com a proteção tradicional das redes urbanas de distribuição. Neste capítulo são mostradas a integração dos agentes inteligentes com fusíveis, religadores e seccionadores, como ocorre esta interação e como os agentes podem monitorar a atuação desses componentes, informando na sequência ao operador a chave que atuou, reduzindo assim o tempo de reparo.

O capítulo 8 mostra resultados de pacotes computacionais desenvolvidos para testar o sistema multiagente proposto neste trabalho. A primeira parte deste capítulo mostra como ocorre a interação entre os agentes inteligentes e como eles promovem a detecção e isolamento

do curto-circuito e, em seguida, como o restabelecimento sistêmico. A segunda parte deste capítulo mostra a operação dos agentes inteligentes com os componentes da proteção tradicional. Curtos-circuitos são posicionados em cada um dos ramais e é verificado se o agente consegue detectar a chave correta que atuou.

O capítulo 9 é o de conclusões, mostrando as realizações alcançadas nesta tese, bem como as suas principais contribuições. Em seguida, são apresentadas algumas linhas de pesquisa e trabalhos futuros, que podem ser originados deste trabalho.

O capítulo 10 é o de Referências Bibliográficas

Esta tese apresenta ainda dois apêndices. O primeiro faz uma revisão dos tipos de agentes encontrados na literatura. O segundo apêndice mostra resultados passo-a-passo do pacote computacional desenvolvido.

2 Revisão da Literatura

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais conceitos de redes elétricas inteligentes (REI), dos conceitos de autorrecuperação e uma análise das abordagens centralizadas e descentralizadas de solução da autorrecuperação. Em seguida, é apresentada a solução deste problema através das técnicas de sistemas multiagentes, mostrando como ela pode ser feita em ambientes descentralizados. Finalmente, é feita uma revisão crítica dos trabalhos que vêm sendo publicados na literatura relacionados ao tema de autorrecuperação de REI, destacando as técnicas utilizadas, os objetivos da restauração e onde vêm sendo aplicados.

2.1 Redes Elétricas Inteligentes

As redes elétricas inteligentes (REI) vêm ganhando cada vez mais espaço nos sistemas elétricos de potência (SEPs), seja em âmbito da transmissão, da distribuição ou, até mesmo, de sua integração T&D, com um sistema auxiliando as condições operativas do outro. Atualmente, até os sistemas de geração de grande porte têm começado a ser envolvidos neste novo conceito operativo. Porém, são nos sistemas de distribuição que vêm ocorrendo os avanços mais significativos das REI.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEEs) representam o elo final entre as empresas geradoras de energia elétrica e os consumidores. Em geral, uma das topologias de rede mais utilizadas no SDEEs é a configuração radial, devido a maior simplicidade no projeto, menor custo, e maior facilidade e funcionalidade do sistema de proteção. Devido a suas características topológicas, os SDEEs possuem baixa confiabilidade, de forma que uma falha em algum componente causa a interrupção no atendimento a todas as cargas abaixo do ponto de ocorrência, afetando significadamente a qualidade do serviço para os clientes [15].

Apesar da crescente demanda por energia elétrica e do desenvolvimento de novas tecnologias no sentido de melhoria na operação e na manutenção destes sistemas, falhas e interrupções são inevitáveis [16]. Interrupções no fornecimento de energia elétrica causam diversos impactos econômicos, como perdas de produção, custos de restabelecimento, danos em equipamentos, e deterioração bruta de equipamentos [17]. Além disso, existe a necessidade de as concessionárias de energia elétrica atenderem aos índices, tanto coletivos quanto individuais, de qualidade de energia definidos pela ANEEL, sob pena de serem multados pelos

órgãos reguladores. Estes índices são constantemente revisados visando aumentar a qualidade dos serviços fornecidos pelas concessionárias [14].

Desta forma, quando ocorre uma interrupção no fornecimento de energia elétrica, é crucial que haja uma restauração do sistema para um novo ponto ótimo de operação, atendendo ao maior número de cargas em segurança e no menor tempo possível [18]. Em geral, os SDEEs possuem chaves normalmente abertas (NAs) e normalmente fechadas (NFs), permitindo a interconexão de alimentadores e a transferência de carga. Quando ocorre uma falta, ela deve ser localizada e isolada no menor intervalo de tempo possível. Assim, se inicia o plano de restabelecimento, que busca se obter o menor número de consumidores interrompidos, com o menor número de operações de chaveamento, e sem violar as restrições de operação. Estas etapas – detecção e isolamento da falta e restabelecimento do serviço – constituem os pilares da capacidade de autorrecuperação de um sistema [19].

2.2 Autorrecuperação

As redes elétricas estão sujeitas a faltas e perturbações de naturezas diversas, sendo que as consequências destas incluem possíveis *blackouts*, perda de produção, defeitos incrementais e prejuízos financeiros. A ocorrência de uma falta ou perturbação na rede inteligente provoca variações nas grandezas do sistema, incluindo valores de corrente, tensão, impedância e potência. Estas variações podem ser detectadas, identificadas e gravadas através dos diferentes dispositivos instalados na rede, incluindo sensores, IEDs, PMUs, etc [20].

Neste contexto, a autorrecuperação de SDEE pode ser considerada como a habilidade do sistema, após sofrer uma falta permanente, de executar ações corretivas de forma automática e inteligente para se restaurar para o melhor estado possível, de forma a permitir a realização de suas funções básicas sem violar suas restrições [7], [21]. Isso é possível através da auto-avaliação contínua para detectar, analisar, responder a, e, se necessário, restabelecer os componentes e seções da rede. A expectativa é de que a autorrecuperação minimize a interrupção do serviço. Além disso, ela engloba os estágios de detecção e isolamento da falha bem como o restabelecimento de forma automatizada, sem necessidade de intervenção humana [22]–[24].

2.3 Abordagens Centralizadas e Descentralizadas

As ações de controle no contexto da autorrecuperação de sistemas de distribuição de energia podem ser classificadas em abordagens centralizadas e descentralizadas.

As estratégias de controle centralizadas são baseadas em um centro de controle que lê os dados do sistema e, assim, processa os mesmos a fim de se obter uma solução. A principal vantagem desta abordagem é que ela pode obter a solução ótima para o problema, principalmente no caso de sistemas de pequena escala. No entanto, se houver falha, mesmo que parcial nos sistemas de comunicação do centro de controle, o sistema pode entrar em colapso ou não responder adequadamente a seus comandos. Além disso, existem desafios que podem impedir o emprego desta abordagem em redes de distribuição futuras que requerem o gerenciamento de grande quantidade de dados e o processamento computacional pesado. A operação demanda bastante tempo e pode ser prejudicada por fatores humanos e o comportamento dinâmico de alguns dispositivos elétricos, como grande número de unidades de geração distribuída e o nível crescente de incerteza devido a fontes renováveis, veículos elétricos e variação na curva de carga. Além disso, apresenta a desvantagem econômica de requerer um sistema de comunicação complexo a fim de englobar todo o SEP e enviar todos os dados para o centro de controle [25].

As estratégias descentralizadas são baseadas na pulverização da solução do problema, de forma que a ação de controle é tomada dentro de cada chave que disponha de um sistema de processamento mais avançado, os chamados dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs). Eles são projetados para executarem de maneira autônoma (e, portanto, distribuída nas redes de distribuição) certas ações que são frutos das leituras obtidas e de seus algoritmos internos. Desta forma, é como se existissem na rede diversos processadores atuando simultaneamente. Não existe uma coordenação central entre os processadores, ela é feita normalmente por *softwares* de controle que são previamente instalados nos IEDs.

Assim, dentre as principais características das estratégias descentralizadas, utilizando sistemas distribuídos, destacam-se que nenhum processador tem informação sobre o sistema completo; os processadores tomam decisões baseados em informações locais; e a falha em um processador não implica na falha total do sistema. Esta abordagem pode melhorar a confiabilidade, a flexibilidade e a eficiência das redes de distribuição. Além disso, devido às características citadas, é possível dividir uma tarefa complexa em pequenas tarefas mais simples e o sistema de comunicação pode ser mais simples e eficiente [26].

As abordagens descentralizadas são baseadas na comunicação *peer-to-peer* direta entre dispositivos de monitoramento, sendo que dados locais são adquiridos através de sensores inteligentes locais e IEDs, e dados remotos são coletados através de comunicações *peer-to-peer* com outros controladores. As abordagens descentralizadas focam na paralelização da solução do problema, de forma que a ação de controle ou proteção é tomada dentro de cada unidade de processamento baseada apenas no tratamento de dados locais. O comportamento do sistema total é o conjunto destas ações individuais, sendo que cada dispositivo compartilha dados e eventos com outros dispositivos. Abordagens distribuídas e descentralizadas são projetadas para serem executadas de forma distribuída em diferentes unidades processadores ao mesmo tempo, o que é coordenado através da comunicação. Dentre as principais vantagens dos algoritmos distribuídos em relação aos centralizados, destacam-se [27]:

- Melhor relação custo-benefício, uma vez que o uso de várias máquinas mais baratas possui vantagens no custo e no desempenho em relação ao uso de uma única máquina cara especial;
- Melhoria na confiabilidade, uma vez que se houver falha em um ponto, apesar da diminuição do desempenho, ainda é possível a “sobrevivência” do sistema completo;
- Possibilidade de expansão incremental (modularidade).

Dentre as tecnologias desenvolvidas para estratégias de controle distribuído em SEPs, têm se destacado os sistemas multiagentes (do inglês, *Multi Agent Systems* – MASs) como uma aplicação de inteligência distribuída que lida com a concentração de inteligência em um nível componente [16]. Em MASs, vários agentes inteligentes interagem um com outro para atingirem um conjunto de objetivos ou realizarem um conjunto de tarefas. Os agentes podem realizar ações autônomas e flexíveis para atingir seus objetivos. A característica de flexibilidade é composta pelos atributos de reatividade, proatividade e habilidade social [28].

Recentemente, diversos trabalhos têm sido apresentados utilizando MAS como ferramenta facilitadora para implementação da funcionalidade de autorrecuperação de SDEEs em redes inteligentes [29]–[32]. Os sistemas foram desenvolvidos principalmente para a função de restabelecimento, apresentando soluções satisfatórias, e algumas abordagens também incluindo a localização e o isolamento das falhas.

2.4 Conceito de Agente Inteligente

Por definição, um agente é algo que atua (“agente” vem do latim *agere*, ato). Ele pode ser de dois tipos: agentes “comuns” e agentes inteligentes. O agente “comum” é aquele que reage (ou atua) segundo uma certa lógica, mas que não tem base em técnicas de um sistema inteligente.

No contexto de inteligência artificial (IA), um agente inteligente é um sistema computacional que é capaz de realizar ações independentes em benefício próprio ou do seu controlador. Espera-se que os agentes atuem de forma racional, operem autonomamente, percebam seu ambiente, adaptam-se às mudanças e alcancem seus objetivos. Um agente racional é aquele que atua de forma a obter o melhor resultado ou, quando há incerteza, o melhor resultado esperado [33].

A seguir, são apresentadas a arquitetura de um agente e as suas propriedades; enquanto no Apêndice A – Tipos de Agentes, vários tipos de agentes são apresentados.

2.4.1 Arquitetura de um Agente Inteligente

O conceito de agente inteligente (AI) surgiu dentro da categoria dos sistemas que agem racionalmente, ou seja, agem de tal maneira a alcançar objetivos, dadas algumas condições. O que é racional depende de quatro fatores:

- A medida do desempenho define o grau de sucesso;
- Tudo que o agente percebeu anteriormente, chamada sequência de percepções;
- O que o agente sabe sobre o ambiente;
- As ações que o agente pode desenvolver.

A arquitetura de um AI depende do seu tipo, da sua função e do dispositivo computacional no qual ele será instalado e irá trabalhar. De acordo com Russell [33], a relação entre agente, programa inteligente e arquitetura é dada por:

$$AI = \textit{Arquitetura} + \textit{Programa inteligente}$$

Para a construção do agente é necessário definir os limites de percepção e ações do agente, assim como ter conhecimento de suas metas e medidas de desempenho, além de

conhecer o ambiente no qual ele irá operar. Uma vez definidos o ambiente, o tipo de agente e suas características, pode-se estabelecer suas metas e medidas de desempenho. Essas medidas não fazem parte do corpo do agente, elas são atribuições externas, definidos de acordo com a necessidade de cada ambiente [34]–[36].

Usualmente, a arquitetura do agente inteligente é definida como ilustrada na Figura 1, sendo as partes mais importantes: os sensores e atuadores, o programa computacional, a base de conhecimento, o motor de inferência, o *blackboard* e o sistema de comunicação.

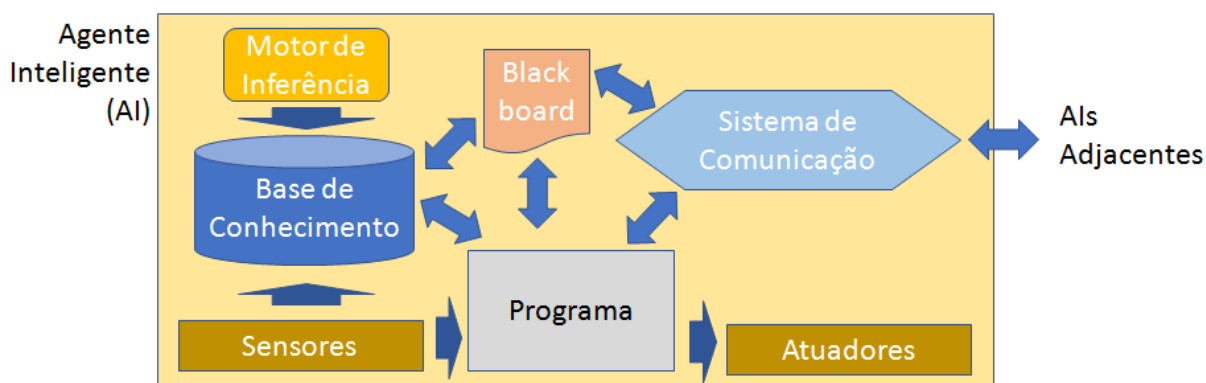


Figura 1. Arquitetura de um agente inteligente

Os sensores são responsáveis pela aquisição dos dados do ambiente para o AI, enquanto os atuadores são os meios para que o AI possa interagir com o meio ambiente.

A base de conhecimento pode ser dividida em duas partes principais: uma para conter informações e regras básicas de proteção do AI e do sistema elétrico, que são praticamente iguais para cada AI, e uma segunda parte, com dados e regras ligados diretamente à sua localização na rede de distribuição. Por exemplo, AIs que estiverem ligados às chaves da subestação devem ter dados relativos à subestação e ao ramal para o qual ele fornece energia; enquanto os AIs que atuam nas chaves ao longo das redes necessitam saber em qual ramo estão localizados e em quais grupos elétricos eles se encaixam.

O motor de inferência é o responsável por executar a base de conhecimento encontrando metadados. Ele irá funcionar em *modus ponens*, ou seja, verificando a premissa da regra e, se ela for verdadeira, definindo sua consequência como verdadeira e a escrevendo no *blackboard*.

O programa computacional é baseado em um sistema inteligente híbrido, com meta-heurísticas, regras de produção e alguns cálculos numéricos de processamento. Trata-se de uma parte crucial do AI. É principalmente sobre este tópico que este trabalho será desenvolvido. As meta-heurísticas possibilitam que certas otimizações sejam feitas e os melhores pontos de ajuste

sejam encontrados. O AI recebe informações dos AIs adjacentes para produzir suas análises. As regras de produção são instruções operativas com restrições e induções de busca para a meta-heurística. Alguns cálculos expeditos de fluxo de carga e de sobrecarga nas redes também devem ser efetuados. Todo este programa computacional deve levar em consideração a posição do IED na rede, que pode ser, por exemplo, na subestação e nos ramais; e que o processamento deve ser feito de maneira rápida e caber dentro do microprocessador do AI.

Internamente, para gerar uma determinada ação, o AI pode ser dividido em duas partes principais: sua arquitetura e o programa inteligente que ele executará. A arquitetura de um AI varia em função do seu tipo e da ação que ele deverá executar. Normalmente, a arquitetura é responsável pelos sinais dos sensores ficarem disponíveis para o AI, e ainda, tem a incumbência de executar o programa inteligente do agente e acionar os atuadores com as ações definidas pelo agente.

2.4.2 Propriedades dos Agentes Inteligentes

As principais propriedades apontadas em [34], necessárias para caracterizar um AI, são autonomia, habilidade social, reatividade e iniciativa própria, como descritas nos tópicos a seguir:

- **Autonomia:** o agente opera sem a intervenção direta de humanos ou outras entidades computacionais, e possui algum tipo de controle sobre suas ações e estados internos (técnicas de IA e algoritmos de aprendizagem).
- **Habilidade Social:** é o comportamento onde os agentes interagem com outros agentes (ou humanos também), através de uma linguagem apropriada, a fim de atingir seus objetivos.
- **Reatividade:** é a habilidade de perceber seu ambiente e responder de maneira oportuna às mudanças que ocorrem para satisfazer os objetivos.
- **Iniciativa Própria:** como agentes inteligentes, eles são capazes de exibir comportamento baseado em propósitos, tomando a iniciativa a fim de atingir os objetivos (comportamento intencional, baseado em crenças, objetivos e habilidades).

2.5 Conceito de Sistema Multiagente Inteligente

Um sistema multiagentes (MAS) é um conjunto de agentes que funcionam de maneira autônoma para produzir um determinado efeito. Desta forma, o conceito de agente pode ser definido como sendo uma entidade de *software* autônoma, que é capaz de perceber mudanças no ambiente que está inserido e gerar uma determinada ação. A percepção das mudanças é sentida, medida ou registrada por sensores; enquanto as ações são feitas por meio de atuadores.

Os MAS podem ter um qualificador a mais, a palavra “inteligente”. Existem duas situações em que se pode encontrar um sistema multiagente inteligente. A primeira é quando o sistema possui agentes inteligentes que interagem e desempenham funções capazes de realizar o objetivo proposto pelo sistema em que estão inseridos. O segundo tipo é aquele em que existem somente agentes “comuns” (que não utilizam técnicas de IA), mas que a “inteligência” emerge da interação deles. Isto é comum em algumas técnicas de IA, tais como: enxame de partículas [37], colônia de formigas [38], entre outras. Neste trabalho, o sistema multiagente inteligente é composto por agentes inteligentes, mas por facilidade a sigla MAS é mantida.

2.5.1 Propriedades dos Sistema Multiagentes Inteligentes

Em um sistema cognitivo composto por vários agentes, todos devem ser capazes de se comunicar. Cada um deverá possuir conhecimento e habilidades para executar uma determinada tarefa, podendo cooperar ou não com o intuito de atingir um objetivo global [35]. Vale ressaltar que cada agente em um MAS tem informações incompletas e os agentes formam um sistema que tem informações suficientes e capacidade para resolver o problema. Não há controle global do sistema, os dados são descentralizados e a computação é assíncrona [39].

Segundo Wooldridge [34], um MAS é um conjunto de entidades ou organismos (agentes) imersos em um ambiente, que interagem entre si através de troca de informações e das habilidades de cooperação, coordenação e negociação, para alcançar um objetivo. Os MASs podem ser vistos com uma perspectiva organizacional – eles são uma consequência da suposta autonomia e interação, um sistema em que consiste de um número de agentes, que interagem entre si, tipicamente por troca de mensagens através de alguma infraestrutura de rede. No caso mais geral, os agentes em um MAS são representados com diferentes objetivos e motivações.

As vantagens no uso de MAS incluem: capacidade de resolver problemas que são muito grandes para serem resolvidos por sistemas centralizados, sendo o uso apropriado para solucionar problemas de natureza distribuída e descentralizada; interconexão e interoperação de sistemas; melhora no desempenho do sistema como eficiência computacional, confiabilidade, capacidade de ampliação, robustez na tolerância a incertezas, facilidade de manutenção (modularidade), capacidade de sempre responder mesmo que haja anomalias (informações tratadas de maneira local), flexibilidade, cooperação, reuso da informação; tolerância as falhas; *software* modular; sistema autoconfigurável; custo reduzido (*hardware/software*); resolução de problemas de forma mais rápida; e comunicação reduzida.

2.5.2 Comunicação entre Agentes de um MAS

O sistema de comunicação é uma parte fundamental de um MAS. O sistema de comunicação realiza a troca de informações entre os agentes fazendo cooperarem entre si e coordenarem suas ações dentro do contexto do MAS. Há basicamente quatro tipos de estrutura para o processo de comunicação [40].

- *Comunicação direta*: Estabelece uma ligação direta com outros agentes permitindo a troca de um grande volume de informações entre um número grande de agentes, usando, por exemplo, um protocolo do tipo TCP/IP, garantindo velocidade e segurança. Nesta estrutura de comunicação é necessário o endereçamento dos agentes.
- *Sistemas confederados*: São utilizados quando o número de agentes é muito grande e o custo computacional é proibitivo, onde os AIs se comunicam através de um agente facilitador (agente mediador). O agente facilitador é responsável por receber a mensagem do agente do seu sistema e roteá-la até o local adequado.
- *Comunicação difundida*: Os agentes recebem mensagens de um único remetente e transmitem para todos os terminais na rede, quando a mensagem tem que ser comunicada a todos os agentes no sistema, ou o remetente não sabe a quem endereçar a mensagem, então ele pode difundir a mensagem para todos os agentes. Quando a mensagem ou o número de agentes for grande haverá um consumo de banda significativo.
- *Sistemas que usam quadro negro (Blackboard System)*: O *blackboard* (quadro-negro) é uma estrutura de memória temporária em que os meta dados (aqueles dados inferidos durante um processo de análise) são escritos e trabalhados. Durante as análises, os meta

dados têm o mesmo grau de importância que os dados disponíveis da base de conhecimento. Ao se concluir a análise, eles são apagados e não ficam mais disponíveis no AI.

2.5.3 Sistemas Multiagente aplicados ao Sistema Elétrico de Potência

Em sistemas elétricos modernos e complexos, onde um enorme processamento de dados é necessário, a utilização de MAS para lidar com esses sistemas torna-se evidente. Além disso, os sistemas modernos requerem rápida tomada de decisão e reação em caso de eventos inesperados, de forma que o uso de agentes autônomos pode garantir tais requisitos. Além disso, o sistema elétrico de potência muda dinamicamente, portanto a flexibilidade e extensibilidade do MAS permitem lidar com esse sistema dinâmico.

O grupo de pesquisa de Sistemas Multiagentes (MAS) da IEEE Power Engineering Society publicou, em 2007, dois trabalhos referentes a aplicação de MAS para redes elétricas inteligentes [35], [36]. Sua missão era definir os impulsionadores e os benefícios obtidos pelo uso da estrutura multiagente nos sistemas elétricos de potência, identificando e divulgando detalhes desses desafios, fornecendo recomendações e orientações técnicas sobre o uso apropriado dos padrões, metodologias, e abordagens de implementação. Concluiu-se que um MAS poderia ser usado como forma de construir sistemas de *hardware/software* robustos e flexíveis ou como uma abordagem de modelagem, destacando as técnicas e ferramentas que poderiam favorecer e auxiliar os projetistas a usar MAS.

No entanto, existem alguns desafios que ainda precisam ser estudados para o uso de MAS nas redes elétricas inteligentes. Dentre eles, tem-se formulação do problema, padronização, comunicação, coerência, robustez, portabilidade, escalabilidade, implementação, e segurança [41]. Um consenso comum é que a inteligência em conjunto com MAS pode ser implementada pela incorporação de técnicas de IA conhecidas, tais como: algoritmos evolutivos, meta-heurísticas, técnicas de otimização, modelos de previsão e aprendizagem, entre outras. O uso de técnicas de IA em sistemas modernos tem sido explorado e testado em várias aplicações da vida real [42].

O MAS é adaptável e pode ser aplicável em diferentes áreas da engenharia, tais como: planejamento, mercado de eletricidade, gerenciamento e operação da rede, sistemas de proteção e controle, e sistemas de monitoramento e diagnóstico. Devido à sua natureza, o MAS pode lidar com problemas grandes e complexos, modularidade e cooperação, inteligência e

autonomia, manuseio de informações de fontes distribuídas, bem como extensibilidade e flexibilidade [41].

2.6 Utilização de MAS em Abordagens Descentralizadas

Como mencionado anteriormente, a rede de distribuição atual está entrando em um estágio evolucionário de REI, graças ao avanço nas tecnologias de informação e comunicação [28]. Neste cenário, são possíveis o desenvolvimento e a melhoria da automação dos SDEEs, que podem ser operados de maneira distribuída através de novas tecnologias digitais, incluindo monitoramento, controle automático, comunicação de duas vias, e gerenciamento de dados. Esta automação da distribuição permite uma maior eficiência nas operações diárias e especialmente no processo de restabelecimento, permitindo uma resposta mais rápida a interrupções, redução de erro do operador, e diminuição da duração de interrupções [43].

As características apresentadas na abordagem descentralizada encorajam o estudo da implantação de estratégias distribuídas no contexto de redes inteligentes, destacando-se notadamente entre elas o uso de funções de autorrecuperação das redes de distribuição. Além disso, dentre as estratégias utilizadas para estes fins, as que mais têm se destacado nos últimos anos são aquelas relacionadas a sistemas multiagentes (MASs).

Estes sistemas agregam diversos elementos de computação individuais, denominados “agentes”. Os agentes são unidades autônomas de processamento, que reagem a mudanças no ambiente em que estão inseridos e são capazes de realizar ações (tomar decisões) a fim de atingirem objetivos específicos. Um MAS pode ser considerado, em último caso, como uma plataforma de processamento distribuído, operação paralela e solução autônoma. Ele pode também ser muito mais rápido para a solução de problemas discretos e não-lineares [25]. Sendo assim, também se optou por se utilizar neste trabalho esta técnica como ferramenta de apoio para a autorrecuperação de SDEEs.

Em um MAS descentralizado, os agentes são capazes de trabalhar de forma independente e coordenar-se entre si para atingir um objetivo comum. Os sistemas descentralizados não envolvem uma entidade central que possua a principal capacidade de tomada de decisão. Em vez disso, o processo de tomada de decisão é feito agente por agente, sendo que o conjunto das ações tomadas é que repercute no sistema como um todo. No entanto, a arquitetura descentralizada tem a desvantagem, muitas vezes, de gerar uma solução global não ideal, já que os agentes só observam parte do sistema [44].

2.7 Análise Crítica de Trabalhos da Literatura Científica

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica expedita do estado da arte de sistemas multiagentes aplicados a autorrecuperação de redes elétricas inteligentes.

Os sistemas multiagentes têm sofrido uma grande evolução desde sua criação nos idos da década de 80 (quando ainda não se falava de agentes, mas de tipos de Inteligência Artificial Distribuída), da sua formalização como estrutura, em 95, no famoso livro de Russel & Norvig, que já se encontra na 4ª edição [33], e da criação, em 96, da Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) para produzir padrões de *software* para agentes heterogêneos e interativos e para sistemas baseados em agentes. Diversas estruturas de agentes foram criadas, tais como: reativos, baseados em metas e baseados em satisfação; com processamentos internos ligados a técnicas inteligentes, tais como, redes neurais, sistemas evolutivos e sistemas baseados em regras. Também os sistemas de comunicação entre agentes sofreram evoluções, criando-se sistemas confederados, sistemas com comunicação difundida e sistemas com quadro-negro (*blackboard*). Até mesmo uma linguagem, a KQML (*Knowledge Query and Manipulation Language*) [45], foi criada para facilitar as trocas de mensagem entre agentes. Na verdade, a KQML é mais que uma linguagem, é uma arquitetura para plataformas de comunicação entre agentes. Ela é baseada na presença de agentes facilitadores, que detêm o conhecimento sobre quais agentes inteligentes estão acessíveis naquele momento e quais são suas habilidades, permitindo a construção de uma sociedade aberta, síncrona ou assíncrona [46].

Dentre os avanços mais significativos do começo deste milênio, encontram-se os trabalhos de: (a) Jadbabaie, Lin & Morse [47], que apresentavam agentes autônomos e cooperativos modelos de Vicsek com funções de Lyapunov; (b) Olfati-Saber, Fax & Murray [48] introduzindo o conceito de algoritmo de consenso, que traz para a análise informações duvidosas e como tratá-las; e (c) Buşoniu, Babuška & Schutter [49], com multiagentes que trabalhavam com reforço de aprendizado; todos eles com mais de 300 citações em revistas indexadas pelo ISI. Dentre as aplicações de multiagentes diretamente em problemas dos sistemas elétricos, destacam-se os trabalhos de: (a) Dimeas & Hatziargyriou [50], na operação de microrrede; (b) Pipattanasomporn, Feroze & Rahman [51], tratando de operação de REI e de ilhamentos; e, uma das primeiras aplicações reais de multiagentes inteligentes, (c) Nagata & Sasaki [18] para o restabelecimento de sistemas de distribuição. Além desses, merecem destaque os dois artigos do Grupo de Trabalho do IEEE-PES em seu subcomitê de Sistemas

Inteligentes, coordenados por McArthur, que apresentam uma completa revisão dos principais tópicos de multiagentes inteligentes até 2007 [35], [36].

No contexto de aplicação de sistemas multiagentes a problemas de sistemas de potência, foi realizada uma consulta no Web of Science sobre o número de artigos publicados nos últimos 15 anos contendo os tópicos (em inglês) *multiagent* e *power system*. A Figura 2 apresenta o resultado obtido, que consiste em um gráfico anual com o número de publicações indexadas pelo Web of Science, até o ano de 2020, contendo os tópicos citados.

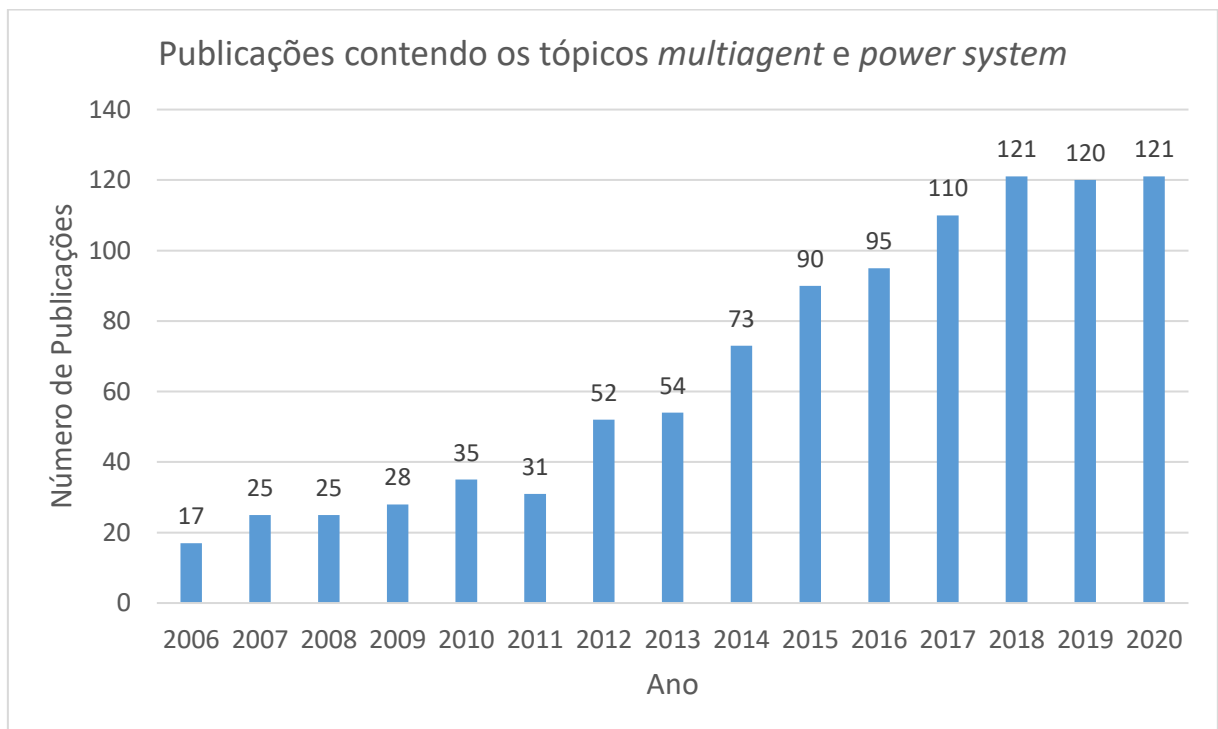


Figura 2. Trabalhos publicados nos últimos 15 anos contendo os tópicos *multiagent* e *power system*, indexados na Web of Science.

Realizou-se também uma consulta no Web of Science sobre o número de artigos publicados nos últimos 15 anos contendo os tópicos (em inglês) *multiagent* e *distribution system*, de forma a se especificar um pouco mais o campo de aplicação de sistemas multiagentes, de forma coerente com o foco do presente trabalho. A Figura 3 apresenta o resultado obtido, que consiste em um gráfico anual com o número de publicações indexadas pelo Web of Science, contendo os tópicos citados.

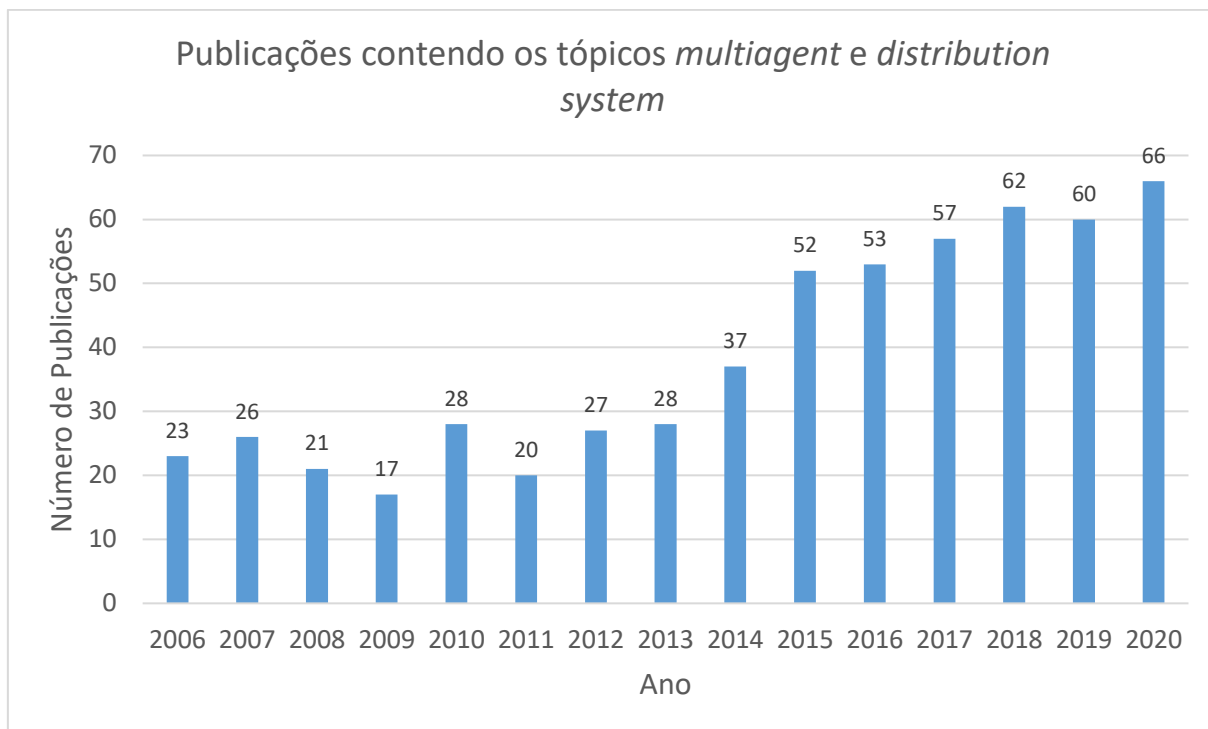


Figura 3. Trabalhos publicados nos últimos 15 anos contendo os tópicos *multiagent e distribution system*, indexados na Web of Science.

Os gráficos apresentados na Figura 2 e na Figura 3 indicam que a aplicação de sistemas multiagentes em problemas de sistemas de potência e, ainda, em sistemas de distribuição têm se mostrado uma área promissora, com tendência crescente de publicações.

Avançando um pouco mais e considerando o problema abordado neste trabalho, tem-se que a literatura científica apresenta diversas estratégias, procedimentos e algoritmos de autorrecuperação [5], [52], [53], sendo que a maioria deles envolve técnicas numéricas [54], [55], meta-heurísticas [56], [57] e sistemas inteligentes [58], [59] visando obter o máximo (ou mínimo) global de uma determinada função objetivo. Esta pode ser voltada para ser maximização de receitas, maximização da qualidade de serviços, minimização do corte de cargas, ou minimização de danos. Para se alcançar isso, o sistema é visto de uma forma centralizada e unificada. No entanto, com o avanço da complexidade e expansão do SDEE e com o surgimento de novas tecnologias, há uma necessidade de realizar não apenas uma análise central, mas também uma análise distribuída ao longo do sistema de distribuição, sem uma coordenação central, onde uma perturbação na rede possa ser detectada e eliminada e a restauração seja feita apenas por dispositivos locais, muito mais próxima das técnicas multiagentes [28], [33], [60], [61].

A Tabela 1 apresenta um quadro comparativo sobre trabalhos selecionados de autorrecuperação de REI utilizando MAS, considerando-se características notáveis dos mesmos. Uma observação é que os trabalhos foram referenciados na Tabela 1 em ordem cronológica de publicação. Também foi incluída nesta tabela, o presente trabalho com suas características.

Tabela 1. Quadro comparativo sobre trabalhos selecionados de autorrecuperação de REI utilizando MAS

Referência	Tipo	Método	Prioridade de carga?	Evolução de carga?	Integração com dispositivos tradicionais?	Outras características relevantes
[18]	Centralizado	Multiagente	Não	Não	Não	Sistema confederado, depende de um agente de tomada de decisão
[16]	Descentralizado	Regras heurísticas + multiagente	Sim	Não	Não	Tarefas executadas pelos agentes na forma de comportamentos
[25]	Centralizado	Sistema especialista + multiagente	Sim	Não	Não	Coordenação hierárquica; depende de um agente de tomada de decisão
[17]	Centralizado	Multiagente	Sim	Não	Não	Arquitetura hierárquica é criada para fornecer solução global
[62]	Descentralizado	Regras heurísticas + multiagente	Sim	Não	Não	Investiga impactos da utilização de unidades de abastecimento e veículos elétricos conectados na rede
[63]	Descentralizado	Regras heurísticas + multiagente	Sim	Não	Não	Considera a incerteza da demanda de carga e energia gerada pelas fontes renováveis
[64]	Centralizado	Sistema especialista + multiagente	Sim	Não	Não	Coordenação hierárquica; depende de um agente de tomada de decisão
[65]	Descentralizado	Sistema especialista + multiagente	Sim	Não	Não	Agentes têm mesmo comportamento e conhecimento inicial, capaz de identificar seu tipo em cada situação de falha
[32]	Descentralizado	Multiagente	Sim	Não	Não	Teoria de fluxo de rede e um modelo reduzido
Tese	Descentralizado	Regras heurísticas + Multiagente + Comunicação restrita ao agente adjacente	Sim	Sim	Sim	Agente com estrutura hierárquica e híbrida; sistema de comunicação e retaguarda; procedimentos à resposta a demanda

A seguir, os principais trabalhos selecionados na área serão abordados, considerando-se suas características mais importantes, bem como destacando-se seus pontos fracos, que motivam as contribuições a serem dadas pelo presente trabalho.

Uma primeira aplicação de um MAS para restauração da rede elétrica foi feita por Nagata [18]. O método proposto consiste em uma série de agentes barra (*Bus Agent*) e um único agente facilitador (*Facilitator Agent*). O agente barra foi desenvolvido para decidir uma configuração sub-ótima depois que ocorrer uma falta no sistema, interagindo com outros agentes barra adjacentes; enquanto o agente facilitador foi desenvolvido para atuar como gerenciador na tomada de decisão do processo de restauração. A estrutura de suporte ao processo de comunicação utilizado é a de um sistema confederado onde os AIs se comunicam através de um agente facilitador. Este é responsável por receber a mensagem do seu sistema e roteá-la ao local adequado. Um objeto chamado KQML foi usado para comunicação entre os agentes. Assim, o método requer um grande número de agentes, o que pode ser impraticável para grandes redes. Também, o método baseia-se em um único agente para a tomada de decisão, o que o torna modelo centralizado. Além disso, o método não considera a priorização de carga ou a presença de geração distribuída (GD).

Outro trabalho notável envolvendo MAS é o de Solanki [16], que propõe um MAS descentralizado implementado em uma linguagem compatível (FIPA) e com interface com *software* de simulação de sistemas de distribuição. Três tipos de agentes são propostos: Agentes Chave, Agentes Carga e Agentes Geradores. Assim, o número total de agentes corresponde ao número de geradores, cargas e chaves no sistema. Os agentes se comunicam apenas com agentes vizinhos. As tarefas executadas pelos agentes são representadas na forma de comportamentos em que cada agente tem acesso aos dados locais e também tem capacidade de arquivamento para trocar de informações e determinar um caminho de restauração viável. Este método leva em consideração a prioridade de carregamento, mas não considera a presença de GD, nem os limites de tensão no sistema após a restauração.

Zidan [25] apresenta uma estrutura MAS para autorrecuperação de sistemas de distribuição. A estrutura de controle consiste em duas camadas: zona e alimentador. A função dos agentes zona na primeira camada é monitorar, fazer cálculos simples e implementar ações de controle. Os agentes alimentadores na segunda camada são atribuídos à negociação. Cada agente alimentador se comunica apenas com os agentes vizinhos que estão conectados a eles por chaves de recurso. Um algoritmo de tomada de decisão baseado em regras (sistema especialista) foi usado para governar os agentes de controle a fim de atingir seus objetivos e satisfazer suas restrições. A coordenação por meio de um protocolo de comunicação bidirecional (FIPA) foi proposto como um meio de alcançar uma cooperação eficaz entre os agentes e de implementar a detecção, o isolamento da falha e a restauração. O algoritmo proposto constrói seu plano de restauração reenergizando tanto quanto possível as cargas fora

de serviço, levando em consideração suas prioridades e minimizando o número de operações de chaveamento.

Em Ren [17], um novo mecanismo de formação dinâmica de time é proposto para gerenciar dinamicamente os agentes no sistema elétrico com uma estrutura de coordenação flexível, de modo a equilibrar a eficácia e a eficiência do sistema multiagente introduzido. Tem-se que a arquitetura do MAS proposto é dinâmica e automaticamente modificada de acordo com o *status* do sistema elétrico. Um mecanismo dinâmico de formação de times foi proposto para fins de coordenação dos agentes. Os agentes locais são controlados por vários agentes coordenadores. Cada agente coordenador e seus agentes locais formam um grupo local, onde o agente coordenador atua como um líder do grupo local. Diferentes grupos podem se comunicar, cooperar e trabalhar juntos para restaurar o sistema de energia. O método pode fornecer soluções razoáveis para falhas em diferentes níveis de complexidade. Os grupos locais são gerados primeiro para fornecer a solução otimizada local. O tamanho do grupo é gradualmente aumentado de acordo com a complexidade das falhas. Finalmente, a solução global otimizada pode ser fornecida para solucionar falhas fatais e falhas catastróficas quando necessário. De forma sintética, o MAS proposto consiste em três camadas e gerencia os sistemas de energia desde as operações do dia-a-dia até a restauração de falhas dinâmicas. Arquiteturas distribuídas são geradas para executar operações normais e/ou restaurar o sistema usando agentes individuais, e arquiteturas hierárquicas são criadas para fornecer soluções globais para falhas.

O trabalho de Sharma [62] propõe uma abordagem MAS descentralizada para restauração de serviços com base no conceito de ilhamento intencional controlado por uma GD. Além disso, o trabalho investiga os impactos da utilização das unidades de abastecimento de veículos elétricos conectados na rede e do uso das baterias dos próprios veículos para restauração de serviço. Vale ressaltar que até recentemente, os esquemas de proteção do sistema de distribuição eram projetados para desconectar as GDs em caso de falha. No entanto, a Norma IEEE 1547.2-2008 sugere a implementação de ilhamento intencional em redes alimentadas por GDs em caso de falta de energia no sistema. Em continuação, a Norma IEEE 1547.4-2011 fornece diretrizes para o projeto, a operação e a integração dos ilhamentos intencionais, validando o uso de GDs para ajudar a sustentar o fluxo de energia para cargas essenciais seletivas.

Em continuação ao trabalho anterior [62], Sharma [63] propõe uma abordagem MAS descentralizada para resolver o problema de restauração de serviço considerando a incerteza da demanda de carga e geradores distribuídos de fontes renováveis. Primeiro, a incerteza da demanda de carga e geração é prevista pela geração de cenários usando simulações de Monte

Carlo. Em seguida, os nós esperados a serem restaurados em umilhamento são determinados usando uma técnica baseada em regras heurísticas. Finalmente, a probabilidade máxima dos intervalos de ilhamentos esperados a serem restaurados são estimados usando o método de estimativa por máxima verossimilhança para auxiliar a concessionária na tomada de decisão. Vale ressaltar que somente é utilizado ilhamento intencional como método de restabelecimento de energia, sem levar em consideração outras fontes primárias de geração.

O método apresentado em [62], [63] utiliza uma estrutura MAS descentralizada para restauração considerando ilhamento controlado por GD e a utilização das unidades de abastecimento de veículos elétricos conectados na rede. No entanto, este método descentralizado considera apenas o modelo de restauração de ilhamento intencional. O método requer o uso de um grande número de agentes em cada barramento. Além disso, não fornece detalhes sobre como os limites de tensão nas seções restauradas são calculados. A principal limitação do trabalho anterior de Sharma [62] é que a demanda de carga é considerada determinística. Além disso, esses estudos consideraram apenas GDs despacháveis (do inglês, *dispatchable distributed generators* – DDGs) com saída de geração fixa. No entanto, as condições de operação do sistema, como a demanda de carga e a energia gerada pelos GDs renováveis (do inglês, *renewable distributed generators* – RDGs), não permanecem constantes durante o processo de restauração. Assim, em [63] é proposto uma estrutura MAS descentralizada para resolver o problema de restauração de serviço considerando a incerteza de demanda de carga e potência gerada pelos RDGs.

O modelo de autorrecuperação apresentado por Souza [64] é composto por quatro tipos de agentes reativos: agente alimentador, agente zona, agente dispositivo (agente de controle) e agente geração distribuída. Os agentes alimentadores são responsáveis por todas as negociações e cálculos para transferência de carga entre alimentadores. Os agentes zona são responsáveis pelas informações dos valores de demanda das cargas, fator de prioridade e o seu próprio *status*. Os agentes dispositivo são responsáveis pela identificação da falta e isolamento da zona onde ocorreu o defeito. Os agentes geração distribuída são responsáveis por enviar seu estado e sua capacidade de geração. A metodologia proposta possui quatro etapas, a fim de que ao final do processo todas as cargas possíveis sejam reestabelecidas conforme os critérios de cada etapa e respeitando as restrições e limites do sistema. O plano de corte seletivo de carga e as três primeiras etapas da metodologia proposta neste artigo foram baseadas na proposta apresentada em [25], de forma que o ilhamento intencional considerando geração distribuída é executado na quarta etapa, sendo uma contribuição deste trabalho.

Os métodos apresentados em [25], [64] utilizam uma estratégia de coordenação hierárquica para restauração, considerando a presença de GDs e a priorização de carga. O método é baseado em três tipos de agentes: agentes zona, agentes alimentador e agentes de controle, e um quarto agente para GD que foi adicionado em [64]. No entanto, o método depende de um agente de tomada de decisão, o agente alimentador, para todas as falhas no mesmo alimentador.

O trabalho de Abel Hafez [65] apresenta uma técnica descentralizada utilizando MAS baseada em regras (sistema especialista) projetadas para permitir que os agentes executem suas tarefas de forma autônoma. A arquitetura é baseada em um único tipo de agente, sendo que os agentes são distribuídos em zonas ao longo da rede, de acordo com a localização da falta, e cada agente assume um tipo de comportamento. O processo de restauração é inicializado após detectar uma falha dentro de uma das zonas e desligar o disjuntor do alimentador. Nesse instante, os agentes passam a identificar seus papéis de acordo com sua localização em relação à falta. De acordo com sua função, cada agente possui uma lista específica de ações que devem ser executadas para atingir os objetivos de restauração necessários, considerando as restrições técnicas da rede. Antes da falta, todos os agentes têm o mesmo comportamento, pois monitoram os dispositivos de medição nas chaves no limite de suas zonas. Além disso, todos os agentes possuem o mesmo conhecimento inicial. Quando ocorre uma falta, cada um desses agentes é capaz de identificar seu tipo com base em uma condição específica. Na estrutura MAS descentralizada apresentada em [65], os agentes com *status* iguais estão todos no mesmo nível estrutural, e o agente de tomada de decisão não é fixo, mas varia de acordo com o ponto de falha. O trabalho considera a prioridade de carga e o uso de GDs para restauração da rede. O método baseado em regras (sistema especialista) sem função objetivo, entretanto, é difícil de garantir uma solução de otimização global para cenários de restauração complexos.

O trabalho de Li [32] apresenta uma estratégia descentralizada para restauração sistêmica de redes de distribuição com GDs combinando a configuração da rede com ilhamento intencional. Diferentemente dos métodos anteriores baseados em regras heurísticas [16], [63], ou baseados em regras especialistas [65], a estratégia descentralizada proposta é baseada na teoria de fluxo de rede e um modelo reduzido. Os IEDs são usados como agentes de controle, e a comunicação entre os agentes é baseada no modelo *peer-to-peer* (P2P) do protocolo IEC 61850, que é empregado na comunicação em tempo real pelo objeto genérico mensagens de eventos orientados da subestação (do Inglês, *Generic Object Oriented Substation Events* – GOOSE). Dois cenários de restauração são considerados. O primeiro é o modo de ilhamento intencional, onde após a falta ser isolada, se os GDs tiverem capacidade suficiente e contiverem

o modelo de controle (v-f), umilhamento intencional alimentado por GDs será formado e todas ou parte das cargas podem ser restauradas por meio de GDs. Outro modo de operação é o modo conectado à rede, no qual as cargas fora de serviço podem ser restauradas por meio da conexão à rede por meio de chaves NA.

Os métodos apresentados em [16], [62], [63], [65] têm vantagens inerentes aos requisitos de comunicação reduzida, alta tolerância a falhas e boa escalabilidade. No entanto, em sistemas MAS descentralizados, é difícil adquirir informações globais, pois exigiriam multi-iterações das informações. Além disto, deve também haver uma redução da complexidade computacional de tratamento do problema global para que ele possa ser tratado mais localmente. Um dos maiores desafios é que, ao usar os sistemas distribuídos, os agentes podem se concentrar nas comunicações vizinhas e nas trocas de informações, e seu processo de tomada de decisão pode ser otimizado localmente, sendo difícil fornecer uma solução global otimizada com eficiência. Como equilibrar eficácia e eficiência na restauração do sistema elétrico tornou-se, portanto, uma questão de pesquisa importante.

A presente tese também apresenta uma estrutura hierárquica de solução do problema de autorrecuperação, mas esta hierarquização ocorre dentro do agente e através de comandos enviados por outros agentes. Assim, ele diferentemente dos demais é composto por regras heurísticas dispostas em quatro níveis hierárquicos dentro do agente e com acesso a rotinas numéricas de apoio. Ele apresenta funções de sobrecarga e de priorização da carga, porém com outras funções adicionais de resposta à demanda, como a evolução da carga. Ele também apresenta um sistema de comunicação restrito, mas de grande robustez, com os agentes adjacentes somente. E, finalmente, nenhuma literatura foi encontrada, nem técnica e nem científica, que se relaciona componentes da REI com componentes da proteção tradicional.

2.8 Considerações Finais do Capítulo

O desenvolvimento de MAS para autorrecuperação de SDEEs é um campo interessante para desenvolver uma estrutura de controle descentralizada bem definida para a autorrecuperação da rede. Dentre os tópicos que necessitam ser incluídos nesta estrutura, tem-se:

- Estrutura de controle adequada e método computacional para serem implementados em cada agente de controle;

- Coordenação e comunicação adequadas entre os agentes de controle de forma distribuída;
- Um procedimento de restabelecimento genérico e eficiente, que seja compatível com qualquer rede de distribuição, sem regras específicas para cada sistema;
- Consideração de variação na demanda, prioridades de carga dos consumidores, unidades de geração distribuída (por exemplo, sistemas de energia eólica e fotovoltaica), e restrições operacionais.

Desta forma, observa-se que um sistema de autorrecuperação para as REI apresenta uma grande complexidade para seu desenvolvimento, sendo um problema atual para as concessionárias de energia. As soluções atuais precisam considerar novos aspectos para poder resolver de forma correta as novas demandas das REI. Com isto, exige-se a introdução de metodologias não clássicas para a solução desses problemas, que possibilitem a correta automação dos sistemas.

A capacidade, como *plug and play*, também permite que o MAS melhore a flexibilidade da rede de maneira mais eficaz. Além disso, os recursos de inteligência e autonomia do MAS beneficiam a rede, pois esses recursos permitem uma rápida resposta no caso de qualquer falha. Assim sugere-se o MAS como uma alternativa de controle distribuído para REI.

3 Proposição da Estrutura do Agente Inteligente

Como visto anteriormente, a unidade básica de controle de um sistema multiagente é o próprio agente inteligente. Esta seção apresenta de forma geral o agente inteligente proposto para este trabalho. Ele pode ser descrito didaticamente por duas partes principais: uma física e outra lógica. A parte física do agente se refere a sua constituição e montagem; enquanto a parte lógica se refere as suas reações a determinados impulsos externos. As duas trabalham em conjunto e estão descritas nas subseções a seguir.

3.1 Parte Física do Agente Inteligente

A parte física do AI pode ser dividida em quatro componentes principais: sensores e atuadores, sistema de comunicação, memória local e unidade de processamento. A Figura 4 mostra cada uma dessas partes e suas trocas de informações. Como visto anteriormente, estes quatro componentes fazem parte da maioria dos agentes inteligentes. A diferença desses para o agente inteligente proposto neste trabalho é a forma como cada componente desempenha suas funções, as quais são gerenciadas pela parte lógica do agente.

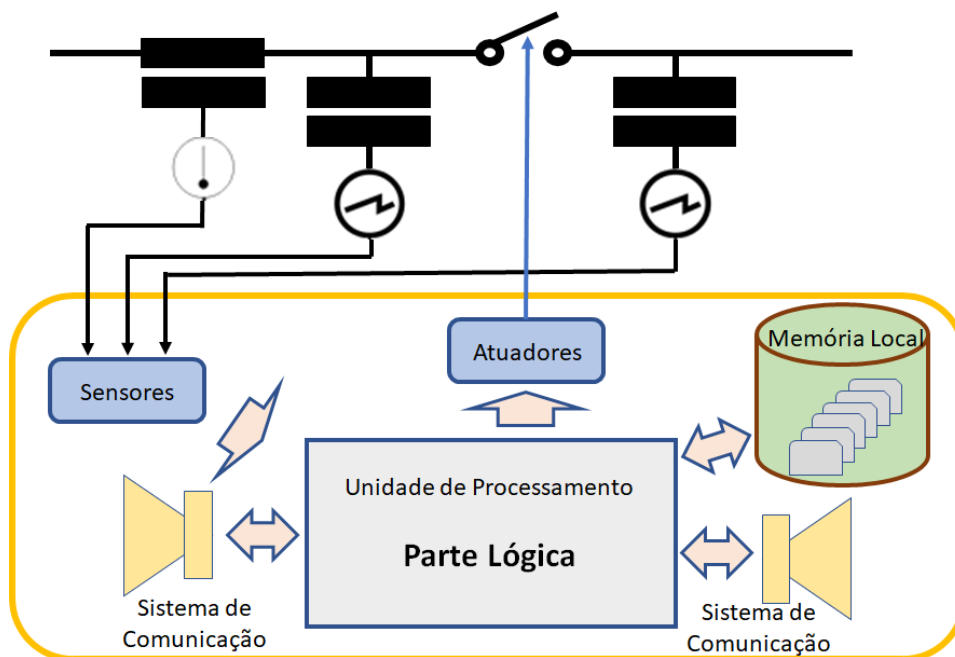


Figura 4. Componentes principais do agente inteligente proposto.

3.1.1 Sensores e Atuadores

Os sensores e atuadores são as formas de contato do agente com o mundo exterior. No Apêndice A – Tipos de Agentes, são mostradas diversas formas deste relacionamento. No agente inteligente proposto neste trabalho, os sensores são compostos por dois dispositivos de leitura da tensão e por um dispositivo de leitura da corrente. Os dois dispositivos de leitura da tensão são colocados um de cada lado da chave; enquanto o dispositivo de corrente é localizado em um de seus lados.

Os dispositivos de tensão têm a função de verificar somente se existe tensão (ou não) naquele lado da chave em que ele está instalado. Ele não necessita ser de grande precisão, devendo apenas informar à parte lógica do agente o nível de tensão a que a chave está submetida naquele lado. Ele pode ser um transformador de potencial, um sensor Hall ou mesmo um outro dispositivo de verificação de tensão. É importante que existam dois dispositivos deste tipo, pois são eles que vão fornecer os elementos iniciais de análise para a parte lógica do agente. Um exemplo disto, como será visto mais a frente nesta seção, é que quando a chave está aberta e existe tensão dos dois lados dela, ela fica na condição travada, pois não pode fechar devido a formação de um circuito em anel e a problemas de sincronização (módulo e ângulo) entre as tensões de suas duas extremidades.

O dispositivo de corrente, como dito, é único e está situado em apenas um dos lados da chave. Isso porque, como ele se destina a medir a corrente que passa pela chave, e como isto só ocorre quando a chave está fechada, não é necessário que existam dois, como no caso dos dispositivos de tensão. Porém, este dispositivo, diferentemente dos de tensão, tem a função de fazer a medição da corrente e a medida deve ser correta (não somente em níveis, como no caso da tensão) para que o processo de tomada de decisão seja feito adequadamente. Um exemplo da utilização do valor do sinal da corrente é o cálculo constante que a parte lógica de controle do agente efetua para saber a capacidade remanescente, que é a diferença entre a capacidade da chave e a corrente que está passando por ela.

Por fim, o atuador do agente inteligente proposto age sobre a chave abrindo-a, fechando-a ou mesmo travando-a (na posição aberta). A ação do atuador é o resultado de um processo de análise realizado pela parte lógica do agente, que pode fazê-lo mudar de posição (seja de aberto para fechado ou seja de fechado para aberto) ou que ele permaneça na mesma posição em que está. A parte lógica está constantemente analisando as informações recebidas dos sensores e produzindo um determinado resultado, que pode ou não mudar a posição da chave.

3.1.2 Sistema de Comunicação

O sistema de comunicação é também um tipo de sensor e de atuador, pois relaciona o agente proposto com o mundo exterior, mas, por ter uma característica especial, é tratada de forma individual nesta seção.

Pode-se dizer, comparando com o corpo humano, que os sensores e atuadores, descritos na seção passada, são os olhos e os músculos do corpo, respectivamente; enquanto o sistema de comunicação são a boca e os ouvidos do sistema, pois são seus elementos que, como diz o seu próprio nome, se comunicam com o mundo exterior.

Na verdade, esta comunicação, que envia e recebe sinais (informações), se estabelece com os demais agentes; porém, no agente proposto neste trabalho, ela se dá com os agentes dos seus times somente. Esta é uma característica importante do agente proposto, ou seja, a comunicação só deve ser feita com os agentes que fazem parte dos seus times, nunca com os demais agentes existentes no sistema.

A comunicação com os outros agentes não pertencentes aos seus times é feita através de troca de sinais entre agentes de times adjacentes. Por exemplo, às vezes um agente deve enviar uma informação a um agente mais distante, como um agente de subestação; então, isto ocorre através da transferência desta informação de um agente para outro até que chegue ao agente da subestação. Toda a parte lógica é baseada nesta premissa fundamental: “nenhum agente se comunica fora do seu time”, nem recebendo informação, nem transmitindo informação.

É possível pelos sistemas de comunicação que um agente venha a receber uma informação de um outro agente que não seja do seu time, pois o envio de informações normalmente é feito na forma de *broadcasting*, porém se não for de um agente de seu time, simplesmente ele desconsidera a mensagem.

Esta característica do sistema de comunicação faz com que dois elementos importantes venham a existir: (a) um sistema de comunicação mais simples, com menos necessidade de alcance e menos potência consumida e (b) um sistema de comunicação mais barato e com menor complexidade operacional. Além disto, esta característica faz com que o sistema multiagente formado pelos agentes propostos neste trabalho apresente uma solução que seja efetivamente distribuída.

O sistema de comunicação proposto assim possui um emissor e um receptor de informações, que estão operando de forma contínua enviando e recebendo sinais. Cada vez que

um sinal chega, dois procedimentos são feitos de forma imediata: (a) a verificação se o sinal veio de um agente de seus times, se sim, passa-se ao próximo procedimento; se não, destacar-se a mensagem; e (b) verifica-se qual tipo de mensagem foi recebida.

Existem quatro tipos de mensagens: comando (C), pergunta (?), resposta (A) e informação (I). Esta divisão das mensagens é puramente teórica, pois o seu conteúdo é analisado e processado pela parte lógica do agente, levando em consideração não apenas a mensagem, mas o seu estado da sua chave (aberta, fechada ou travada – sempre aberta), do agente que enviou a mensagem e de suas leituras dos sensores. Assim, uma mesma mensagem pode gerar saídas completamente diferentes entre os agentes. Exemplos dessas mensagens são:

- Comando (C): “abra a chave e trave” – este comando é dado quando do isolamento de um ramal em que ocorreu um curto-circuito. A chave que “viu” a corrente de curto-circuito envia este comando para as chaves do seu time que não “viram”.
- Pergunta (?): “qual a capacidade remanescente do circuito?” – esta pergunta acontece quando uma chave questiona a outra sobre sua capacidade remanescente durante o processo de restabelecimento. Sempre que uma chave faz uma pergunta, ela fica aguardando uma resposta.
- Resposta (A): “30A” – esta pode ser uma resposta dada por uma chave representando a capacidade remanescente do circuito que ela está representando.
- Informação (I): “20A” – esta pode ser uma informação prestada para outra do seu time quando ela abriu e travou, significando que esta era a sua corrente pré-falta.

É importante notar que o objetivo deste trabalho não é estudar os meios, protocolos e linguagens de comunicação entre os agentes (FIPA-ACL, KQML, KIF, LProlog, P2P, IEC 61850, entre outros), mas sim a parte física que permite um tratamento das informações pela parte lógica.

3.1.3 Memória Local e Unidade de Processamento

A memória local pode ser dividida em três áreas, segundo a periodicidade de atualização das informações nela.

A primeira área é aquela que praticamente nunca é modificada. Basicamente, é escrita na memória dados que estão ligados à construção do sistema e que são alterados somente quando de uma obra física na rede. Exemplos desses dados são, entre possíveis outros: a capacidade da chave, as chaves do time 1 desta chave e as chaves do time 2 desta chave.

A segunda área é aquela onde os valores que são calculados e devem ser guardados estão disponíveis. Exemplos desses valores são, entre outros: a última corrente lida (no caso de um curto-circuito, denominada de corrente pré-falta), a corrente recebida (como informação) de uma chave travada e a sua capacidade remanescente.

A terceira área é aquela volátil, ou seja, é utilizada como o quadro-negro, onde seus valores e informações só são utilizados durante o processo de tomada de decisão e, em seguida, apagados.

Da mesma forma que as mensagens de comunicação, esta divisão em área é puramente acadêmica para facilitar a explicação do processo. Para a parte lógica, podem existir apenas endereços na memória.

Por fim, é na unidade de processamento que está a parte lógica de todo o controle do processo de medição, análise e ação do agente. Ela lê e escreve constantemente durante suas análises na memória local e gerencia o sistema de comunicação, tanto para enviar mensagens, quanto para compreender uma mensagem que chegou.

3.2 Parte Lógica do Agente Inteligente

Como dito anteriormente, é a parte lógica do agente que controla as suas ações, tanto na parte de gerenciamento de dados e informações, quanto nas diversas ações que ele deve tomar. Esta parte lógica está dividida em níveis hierárquicos de raciocínio, fazendo com que quanto mais complexa for a análise, mais níveis devam ser aprofundados. Estes níveis são apresentados a seguir.

3.2.1 Nível 1: Nível de Instinto

O primeiro nível é o de instinto, ou seja, aquele em que uma ação é tomada de forma rápida, verificando apenas alguns poucos elementos, pois a situação exige uma resposta célere por parte do agente.

Normalmente, este nível ocorre durante a existência do curto-circuito e de seu isolamento. Quando há um curto-circuito, sabe-se que a corrente cresce de maneira muito rápida, podendo causar graves problemas aos equipamentos da rede e gravíssimos problemas

de segurança pessoal. Assim, ele deve ser extinto o mais rapidamente possível, porém pelo agente correto.

Se o curto-circuito ocorre a alguns ramais de distância da subestação, vários agentes podem observá-lo, mas pode ocorrer de nenhum deles poder eliminá-lo, já que suas chaves não dispõem de câmaras para a eliminação desta magnitude de corrente. Somente chaves com capacidade de eliminação de curtos-circuitos podem eliminar este evento. Assim, mesmo percebendo o curto-circuito, eles não podem gerar uma ação externa. Porém, o agente da chave que está na subestação deve eliminá-lo através da abertura de sua chave. Além disso, deve-se seguir os protocolos operativos da concessionária visando verificar se este curto-circuito tem característica transitória ou permanente. Normalmente, isto ocorre com três tentativas de religamento desta mesma chave que o interrompeu. Cada concessionária já tem previamente especificado o número de tentativas que devem ser feitas.

3.2.2 Nível 2: Nível de Trabalho Normal

Neste segundo nível hierárquico, é feito o trabalho normal de verificação e cálculo pelo agente; ou seja, quando o sistema está operando normalmente, a maioria das funções utilizadas são deste nível hierárquico.

Assim, um agente cuja chave está fechada deve continuamente ler a corrente que está passando por ele e gravá-la na memória em sua posição correspondente. Ele também pode calcular a sua capacidade remanescente e verificar se ela ainda é positiva.

Um agente cuja chave está aberta deve continuamente ler as tensões dos dois lados da chave e registrá-las na memória. Quando existem tensões nos dois lados, ela deve se travar, não executando nunca um comando para fechar. Quando existe tensão em apenas um de seus lados, ela deve estar atenta para receber comandos (ou executar de forma autônoma, em alguns poucos casos, seu fechamento). Quando não existe tensão em nenhum de seus lados, ela também deve esperar um comando externo ou participar de um processo de restauração (já no nível 3).

3.2.3 Nível 3: Nível de Trabalho Anormal

No nível hierárquico 3, o sistema está operando de forma anormal para a chave. Deve-se notar que esta percepção de anormalidade é feita pelo agente localmente. Assim, em um

mesmo instante no sistema, podem existir agentes que estão operando no nível 2, enquanto outros estão no nível 3. Isto ocorre por exemplo, quando um circuito acabou de eliminar um curto-circuito e tem agentes com chaves sem tensão e/ou sem corrente; enquanto o outro circuito opera normalmente.

É neste nível 3 que estão as funções e procedimento de restauração do sistema. Nele, o sistema de comunicação deve trocar mensagens para que ações nas chaves venham a primeiramente isolar o ramal em curto-circuito e depois providenciar o restabelecimento das cargas que podem ainda ser alimentadas.

Podem existir outros tipos de serviços neste nível, tais como trabalhos em sobrecarga, desvios de tensão e outros tipos de anormalidade, que serão tratados mais a frente neste documento.

3.2.4 Nível 4: Nível de Otimização e Predição

Neste nível hierárquico mais profundo é onde estão as ações de construção das bases e acionamento dos programas “externos” de previsão, de otimização e cálculos especiais. Este nível é acessado quando alguma anormalidade é detectada nas medições do nível 2 e após uma análise das funções existentes no nível 3, assim alguns de seus programas são instados a produzir um resultado.

As funções do quarto nível são responsáveis também por acionar programas “externos”. Aqui, foi utilizada esta designação somente para dizer que eles não formam a parte lógica, mas sim são adendos do agente. Estes programas externos podem ser de puro processamento matemático ou um programa baseado em técnicas inteligentes. São as funções deste nível que irão organizar os dados na memória local e acionar o programa externo para que ele possa ser executado e ao final escreva na memória o resultado requerido. Assim, as funções do quarto nível irão ler este resultado e continuar as suas ações (demandadas pelas funções do terceiro nível).

Ao possuir programas externos (matemáticos ou inteligentes), o agente passa a ser designado como agente inteligente híbrido, pois reúne mais de um tipo de técnica em sua parte lógica de execução. Além disso, deve-se notar que os programas externos não impedem que procedimentos matemáticos mais simples sejam executados nos diversos níveis (tais como: comparações, operações aritméticas, entre outras). Os programas externos são para executarem

rotinas efetivamente mais complexas, tais como a previsão da evolução da carga para as próximas horas ou pequenos fluxos de potência locais.

Estes programas externos são acionados tanto em situação normal quanto em situação anormal de funcionamento da rede. Por exemplo, no funcionamento normal, ele pode calcular constantemente o perfil da carga que passa pela chave por ele comandada; enquanto, na operação anormal, ou seja, durante sobrecargas contínuas, restabelecimentos da rede em momentos de alta carga, em situações de desvios de tensão, em ilhamento, entre outros, eles também podem ser acionados. Mais à frente neste documento, estes programas começarão a ser tratados.

3.3 Representação dos Elementos de um Agente

A Figura 5 apresenta uma representação pictórica de um agente inteligente, com sua parte lógica com seus sensores e atuadores, com sua unidade de memória local e com seus sistemas de comunicação. Observa-se também a existência de programas “externos”, que são acionados pelas regras da parte lógica para auxiliar na solução de um problema ou para a composição de dados que ficam na memória para posterior utilização, caso necessário.

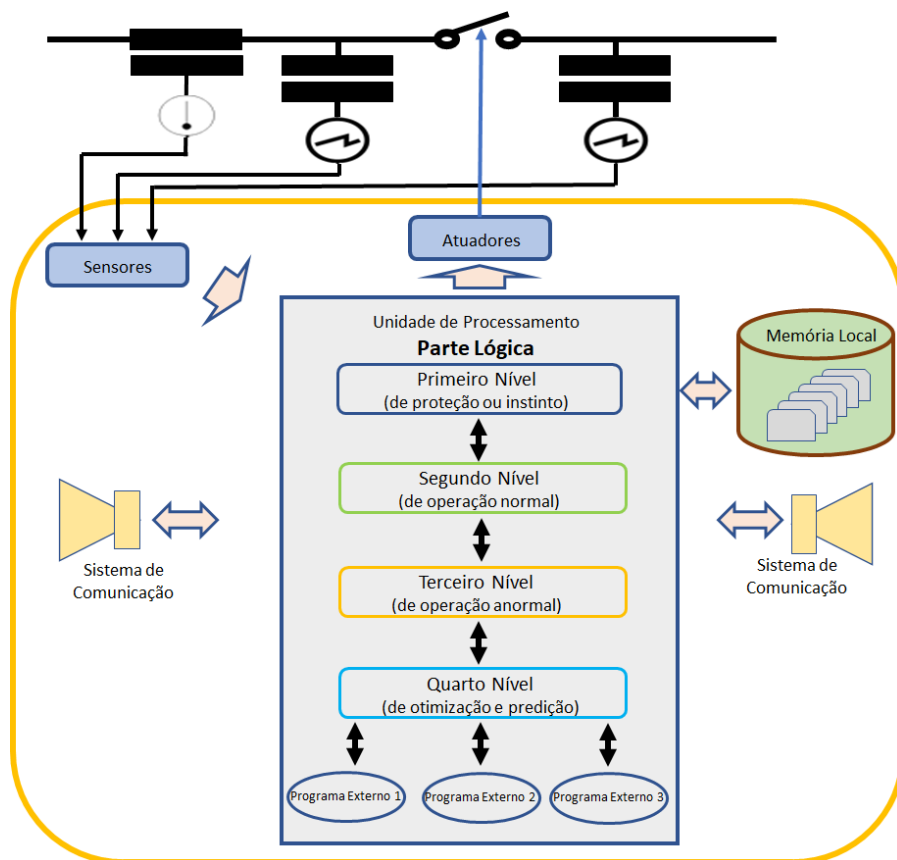


Figura 5. Estrutura do agente proposto, com o acionamento de programas externos.

3.4 Agente de Subestação e Agente de Ramal

Antes de prosseguir com as explicações sobre os agentes, é necessário se fazer alguns comentários sobre o agente de uma chave da subestação e o agente de uma chave de ramal. O agente de uma chave da subestação, como próprio nome define, é aquele que controla uma chave que está situada na subestação e que tem capacidade de operar em carga e de eliminar curtos-circuitos. O agente de uma chave de ramal, também conforme determinado por seu nome, controla uma chave que está localizada na rede de distribuição. Esta chave não tem poder de abrir sob carga e muito menos de eliminar curtos-circuitos. Ela só pode abrir a vazio e fechar quando não existem tensões em seus dois lados.

Isto faz com que elas sejam fisicamente muito diferentes e também diferentes em sua forma de atuar no sistema; porém a estrutura e os procedimentos internos dos seus agentes são os mesmos, pois levam em consideração durante o processo de tomada de decisão qual é o tipo

de chave que está atuando. Em outras palavras, o programa computacional que os controla é exatamente o mesmo.

O programa consegue distinguir uma chave da outra pelo registro feito durante a sua instalação. No agente da chave de ramal existem sempre dois times registrados, ou seja, as chaves de um lado e as chaves do outro lado. Em chaves terminais, aquelas que alimentam somente um ramal terminal, existem chaves de um lado, mas não existem do outro, mas um código é inserido para que a parte lógica do agente entenda que ela é uma chave de ramal; e mais, que ela é uma chave terminal (existem alguns procedimentos especiais também para esta chave).

O programa consegue verificar que a chave que o agente está comandando é de uma subestação pelo registro da memória, pois somente é registrado um time. No outro é posto um código que permite ao programa entender que ela está localizada na subestação e que tem funções distintas das chaves dos ramais.

Então, é importante notar que mesmo que se faça distinção ao se apresentar os procedimentos a seguir, eles são puramente didáticos e na prática um conjunto de regras. Então são aplicadas para se saber os procedimentos que devem ser aplicados.

Por fim, deve-se notar que em muitas vezes no texto, por simplicidade de expressão, escreve-se afirmativas tais como “a chave percebeu o curto-circuito” ou “uma chave perguntou para outra chave”. Obviamente, a chave não percebe nada e nem envia uma pergunta para outra chave. Na realidade, o correto seria sempre dizer “o agente da chave percebeu o curto-circuito” ou “o agente de uma chave perguntou ao agente da outra chave”, mas entende-se de forma subliminar estas expressões.

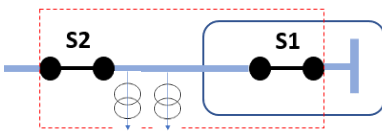
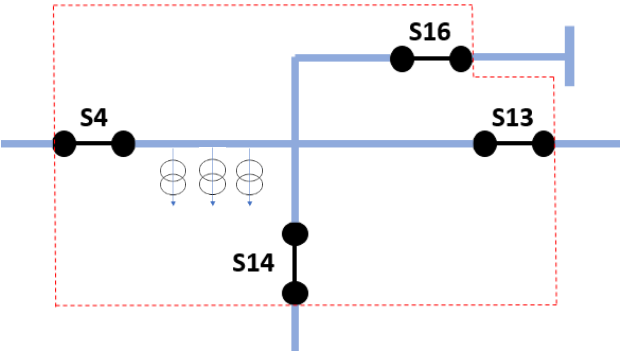
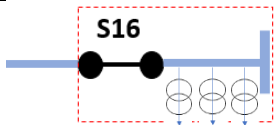
3.5 A Definição de Time

Antes de apresentar o funcionamento normal do agente, é importante discutir o conceito de time no qual este algoritmo se baseia. “Time” é um conjunto topológico formado por um segmento do alimentador (denominado aqui como “ramal”) mais uma ou mais chaves. Assim, em qualquer rede de distribuição radial, cada ramal pertence a apenas um time, as chaves da subestação pertencem a apenas um time e as chaves localizadas nos ramais sempre pertencem a dois times. Essa divisão entre as chaves da subestação e as chaves dos ramais é importante porque os algoritmos propostos para cada uma são diferentes. As configurações possíveis estão

ilustradas na Tabela 2, que são: (a) chave da subestação (de saída de circuito) + ramal + chave do ramal; (b) chave do ramal + ramal + chave de ramal; e (c) chave de ramal + ramal. O primeiro caso ocorre no time da saída da subestação. O segundo caso ocorre nos trechos intermediários do alimentador. E, por fim, o terceiro caso ocorre em uma chave terminal (último ramal do alimentador). As linhas pontilhadas evidenciam o time que está sendo exemplificado.

Nos exemplos de configuração de times ainda aparecem a ligação de alguns transformadores; em verdade, estes transformadores estão em quase todos (senão todos) os ramos existentes nos sistemas de distribuição em análise de trabalho. A função destes transformadores é realizar a mudança de tensão para rede de distribuição secundária (baixa tensão) ou para alimentação de cargas em 13,8 kV. Os transformadores foram omitidos dos demais exemplos de circuitos para simplificar.

Tabela 2. Exemplos de Times

Tipos de Estrutura do Time	Exemplos de Configuração
chave da subestação + ramal + chave de ramal	
chave de ramal + ramal + chave de ramal	
chave de ramal + ramal	

3.6 Procedimentos de Operação Normal

Os procedimentos da operação normal são aqueles efetuados durante o regime permanente de operação da rede. A seguir, para cada agente e sua respectiva chave são apresentados estes procedimentos.

Os agentes das chaves de ramais que estão fechadas registram a corrente que passa pela chave, medida pelo sensor de corrente, e a registram na memória em sua segunda área. Pode ser feita uma checagem de controle dos sensores de tensão, pois eles devem apresentar valores iguais. A capacidade remanescente da chave pode ser calculada, a qual é dada pela diferença entre a capacidade de chave (que está na primeira área da memória) e a corrente que acabou de ser lida. Este valor também é registrado na segunda área da memória. Nenhuma ação de mudança de posição ou de comunicação com outra chave deve ser feita.

Os agentes das chaves de ramais que estão abertas devem ter tensão em seus dois lados e obviamente não podem ter corrente. A existência da tensão nos dois lados mostra que esta chave está localizada entre circuitos diferentes. Também pode ser feita uma checagem de controle do sensor de corrente, pois ele deve apresentar valor zero. A ação de que posição deve ser tomada é de travar a chave na posição aberta. Nenhuma ação de comunicação deve ser tomada.

Na operação normal, o agente da chave subestação observa que ela está fechada alimentando o seu circuito. É usada uma operação análoga ao descrito acima para as chaves fechadas dos ramais. Nenhuma ação de mudança de posição ou de comunicação com outra chave deve ser feita.

A Figura 6 começa a estruturar a parte lógica do agente inteligente proposto. Nela estão estruturadas as principais funções executadas no Nível 2, para o agente da subestação e para os agentes dos ramais (fechadas e abertas). Vale destacar que, para que a chave do agente da subestação esteja operando no Nível 2, é preciso que ela esteja fechada. Já as chaves dos ramais podem estar fechadas ou abertas.

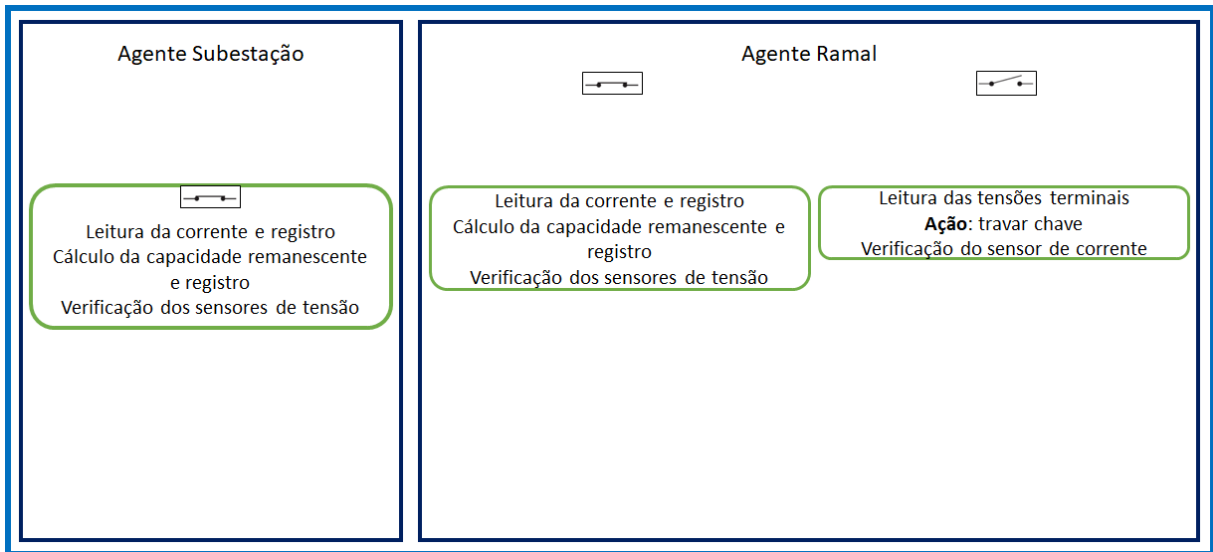


Figura 6. Parte Lógica do Agente: Nível 2.

A seguir, na Figura 7, tem-se a representação para a posição das chaves e de suas tensões terminais para se construir uma tabela temporal dos eventos, como será feito ao longo deste capítulo. Neste exemplo, o instante tratado é o de $t-2$, onde as chaves S1 (da subestação) e S4 e S5 (chaves dos ramais) são apresentadas. As cores azul e laranja representam as tensões dos circuitos. Assim, verifica-se que as chaves S1 e S4 (fechadas) fazem parte do mesmo circuito, pois são tensões terminais (em azul) são iguais; enquanto a chave S5 (aberta) interliga um circuito (em azul) a um outro circuito (em laranja).

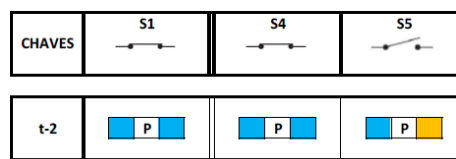


Figura 7. Exemplo de participação das chaves nos circuitos.

3.7 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo, foi apresentada a estrutura proposta de cada agente inteligente que será utilizado na montagem dos vários procedimentos de solução dos problemas operativos que, porventura, possam vir a aparecer nos sistemas de distribuição. O AI proposto pode ser dividido didaticamente em duas partes, uma física e outra lógica.

A parte física do AI possui sensores que reportam o mundo exterior para o agente (no caso, dois sensores de tensão e um de corrente), que lhe permitem verificar as condições locais do sistema, como as tensões dos dois lados da chave que lhe atua e a corrente que passa por ela. Além disso, a parte física também é composta por uma memória local, um sistema de comunicação (capaz de enviar e receber mensagens das chaves adjacentes, ou seja, dos mesmos times do agente) e uma unidade de processamento. É nesta unidade de processamento que está alojado o programa que lidera todo o controle das ações do agente, gerenciando os processos de aquisição de dados, sua interpretação e armazenamento, de sua comunicação com outros agentes e da atuação de sua ação no mundo exterior, via o controle da chave de manobra.

O AI também é composto por uma parte lógica, onde estão as regras, procedimentos e cálculos necessários ao seu processo de tomada de decisão. Esta parte lógica também está ligada ao sistema de comunicação do agente que recebe e emite: comando (C), pergunta (?), resposta (A) e informação (I). Existe também uma memória local que armazena alguns elementos que são importantes para processos de tomada de decisão naquele momento ou no futuro. Finalmente, após concluído o processo de tomada de decisão, o agente pode ou não atuar sobre a chave que ele comanda, alterando ou não, seu estado (de aberto para fechado, de fechado para aberto, ou travando a chave em aberto). Destaca-se que a parte lógica do agente, que já começou a ser construída neste capítulo com o procedimento do agente na operação normal do sistema (ou seja, sem nenhuma contingência), está sendo estruturada em quatro níveis principais, a saber: Nível de Instinto, Nível de Trabalho Normal, Nível de Trabalho Anormal e Nível de Otimização e Predição. As regras de cada um desses níveis serão construídas ao longo dos próximos capítulos.

O programa foi designado neste capítulo como parte lógica. Ele é estruturado também de forma acadêmica em regras alocadas às chaves de subestação e às chaves de ramais. Mas isto, em verdade, não condiz com o agente proposto, pois o programa é o mesmo, a diferença é que ele conhece pelos dados que são configurados em sua memória, quando de sua instalação da chave com seu agente na rede. Neste processo, são definidos os agentes que fazem parte dos times do agente que está sendo instalado.

Finalmente, neste capítulo foi apresentado um conceito bastante importante para a construção e o entendimento das regras que comporão os agentes, que é a definição de time. Ele é um conjunto topológico formado por um ramal e mais uma ou mais chaves que são a ele fisicamente ligadas. Vale destacar que reconfigurações e chaveamentos na rede não mudam os times dos agentes. Isto só ocorre quando uma nova chave é incluída fisicamente na rede através

de uma obra. Neste momento, é necessário acrescentar esta chave na memória de todos os agentes daquele time. Este fato não ocorre corriqueiramente nas redes de distribuição.

4 Procedimentos para a Função Restabelecimento de um Curto-Circuito

Neste capítulo se inicia a construção da parte lógica dos agentes, preenchendo-se os vários níveis, de acordo com a necessidade, com regras operativas. Neste ponto, deseja-se que o MAS atue através de seus agentes no caso de um curto-circuito em um dos ramais do sistema de distribuição.

A solução deste problema envolve algumas etapas de ações que devem ser executadas pelos agentes envolvidos no evento. Primeiramente, eles devem eliminar o curto-circuito; em seguida, eles devem isolar o ramal onde o curto ocorreu; e, finalmente, eles devem verificar como devem contribuir para efetuar a restauração dos ramais que estão sãos, mas sem energia.

Como é próprio de cada agente, eles deverão atuar de forma assíncrona, mas coordenada, sendo que esta coordenação ocorre através dos comandos e sinais efetuados pelos sistemas de comunicação. As seções a seguir mostram como cada uma das etapas são executadas e a forma das regras necessárias para que os agentes atuem nesses passos.

4.1 Procedimentos de Eliminação do Curto-Circuito

A eliminação do curto-circuito só pode ser feita pela chave da subestação, a qual dispõe de câmaras de extinção de arco. Porém, as chaves fechadas dos ramais podem ter duas reações diferentes: perceber a corrente de curto-circuito ou perceber a falta (ou sensível redução) de tensão.

O agente da chave da subestação, ao verificar a corrente de curto-circuito, começa o processo de desligamento e religamento automático. Como dito, a maioria das empresas define como três o número de tentativas de religamento do circuito para verificar se o curto-circuito tem caráter permanente ou transitório. Se for de caráter transitório, o curto-circuito deve ser eliminado até a terceira tentativa de religamento; se for de caráter permanente, a chave da subestação abre e espera os procedimentos de conclusão do isolamento da falta.

Os agentes das chaves fechadas dos ramais percebem através do sensor de corrente a elevação de seu valor durante o curto-circuito. Como existem limitadores naturais nos diversos tipos de sensores de corrente que limitam a corrente no secundário dos sensores (seja ele TC ou

de efeito Hall), para que não haja a queima da unidade de processo do agente; não é possível a correta medição da corrente de curto-circuito pelo agente, mas isto não é importante. Basta que se tenha uma corrente bem acima da nominal para o agente verificar que ela aconteceu. Neste instante, a chave começa a contar o número de religamento definidos, e isto ocorre pela verificação repetida da corrente de curto-circuito pela chave. Se o curto-circuito for de caráter transitório, a chave não chega a limite da contagem de três (quando forem três tentativas de religamento) e ela continua nesta situação e fecha, pois o circuito volta a sua operação normal.

Entretanto, quando o curto-circuito for de caráter permanente, a chave fecha a contagem de três (ou seja, ela mede a corrente de curto-circuito por quatro vezes – uma da primeira vez da existência do curto e mais três tentativas de religamento). Ela guarda esta informação (de ter visto a corrente de curto-circuito) em uma dada posição de memória.

Os agentes das chaves fechadas dos ramais podem não ter percebido a corrente de curto-circuito, somente uma redução da tensão em seus terminais. Isto acontece quando o curto-circuito ocorre “antes” da chave no seu circuito. Assim, ela não faz nenhum registro.

Em ambos os casos o agente conserva a chave fechada nesta etapa.

O agente da chave aberta, que de um lado pertence ao circuito de onde ocorreu o curto-circuito, observa que a tensão deste lado vai a zero (ou sofre uma redução bastante sensível). Esta chave também permanece na sua posição aberta.

A Figura 7 continua a estruturação da parte lógica do agente inteligente proposto. Nela são agora adicionadas as funções executadas no Nível 1, para o agente da subestação e para os agentes dos ramais fechadas. Observa-se que nenhum procedimento que cause ação é feito pelos agentes das chaves de ramais que estavam abertas, ou mesmo pelos agentes das chaves de ramais fechadas que não perceberam o curto-circuito.

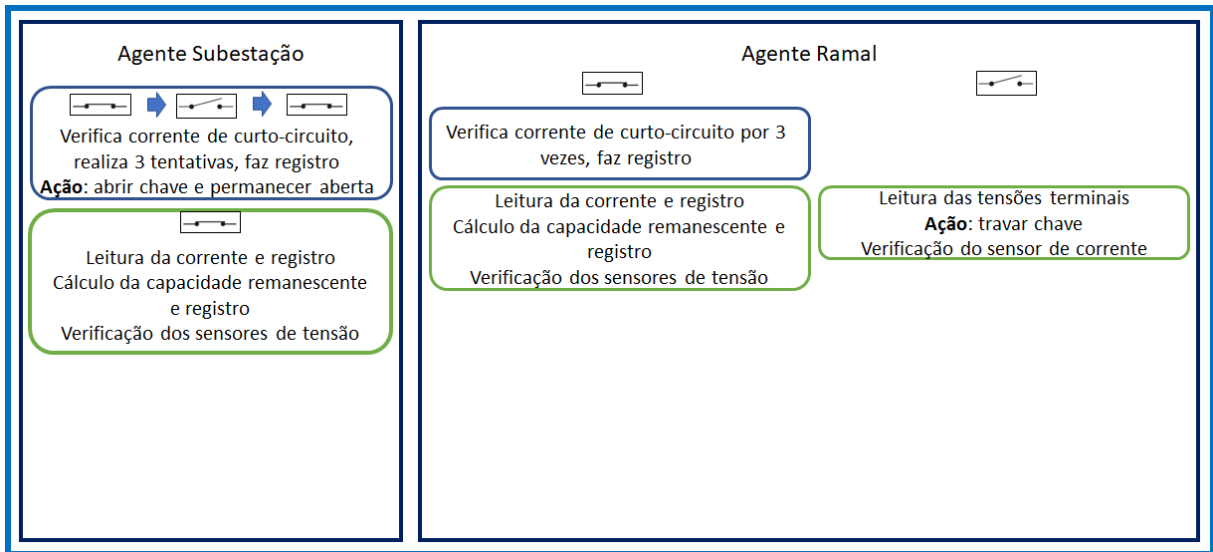


Figura 8. Parte Lógica do Agente: Nível 1.

A seguir, na Figura 9, é apresentada a representação da posição das chaves e de suas tensões terminais para se construir uma tabela temporal dos eventos. Neste exemplo, o curto-circuito ocorreu no instante $t=0$, assim no instante $t+1$, a chave S1 (da subestação) faz as três tentativas de religamento (permanecendo aberta). Assim, um de seus lados continua azul e o outro se torna sem cor. O agente da chave S4 (de ramal) ficou sem tensão em seus terminais (devido a abertura da chave S1) e, se viu a corrente de curto-circuito, registrou a sua existência. Seus dois lados estão sem tensão, então estão sem cor. Finalmente, o agente da chave S5 percebe a falta de tensão em um de seus lados e aquele em que o curto ocorreu ficou sem tensão (sem cor deste lado). O outro permanece com energia (cor laranja).

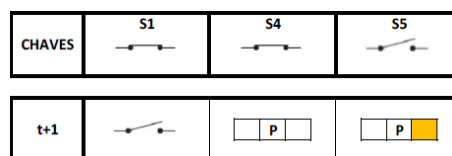


Figura 9. Exemplo de participação das chaves nos circuitos.

4.2 Procedimentos de Isolamento do Curto-Circuito

Após a eliminação da corrente de curto-circuito e a tensão ter ido a zero, resta aos agentes envolvidos do circuito afetado isolarem o ramal onde ele ocorreu. Vale destacar que o

processo ocorre em cada agente individualmente, e a chegada a zero da tensão faz com que eles disparem o processo de isolamento.

O agente da chave da subestação, ao abrir, pergunta (?) aos agentes das chaves do seu time se eles “viram” a corrente de curto-circuito. Todo agente que observou o curto-circuito possui o registro deste fato. Assim, se um deles observou a corrente de curto-circuito, ele recebe a resposta (A) afirmativa e conclui que a falta não ocorreu em seu time (ou seja, no ramal de seu time), então ele está apto a fechar. Porém, não fecha ainda, pois necessita receber um comando suplementar. Na realidade, este comando suplementar é feito para que se possa garantir que o trecho em curto foi isolado.

Entretanto, se ele não receber nenhuma resposta afirmativa das chaves do seu time, ele conclui que o curto-circuito ocorreu entre ele e as demais chaves do seu time. Assim, a chave do agente permanece aberta e travada. Neste caso, além disto, ele envia um comando para as chaves de seu time, mandando que todas as chaves abram e travem; isolando o curto-circuito.

Os demais agentes que perceberam a corrente de curto-circuito começam a se perguntar se o curto-circuito ocorreu em seus times. Para tal, os agentes enviam perguntas (?) aos demais agentes de seus dois times. Isto deve ocorrer pois o sensor de corrente não é direcional; assim o agente desconhece se a corrente passou da esquerda para a direita ou vice-versa. Se cada time oferecer uma resposta (A) afirmativa, o agente concluiu que o curto-circuito não estava localizado naquele ramal. Porém, se o agente de uma dessas chaves não recebe uma resposta positiva de um de seus times, significa que o curto-circuito ocorreu dentro daquele time. Assim, a sua chave deve abrir e travar, enviar um comando para as outras chaves deste time também abrirem e travarem.

As demais chaves do circuito do curto-circuito que não viram sua corrente e a chave aberta que faz a interligação com o outro circuito não realizam nenhuma ação, permanecendo na mesma posição e aguardando uma nova mensagem.

A Figura 10 continua a estruturação da parte lógica do agente inteligente proposto com funções executadas agora no Nível 3, para os procedimentos de isolamento do ramal em que existia o curto-circuito. Se a chave da subestação verificar que o curto estava em seu time, ela permanece aberta e travada. Além disto, ela envia um comando para as demais chaves de seu time também abrirem e travarem. A mesma atitude toma a chave que detectou que o curto-circuito estava em seu time.

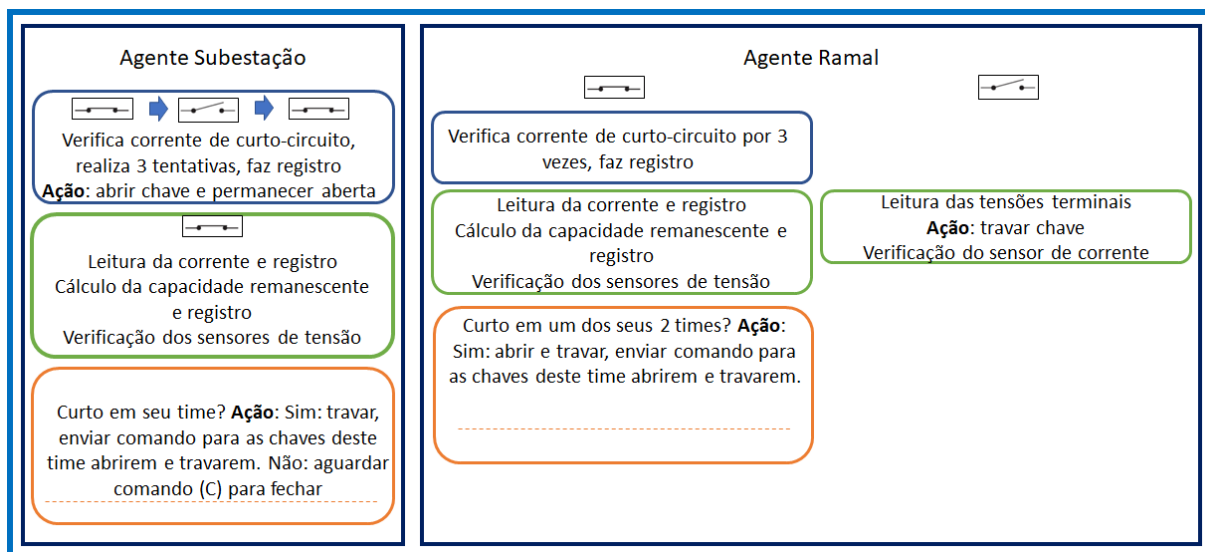


Figura 10. Parte Lógica do Agente: Nível 3 – Isolamento do ramal em curto.

4.3 Procedimentos de Restauração do Circuito

O processo de restauração da energia nos ramais que podem ser restabelecidos começa pelo agente da chave de ramal que detectou que a falta estava em seu time. Depois que ele abre sua chave, ela envia um comando (C) para o agente da chave da subestação. Isto é feito chave a chave, ou seja, através da passagem de um comando de fechar de uma chave para outra até chegar na subestação. Assim, esta chave envia um comando para as chaves do seu outro time (aquele que viu o curto-circuito). Estas chaves, por sua vez, recebem este comando e o repassam para as chaves de seu outro time. Este processo continua até que chega o comando (C) no agente da chave da subestação que o esperava para fechar, energizando assim uma parte da rede.

Por sua vez, as outras chaves que fazem parte do time em que estava localizada a falta (que não viram o curto, mas que abriram e travaram), passam uma informação (I) para às chaves do seu outro time, com o valor da sua corrente de pré-falta. Esta corrente servirá para que possa ser informada as demais chaves para que elas venham a contribuir para o processo de restauração.

A Figura 11 continua a estruturação da parte lógica do agente inteligente proposto, com funções executadas agora no Nível 3, para os procedimentos iniciais de restauração da energia dos ramais que ficaram sem energia e que ainda podem recebê-la. A chave de ramal que viu o curto em seu time, envia um comando (C) para a chave da subestação, permitindo que esta feche, energizando alguns ramais. A chave de ramal que não viu o curto em seu time, envia

uma informação (I) para as chaves do seu outro time com a sua corrente pré-falta. Este comando inicia a segunda parte do processo de restauração, com o possível socorro de um outro circuito.

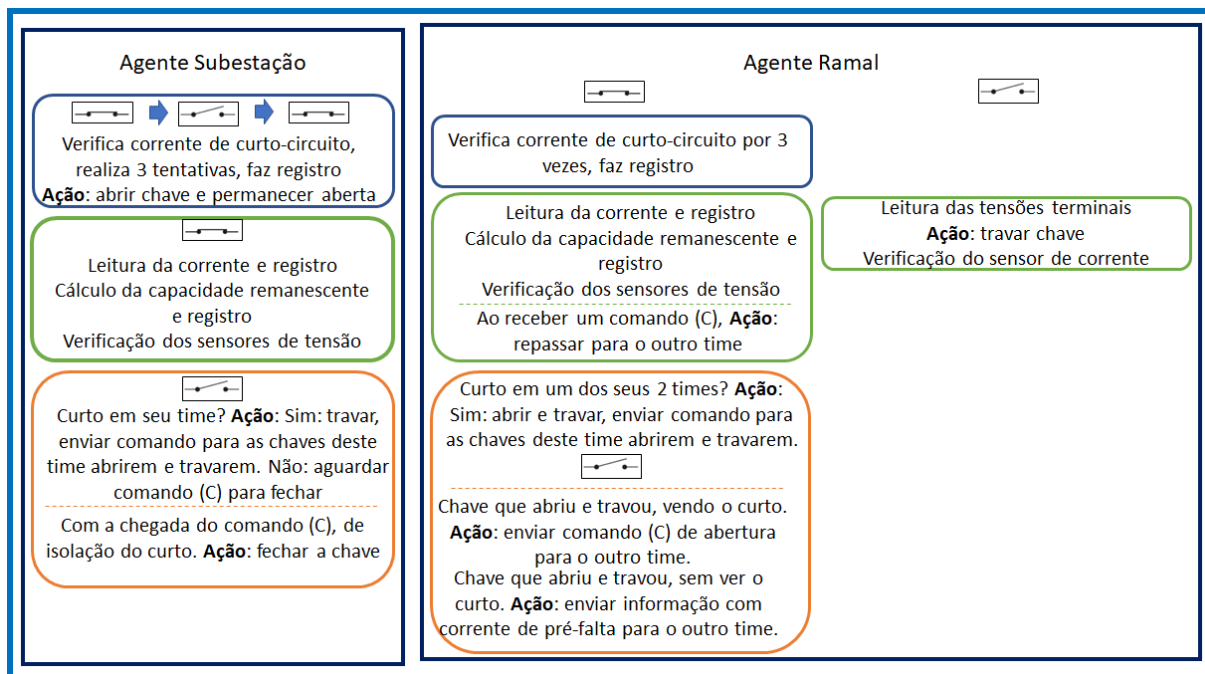


Figura 11. Parte Lógica do Agente: Nível 3 – Restauração – Procedimentos Iniciais.

Antes de continuar a explanação do processo de restauração da energia nos ramais afetados, dois conceitos que vão ser utilizados nos próximos passos devem ser apresentados, a saber: a capacidade remanescente de corrente do circuito e o conceito de disputa.

A capacidade remanescente de corrente do circuito é o menor valor entre todas as capacidades remanescentes das chaves do circuito, ou seja, é o valor de corrente que ainda pode transitar por ele dentro da capacidade nominal das chaves do circuito. Este valor é importante, pois, de certa forma, ele define a capacidade de auxílio deste circuito aos ramais sem energia. É sempre através das chaves abertas que a capacidade remanescente de corrente do circuito começa a ser calculada. Isto é feito através de uma consulta que vai da chave aberta até a chave da subestação, chave a chave, cada uma observando o valor que recebeu, comparando com o seu e transmitindo o menor desses dois valores para a chave seguinte de seu outro time.

Uma disputa ocorre quando existem dois ou mais circuitos que podem auxiliar no processo de restauração. Como se verá mais a frente nesta seção, uma disputa pode ser feita diretamente pelas chaves abertas ou por chaves fechadas que as representam. O circuito vencedor de uma disputa é aquele que tem maior capacidade remanescente de corrente do circuito. Alguns outros elementos também podem interferir no valor de disputa, como a

capacidade remanescente fictícia de uma chave, mas este conceito será explicado um pouco mais a frente.

A partir daqui, como são várias as possibilidades de análises nesta próxima fase do processo de restauração, foram desenvolvidos cinco exemplos de auxílio na demonstração dos processos de restauração.

4.3.1 Primeiro Exemplo: Verificação da Capacidade de um Circuito

Este primeiro exemplo visa mostrar uma situação em que, ao ocorrer um curto-circuito em um dos ramos de um dos circuitos, como o outro circuito pode auxiliar no processo de restabelecimento da energia nos demais ramos que ficaram desenergizados.

Apresenta-se, nesta seção, como cada uma das chaves se comporta durante cada instante nas diversas etapas, que foram divididas em: situação pré-falta, em falta, isolamento do ramal em curto, e processo de restabelecimento. A Figura 12 apresenta um sistema de distribuição teste, chamado de “sistema teste 1”, para auxiliar a exemplificação desses procedimentos. Ele é composto por dois circuitos, 1 e 2, os quais são coloridos em azul e laranja, respectivamente. Estas cores são utilizadas didaticamente para melhor visualização dos circuitos, ou seja, para mostrar por onde a energia está chegando em seus ramos. Cada chave S está em uma posição devida para se ter uma certa configuração do sistema. As chaves S1 e S9 são chaves de subestação; enquanto as demais são chaves de ramais.

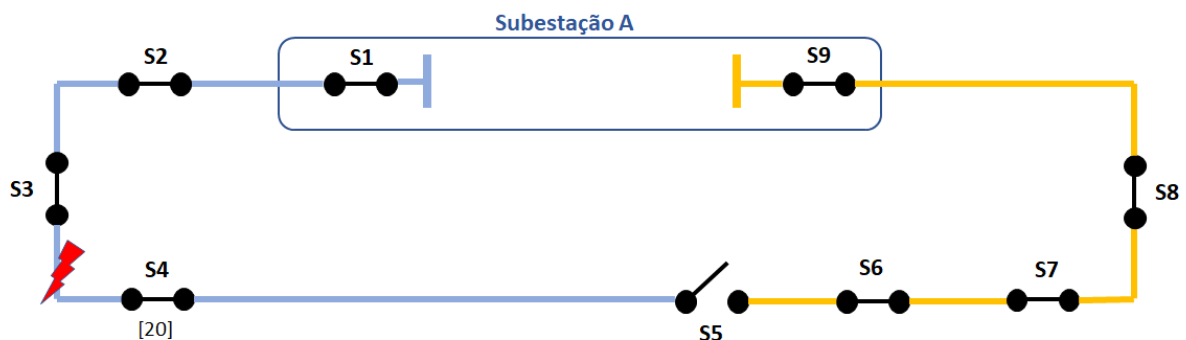


Figura 12. Sistema teste 1

A seguir, cada uma das etapas descritas anteriormente é analisada.

a) Pré-falta

Na situação pré-falta, tem-se uma operação normal do sistema, ou seja, não existe a necessidade de nenhum chaveamento. Desta forma, nos instantes $t-2$ e $t-1$, mostrados na Figura 13, tem-se a atuação normal de cada chave.

O algoritmo do procedimento (P) das chaves que estão fechadas fica constantemente medindo a corrente que está passando por ela, verificando se existe sobrecorrente (ou curto-circuito), e calculando o seu limite de remanescente de carga (corrente). Este limite remanescente é a diferença entre a sua capacidade nominal e a corrente que está passando por ela naquele instante. Na prática, tal como a corrente, a capacidade remanescente está sempre sendo alterada a cada instante.

O algoritmo P das chaves abertas fica constantemente verificando as tensões nas suas extremidades. Três situações são possíveis: tensão nas duas extremidades, tensão em apenas um dos lados, e tensão em nenhum dos lados. Cada uma dessas situações causa um efeito diferente no algoritmo da chave. A primeira situação provoca o travamento da chave, não permitindo que ela feche, pois estaria fechando um laço. A segunda situação habilita a chave para que ela possa auxiliar no processo de restabelecimento. A terceira situação faz com que a chave espere mais informações para tomar uma decisão.

A Figura 13 apresenta na primeira linha a posição de cada chave, de S1 a S9. A segunda e terceira linhas (ou linhas intermediárias) apresentam o procedimento P que cada chave está executando. As cores a direita e a esquerda mostram, somente para efeitos didáticos, de qual circuito é a tensão que está sendo medida em seus terminais. Pode-se notar, por exemplo, que a chave S5 apresenta cores diferentes, pois ela está aberta e tem tensões dos circuitos 1 (azul) e 2 (laranja) em seus terminais. É importante notar que as chaves não necessitam saber o número do seu circuito, já que elas só têm conhecimento dos seus times. A última linha da figura apresenta o estado final das chaves depois de executados os procedimentos P, nas seções intermediárias. Neste caso, nenhuma chave mudou de posição.

Estruturação similar à da Figura 13 será realizada em todas as figuras deste trabalho quando se desejar fazer uma estruturação temporal da solução de autorrecuperação do sistema.

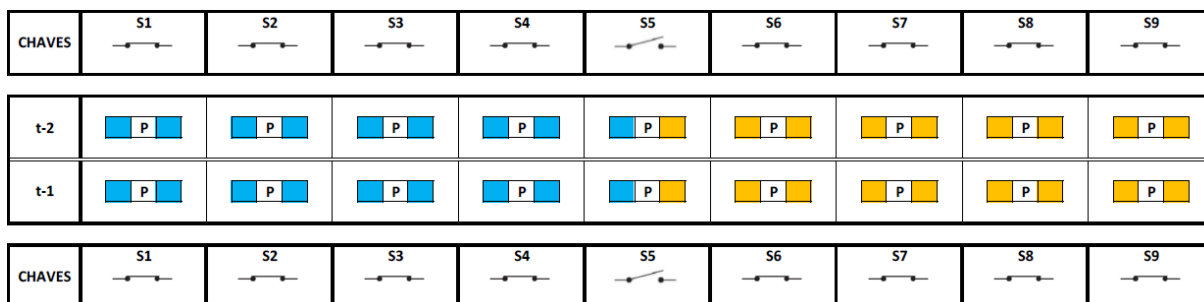


Figura 13. Ações operativas no sistema teste 1 na condição pré-falta

b) Falta (curto-circuito)

No instante $t=0$, ocorre um curto-circuito no ramal 3-4, conforme mostrado na figura do sistema teste 1. Este curto-circuito é mostrado na Figura 14. Note que nenhuma chave muda de posição; contudo, dois fatos importantes ocorrem:

- (a) as chaves S1, S2 e S3 percebem a corrente de curto-circuito e
- (b) a tensão nas chaves S4 e em um dos lados da chave S5 passam a ser zero (ou quase zero, dependendo da impedância de curto). Isto faz com que essas cores terminais venham a ser apagadas, denotando a falta de energia naquele ponto do circuito.

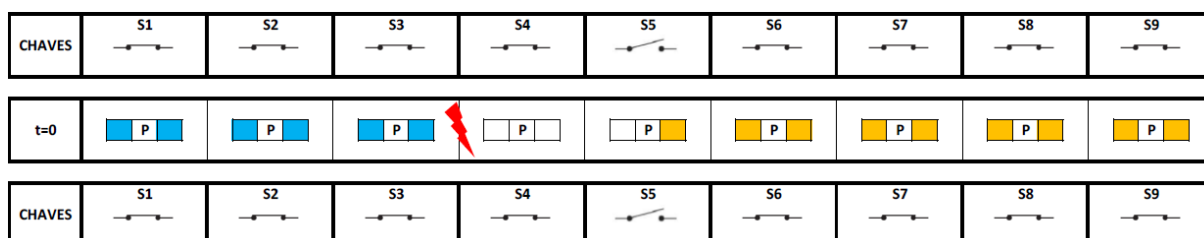


Figura 14. Ações operativas no sistema teste 1 na condição durante a falta

c) Eliminação do curto-circuito ($t+1$)

Após as tentativas de religamento, quando se configura um curto-circuito permanente, a chave de subestação S1 abre, extinguindo o curto-circuito. Com este procedimento, todas as tensões das chaves de ramais do circuito 1 (a saber S2, S3, S4 e um dos lados da chave S5) passam a ser zero.

Tanto o curto-circuito quanto a abertura da chave S1 são quase totalmente imperceptíveis para as chaves do circuito 2, pois elas não registraram o curto-circuito; salvo para a chave S5, que também pertence ao circuito 2, e verifica a falta de tensão em um de seus

terminais. Todas as outras chaves do circuito 2 continuam a operar de forma idêntica a uma situação normal de operação.

A Figura 15 mostra as ações operativas para a eliminação do curto-circuito.

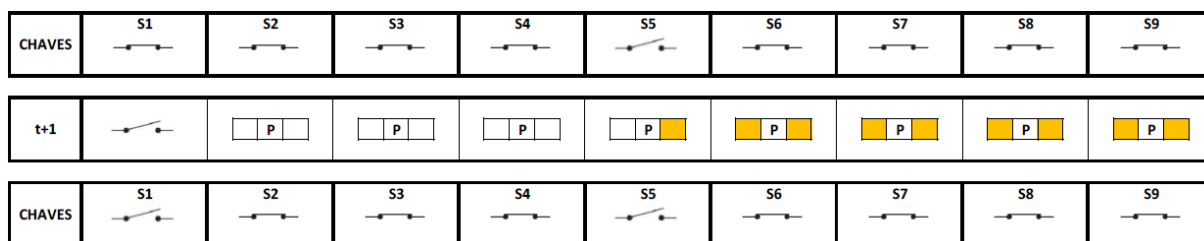


Figura 15. Ações operativas no sistema teste 1 na condição de eliminação do curto-circuito

d) Localização e Processo de Isolamento do curto-circuito (de t+2 a t+6)

O processo de localização e isolamento do curto-circuito acontece como descrito a seguir. As chaves do circuito que perceberam a corrente de curto-circuito enviam perguntas (? – *queries*) às chaves do seu time, para verificar se elas também observaram o curto-circuito.

Assim, as chaves S1, S2 e S3, que observaram a corrente de curto, enviam perguntas para as chaves dos seus times:

- a chave S1 envia a pergunta para a chave S2;
- a chave S2 envia a pergunta para as chaves S1 e S3 (ela pertence a dois times); e
- a chave S3 envia a pergunta para as chaves S2 e S4 (ela também pertence a dois times).

A chave S4 não envia perguntas, pois ela não observou a corrente de curto-circuito, então seu algoritmo de controle não realiza nenhuma ação de comunicação.

As chaves do circuito 2 continuam sua operação normal.

No instante seguinte, t+3, as chaves S1, S2, S3 e S4 recebem as perguntas, processam a informação e respondem (A) para as chaves que perguntaram. No instante t+4, as chaves processam as respostas recebidas.

O processamento da chave da subestação ocorre segundo as seguintes regras:

- (a) se ao menos uma chave do seu time percebeu a corrente de curto-circuito (ou seja, recebeu uma resposta positiva), ela está apta para fechar, aguardando somente uma informação adicional; ou
- (b) se nenhuma das chaves do seu time percebeu a corrente de curto-circuito (ou seja, só recebeu respostas negativas), ela trava na posição aberta.

A primeira parte da regra pode ser explicada da seguinte maneira: se uma outra chave do seu time viu a corrente de curto-circuito é porque o curto não está localizado neste time, então a chave da subestação pode fechar. A segunda parte da regra é o contrário, ou seja, a corrente de curto-circuito “entrou” no time, mas não “saiu”, denotando que o curto está dentro daquele time e se a chave da subestação fechar, ela alimentará o curto-circuito novamente, então ela deve travar na posição aberta.

O processamento das chaves dos ramais ocorre de acordo com as seguintes regras:

- (a) se ao menos uma chave de cada um de seus times percebeu a corrente de curto-circuito, ela deve continuar na posição fechada; ou
- (b) se em um de seus times, nenhuma das chaves percebeu a corrente de curto-circuito, ela deve abrir e travar; e, em seguida, deve 1. enviar um comando (C) para as outras chaves daquele time que não viram a corrente de curto-circuito, ordenando suas aberturas e travamentos; e 2. enviar uma informação (I) para a chave da subestação para através da chave do seu outro time.

No instante $t+5$, as chaves efetuam as ações devidas em seu processamento de $t+4$, a saber:

- chave S1: recebeu da chave S2 a resposta positiva (S2 registrou a corrente de curto-circuito), então ela está apta para fechar. Só não pode fechar imediatamente, pois necessita de uma informação adicional para confirmação de isolamento do curto pelas chaves dos ramais.
- chave S2: recebeu resposta positiva de S1 e de S3, ou seja a corrente de curto-passou pelos seus times, com isto, a sua posição deve permanecer inalterada;
- chave S3: recebeu uma resposta positiva da chave S2 e uma resposta negativa da chave S4, denotando que o curto-circuito ocorreu neste time; então ela deve abrir e travar. Em seguida, ela envia um comando (C) para que a chave S4 também abra e trave e também envia uma informação (I) para a chave S2 do outro time notificando que ela abriu.

A Figura 16 mostra as ações das chaves no instante $t+2$ até o instante $t+6$. Deve-se também notar que as mensagens pergunta (?), resposta (A), comando (C) e informação (I) possuem a mesma natureza, sendo divididas didaticamente aqui para facilitar o entendimento, mas cada uma delas provoca uma ação nas chaves que as recebem, de acordo com os seus estados operacionais naquele instante.

No instante $t+6$, a chave S4 recebeu o comando da chave S3 para abrir e travar. Neste instante, ela executa esta ação trocando de posição e envia uma informação (I) para a chave S5, liberando-a para começar o processo de restauração e informando a corrente que passava por ela na condição pré-falta. Em verdade, o algoritmo só envia o valor da corrente pré-falta, pois a chave que recebe este valor e está aberta com tensão em apenas um de seus terminais

“entende” que ela está apta para começar o processo de restauração. Para continuar este exemplo, será considerada a corrente informada de 20 A.

Também, neste instante t+6, a chave S2 que tinha recebido a informação em t+5 da chave S3, transmite esta informação para a chave S1 da subestação.

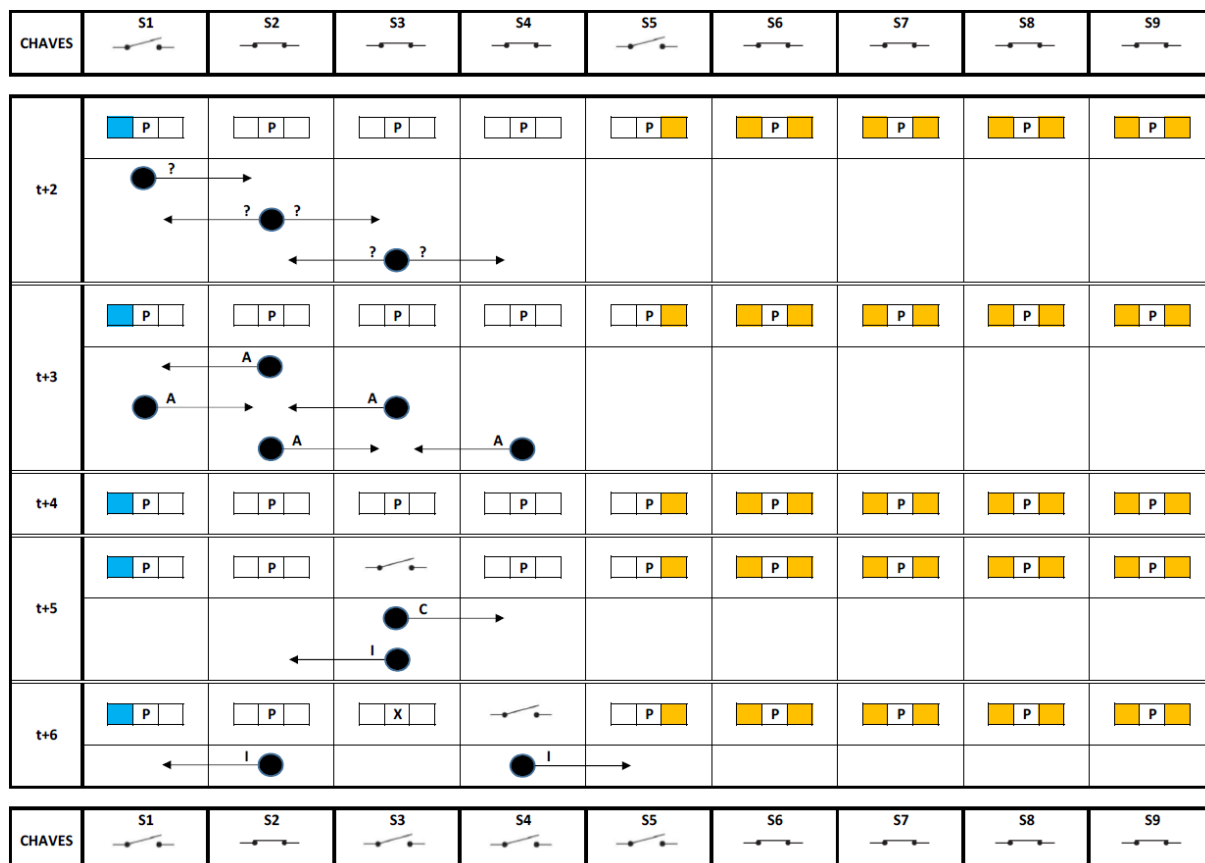


Figura 16. Ações operativas no sistema teste 1 na condição de localização e isolamento do curto-circuito

e) Processo de Restauração (de t+7 a t+15)

No instante t+7, a chave S1 processa a informação que chegou da chave S2 notificando que uma das chaves do ramal abriu (para isolar o curto). Como ela está apta para fechar e só necessitava dessa informação adicional, ela fecha e energiza os ramos que restaram do circuito 1. Neste instante, os ramos 3-4 e 4-5 continuam sem energia, sendo que o primeiro (por ter o curto) sempre vai ficar desenergizado.

No instante t+7 também começa o processo de restauração do ramal 4-5. A chave S5, que recebeu a informação de liberação no instante t+6 da chave S4, inicia uma consulta para

saber a capacidade remanescente do circuito 2. Para isto, ela envia uma pergunta (?) para a chave S6 sobre a sua capacidade remanescente.

No instante seguinte, t+8, a chave S6 pergunta (?) para a chave S7 sobre a sua capacidade remanescente, incluindo o valor de sua própria capacidade remanescente.

No instante t+9, a chave S7 processa esta pergunta, comparando o valor recebido com seu próprio valor remanescente. O menor valor é enviado para a chave S8, também perguntando sobre sua capacidade remanescente.

No instante t+10, a chave S8 processa a pergunta, comparando o valor recebido com seu próprio valor remanescente. O menor valor é enviado para a chave S9, também perguntando sobre sua capacidade remanescente.

A Figura 17 mostra as ações para os instantes t+7 a t+10 e as posições das chaves.

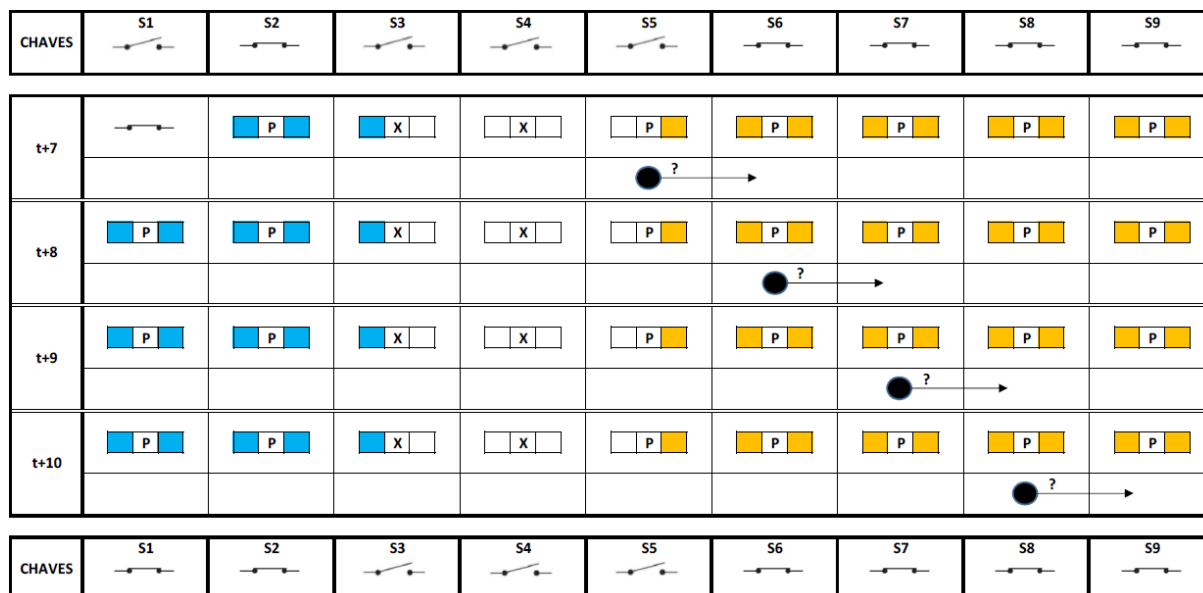


Figura 17. Ações operativas no sistema teste 1, parte inicial do processo de restauração, verificação da capacidade remanescente no circuito 2

No instante t+11, a chave S9, que é uma chave de subestação, processa a pergunta, comparando o valor recebido com seu próprio valor remanescente. O menor valor é devolvido para a chave S8. Neste exemplo, adota-se o valor de 30 A. Na verdade, este valor é o menor valor da capacidade remanescente entre as chaves S6 a S9.

Nos instantes seguintes, t+12, t+13 e t+14, o valor que foi devolvido para a chave S8 pela chave S9, é transladado de S8 para S7, de S7 para S6 e de S6 para S5, respectivamente. A Figura 18 mostra as ações desses instantes.

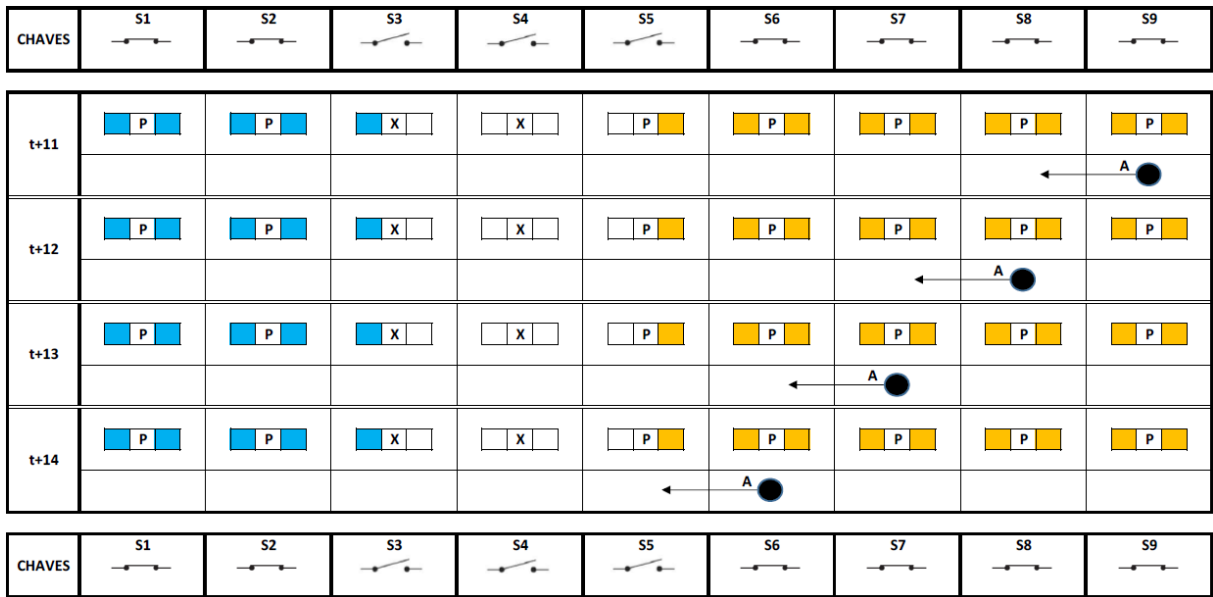


Figura 18. Ações operativas no sistema teste 1, parte intermediária do processo de restauração, retorno da capacidade remanescente no circuito 2 para a chave S5

No instante t+15, a chave S5 processa o valor recebido de S6 (adotado anteriormente como 30 A) com o valor informado pela chave S4, quando da sua liberação (que foi também adotado como 20 A). Como a capacidade remanescente do circuito é maior do que a carga do ramal a ser alimentado ($30 > 20$), a chave S5 pode fechar sem causar sobrecarga ao circuito 2. A Figura 19 mostra a ação das chaves.

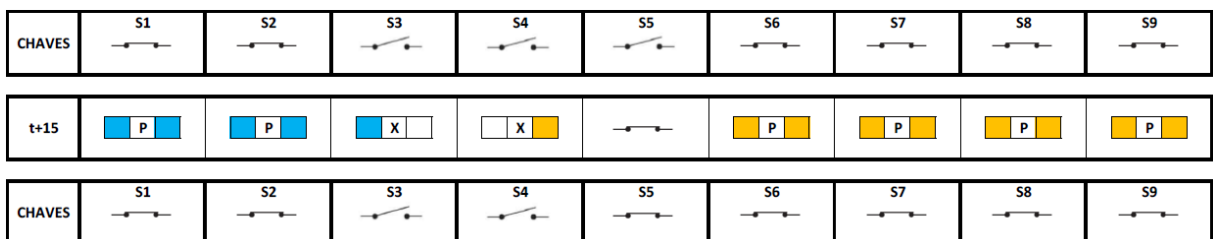


Figura 19. Ações operativas no sistema teste 1, parte final do processo de restauração

f) Após o processo de restauração (t+16 para frente)

Após o processo de restauração ter finalizado, todos os ramais estão alimentados (com exceção do ramal 3-4, onde existe o curto-circuito permanente). O ramal 4-5 está agora sendo alimentado pelo circuito 2. Todas as chaves voltam a ter sua operação normal, conforme mostrado na condição pré-falta (procedimentos P). A Figura 20 mostra os instantes t+16 e t+17).

CHAVES	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
t+16	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> X	<input type="checkbox"/> X	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P
t+17	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> X	<input type="checkbox"/> X	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P	<input checked="" type="checkbox"/> P
CHAVES	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9

Figura 20. Ações operativas no sistema teste 1, operação normal com nova configuração

A Figura 21 mostra a nova configuração operativa do sistema teste 1.

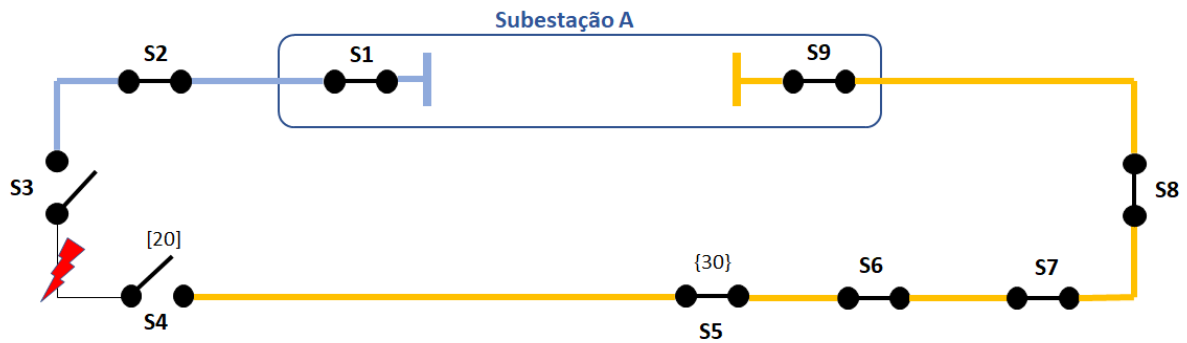


Figura 21. Sistema teste 1 com nova configuração operativa

4.3.2 Segundo Exemplo: Disputa entre Circuitos

Este segundo exemplo visa mostrar uma situação operativa em que ocorre uma disputa entre circuitos para a alimentação de um ramal que está sem energia. Diferentemente do primeiro exemplo, em que a alimentação só poderia ser feita pelo circuito 2 (em laranja), na figura a seguir, ela também pode ser feita pelo circuito 3 (em roxo). Desta forma, ocorre uma disputa entre as chaves S5 e S12 pela melhor fonte de alimentação para o ramal 4-5, que fica sem energia após a falta. A Figura 22 mostra o novo sistema de distribuição com três circuitos. Quando a falta ocorrer, ela acontece no ramal 3-4.

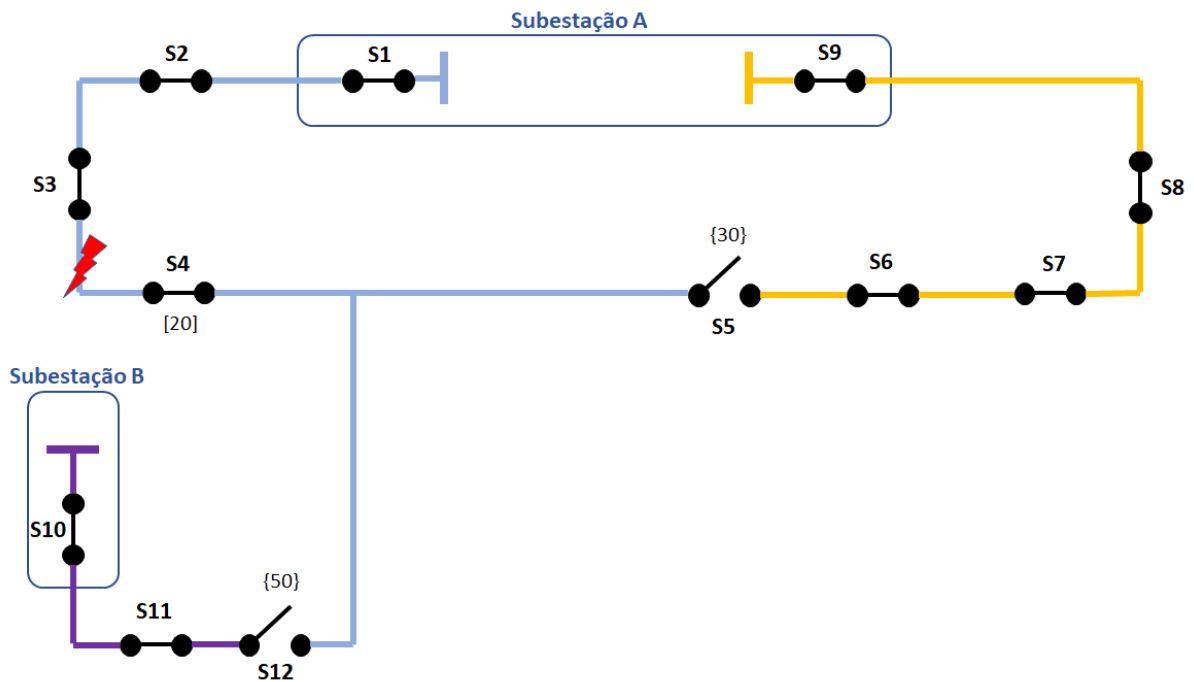


Figura 22. Sistema teste 2

A análise operativa do sistema pré-falta, em falta, da eliminação da falta, da localização da falta, do processo de isolamento e do processo de restabelecimento (com a disputa) são apresentados a seguir. É importante observar, antecipadamente, que do instante $t-2$ até o instante $t+5$, as chaves dos circuitos 1 e 2 apresentam a mesmas ações que já foram descritas no primeiro exemplo. Desta forma, deixam de ser descritas a seguir, sendo mostrado somente o comportamento das chaves do circuito 3. A partir do $t+6$ (inclusive) passa-se a descrever todas as chaves dos 3 circuitos. Porém, para uniformidade das figuras desta seção, mesmo nos instantes de $t-2$ a $t+5$, elas apresentam as ações das chaves dos circuitos 1 e 2.

a) Pré-falta (até $t-1$)

Como dito anteriormente na situação pré-falta:

- (a) as chaves fechadas ficam constantemente: 1. registrando a corrente que está passando por ela, 2. verificando se existe sobrecorrente (ou curto-circuito), e 3. calculando o seu limite de remanescente de carga e
- (b) as chaves abertas ficam constantemente verificando as tensões nas suas extremidades.

No circuito 3, as chaves 10 e 11 são chaves que estão fechadas, enquanto a chave 12 está aberta e sendo alimentada por um lado pela tensão do circuito 3 (em roxo) e pelo outro lado pela tensão do circuito 1 (em azul). Isto ocorre até o instante $t-1$. A Figura 23 mostra a representação dessas ações operativas.

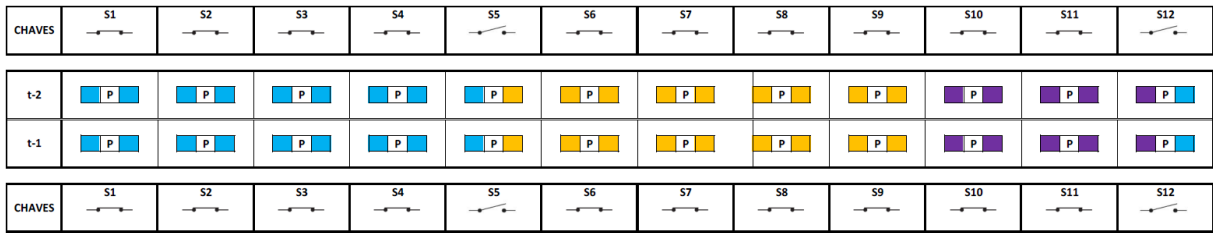


Figura 23. Ações operativas no sistema teste 2 na condição pré-falta

b) Falta (t=0)

Da mesma forma que no exemplo anterior, no instante $t=0$ ocorre a falta no ramal 3-4, que está contido no circuito 1. Como se pode observar, o circuito 3 simplesmente não percebe esta falta, pois não existe ligação entre eles. Desta forma, todas as chaves do circuito 3 continuam a operar de forma idêntica à situação pré-falta. A única mudança é que na presença do curto-circuito a tensão em um dos terminais da chave 12 passa a ser zero (se o curto-circuito for franco ou bem próximo disto). Daí a mudança de cor na figura a seguir em um dos lados da chave 12 (passando a não ter cor), enquanto do outro lado continua a ter a tensão do circuito 3 (roxo).

Esta mudança na chave 12 é importante, pois a habilita a fechar quando necessário. Vale lembrar que enquanto uma chave aberta tem tensão dos dois lados, ela permanece travada. A Figura 24 mostra as ações operativas no sistema teste 2 na condição durante a falta.

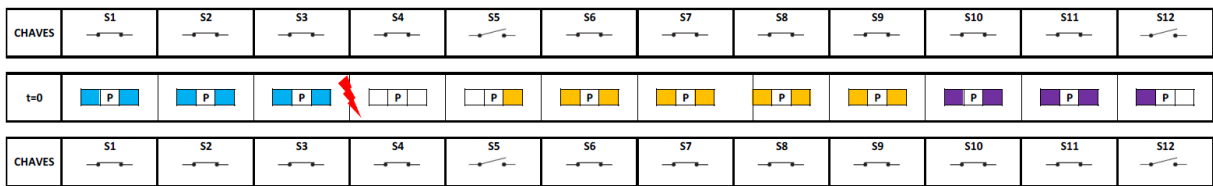


Figura 24. Ações operativas no sistema teste 2 na condição durante a falta

c) Eliminação do curto-circuito (t+1)

Como dito anteriormente, após as tentativas de religamento, se configurando um curto-circuito permanente, a chave de subestação S1 abre, extinguindo-o. Para as chaves do circuito 3, este procedimento é totalmente imperceptível, pois elas não registraram o curto-circuito. Assim, todas as chaves do circuito 3 continuam a operar de forma idêntica a uma situação normal de operação. A Figura 25 apresenta as ações operativas no sistema teste 2 na condição de eliminação de curto-circuito.

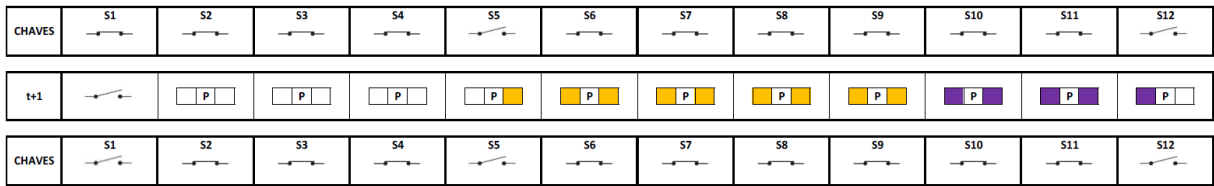


Figura 25. Ações operativas no sistema teste 2 na condição de eliminação do curto-circuito

d) Localização e Processo de Isolamento do curto-circuito (de t+2 a t+6)

O processo de localização e isolamento do curto-circuito ocorre de maneira similar ao apresentado anteriormente, sendo totalmente imperceptível para as chaves do circuito 3, que continuam seu processo de operação normal. A única diferença ocorre no instante t+6, onde a chave S4 ao abrir e travar, envia um sinal (I – Informação) para as chaves S5 e S12, que estão em seu time para que elas possam fornecer alimentação para o ramal sem energia. No exemplo anterior, não existia a chave S12, então o sinal era enviado somente para a chave S5. A Figura 26 apresenta as ações operativas no sistema teste 2 na condição de localização e isolamento do curto-circuito.

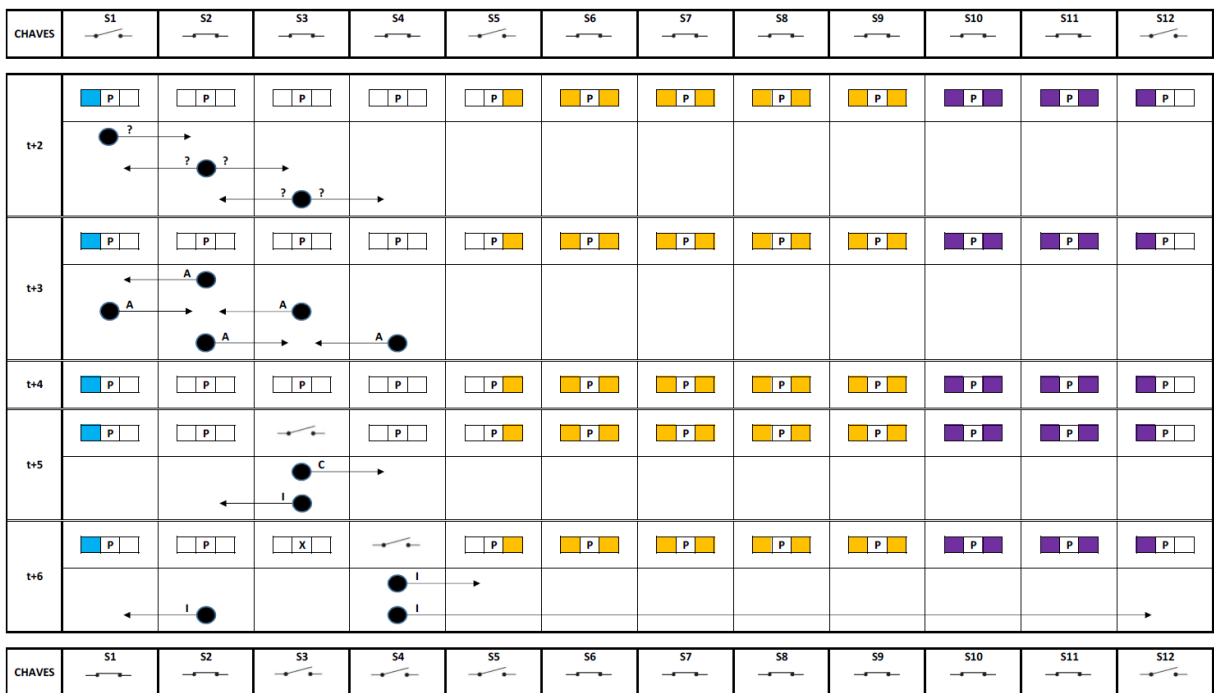


Figura 26. Ações operativas no sistema teste 2 na condição de localização e isolamento do curto-circuito

e) Processo de Restauração (de $t+7$ a $t+16$)

Ao receber o sinal (I) da chave S4, as chaves S5 e S12 iniciam seus procedimentos de tentativa de alimentação do ramal sem energia. Por serem chaves que estão abertas e que têm tensão de um dos lados apenas, elas estão aptas a fechar e alimentar o ramal. Porém, diferentemente do exemplo passado, em que existia apenas uma chave apta para isto, S5, agora existem duas chaves, S5 e S12. Elas devem disputar para saber qual delas deve fechar. Mas pode surgir a pergunta: como elas sabem que devem disputar? Elas sabem que devem disputar, pois elas conhecem o número de chaves desse time, no caso três chaves: uma (S4) que enviou o valor de corrente (por exemplo, 20A), e duas (S5 e S12) que receberam esta informação. Com isto, cada chave sabe que deve processar um valor pelo seu circuito e deve ainda aguardar a informação vinda da outra chave. Estes dois valores é que vão entrar em disputa. No caso do exemplo, a chave S5 consulta o circuito 2 e espera o valor da chave S12; enquanto a chave S12 consulta o circuito 3 e espera o valor da chave S5.

A disputa é decidida pela capacidade remanescente de corrente do circuito. Assim, cada chave se comunica com a outra chave do seu time. Do lado da chave S5, ela pergunta à chave S6 qual é a sua capacidade remanescente ($t+7$). A chave S6 verifica sua capacidade remanescente e envia este valor, no instante $t+8$, para a chave S7. Esta, por sua vez, no instante $t+9$, compara a sua capacidade remanescente com o valor recebido da chave S6 e envia o menor dos valores para a chave S8. Esta executa o mesmo processo no instante $t+10$, compara a sua capacidade remanescente com o valor recebido da chave S7 e envia o menor dos valores para a chave S9. A chave (da subestação) S9, no instante $t+11$, também compara a sua capacidade remanescente com o valor recebido de S8 e devolve o menor valor (da capacidade remanescente do circuito 2) para a chave S8. Nos instantes $t+12$, $t+13$ e $t+14$, a chave S8 envia valor recebido de S9 para S7, a chave S7 passa para S6 e a chave S6 repassa o valor o menor da capacidade remanescente do circuito 2 para a chave S5, respectivamente.

Pelo outro lado, a chave S12 pergunta à chave S11 qual é a sua capacidade remanescente, em $t+7$. A chave S11 verifica sua capacidade remanescente e envia este valor, no instante $t+8$, para a chave S10. A chave (da subestação) S10, no instante $t+9$, compara a sua capacidade remanescente com o valor recebido de S11 e devolve o menor valor (da capacidade remanescente do circuito 3) para a chave S11. No instante $t+10$, a chave S11 informa a chave S12, a capacidade remanescente de corrente do circuito 3.

Em $t+11$, a chave S12 informa a chave S5 a sua capacidade remanescente de seu circuito, por exemplo, 50 A.

Deve-se notar que no instante $t+11$ a chave S5 ainda não tem a resposta da capacidade remanescente em seu circuito (2). E, também, com isto, a chave S12 ainda não recebeu a resposta da chave S5. Desta forma, nenhuma das duas pode dar prosseguimento aos seus algoritmos, pois a chave S5 necessita da informação do seu circuito e a chave S12 necessita da resposta da chave S5.

Como no instante $t+14$ a chave S6 informa a resposta à chave S5, por exemplo, 30A; assim ela está apta para dar prosseguimento ao seu algoritmo no instante $t+15$, fazendo seu processamento e informando a chave S12 a sua resposta. Neste instante, a chave S5 compara o valor recebido da chave S12 (50A) e o valor obtido no seu circuito (30A). Como o valor obtido é menor ($30 < 50$), ela “perdeu” a disputa e permanece como está.

No instante $t+16$, a chave S12 de posse do valor recebido da S5 (30A), compara com o valor obtido no seu circuito (50A). Como o valor obtido é maior ($50 > 30$), ela “ganhou” a disputa e a chave S12 fecha, alimentando o ramal 4-5.

A Figura 27 apresenta as ações operativas no sistema teste 2, busca do menor valor remanescente de corrente em cada circuito e disputa entre as chaves S5 e S12.

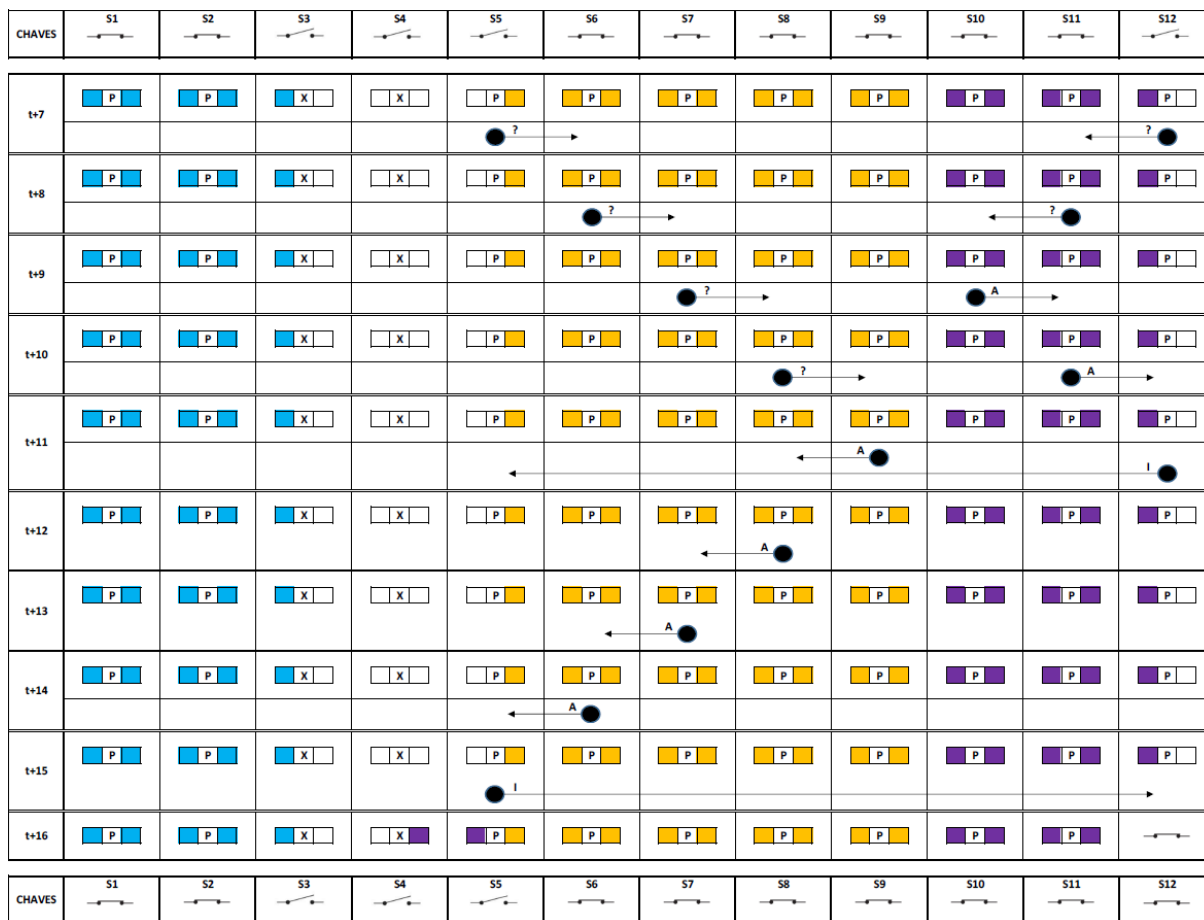


Figura 27. Ações operativas no sistema teste 2, busca do menor valor remanescente de corrente em cada circuito e disputa entre as chaves S5 e S12

f) Após o processo de restauração

Após o processo de restauração se findar, todos os ramos estão alimentados (à exceção do ramo 3-4, onde existe o curto-circuito permanente) e volta-se à operação normal das chaves conforme descrito na seção pré-falta (representado nos instantes t+17 e t+18). A Figura 28 apresenta as ações operativas no sistema teste 2, operação normal com nova configuração. Note que a única diferença é que agora existe uma nova configuração operativa do sistema, conforme mostrado na Figura 29.

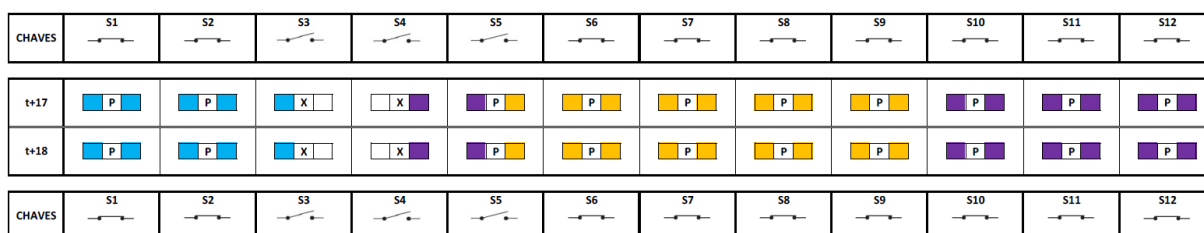


Figura 28. Ações operativas no sistema teste 2, operação normal com nova configuração

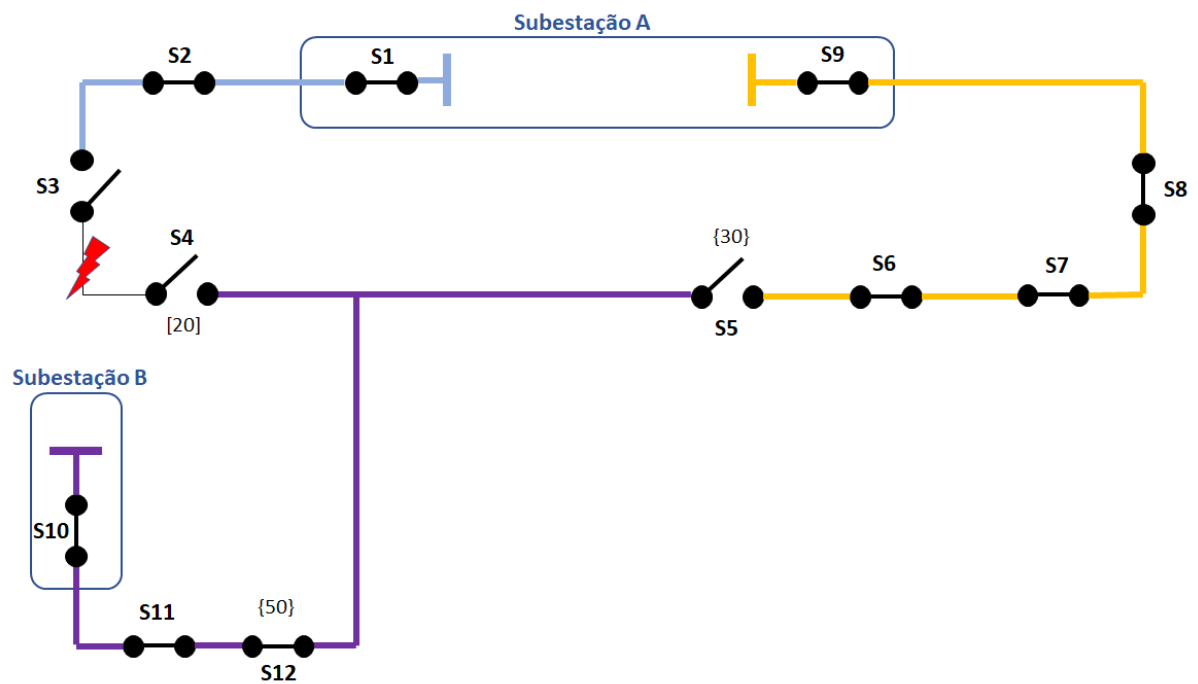


Figura 29. Sistema teste 2 com nova configuração operativa

4.3.3 Terceiro Exemplo: Sem auxílio de outro Circuito

Este terceiro exemplo visa mostrar uma situação operativa em que o sistema não possui nenhum circuito de socorro. A função deste exemplo é mostrar como as chaves processam este tipo de problema. A Figura 30 mostra o novo sistema de distribuição com apenas um circuito. Este sistema teste é semelhante ao circuito 1 do sistema teste 1, mas com mais chaves para dificultar um pouco mais a análise e os procedimentos de funcionamento, mostrando como o algoritmo proposto das chaves funciona corretamente. Como nos exemplos anteriores, a falta ocorre no ramal 3-4, ou seja, os ramais 4-13-14-16, 13, 14-15, 15 e 16 ficam sem energia.

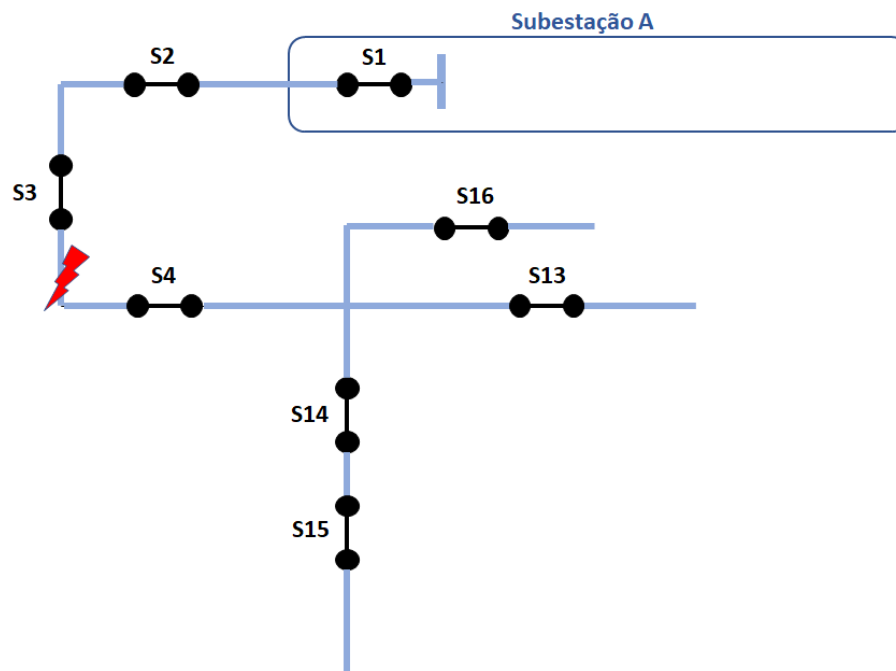


Figura 30. Sistema teste 3

A análise operativa do sistema pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento são idênticos aos relatados acima e não serão explicados novamente nesta seção.

A descrição da evolução dos procedimentos ocorre a partir do processo de restabelecimento, ou seja, do instante $t+7$.

A única mudança é que no instante $t+6$, a chave S4 envia uma informação para as chaves S13, S14 e S16. A chave S2 continua a enviar a mesma informação de chave aberta para que a chave S1 possa abrir. A Figura 31 mostra os procedimentos das chaves de $t-2$ a $t+6$.

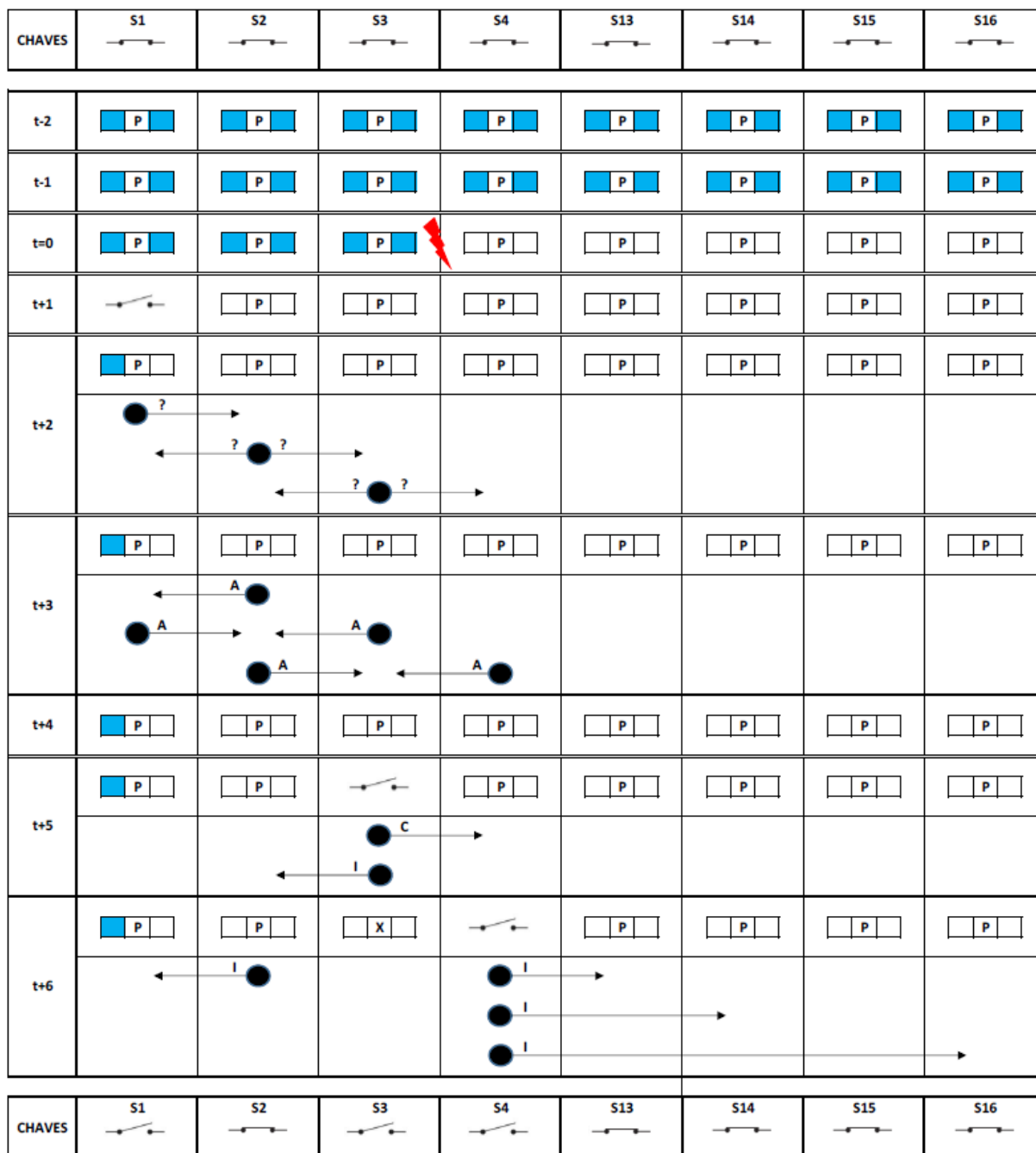


Figura 31. Ações operativas no sistema teste 3 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento

a) Processo de Restauração (de t+7 a t+11)

Ao receber o sinal (informação) da chave S4, no instante t+6, as chaves S13, S14 e S16 tentam iniciar o processo de restauração. Como elas conhecem as chaves do seu time, elas sabem que existirá uma disputa entre elas. Assim, cada uma das chaves deve procurar o seu valor próprio para a disputa e esperar por mais dois valores vindos das outras duas chaves. Por exemplo, a chave S13 deve procurar a sua capacidade remanescente do seu circuito (se houver)

e esperar dois valores vindos das outras duas chaves (S14 e S16) para tomar a decisão. O mesmo se aplica às outras duas chaves.

Assim, cada uma das chaves (S13, S14 e S16) inicia a tentativa de procurar um circuito de socorro para realizar a restauração. A chave S13 verifica que no seu outro time não existem mais chaves, isto configura que ela é uma chave de “final de ramal”. Isto significa no algoritmo da chave que ela não encontrou nenhuma chave aberta (de socorro) e deve retornar um valor pré-fixado para a disputa de -999A, denotando que ela está fora da disputa para ela própria e para as demais chaves. O mesmo ocorre com a chave S16. Então, no instante $t+7$, as chaves S13 e S16 enviam uma informação para as outras chaves, no caso, S14 e S16, e S13 e S14, respectivamente, com o valor -999A.

Por sua vez, neste instante $t+7$, a chave S14 envia uma pergunta e uma informação para a chave S15 para verificar a capacidade remanescente do seu circuito e a quantidade de carga sem energia.

No instante $t+8$, a chave S15 verifica que ela é uma chave de “final de ramal”, pois não existem outras chaves em seu outro time. Daí, ela retorna para a chave S14 também o valor pré-fixado -999A.

No instante $t+9$, a chave S14 processa o seu valor (-999A) e os dois valores recebidos (-999A e -999A) e verifica que não tem nada a fazer. Ela também envia o valor obtido na sua tentativa de busca de um circuito de socorro para as outras duas chaves (S13 e S16).

No instante $t+10$, estas chaves (S13 e S16) também processam o seu valor (-999A) e os dois valores recebidos (-999A e -999A) e verificam que não tem nada a fazer. E o processo de restauração se encerra.

A Figura 32 mostra estes procedimentos de $t+7$ a $t+10$. A Figura 33 mostra o sistema teste 3, após a tentativa de restauração.

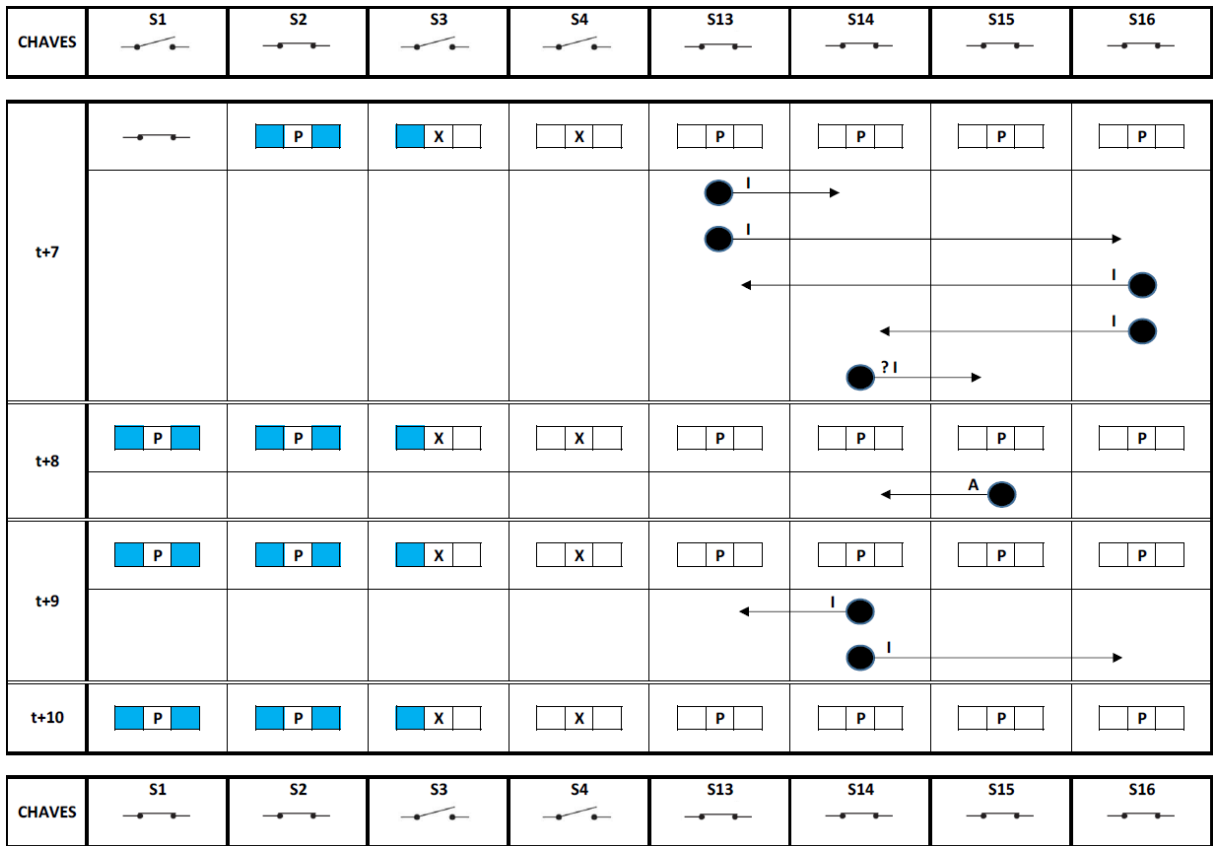


Figura 32. Ações operativas no sistema teste 3 na condição do processo de restauração

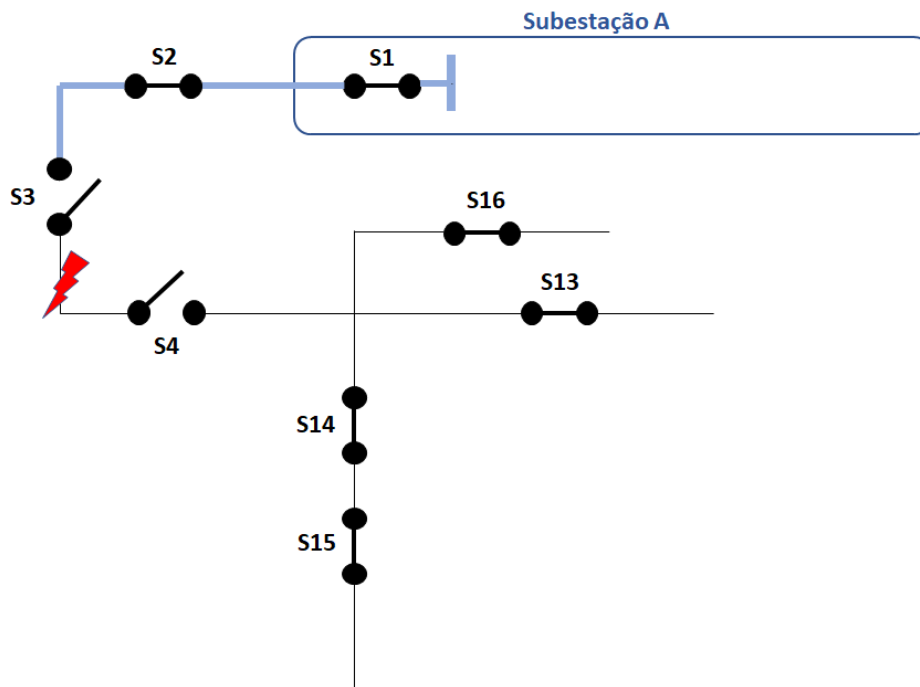


Figura 33. Sistema teste 3, pós tentativa de restauração

4.3.4 Quarto Exemplo: Disputa Indireta entre Circuitos

Este quarto exemplo visa mostrar uma situação operativa em que ocorre uma disputa indireta entre dois circuitos, ou seja, a disputa não ocorre diretamente entre as chaves abertas, mas sim através de outras chaves de ramais que as “representam” na disputa.

Para tal, seja o sistema mostrado na Figura 34. Pode-se notar que ele é uma mistura do sistema teste 2 e do sistema teste 3, e foi produzido para dificultar um pouco mais a análise e os procedimentos de funcionamento, mostrando como o algoritmo proposto das chaves funciona corretamente. Como nos exemplos anteriores, a falta ocorre no ramal 3-4. A disputa, como pode ser observada, é feita entre as chaves S5 e S12, que não pertencem mais ao time da chave S4.

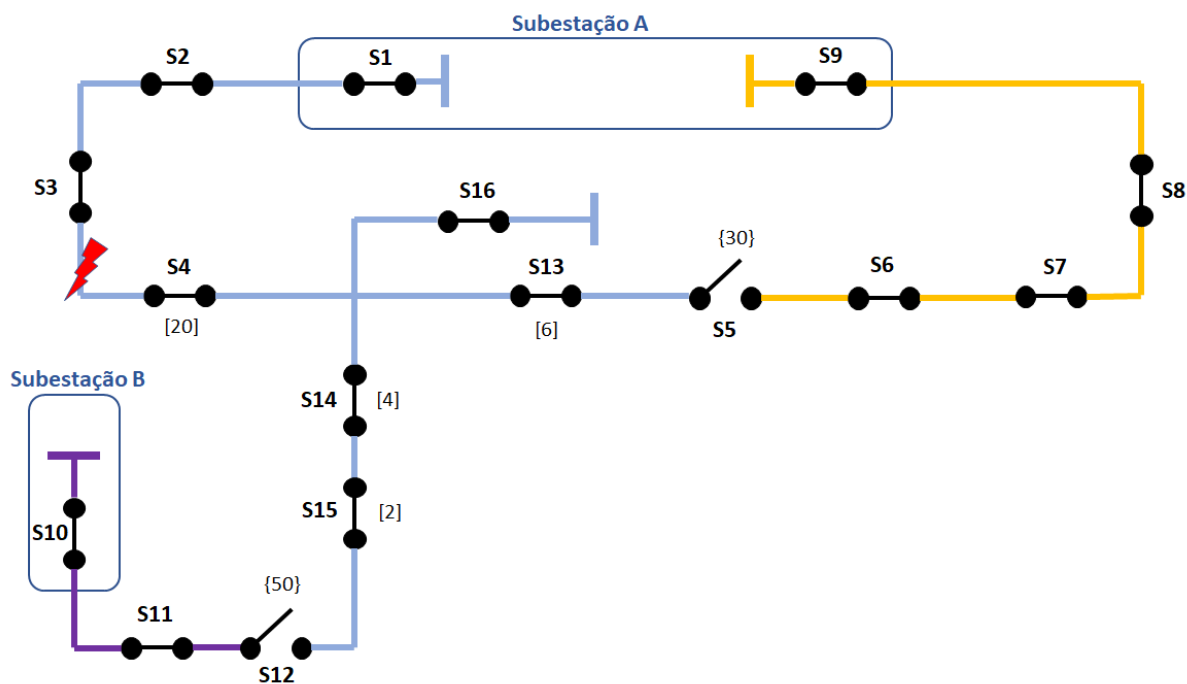


Figura 34. Sistema teste 4

A análise operativa do sistema pré-falta, em falta, da eliminação da falta, da localização da falta e do processo de isolamento são idênticos aos relatados acima e não serão explicados novamente nesta seção.

A descrição da evolução dos procedimentos ocorre a partir do processo de restabelecimento, ou seja, a partir do instante $t+7$.

Pela configuração do sistema teste 4, no instante t+6, a chave S4, como no exemplo anterior, envia uma informação (sobre a corrente que passava por ela, por exemplo de 20A) para as chaves S13, S14 e S16. Esta informação (valor) representa a carga total sem energia.

A chave S2 ao receber a informação de “chave aberta e travada”, envia esta informação para que a chave S1 possa fechar. A Figura 35 mostra os procedimentos das chaves de t-2 a t+6.

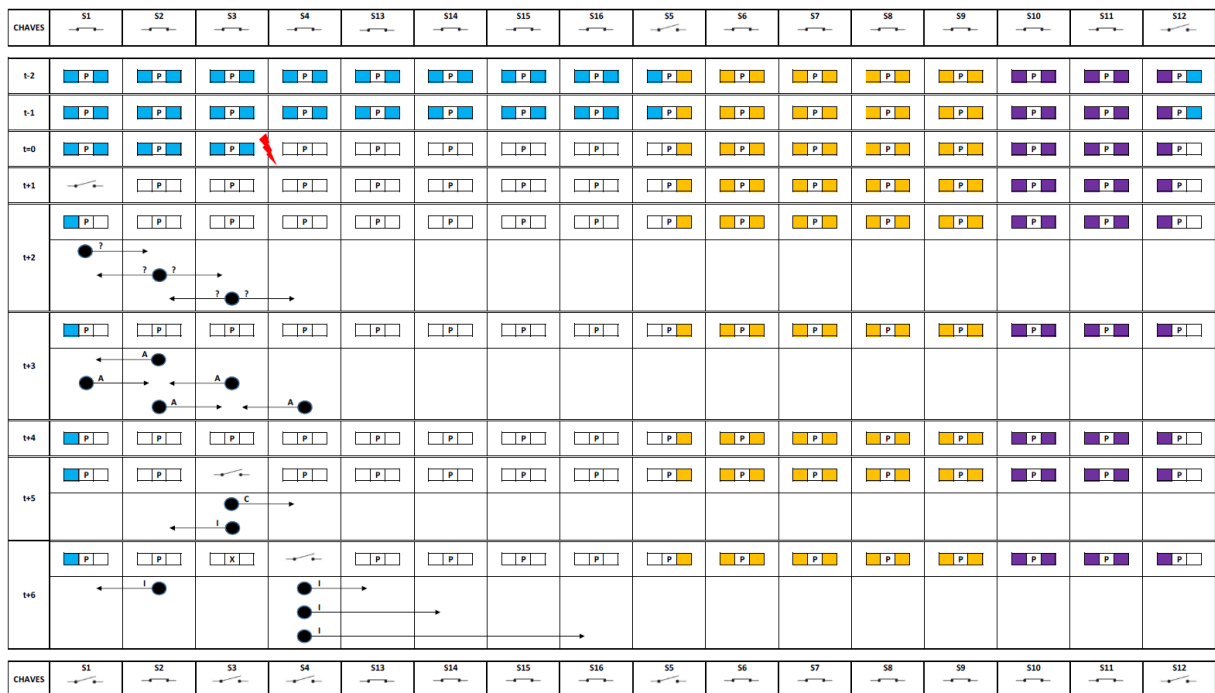


Figura 35. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento

a) Processo de Restauração (de t+7 a t+20)

Ao receber o sinal (informação) da chave S4, no instante t+6, as chaves S13, S14 e S16 tentam iniciar o processo de restauração. Como elas conhecem as chaves do seu time, elas sabem que existirá uma disputa entre elas. Assim, da mesma forma que no exemplo anterior, cada uma das chaves deve procurar o seu valor próprio para a disputa e esperar por mais dois valores vindos das outras duas chaves. Por exemplo, a chave S13 deve procurar a sua capacidade remanescente do seu circuito (se houver, e no caso há) e esperar dois valores vindos das outras duas chaves (S14 e S16) para tomar a decisão. O mesmo se aplica às outras duas chaves.

Assim, no instante t+7, cada uma das chaves (S13, S14 e S16) inicia a tentativa de procurar um circuito de socorro para realizar a restauração. A chave S16 verifica que no seu

outro time não existem mais chaves, isto configura que ela é uma chave de “final de ramal”. Isto significa no algoritmo da chave que ela não encontrou nenhuma chave aberta (de socorro) e deve retornar um valor pré-fixado para a disputa de -999A, denotando que ela está fora da disputa, para ela própria e para as demais chaves.

Ainda neste mesmo instante $t+7$, a chave S13 envia uma pergunta (?) à chave S5 sobre a sua a capacidade remanescente. De forma análoga, a chave S14 pergunta (?) e envia uma informação (I) à chave S15, perguntando sobre a sua capacidade remanescente e informando a quantidade de carga sem energia, dado enviado para ela pela chave S4 (no instante $t+6$).

No instante $t+8$, a chave S15 pergunta (?) à chave S12, que é uma chave aberta, e esta percebe através de seu algoritmo que ela deve verificar a capacidade remanescente de seu circuito, tal como foi feito no segundo exemplo. Assim, ela envia uma pergunta (?) à chave S11, que a processa e envia para a chave S10, que por ser uma chave de subestação, a processa e envia uma resposta (A) para a chave S11, que a envia para a chave S12, que repassa a resposta para a chave S15. Isto ocorre nos instantes $t+9$, $t+10$, $t+11$, $t+12$, e $t+13$, respectivamente.

No instante $t+14$, a chave S15 deve processar a informação recebida que é a capacidade do circuito 3 (da mesma forma que no segundo exemplo), por exemplo, 50A. Este valor deve ser comparado com a sua capacidade remanescente fictícia.

As capacidades remanescente e remanescente fictícia são diferentes. A capacidade remanescente, conforme definida anteriormente, é calculada através da diferença entre a capacidade nominal da chave e da corrente que está passando por ela (no caso de uma falta, da corrente pré-falta). A capacidade remanescente fictícia é calculada através da diferença entre a sua capacidade nominal da chave e a corrente que irá passar por ela no caso da restauração ocorrer pelo seu circuito de socorro; no caso, o circuito 3. Por esta razão, no instante $t+7$, a chave S15 recebeu a informação da quantidade de carga sem energia (definida no exemplo como 20A). A corrente que irá passar por ela é dada pela diferença entre a corrente de carga sem energia menos a corrente pré-falta da chave. Supondo-se que a corrente pré-falta da chave S15 (carga do ramal 15-12) seja de 2A, dos 20A sem energia 2A serão abastecidos antes de passar por ela, assim, a corrente que passará por ela caso a restauração ocorra pelo circuito 3, será de 18A. Daí, se a capacidade nominal da chave for 60A, sua capacidade remanescente fictícia será de 42A ($=60-(20-2)$).

Este valor deve ser comparado com o valor vindo da chave S12, que é de 50A. Então, no instante $t+14$, o menor valor (42A) é transmitido como resposta (A) para a chave S14.

No instante seguinte, $t+15$, a chave S14 que recebeu o valor da chave S15 (42A) e o compara com a sua capacidade remanescente fictícia. Supondo que no regime pré-falta a

corrente fosse de 4A (carga dos ramais 14-15 e 15-12) e a sua capacidade nominal de também 60A, a sua capacidade remanescente fictícia seria de 44 A ($=60-(20-4)$), pois 4A dos 20A sem energia já estariam sendo abastecidos antes.

Desta forma, a chave S14 efetua a comparação entre o valor vindo da chave S15, que é de 42A e a sua capacidade remanescente fictícia de 44A. Então, no instante $t+15$, o menor valor (42A) é transmitido como informação (I) para as chaves S13 e S16.

Pelo outro circuito de socorro (circuito 2), como dito anteriormente, no instante $t+7$, a chave S13 envia uma pergunta (?) à chave S5 sobre a sua a capacidade remanescente. Esta chave S5 como é uma chave aberta, percebe através de seu algoritmo que ela deve verificar a capacidade remanescente de seu circuito, tal como foi feito no segundo exemplo. Assim, ela envia, no instante $t+8$, uma pergunta à chave S6, que a processa e envia para a chave S7, que a processa e envia para a chave S8, que a processa e envia para a chave S9. Isto ocorre nos instantes $t+9$, $t+10$ e $t+11$, respectivamente. No instante $t+12$, a chave S9, que é uma chave de subestação, processa o valor e envia uma resposta (A) para S8, que envia para S7, que envia para S6, que envia para S5, que, por sua vez, envia para S13. Isto ocorre nos instantes, $t+13$, $t+14$, $t+15$ e $t+16$, respectivamente.

Assim, no instante $t+17$, a chave S13, por ser fechada, deve comparar o valor recebido da chave S5 (adotando-se o mesmo valor do segundo exemplo, 30A) com a sua capacidade remanescente fictícia. Se sua capacidade nominal for de 60 A e estivesse passando por ela 6 A (carga do ramal 13-5), sua capacidade remanescente fictícia seria de 46A ($=60-(20-6)$). Comparando com 30A, no instante $t+17$, ela envia para as chaves S14 e S16, o valor de 30A (menor valor entre 46A e 30A) e processa os valores recebidos pelas chaves S14 e S16, 45 e -999A, respectivamente; verificando que “perdeu” a disputa pois $42 > 30$ e encerrando seu processamento.

No instante $t+18$, a chave S16 processa os valores recebidos: de 30 A da chave S13 (no instante $t+18$) e de 42A da chave S14 (no instante $t+17$), comparando com o seu valor de -999A; verificando que “perdeu” a disputa pois $42 > -999$ e encerrando seu processamento.

Também no instante $t+18$, a chave S14 processa os valores recebidos: de 30A da chave S13 (no instante $t+17$) e de -999A da chave S16 (no instante $t+7$), comparando com o seu valor de 42A; verificando que “ganhou” a disputa pois $42 > 30 > -999$. Como a chave “ganhou” a disputa, ela envia um comando para a chave S15 de fechar. Esta por sua vez, por estar fechada, no instante $t+19$, transmite este comando para a chave S12, que no instante $t+20$, fecha, energizando todos os ramais sem energia e encerrando o processo de restauração.

A Figura 36 mostra estas ações nos instantes de $t+7$ até $t+20$.

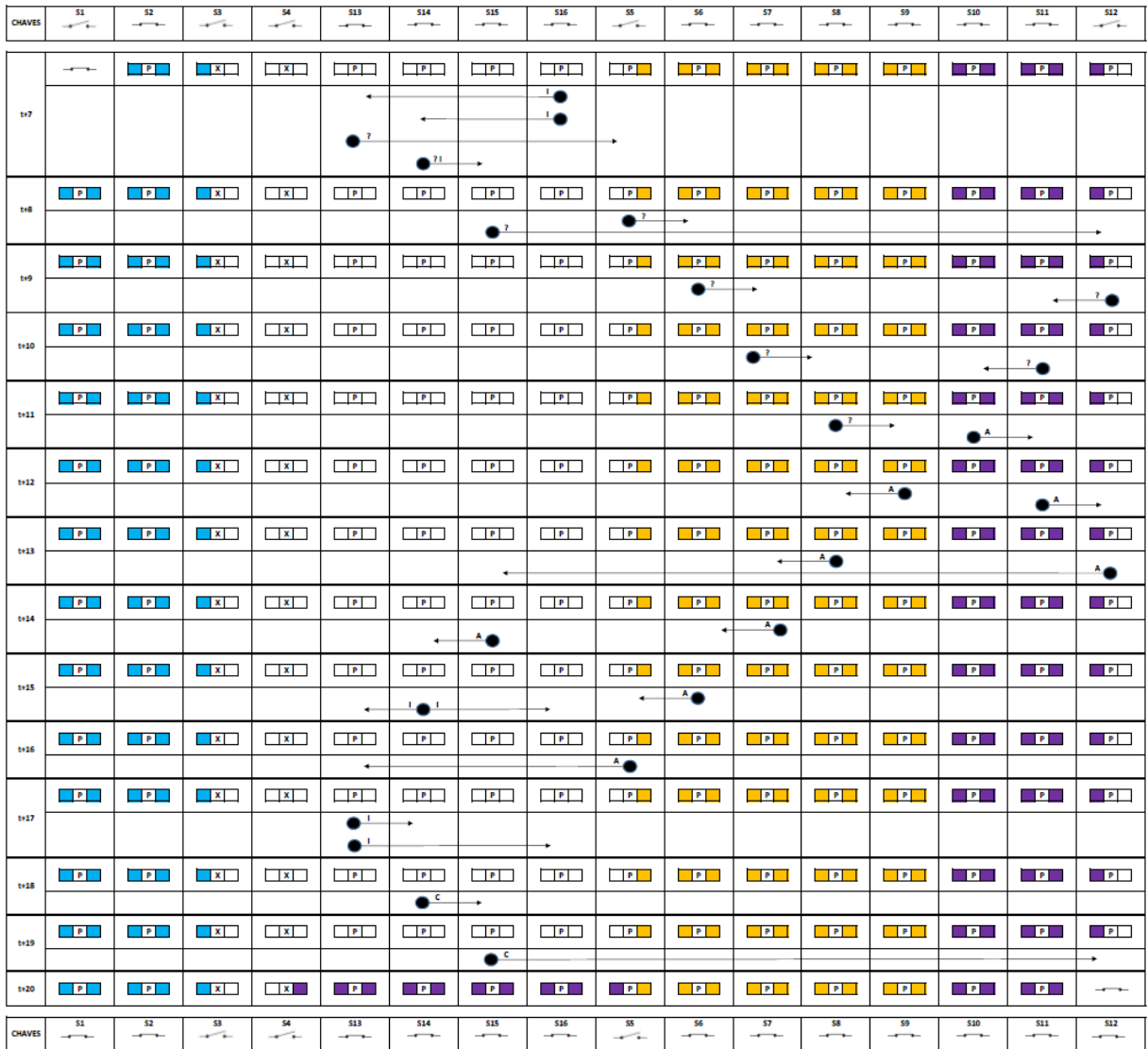


Figura 36. Ações operativas no sistema teste 4 na condição do processo de restauração

Os instantes t+22 e t+23 mostram uma operação normal da nova configuração do sistema teste 4, conforme apresentado na Figura 37.

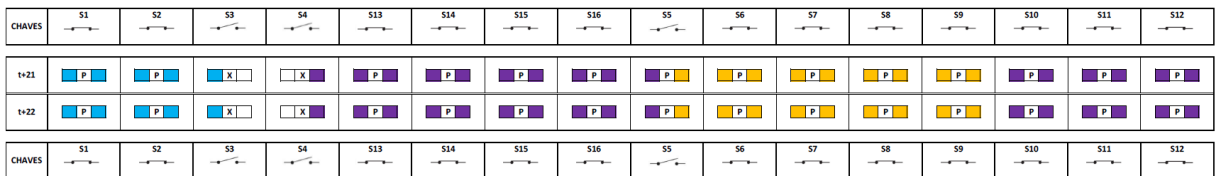


Figura 37. Ações operativas no sistema teste 4 na condição pós-restauração

A Figura 38 mostra o sistema teste 4 na condição pós-restauração.

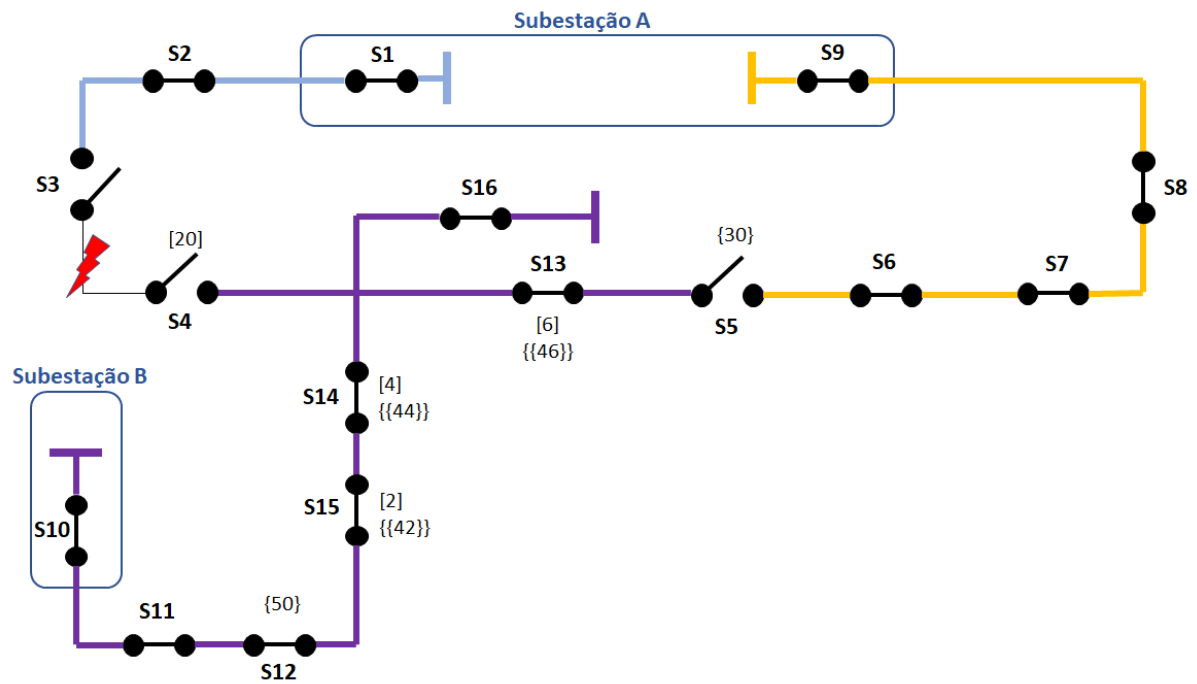


Figura 38. Sistema teste 4, pós restauração

4.3.5 Quinto Exemplo: Disputa Interna entre Circuitos

Este quinto exemplo visa mostrar uma situação restaurativa em que, ao ocorrer um curto-circuito, existe uma disputa entre circuitos, como no segundo exemplo, e uma outra disputa dentro de um dos circuitos. A Figura 39 mostra a nova configuração do sistema de distribuição no estado pré-falta. O curto-circuito ocorre no ramo 3-4, sendo que agora existem três chaves abertas que podem auxiliar no processo de restauração da energia, ou seja, existem três possíveis circuitos de socorro, a saber: o circuito 2 (em cor laranja) utilizando a chave S5, o circuito 3 (em roxo) através da chave S12 e o circuito 4 (em verde) utilizando a chave S17.

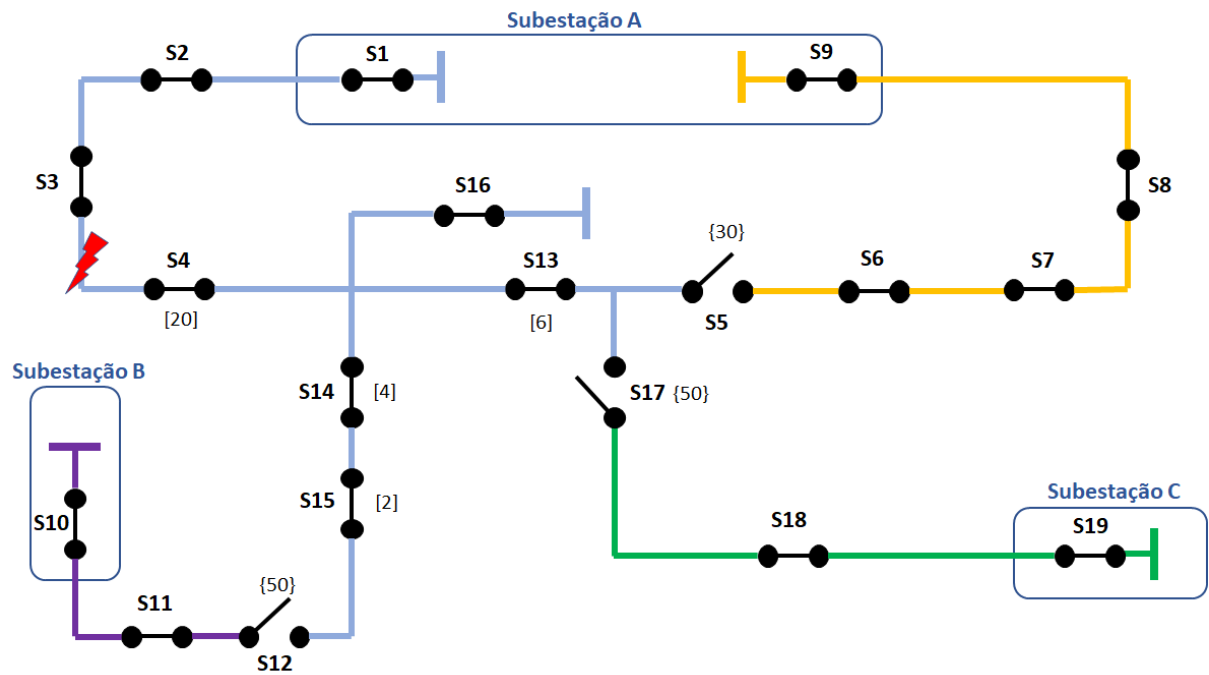


Figura 39. Sistema teste 5

Pode-se observar que este novo sistema teste 5 é similar ao sistema teste 4 com a adição do circuito 4 (em verde). Com isto, pode-se utilizar as ações já apresentadas anteriormente sem necessidade de nova explicação, pois tudo se passa de forma análoga até o instante t+6, conforme mostrado na Figura 40.

CHAVES	S1	S2	S3	S4	S13	S14	S15	S16	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S17	S18	S19
t-2	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]
t-1	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]
t=0	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]
t+1	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]
t+2	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]
t+3	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]
t+4	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]
t+5	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]
t+6	[P]	[P]	[X]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]	[P]

Figura 40. Ações operativas no sistema teste 5 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento

a) Processo de Restauração (de t+7 a t+20)

Ao receber o sinal (informação) da chave S4, no instante t+6, as chaves S13, S14 e S16 tentam iniciar o processo de restauração.

Aqui também deixará de ser explicado a obtenção dos valores de disputa das chaves S14 e S16, pois ocorrem da mesma forma como já explanado no quarto exemplo. Os valores obtidos foram de 42A no instante t+15 e de -999A no instante t+7 para estas duas chaves, respectivamente.

Com isto, resta analisar o comportamento da chave S13, pois é nele que o novo circuito 5 poderá interferir.

Assim, no instante t+7, a chave S13 envia uma pergunta (?) para as chaves S5 e S17 sobre a sua a capacidade remanescente. Estas duas chaves, como estão no mesmo time, verificam que elas devem efetuar uma disputa (para um observador externo: uma disputa entre S5 e S17 dentro da disputa de S13 – para as chaves, este processo é completamente transparente). Assim, cada chave, S5 e S17, inicia sua busca pela capacidade remanescente de seu circuito.

Pelo circuito 2 da chave S5, que é uma chave aberta, esta percebe através de seu programa inteligente que ela deve verificar a capacidade remanescente de seu circuito, tal como foi feito no segundo exemplo. Assim, ela envia, no instante t+8, uma pergunta a chave S6, que a processa e envia para a chave S7, que a processa e envia para a chave S8, que a processa e envia para a chave S9. Isto ocorre nos instantes t+9, t+10 e t+11, respectivamente. No instante t+12, a chave S9, que é uma chave de subestação, processa o valor e envia uma resposta (A) para S8, que envia para S7, que envia para S6, que envia para S5, que, por sua vez envia para S13 e S17. Isto ocorre nos instantes, t+13, t+14, t+15 e t+16, respectivamente. Adota-se aqui a mesma resposta enviada nos exemplos anteriores, 30A.

Pelo circuito 4, da chave S17, que é uma chave aberta, esta também percebe que deve verificar a capacidade remanescente de seu circuito. Assim, ela envia, no instante t+8, uma pergunta a chave S18, que a processa e envia para a chave S19. Isto ocorre no instante t+9. No instante t+10, a chave S19, que é uma chave de subestação, processa o valor e envia uma resposta (A) para S18, que envia para S17, que envia para as chaves S13 e S5. Isto ocorre nos instantes, t+11 e t+12, respectivamente. Adota-se aqui uma capacidade remanescente de seu circuito 4 como sendo 50A.

No instante t+16 ainda, a chave S5, que já tinha recebido em t+12 o valor para a disputa da chave S17 (50A), verifica que este é maior do que o seu valor (30A), percebendo que “perdeu” a disputa para a chave S17.

No instante $t+17$, a chave S17, que recebeu no instante anterior o valor de 30A da chave S5, percebe que “ganhou” a disputa, mas deve esperar o comando de fechamento pois existem outras disputas ocorrendo.

Neste mesmo instante $t+17$, a chave S13, que já tinha recebido, no instante $t+12$, o valor de 50A, da chave S17 e agora recebeu no instante anterior o valor de 30A da chave S5, compara com o seu valor da sua própria capacidade remanescente fictícia (adota-se o valor de 46A, como no quarto exemplo). Com isto, o programa inteligente da chave S13 compara 50A e 30A, verificando que a capacidade de socorro é de 50A e que ela pode permitir a passagem de até 46A. Com isto, envia uma informação às chaves S14 e S16, com o valor de 46A.

Ainda neste instante $t+17$, como a chave S13 já tinha recebido o valor das outras duas chaves S14 e S16, de 42A no instante $t+15$ e de -999A no instante $t+7$, ela verifica que “ganhou” a disputa e também envia um comando (C) para S17 fechar.

No instante $t+18$, a chave S14 tendo recebido no instante anterior o valor (46A) da chave S13 e já tendo recebido o valor (-999A) da chave S16 em $t+7$, compara com seu próprio valor (42A), e verifica que perdeu a disputa, encerrando para ela o processo de restauração.

Neste mesmo instante $t+18$, a chave S16, tem um procedimento similar. Tendo recebido no instante anterior o valor (46A) da chave S13 e já tendo recebido o valor (42A) da chave S14 em $t+15$, compara com seu próprio valor (-999A), e verifica que perdeu a disputa, encerrando para ela o processo de restauração.

Ainda no instante $t+18$, as chaves S5 e S17 recebem o comando para fechar. A chave S5, mesmo sendo uma chave aberta, mas sabendo que perdeu a disputa sabe que o comando não é para ela. A chave S17, como está aberta e sabedora de ter ganho a disputa, estava esperando este comando para fechar e fecha, restaurando os ramais sem energia.

A Figura 41 mostra estas ações nos instantes de $t+7$ até $t+18$.

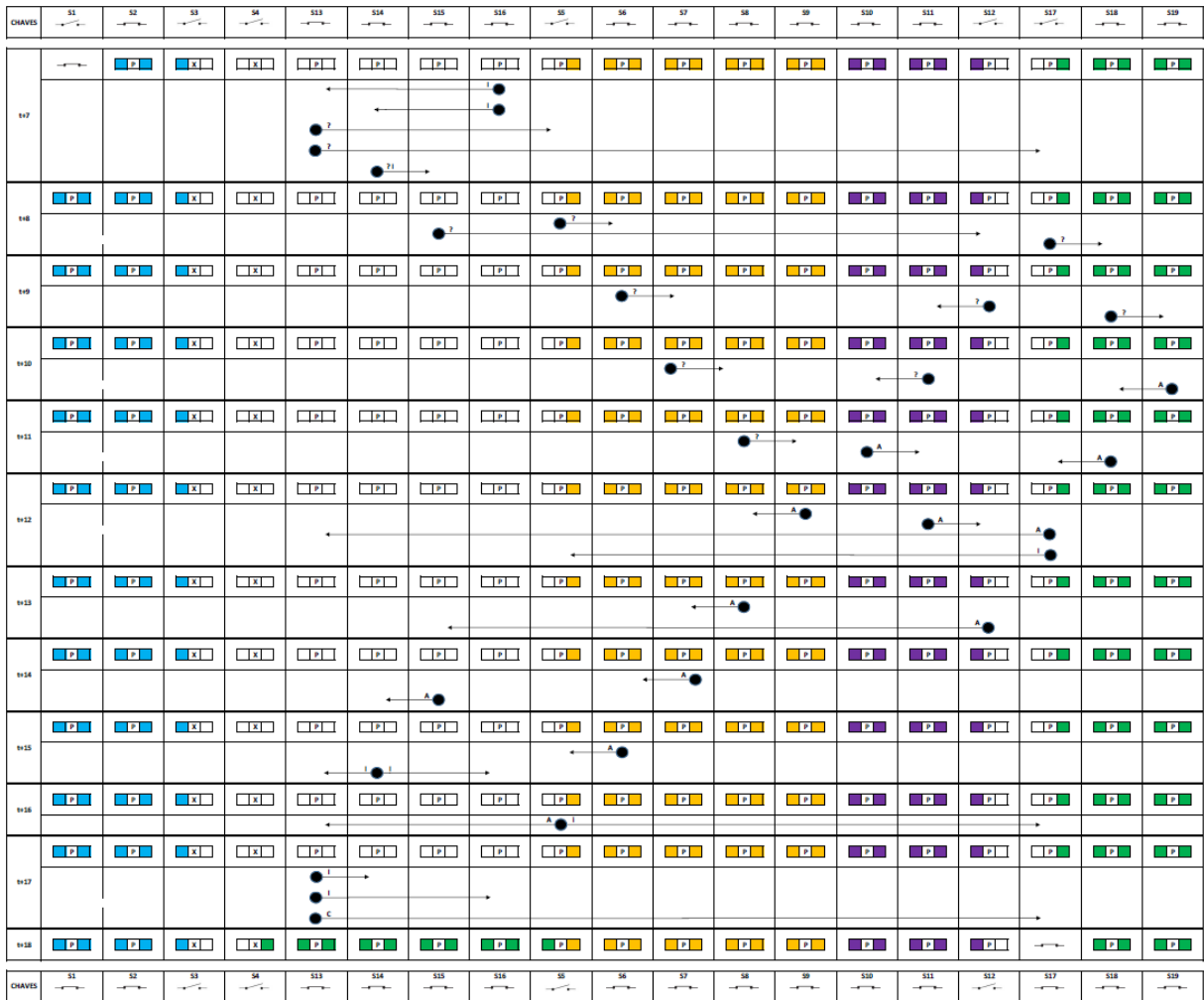


Figura 41. Ações operativas no sistema teste 4 na condição do processo de restauração

Os instantes t+19 e t+20 mostram uma operação normal da nova configuração do sistema teste 5, conforme mostrado na Figura 42.

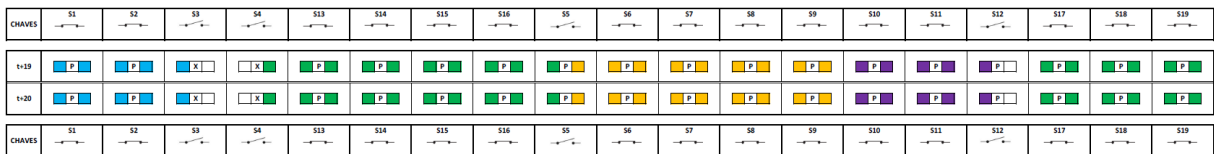


Figura 42. Ações operativas no sistema teste 4 na condição pós-restauração

A Figura 43 mostra o sistema teste 5 na condição pós-restauração.

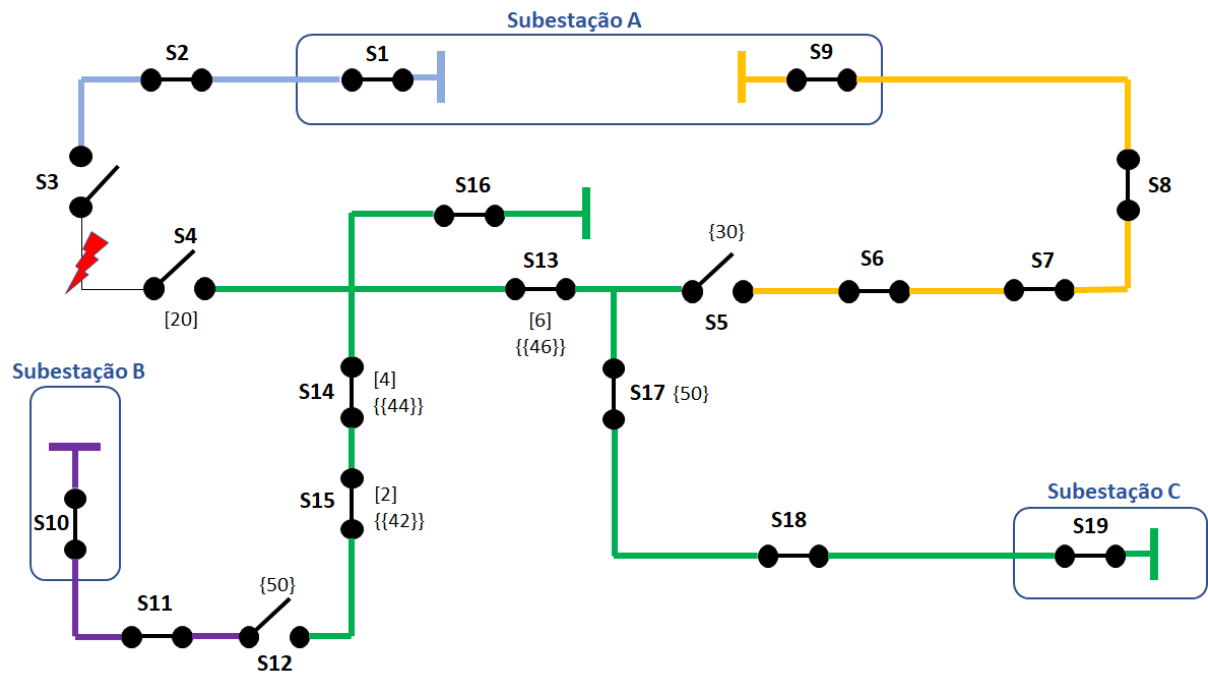


Figura 43. Sistema teste 5, pós restauração

4.4 Sumarizando a Estrutura do Agente com o Restabelecimento de um Curto-Circuito

Esta seção sumariza as principais ações do agente inteligente para a Função Restabelecimento de um Curto-Circuito com todos os três procedimentos que o compõe (eliminação do curto, isolamento do curto e restauração do circuito). A Figura 44 apresenta a implementação das regras das funções criadas neste capítulo.

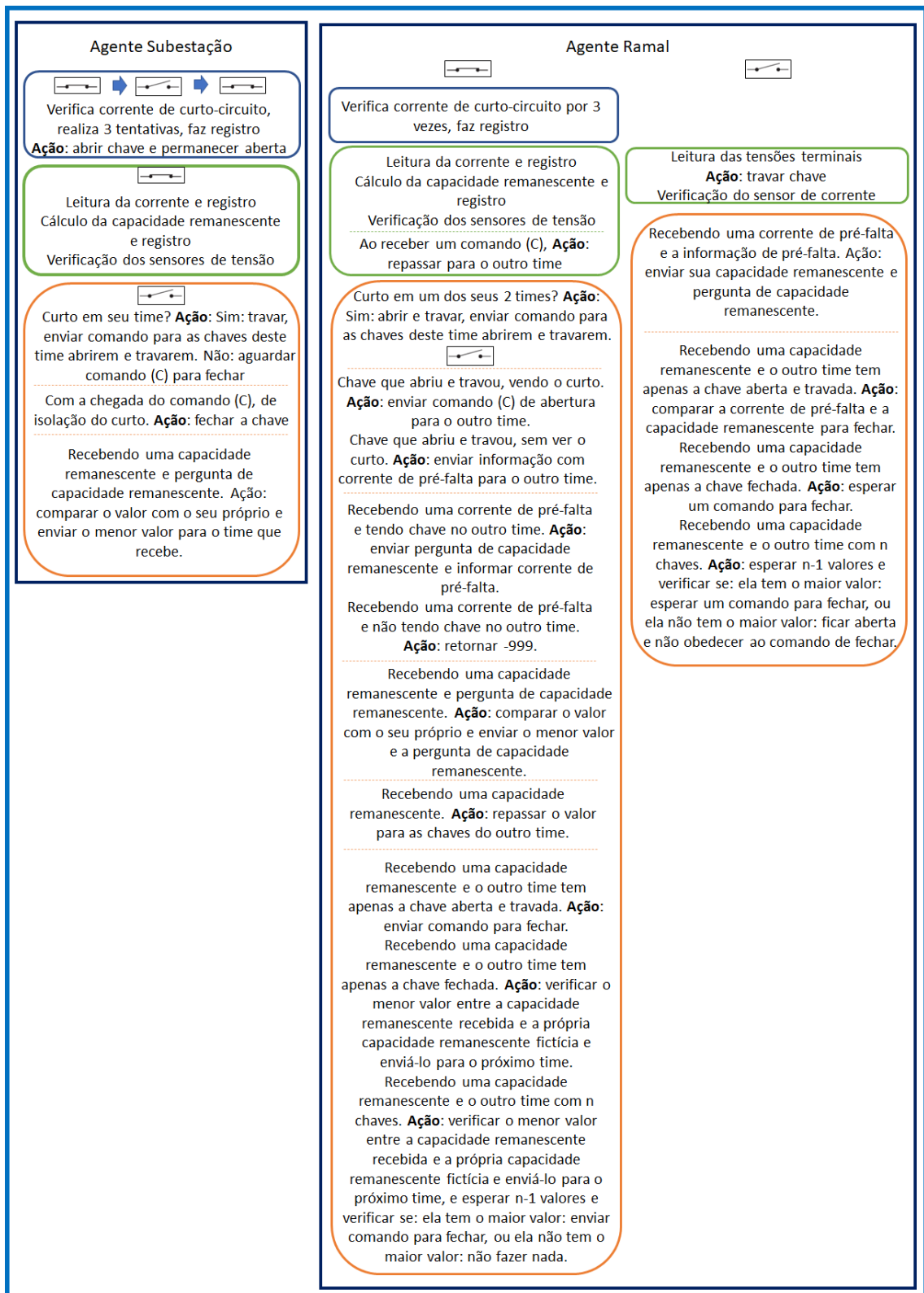


Figura 44. Estrutura de regras no agente com a implementação da Função de Restabelecimento de um Curto-Circuito

4.4.1 Repasse do Cálculo da Capacidade Remanescente

O agente da chave fechada de ramal pode receber a informação da corrente de pré-falta e deve enviar uma pergunta sobre a pretensa capacidade remanescente dos circuitos que podem ser encontrados pelas chaves do outro time. Em síntese: o agente, ao receber uma corrente pré-falta, deve verificar se existem chaves em seu outro time. Se a resposta for positiva, ele envia uma pergunta sobre a capacidade remanescente e informa a corrente de pré-falta. Se a resposta for negativa (ou seja, ela for uma chave terminal), ela retorna o valor -999. Tem-se as regras abaixo na forma de linguagem corrente e na forma de regras:

- Recebendo uma corrente de pré-falta e tendo chave no outro time. Ação: enviar pergunta de capacidade remanescente e informar corrente de pré-falta.
 - Se corrente de pré-falta é detectada e existe chave no outro time então perguntar de capacidade remanescente e informar corrente de pré-falta.
- Recebendo uma corrente de pré-falta e não tendo chave no outro time. Ação: retornar -999.
 - Se corrente de pré-falta é detectada e não existe chave no outro time então retornar -999.

4.4.2 Cálculo da Capacidade Remanescente

O agente da chave aberta de ramal, ao receber a informação da corrente de pré-falta, deve enviar uma pergunta sobre a pretensa capacidade remanescente do outro circuito, enviando a sua capacidade remanescente (que é igual a sua capacidade nominal, pois a corrente por ela é zero – chave aberta), e perguntando a capacidade remanescente da próxima chave. Tem-se a regra abaixo nas duas formas:

- Recebendo uma corrente de pré-falta e a informação de pré-falta. Ação: enviar sua capacidade remanescente e pergunta de capacidade remanescente.
 - Se corrente de pré-falta é detectada e a corrente de pré-falta for recebida então enviar sua capacidade remanescente perguntar de capacidade remanescente.

4.4.3 Cálculo da Capacidade Remanescente de Outros Circuitos

O agente da chave fechada de ramal ao receber somente a pergunta sobre sua capacidade remanescente (sem a informação da corrente pré-falta) e o valor da capacidade remanescente da outra chave, ele deve comparar este valor recebido com o valor de sua própria capacidade remanescente e enviar uma pergunta para as próximas chaves do outro time. Tem-se a regra abaixo nas duas formas:

- Recebendo uma capacidade remanescente e pergunta de capacidade remanescente.
Ação: comparar o valor com o seu próprio e enviar o menor valor e a pergunta de capacidade remanescente.
 - Se uma capacidade remanescente for recebida e pergunta da capacidade remanescente então comparar o valor recebido com seu próprio valor e enviar para o próximo agente o menor valor e a pergunta de capacidade remanescente.

Para o agente da chave da subestação (que está fechada), esta, ao receber uma capacidade remanescente e pergunta de capacidade remanescente, verifica que não tem para onde enviar e retorna o menor valor entre o recebido e seu próprio valor. Tem-se a regra a seguir:

- Recebendo uma capacidade remanescente e pergunta de capacidade remanescente.
Ação: comparar o valor com o seu próprio e enviar o menor valor para o time que recebe.
 - Se uma capacidade remanescente for recebida e pergunta da capacidade remanescente então comparar o valor recebido com seu próprio valor e enviar para o próximo agente o menor valor.

Para o agente da chave fechada de ramal, ao receber a resposta do valor da capacidade remanescente (sem nenhuma pergunta, “entende” que este valor é uma resposta), ele simplesmente o repassa para a próxima chave. Tem-se a regra a seguir:

- Recebendo uma capacidade remanescente. Ação: repassar o valor para as chaves do outro time.
 - Se uma capacidade remanescente for recebida então repassar o valor para as chaves do outro time.

4.4.4 Processo de Tomada de Decisão sobre a Alimentação por Outro Circuito

Para o agente da chave aberta de ramal, ele, ao receber a resposta sobre a capacidade remanescente no circuito, verifica quantas chaves ela tem em seu outro time: (a) havendo apenas uma, sendo a chave que abriu e travou, ela deve comparar a corrente de pré-falta com a capacidade remanescente (respondida pelo circuito) e podendo fechar, deve fazê-lo; (b) havendo apenas uma chave fechada, deve repassar a capacidade remanescente e esperar um comando para fechar; e (c) havendo mais de uma chave (n chaves), ela deve informar a capacidade remanescente e esperar $n-1$ valores para verificar se ganhou a disputa: se sim (ou seja, ela tem a maior capacidade remanescente), ela deve esperar um comando para fechar, e se não (ou seja, ela recebeu um valor maior que sua capacidade remanescente), ela deve ficar aberta e não obedecer ao comando de fechar (caso ele venha, pois não será para ela). Tem-se as regras abaixo:

- Recebendo uma capacidade remanescente e o outro time tem apenas a chave aberta e travada. Ação: comparar a corrente de pré-falta e a capacidade remanescente para fechar.
 - Se uma capacidade remanescente e o outro time tem apenas a chave aberta e travada então comparar a corrente de pré-falta e a capacidade remanescente para fechar.
- Recebendo uma capacidade remanescente e o outro time tem apenas a chave fechada. Ação: esperar um comando para fechar.
 - Se uma capacidade remanescente for recebida e o outro time tem apenas a chave fechada então esperar um comando para fechar.
- Recebendo uma capacidade remanescente e o outro time com n chaves. Ação: esperar $n-1$ valores e verificar se: ela tem o maior valor: esperar um comando para fechar, ou ela não tem o maior valor: ficar aberta e não obedecer ao comando de fechar.
 - Se uma capacidade remanescente e o outro time com n chaves então: esperar $n-1$ valores e verificar se: ela tem o maior valor: esperar um comando para fechar, ou ela não tem o maior valor: ficar aberta e não obedecer ao comando de fechar.

A chave fechada, ao receber a resposta da capacidade remanescente da outra chave, deve comparar com sua capacidade remanescente fictícia e o menor valor deve ser repassado. As situações possíveis são: (a) havendo apenas uma, sendo a chave que abriu e travou, ela deve enviar um comando (C) para o time do qual ela recebeu a capacidade remanescente para que a

chave feche; (b) havendo apenas uma chave fechada, deve repassar o menor valor; e (c) havendo mais de uma chave (n chaves), ela deve informar a capacidade remanescente e esperar $n-1$ valores para verificar se ganhou a disputa: se sim (ou seja, ela tem o maior valor calculado – capacidade remanescente e capacidade remanescente fictícia), ela deve enviar um comando (C) para o time do qual ela recebeu a capacidade remanescente para que a chave feche, e se não (ou seja, ela recebeu um valor maior do que o seu), ela não deve efetuar nenhuma ação. Tem-se as regras abaixo:

- Recebendo uma capacidade remanescente e o outro time tem apenas a chave aberta e travada. Ação: enviar comando para fechar.
 - Se uma capacidade remanescente for recebida e o outro time tem apenas a chave aberta e travada então enviar comando para fechar.
- Recebendo uma capacidade remanescente e o outro time tem apenas a chave fechada. Ação: verificar o menor valor entre a capacidade remanescente recebida e a própria capacidade remanescente fictícia e enviá-lo para o próximo time.
 - Se uma capacidade remanescente for recebida e o outro time tem apenas a chave fechada então verificar o menor valor entre a capacidade remanescente recebida e a própria capacidade remanescente fictícia e enviá-lo para o próximo time.
- Recebendo uma capacidade remanescente e o outro time com n chaves. Ação: verificar o menor valor entre a capacidade remanescente recebida e a própria capacidade remanescente fictícia e enviá-lo para o próximo time, e esperar $n-1$ valores e verificar se ela tem o maior valor, então enviar comando para fechar, ou se ela não tem o maior valor, então não fazer nada.
 - Se uma capacidade remanescente for recebida e o outro time com n chaves então verificar o menor valor entre a capacidade remanescente recebida e a própria capacidade remanescente fictícia e enviá-lo para o próximo time, e esperar $n-1$ valores e verificar se ela tem o maior valor, então enviar comando para fechar, ou se ela não tem o maior valor, então não fazer nada.

4.5 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo iniciou a construção da parte lógica dos agentes, com foco no restabelecimento do sistema em caso de um curto-circuito em um dos ramais do sistema de distribuição.

A parte lógica do agente proposto foi desenvolvida em uma estrutura em níveis hierárquicos, nas quais os procedimentos foram alocados de acordo com o grau de urgência ou de intensidade de cálculo que ele necessita. Tais níveis serão recapitulados a seguir. O nível 1 é o de reação (ou instinto), ou seja, é aquele que o agente deve tomar uma ação para a sua sobrevivência e a saúde da rede. Obviamente, esta ação está ligada ao tipo de chave que ele dispõe para fazer face ao distúrbio que está ocorrendo. Mas, mesmo que o agente não possa contribuir para a solução do distúrbio na rede, ele deve registrar parâmetros do distúrbio para futuras ações.

O nível 2 é o nível da operação em estado permanente, ou seja, quando a rede está em operação normal, mesmo que haja alteração na carga e que ela ocorra dentro dos limites normais de carregamento do agente. Neste nível, o agente está constantemente lendo valores da rede, através de seus sensores, e registrando-os em locais especiais da memória também para possíveis utilizações futuras. Nele, normalmente, poucas comunicações ocorrem entre os agentes. É neste nível que o agente e a rede operam a maior parte do tempo.

O nível 3 é onde estão as regras para as situações anormais de operação. São estas regras que permitem aos agentes auxiliar o funcionamento da rede em caso de contingências. Existem regras operativas que devem ser aplicadas a qualquer concessionária, como podem existir regras que são características de uma determinada opção operativa.

O nível 4 agrupa as regras de otimização e de cálculos especiais. As regras de otimização são aquelas que fazem com que o agente possa melhorar o funcionamento de uma rede ou mesmo prepará-la para um novo chaveamento ou uma nova contingência. Normalmente, estas regras são disparadas quando alguma situação especial é detectada pelas regras do nível 2, que precisam de um apoio para a auxiliar a rede quando algum desvio é detectado. Os cálculos especiais, normalmente, são disparados pelas regras do nível 3 ou mesmo pelas regras de otimização do próprio nível 4. Estes cálculos especiais reúnem um conjunto de diferentes estudos da rede que podem ser feitos de maneira local, utilizando o conhecimento dos dados que foram coletados ao longo do funcionamento do agente e que estão armazenados na memória local.

Neste capítulo, foram descritas as grandezas que deveriam estar registradas no momento da instalação na memória de uma agente e os seus elementos de comunicação, os quais didaticamente foram divididos em informação (I), comando (C), pergunta (?) e resposta (A).

Foram apresentados também os procedimentos para um problema que as redes urbanas de distribuição corriqueiramente enfrentam, que são os curtos-circuitos em seus ramais. O problema do curto-circuito envolve uma série de funções que o agente de uma chave deve efetuar. Neste capítulo, elas foram divididas em funções de eliminação do curto, de isolamento do curto e de restauração. As funções de eliminação do curto estão situadas no nível 1. Como visto, a chave que possui a capacidade de extinção do curto atua, enquanto as demais que viram o curto registram este fato em sua memória para utilização futura.

O processo de isolamento do curto ocorre após a sua extinção, para que a rede possa, pelo menos parcialmente, voltar a operar. As regras aqui necessitam de uma maior análise e, muitas vezes, comunicações com outros agentes, então estas regras fazem parte do nível 3. Como visto, não são todas as chaves que participam deste processo. Aqui faz-se uma lembrança, que cada agente tem a própria inteligência e a sua própria dinâmica. Cada agente toma decisões em cooperação, quando necessário, com os agentes de seu time. Assim, cada agente age em seu tempo. Obviamente, existe uma coordenação entre eles, quando necessária, fornecida pela troca de mensagens feitas pelo sistema de comunicação, sempre lembrando que um agente só se comunica com agentes de seus times, nunca com agentes fora de seus times. Existe um olhar global do agente, que recebe informações vindas de outros times, até mesmo distantes, mas sempre por uma comunicação com agentes adjacentes.

O processo de restauração da parte da rede que ficou sem energia e pode ser novamente energizada também é feita através de regras que estão no nível 3. Estas regras geram comunicações com outros circuitos, sempre como dito no parágrafo anterior, através de agentes adjacentes, que buscam os circuitos, qual deles é o de maior interesse para efetuar o processo de restauração. Assim, quando existe mais de um circuito disponível, podem ocorrer disputas entre eles para que se defina qual circuito terá a missão de fornecer energia para a rede afetada pelo curto-circuito.

Aqui já se pode dar exemplos de regras que devem ser aplicadas a qualquer concessionária e regras operativas de uma determinada concessionária. Uma regra que vale para qualquer concessionária é aquela que diz que “uma chave aberta com tensão dos dois lados não pode fechar”. Esta regra vale para qualquer concessionária, pois seu fechamento implicaria dinamicamente em um transitório (às vezes de grande porte para as redes urbanas) e em estado permanente no fechamento de um circuito em anel, perdendo a sua característica radial. A regra

própria de uma concessionária pode ser exemplificada pelo processo de decisão que vai definir uma disputa. Nos exemplos deste capítulo, utilizou-se a capacidade remanescente de carga nas chaves, mas o critério poderia ser outro, como o número de chaves até a subestação ou o número de chaves do circuito ou mesmo um outro critério, que poderia ser híbrido misturando com pesos diferentes critérios. Cada concessionária tem sua forma de operar o sistema e pode fazer definições quanto às suas escolhas.

Finalmente, este capítulo não apresentou ainda nenhuma regra para o nível 4. Porém, para não deixar de exemplificar, um possível conjunto de regras que poderiam estar ligadas ao processo de restauração seria para a evolução da carga. Seja considerar que o curto do quarto exemplo tenha ocorrido às 17 horas. A decisão da disputa foi feita pela capacidade remanescente dos circuitos 2 (em laranja) e 3 (em roxo), tendo ganho o circuito 3. Porém, considere que fosse de praxe a concessionária só consertar o defeito no ramal em curto, deixando qualquer chaveamento somente para o dia seguinte e que o circuito 2 fosse de carga industrial e o circuito 3, de carga residencial. Poderia ser mais interessante escolher como alimentador o circuito 2, pois sua carga tenderia a diminuir na próxima hora e pela noite inteira, enquanto o circuito 3 tenderia a ter sua carga aumentada. As regras de previsão de carga do nível 4 poderiam providenciar os valores para esta disputa, conhecendo o desempenho da carga ao longo das últimas semanas.

5 Proposição do Sistema de Comunicação e da Função de Retaguarda

Nenhum MAS pode operar corretamente sem que haja uma correta comunicação entre os agentes, pois, a despeito de eles trabalharem de forma assíncrona, deve haver uma coordenação entre as ações, como foi visto nos procedimentos de restabelecimento, apresentados no capítulo passado.

Este capítulo visa apresentar exatamente a proposição de um sistema de comunicação, mais especificamente de troca de mensagens, que possua redundância e eficácia, mitigando os riscos de uma comunicação errônea entre os agentes.

Em seguida, este capítulo apresenta uma solução para quando o sistema de comunicação do agente falha ou mesmo seus sensores e atuadores deixam de operar corretamente. A esta solução deu-se a denominação de Função de Retaguarda.

5.1 Proposição de um Sistema de Troca de Mensagens para o Agente

Para que exista um sistema de troca de mensagens entre os agentes, deve existir uma estrutura rígida desta mensagem. Este é o primeiro item a ser definido, ou seja, a estrutura de uma mensagem.

5.1.1 Estrutura de uma Mensagem

No sistema proposto, a mensagem só contém números e os exemplos que são apresentados nesta seção mostram um sistema que tenha dois dígitos para representar o número das chaves (e, por consequência, dos agentes inteligentes).

A estrutura básica é composta por 12 dígitos, 10 para a mensagem e dois para a verificação. Nos 10 dígitos, os dois primeiros representam o número da chave emissora, os dois próximos dígitos representam o número da chave receptora, os dois seguintes definem o tipo de mensagem (comando, pergunta, resposta ou informação) de forma específica; enquanto os quatro últimos transportam um valor (caso haja necessidade). Os dois dígitos de verificação

servem para uma verificação local da veracidade da mensagem. Assim, um exemplo de mensagem poderia ser:

060512003005

Esta mensagem foi retirada do t+14 do exemplo da Figura 18, e representa que a chave 06 está enviando uma mensagem para a chave 05 sobre uma consulta da capacidade remanescente do circuito (código 12) e que esta capacidade é de 0030 (ou seja, +30 A, pois o primeiro desses dígitos informa o sinal do número que se quer informar: 0 para “+” e 1 para “-”). Este são os 10 primeiros dígitos da mensagem. Os dois últimos dígitos são introduzidos na mensagem automaticamente para que localmente se possa verificar se ela foi ou não corrompida. A lógica utilizada é a seguinte: somam-se os dez primeiros dígitos (no caso, perfazendo 17) e acrescenta-se o número que transforma o total no menor número com dois algarismos iguais. No caso do exemplo, este número seria 22, então foram acrescentados os dígitos 05.

Esta ideia não é original, vários sistemas utilizam este procedimento simples de verificação, como os números de CPF (Cadastro de Pessoa Física), com algumas variações. No sistema de troca de mensagens proposto, ele pode ser eficaz para detectar anomalias na mensagem, já que se um dígito for alterado a soma total não conterà um número de dois algarismos iguais.

Ainda, para fazer esta mensagem ser compreendida por todos os agentes é necessário que exista um dicionário estabelecendo um código para cada tipo de mensagem. Caso haja mais de 100 chaves no sistema (ou o número da chave tenha mais algarismos) basta repensar o tamanho da mensagem e dos dígitos verificadores. Estes dois itens não são desenvolvidos mais neste trabalho por fugirem ao seu escopo central, que é propor solução a problemas operativos das redes elétricas através dos MAS.

A mensagem, como é composta por uma sequência de números, é mais facilmente realizada por um programa externo (tipo algorítmico) para a sua composição. Este programa recebe da regra o grupo de agentes adjacentes que devem receber as mensagens e o tipo de mensagem. Ele, por sua vez, monta a primeira parte das mensagens colocando o número do agente emissor (ou seja, seu próprio número), o número do agente a quem a mensagem deve ser encaminhada, o número que representa o tipo de mensagem (que está na memória local), o valor da mensagem (caso exista e que também estará em uma posição definida na memória local, senão será colocado 0000). Em seguida, o programa externo soma todos estes valores (dígito a dígito) e verifica o número inteiro de dígitos iguais, que seja igual ou imediatamente

superior a esta soma. Ele faz a diferença entre este número e a soma e o resultado fornece os dois últimos dígitos da mensagem. Então, ele escreve as mensagens em uma posição da memória para envio pelo sistema de comunicação.

Este sistema, ao encontrar uma mensagem escrita nesta posição, a envia para as chaves próximas. Em seguida, ele copia esta mensagem no rol das mensagens enviadas e apaga esta posição de memória.

5.1.2 Proposição de uma Redundância no Sistema de Comunicação

Um pouco mais deve ainda ser tratado no Sistema de Comunicação, para que sejam mitigados ainda mais possíveis problemas de comunicação entre os agentes adjacentes, ou seja, deve ser incluído algum tipo de redundância.

Então, propõe-se que a troca de mensagens ocorra da maneira como será descrita a seguir. Um agente (emissor) envia a mensagem ao outro agente (receptor). Este a recebe e volta a mesma mensagem ao agente emissor. Este por sua vez, verifica sua integridade e volta a transmitir a mesma mensagem ao agente receptor.

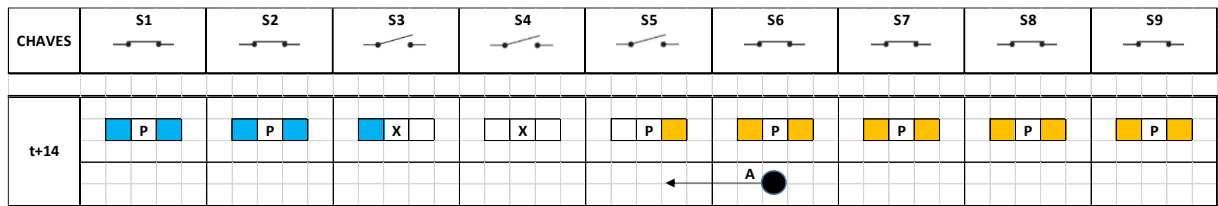
No caso do exemplo da seção anterior, o agente 06 envia a mensagem ao agente 05. Este a recebe e a transmite de volta para o agente 06. Este agente, por sua vez, verifica se ela é a mesma e sendo, ele volta a transmiti-la. Ao chegar novamente a mesma mensagem ao agente 05, ele saberá que ela é autêntica. Caso qualquer verificação falhe, seja a da integridade da mensagem (que é realizada pelos últimos dois dígitos), seja pela checagem de igualdade da mensagem, o processo de troca de mensagens se interrompe imediatamente.

Esta redundância parece complicar a troca de mensagens ou postergar em muito a ação que deveria ser tomada. Mas isto não é verdade, pois as trocas de mensagens são muito rápidas e só acontecem nos níveis de trabalho (normal ou anormal) ou no nível de otimização e predição, jamais no nível de instinto do agente (nível 1). Com isto, ele tem um certo tempo para realizar este procedimento.

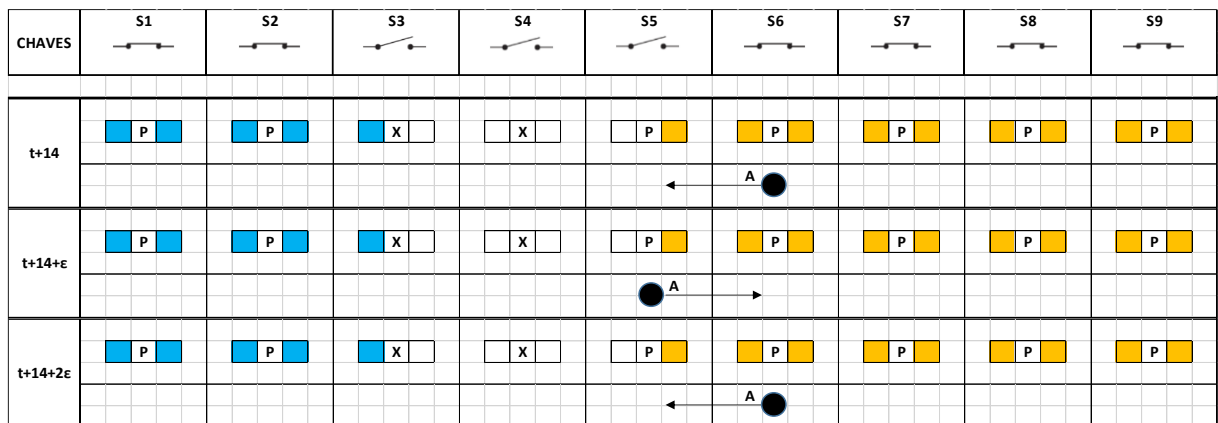
É importante afirmar que o procedimento proposto mitiga possíveis trocas de mensagens errôneas, mas não afasta completamente a possibilidade de erro, notadamente aqueles feitos por *hackers* que conhecem a estruturação da troca de mensagens. Infelizmente, ainda não existem estruturas de comunicação completamente imunes a estes ataques.

5.1.3 Exemplo de uma Troca de Mensagens

Voltando ao exemplo relato nas seções anteriores em que o agente 06 envia a mensagem ao agente 05, no instante $t+14$ do exemplo da Figura 18. Segundo o que foi proposto neste capítulo acontece conforme está mostrado na Figura 45. Para facilidade, a Figura 45 (a) mostra a primeira versão de troca de mensagens entre os agentes 06 e 05 na qual não existe redundância; enquanto a Figura 45 (b) apresenta esta redundância.



(a)



(b)

Figura 45. Ações operativas no sistema teste 1, parte intermediária do processo de restauração, retorno da capacidade remanescente no circuito 2 para a chave S5, no instante $t+14$ no em sistema de comunicação: (a) sem redundância e (b) com redundância.

Observa-se que surge um valor de tempo ϵ que é somado ao tempo $t+14$, o qual é um valor bem pequeno, somente para representar que leva um tempo para que possa ser feita esta troca de mensagens com redundância, mas que ele é bastante reduzido quando comparado aos tempos de restabelecimento e aos possíveis problemas que uma ação baseada em uma mensagem errônea pode ocasionar ao sistema.

5.2 Procedimentos para a Função de Retaguarda

A Função de Retaguarda entra em ação quando algum agente deixa de operar corretamente. Isto pode acontecer se seu sistema de comunicação estiver falhando (tanto na emissão quanto na recepção de mensagens), se seus sensores (de tensão ou de corrente) não estiverem informando corretamente os sinais que estão medindo ou se existir problema no atuador da chave. Obviamente, estes são os principais problemas que o agente pode vir a ter, mas poderão ocorrer outros problemas como na memória, unidade de processamento, entre outros menos comuns. Enfim, se detectar que o agente não está funcionando corretamente a Função de Retaguarda deve entrar em ação.

Um exemplo de problema que poderia ocorrer em um agente é descrito a seguir. Considere o exemplo da seção 4.3.4, na Figura 34. Quando ocorre um curto entre as chaves S3 e S4, como foi descrito, é necessário que ambas as chaves abram para isolar o ramal em curto. Assim, no instante $t+2$ (ainda processo de localização da falta), o agente S3 envia uma mensagem ao agente S4 para verificar se ele percebeu a corrente de curto. Em condições normais, ele, no instante $t+3$, processaria esta informação e responderia ao agente S3 que não percebeu esta corrente anormal. Porém, no presente exemplo, o agente S4 apresenta problemas e simplesmente não responde à pergunta do agente S3.

5.2.1 Etapas do Procedimento

O procedimento proposto a ser adotado neste caso é que o agente reenvie a mensagem mais N vezes e aguarde a resposta. O valor de N pode ser definido para cada agente de acordo com uma lógica de posição da chave no circuito. Um valor normal seria de $N = 2$.

Se a chave S4 responder a qualquer um deste envio de mensagens, o processo de isolamento do ramal em curto continua como apresentado na Figura 35, somente com os atrasos no tempo relativos as mensagens não respondidas por S4. Porém, se ao final de N tentativas o agente da chave S4 não responder, o agente S3 deve inferir que o agente S4 apresenta problemas e deve tomar duas ações: a primeira é entrar em contato com os agentes adjacentes ao agente com problema e a segunda é informar a subestação a que ele está ligado o problema no agente.

Na primeira ação, o agente emissor “ignora” o agente com problema e transforma o(s) agente(s) adjacente(s) desta chave em seus novos agentes adjacentes. Os agentes adjacentes do

agente adjacente com problema podem estar na memória do agente, bastando para isto que durante a sua configuração eles tenham sido registrados.

Assim, tomando-se o tempo $t+2$ no exemplo da seção 4.3.4 em sua Figura 34, quando se tenta localizar o ramal em que está localizado o curto-circuito, o agente S3 envia uma mensagem ao agente S4 e não recebe resposta em $t+3$. Então, reenvia a mesma mensagem no instante $t+4$ e não recebe a resposta em $t+5$. Novamente, reenvia a mensagem em $t+6$ e não recebe resposta em $t+7$. Então, o agente S3 deve inferir que S4 está com problema e assim deve acionar sua Função de Retaguarda, procurando na memória quais são os agentes adjacentes de S4, que são os agentes S13, S14 e S16. Então, o agente S3 “ignora” o agente S4 e envia mensagens, no instante $t+8$, para os agentes S13, S14 e S16, perguntando se eles perceberam a corrente de curto-circuito. Como eles não perceberam (resposta no instante $t+9$), no instante $t+10$ ele processa esta informação, abre e envia comandos para que os agentes S13, S14 e S16 também abram e se bloqueiem. Em $t+11$, estas chaves abrem e enviam as informações devida para dar início ao processo de restauração sistêmica. A Figura 46 mostra esta configuração após a abertura das chaves no sistema teste 4. A Figura 47 mostra as ações operativas produzidas neste exemplo, mas mostrando somente as ações dos agentes que estão envolvidos no problema do mal funcionamento da chave S4. As demais ações de todos os agentes (no caso, S1 e S2) continuam as mesmas. Nota-se que o agente da chave S16 no instante $t+11$ não envia informação (I) para o restabelecimento para nenhum agente pois ele já é terminal (não tendo agente adjacente do outro lado da chave). Outra ação que também merece menção é a informação enviada do agente S3, no instante $t+8$, em direção a subestação (no caso para S2, depois de S2 para S1 e, finalmente, S1 repassando para a subestação) sobre o mau funcionamento da chave S4, com a finalidade de notificar a equipe de manutenção.

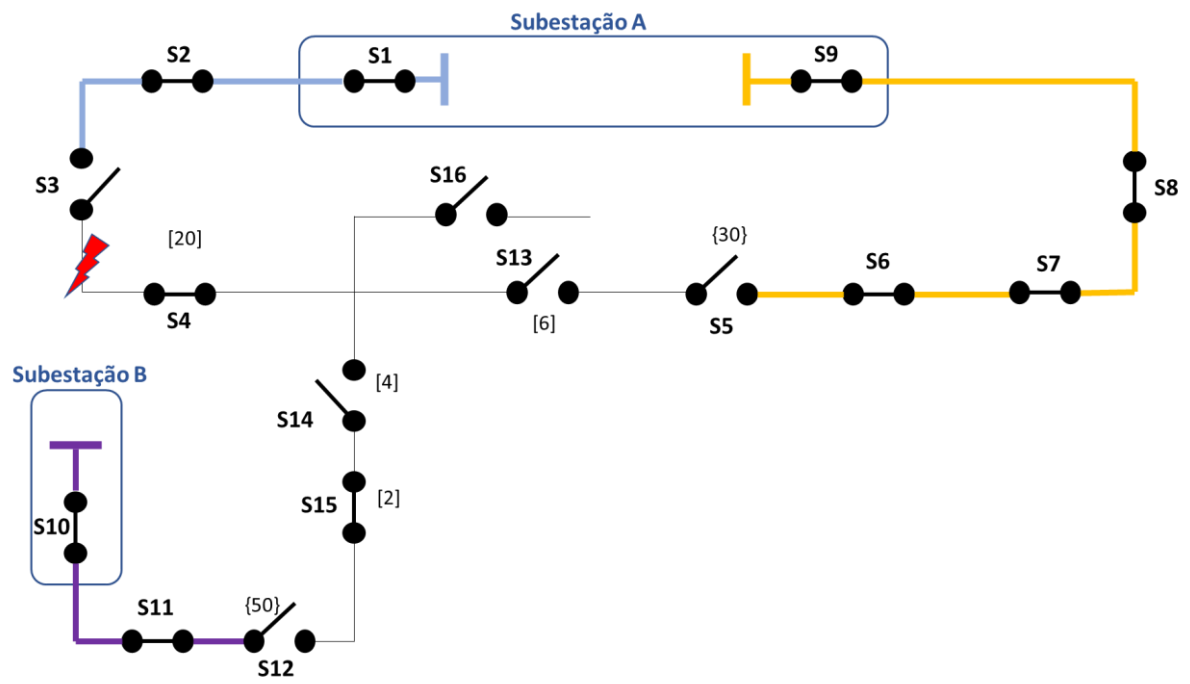


Figura 46. Sistema teste 4, onde o agente da chave S4 apresenta problemas na fase de isolamento do curto-circuito.

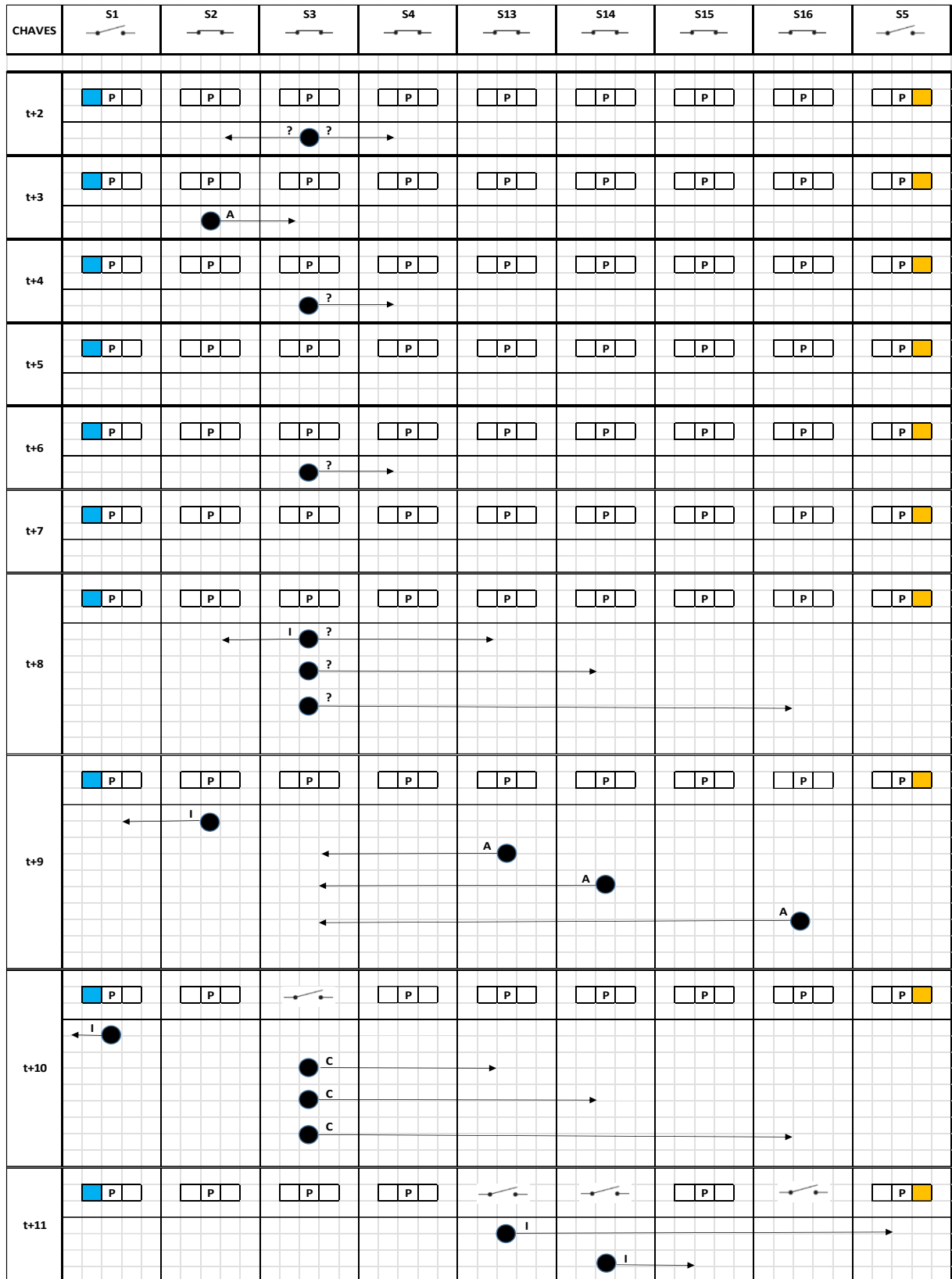


Figura 47. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento, quando o agente da chave S4 apresenta problemas

5.2.2 Parte Inicial do Procedimento

E existe ainda um problema que se deve verificar: se os agentes adjacentes à chave com problema estão no mesmo circuito daquele agente que os tomará como “novos” agentes adjacentes, pois caso contrário as medidas a serem tomadas são diferentes das relatadas acima.

Para exemplificar este fato, seja o sistema teste 4, mas com a configuração inicial apresentada na Figura 48, onde os ramais entre as chaves S4 e S5 e entre S4 e S12 passaram a ser alimentados pelo circuito 2, em laranja, diferentemente da situação anterior, onde esta alimentação era feita pelo circuito 1, em azul. Neste caso, os agentes S13, S14 e S16 não se configuram como agentes de retaguarda da chave S4 (eles são agentes adjacentes, mas neste caso, não são de retaguarda), pois agentes de retaguarda são aqueles que podem socorrer a chave com defeito, mas para isto eles necessitam estar no mesmo circuito, o que não é o caso deste exemplo.

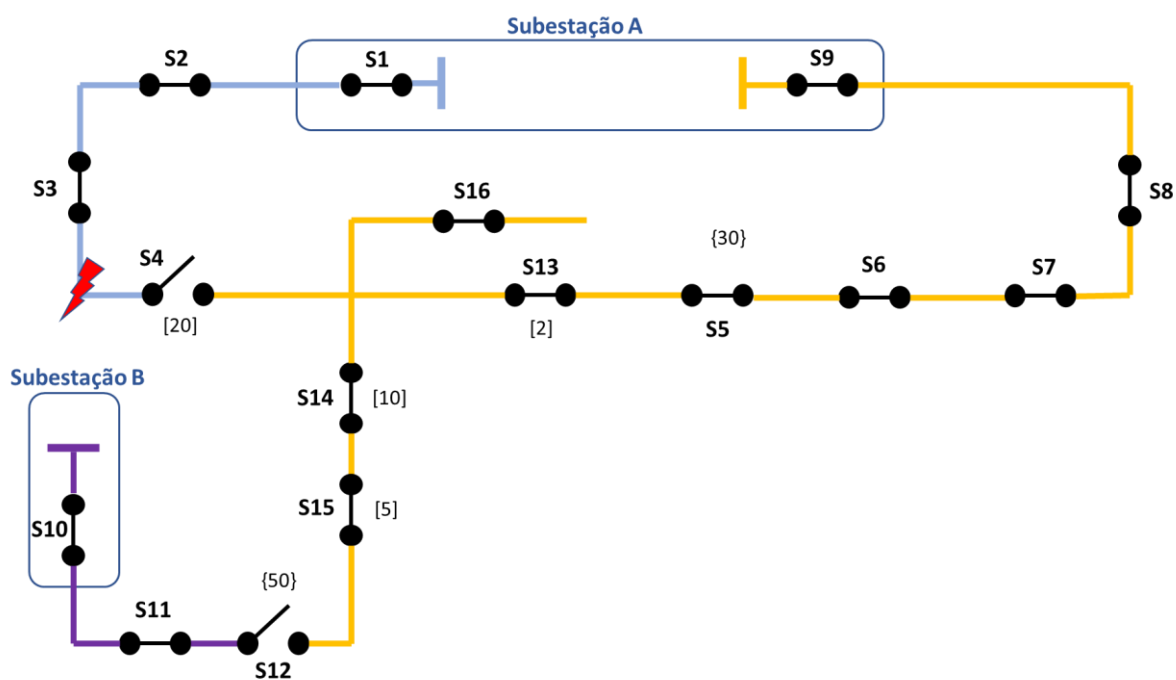


Figura 48. Sistema teste 4, onde o agente da chave S4 apresenta problemas na fase de isolamento do curto-circuito.

Assim, se o agente adjacente apresentar problemas ele deve verificar quais são os agentes adjacentes da chave com problema, mas antes de iniciar o procedimento descrito acima,

ele deve testar para saber se estes “novos” agentes adjacentes a ele fazem parte do mesmo circuito que a chave com problema.

No caso, se o agente da chave S4 falhar, o agente da chave S3 deve verificar quais são os agentes adjacentes a chave S4 (ou seja, S13, S14 e S16), porém antes de qualquer outra ação ele deve verificar se as chaves S13, S14 e S16 fazem parte do mesmo circuito da chave S4 (com problema). Isto é feito através de uma pergunta “tem corrente passando pela chave?”. Se sim, é porque a chave pertence a um outro circuito (que permanece intacto, no caso, o circuito 2, em laranja) e não se pode fazer nada, pois a chave é uma chave terminal de circuito e está separando dois circuitos. Se não, é porque ela pertence ao mesmo circuito da chave com problema e o processo pode continuar como descrito acima.

Desta forma, a Figura 49 apresenta as ações (agora “corrigidas”) para a primeira parte exemplo, enquanto a Figura 50 mostra as ações para a segunda parte do exemplo em que as chaves S13, S14 e S16 fazem parte de outro circuito.

Na Figura 49, as ações “corrigidas” começam a se diferenciar no instante $t+8$, no qual a pergunta (?) não é “se o agente da chave viu o curto-circuito”, mas se “está passando corrente por ela”. Se a resposta (A) for “não”, no exemplo no instante $t+9$; no instante seguinte ($t+10$) o agente S3 (que está comandando este processo de isolamento da falta) pergunta somente agora “se o agente da chave viu o curto-circuito” e todo o processo continua da mesma forma conforme relatado na seção anterior.

Na Figura 50, as ações se diferenciam do exemplo anterior no instante $t+9$, pois a resposta (A) é “sim”. Então, o agente S3 infere que os agentes adjacentes a S4 estão em outro circuito, que desta forma a chave S4 está aberta e, com isto, ele abre e o processo de isolamento do curto se finaliza.

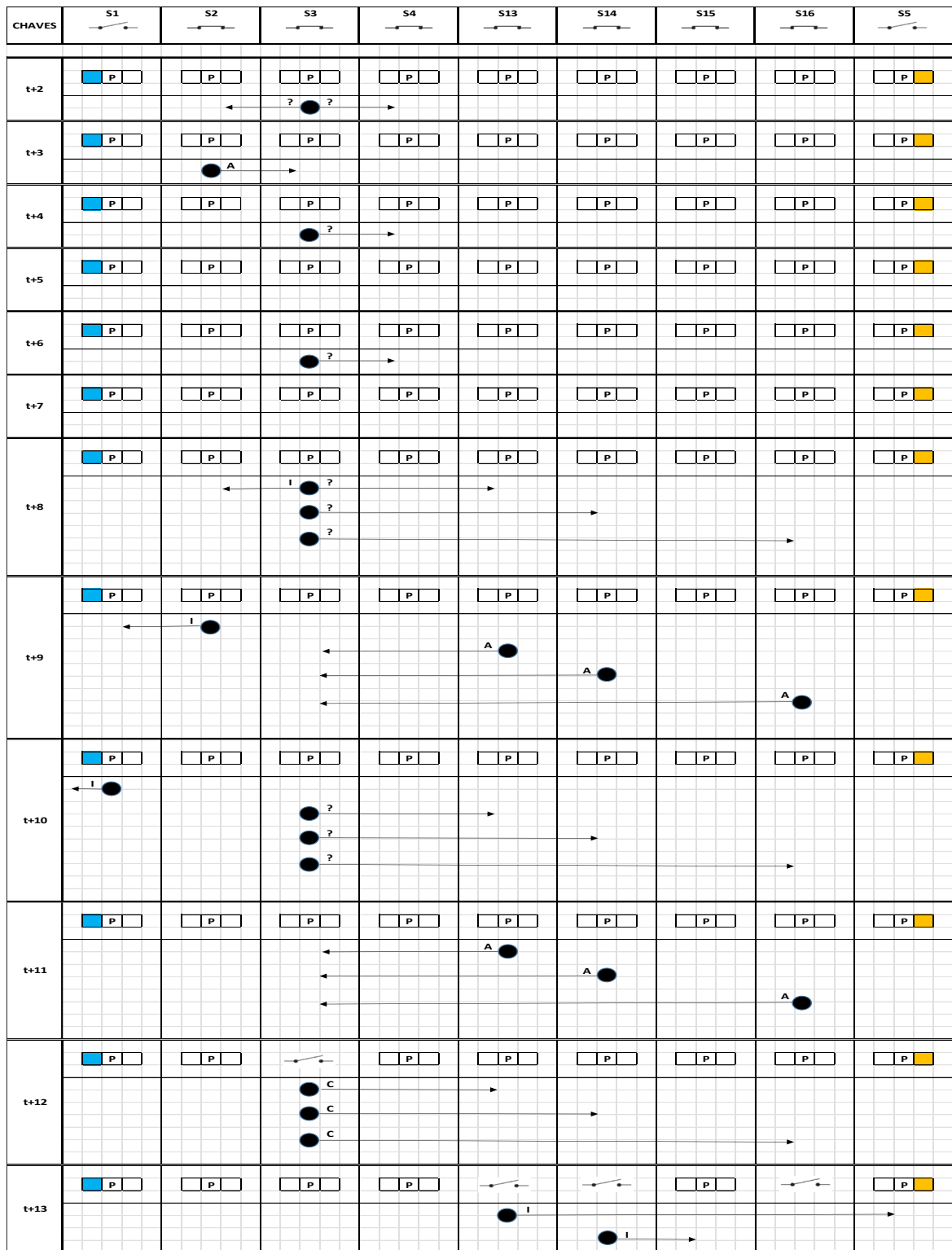


Figura 49. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento, quando o agente da chave S4 apresenta problemas e S13, S14 e S16 fazem parte do mesmo circuito

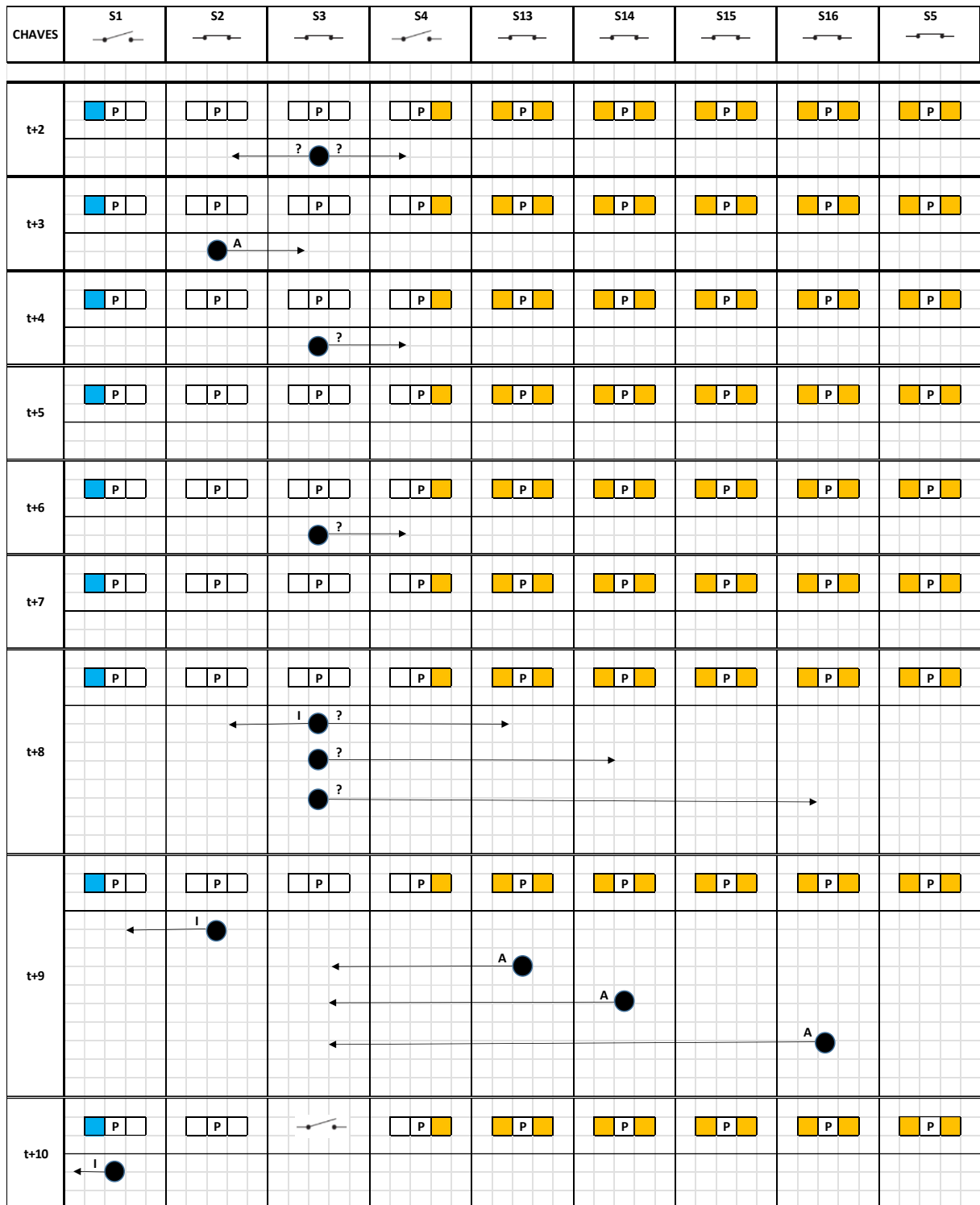


Figura 50. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento, quando o agente da chave S4 apresenta problemas e S13, S14 e S16 fazem parte de outro circuito

5.2.3 Situação de Problema no Agente que Comanda a Ação

Antes de finalizar esta seção é importante analisar quando o agente da chave que “está comandando uma ação” apresenta problemas. No caso, seria o agente S3 durante o processo de isolamento do curto-circuito no ramal.

Considere como base o exemplo da seção 4.3.4 em sua Figura 34, quando ocorre um curto entre as chaves S3 e S4. No instante $t+2$, a chave S2 envia uma pergunta a chave S3. Se esta estiver com problema, ela não vai responder (ou vai responder erroneamente). Assim, a chave S2 vai inferir que o agente S3 está com problemas e vai continuar o processo de isolamento do curto com a chave S4 (que é o agente adjacente a S3), com o procedimento descrito acima. Desta forma, S2 torna-se retaguarda da chave S3 e os dois ramais entre as chaves S2 e S4 permanecem sem energia após o processo de isolamento do curto.

Poder-se-ia agora, por mero exercício teórico, se perguntar o que acontece se os agentes S3 e S4 apresentam problema ao mesmo tempo. Isto é bastante incomum, mas existe uma probabilidade (quase que totalmente teórica disto ocorrer). Duas ações poderiam ser implementadas. A primeira ação é que se um agente não tivesse em sua memória somente os agentes adjacentes de seus agentes adjacentes, mas também os agentes adjacentes dos agentes adjacentes de seus agentes adjacentes. Isto é possível, mas começaria a haver a necessidade da inclusão de alguns pontos suplementares que não se deseja no MAS proposto. Os agentes adjacentes dos agentes adjacentes de seus agentes adjacentes normalmente vão estar, na maioria das vezes nas redes elétricas urbanas de distribuição, fisicamente longe, fato que demandaria sistemas de comunicação mais robustos e com mais possibilidade de problemas. Independentemente destes comentários, a lógica proposta para a função de retaguarda permaneceria a mesma.

A segunda ação, que seria mais prática e a que é preconizada por este trabalho, é a de considerar os agentes das chaves S3 e S4 com problema, abrir S2 e S2 informar o agente da chave da subestação (no caso, S1), que as chaves S3 e S4 apresentam problemas. Neste caso, ficando o curto isolado, mas todos os ramais depois dele sem energia. E mais, o processo de restauração não ocorrerá, pois a nem a chave S13 e nem a chave S15 são instadas a enviar mensagens de auxílio as chaves S5, e S12, respectivamente.

A Figura 51 apresenta as ações tomadas quando S3 e S4 apresentam problemas. Nota-se que no instante $t+2$, o agente da chave S3 deveria perguntar aos seus agentes adjacentes onde se eles também viram o curto, mas como ele está com problema, não o faz; contudo o agente

S2 envia a pergunta para ele. Como em $t+3$, não recebe a resposta, S2 envia novamente a pergunta no instante $t+4$. Não recebendo resposta em $t+5$ e em $t+6$, faz mais uma tentativa. Finalmente, em $t+7$, não recebendo resposta, infere que S3 está com problema, e envia uma mensagem (I) em direção à subestação sobre o problema em S3. Em $t+8$, S2 tenta se comunicar com o agente S4. Se tivesse recebido, em $t+9$, resposta do agente S4, o problema de isolamento do curto ocorreria entre S2 e S4, mas neste exemplo, S4 também não responde. Este processo de tentativa de comunicação ocorre ainda nos instantes $t+10$ e $t+12$, não havendo resposta em $t+11$ e $t+13$. Assim, em $t+14$, a chave S2 abre e envia outra mensagem em direção à subestação sobre o problema em S4.

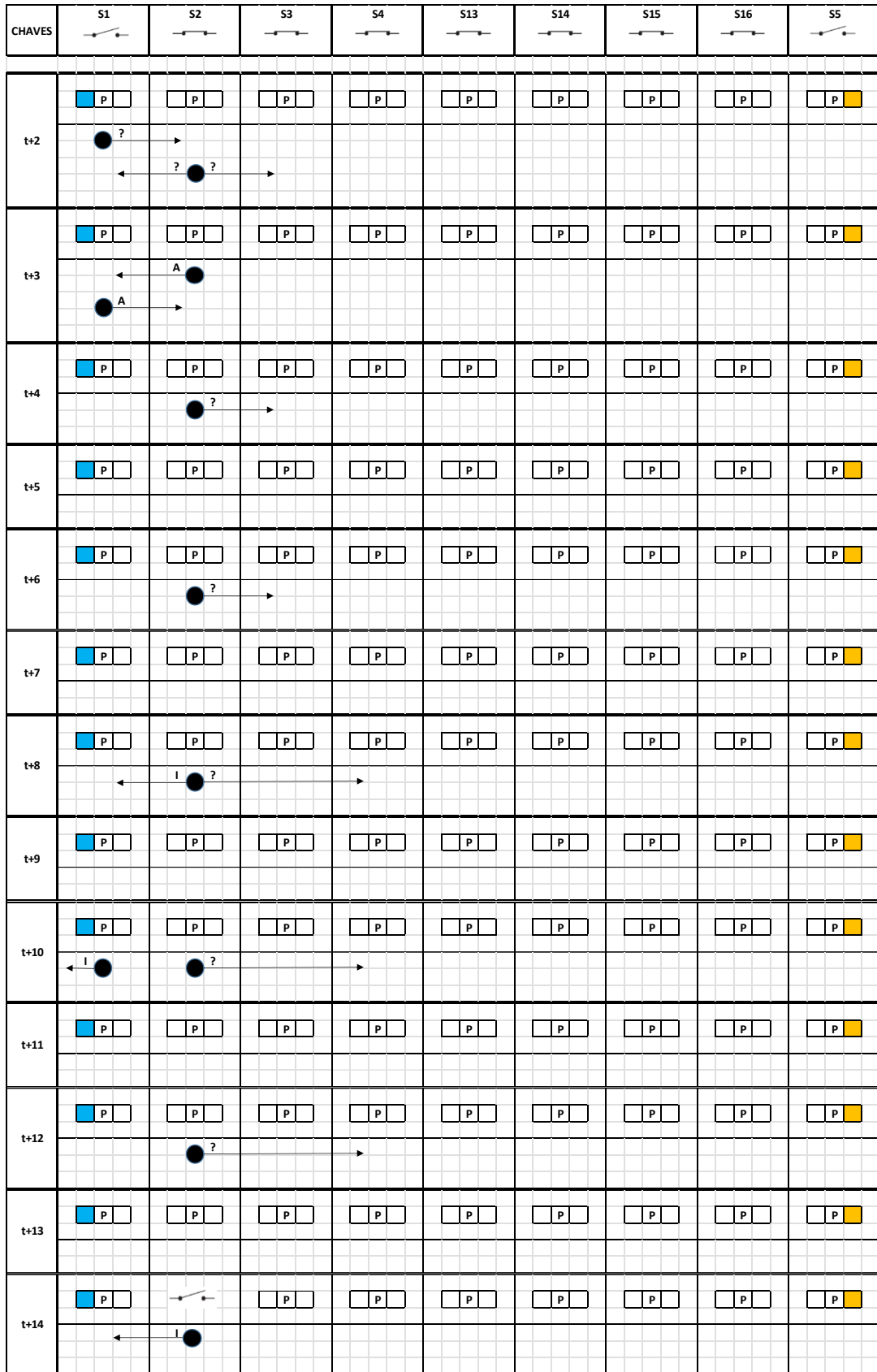


Figura 51. Ações operativas no sistema teste 4 nas condições pré-falta, em falta, de eliminação da falta, de localização da falta e do processo de isolamento, quando os agentes das chaves S3 e S4 apresentam problemas e S2 para realizar o isolamento da falta.

5.3 Sumarizando a Estrutura do Agente com as Regras deste Capítulo

Esta seção sumariza as principais ações do agente inteligente para o sistema de troca de mensagens proposto e para a Função de Retaguarda.

5.3.1 Sistema de Troca de Mensagens

No sistema de troca de mensagens proposto, a primeira parte das regras é para a composição da mensagem. A regra de montagem da mensagem funciona acionando um programa externo que faz a montagem da mensagem. A regra simplesmente entrega para este programa o grupo de agentes adjacentes que devem receber as mensagens e o tipo de mensagem, pela seguinte regra abaixo, na forma de linguagem corrente e na forma de regra:

- Necessitando enviar uma mensagem. Ação: selecionar o grupo de agentes adjacentes (1 ou 2), o tipo de mensagem que deve ser enviada e acionar programa externo de formação de mensagens.
 - Se necessita de uma mensagem então selecionar o grupo de agentes adjacentes (1 ou 2), o tipo de mensagem que deve ser enviada e acionar programa externo de formação de mensagens.

Como as trocas de mensagens podem ser demandadas por ações executadas nos Níveis 2 e 3, esta regra de composição de mensagens se encontra disponível no Nível 4 para ser acionada.

O programa externo compõe a mensagem e a escreve em uma determinada posição de memória. Dali, o sistema de comunicação se encarrega de enviá-la, de copiá-la no bloco de mensagens e de apagá-la desta posição de memória.

5.3.2 Sistema de Redundância de Comunicação

O sistema de redundância de comunicação proposto é acionado quando o sistema recebe uma mensagem. Existem aí três possibilidades, ele é o emissor da mensagem, ele é o receptor da mensagem ou a mensagem não é para ele. Isto é verificado pelos quatro primeiros dígitos da mensagem: dois primeiros representando o emissor e os dois seguintes o receptor. Então, por

um conjunto de regra simples de comparação, que se encontra no Nível 4, verifica a ação a ser tomada para cada possibilidade listada acima, respectivamente:

- Verificação os dois primeiros dígitos da mensagem e se forem iguais ao do próprio agente. Ação: classificá-la como emitida e verificar a integridade da mensagem.
 - Se os dois primeiros dígitos da mensagem e se forem iguais ao do próprio agente, então classificá-la como emitida e verificar a integridade da mensagem.
- Verificação o terceiro e quarto dígitos da mensagem e se forem iguais ao do próprio agente. Ação: classificá-la como recebida e verificar a integridade da mensagem.
 - Se o terceiro e quarto dígitos da mensagem e se forem iguais ao do próprio agente, então classificá-la como recebida e verificar a integridade da mensagem.
- Quando a mensagem não for classificada pelas regras anteriores. Ação: apagar a mensagem.
 - Se a mensagem não for classificada como emitida ou recebida, então apagar a mensagem.

5.3.3 Sistema de Verificação da Integridade Local

Em seguida, existem as regras de verificação da integridade local de mensagem, que também estão no Nível 4 e utilizam um programa externo de verificação da mensagem. Este programa recebe a classificação da mensagem (emitida ou recebida) e a própria mensagem. Ele verifica inicialmente se a soma de seus dígitos da mensagem fornece um número de dígitos iguais. Se não, a mensagem está corrompida e ele apaga a mensagem da posição de memória e o processo se finda. Se sim, a mensagem parece estar íntegra e ele verifica se a mensagem foi classificada como emitida ou recebida.

Caso a mensagem seja recebida, ele verifica se esta mensagem está no bloco de mensagens, se sim, o programa libera a mensagem para uso; se não, ele a coloca na posição da memória para envio pelo sistema de comunicação. Este, por sua vez, envia a mensagem, a copia no bloco de mensagens e a apaga desta posição de memória.

Caso a mensagem seja classificada como emitida, ele verifica se esta mensagem está no bloco de mensagens, se sim, ele a coloca na posição da memória para envio pelo sistema de comunicação. Este, por sua vez, envia a mensagem, copia no bloco de mensagens e apaga desta posição de memória. Caso não esteja no bloco de mensagens, a mensagem está corrompida e ele aciona o sistema para reemissão da mensagem.

Então, as regras de verificação da integridade local de mensagem são:

- Verificação da integridade local de mensagem e se a classificação for recebida. Ação: disponibilizar a mensagem para uso acionando seu conteúdo.
 - Se a classificação for recebida e a verificação da integridade local de mensagem for positiva então disponibilizar a mensagem para uso acionando seu conteúdo.
- Verificação da integridade local de mensagem negativa e se a classificação for emitida. Ação: colocar na posição de memória para envio da mensagem.
 - Se a classificação for emitida e a verificação da integridade local de mensagem for negativa então colocar na posição de memória para envio da mensagem.
- Verificação da integridade local de mensagem e se a classificação for emitida. Ação: colocar na posição de memória para reenvio da mensagem.
 - Se a classificação for emitida e a verificação da integridade local de mensagem for positiva então colocar na posição de memória para envio da mensagem.

Finalmente, quando uma mensagem for classificada como emitida e a sua verificação da integridade local de mensagem der negativa, ou seja, este é o caso em que o agente enviou a primeira mensagem, mas quando a recebeu para autenticá-la, ela estava corrompida. Então a regra necessita de um sistema de reemissão de mensagens:

- Verificação da integridade local de mensagem negativa e se a classificação for emitida. Ação: acionar o sistema de remissão de mensagens.
 - Se a classificação for emitida e a verificação da integridade local de mensagem for negativa então acionar o sistema de remissão de mensagens.

5.3.4 Sistema de Reenvio de Mensagens

Cada vez que o sistema emite uma mensagem (comando (C), pergunta (?), resposta (A) e informação (I)), ele tem em sua memória local uma estimativa do tempo de resposta que deve esperar por uma mensagem de retorno. Mensagens que são destinadas somente a um agente adjacente (como, por exemplo: “você viu a corrente de curto-circuito?”) têm um tempo inferior a uma mensagem que deve passar por vários agentes para que se tenha uma resposta (como, por exemplo, a capacidade remanescente do circuito). Esta consideração é importante pois possibilita que o agente venha a reemitir uma mensagem caso ele não tenha a mensagem de retorno dentro de um tempo estipulado.

Outro caso de necessidade de reenvio de mensagens é o relato acima, quando houver o recebimento de uma mensagem e esta for classificada como emitida e a sua verificação da integridade local de mensagem der negativa. Nestes dois casos, mesmo que diferente, necessitam da mesma ação, ou seja, o reenvio de mensagens.

As regras de reenvio de mensagem estão apresentadas a seguir:

- O tempo de recebimento da mensagem de retorno foi ultrapassado. Ação: reenviar a mensagem e incrementar o contador de reenvio.
 - Se o tempo de recebimento da mensagem de retorno foi ultrapassado, então reenviar a mensagem e incrementar o contador de reenvio.
- Verificação da integridade local de mensagem negativa e se a classificação for emitida. Ação: acionar o sistema de remissão de mensagens e incrementar o contador de reenvio.
 - Se a classificação for emitida e a verificação da integridade local de mensagem for negativa, então acionar o sistema de remissão de mensagens e incrementar o contador de reenvio.

5.3.5 Verificação de Chaves de Retaguarda

Esta verificação é importante pois só são consideradas chaves de retaguarda aquelas que estão no mesmo circuito da chave que apresenta problema. Sendo assim, esta definição está associada a configuração atual da rede elétrica, ou seja, para uma dada configuração uma chave pode ser chave de retaguarda, enquanto para outra configuração de rede pode não ser. Faz-se mister afirmar que a configuração da rede aqui mencionada é simplesmente realizada pela posição das chaves e não por intervenções físicas na rede (como novos ramais e chaves).

Este processo de verificação de chaves de retaguarda se inicia quando o contador de reenvio de mensagens chega a um valor máximo (previamente especificado). Daí, são verificadas as chaves adjacentes à chave que apresentou problema (informação que está na memória de cada agente e, no caso, também do agente controlador do processo). Neste ponto, ele ignora o agente da chave com problema e passa a enviar mensagens para os agentes adjacentes deste agente. A mensagem pode variar com o assunto que está em tela. Por exemplo, para o isolamento de um curto-circuito a pergunta poderia ser “está passando corrente por você?”. Ou em um processo de restabelecimento, em que a chave que abriu, isolou o curto e envia uma mensagem para a sua chave adjacente que não responde. Ela pode associar este mecanismo para saber que o próximo agente adjacente responde à mensagem “informar sua

corrente de pré-falta e qual é a capacidade remanescente?”. E o processo continuaria como se a chave com problema não existisse no sistema.

A regra de verificação de chaves de retaguarda tem a seguinte descrição:

- Como o agente adjacente não responde. Ação: enviar mensagem aos agentes adjacentes do agente adjacente.
 - Se o agente adjacente não responde, então enviar mensagem aos agentes adjacentes do agente adjacente.

Ao receber a resposta o agente deve inferir se o “novo” agente adjacente contactado é ou não uma chave de retaguarda. Isto ocorre de acordo com a resposta recebida. No primeiro exemplo, logo acima, se a resposta for “sim”, ou seja, está passando corrente pela chave, ela não é de retaguarda; caso contrário, ela é. No segundo exemplo, se a corrente de pré-falta for zero, e a chave está aberta então não se configura como chave de retaguarda e, sim, como chave de socorro.

E mais, o agente que comanda o processo deve também informar a sua subestação que a chave está com problema, então ele deve enviar uma mensagem ao agente do outro lado para que esta siga em direção ao agente da subestação, que se comunica com o Centro de Operação de Distribuição e com a equipe de manutenção. Esta regra é a seguinte:

- Como o agente adjacente não responde. Ação: enviar mensagem ao agente do outro lado informando do problema com a chave adjacente.
 - Se o agente adjacente não responde, então enviar mensagem ao agente do outro lado informando do problema com a chave adjacente.

5.3.6 Procedimentos com os “Novos” Agentes Adjacentes

Com o procedimento mostrado na seção anterior, se pode classificar os “novos” agentes adjacentes como de retaguarda, de outro circuito ou de socorro (as chaves que estão abertas isolando circuitos).

De posse dessa informação, os procedimentos de cada agente podem continuar a ocorrer de forma “normal”, ou seja, simplesmente descartando o agente com problema e executando as ações como se ele não existisse no sistema.

O procedimento só será alterado quando os agentes receberem uma mensagem do agente (anteriormente com problema) informando que voltou a operar corretamente. Esta mensagem

pode ser emitida pelo um comando dado pela equipe de manutenção que corrigir o defeito do agente.

5.4 Considerações Finais do Capítulo

Em qualquer tipo de sociedade (seja humana ou robótica) é necessário que se estabeleça alguns protocolos de comunicação, palavras e dicionários. Isto não é diferente nos MAS. Assim, este capítulo apresentou uma proposta para a troca de mensagens entre os agentes. Ela contém informações sobre o agente emissor, sobre o agente receptor, o tipo de mensagem, dígitos para o envio de um número (caso necessário) e dois dígitos para uma validação local da mensagem.

Esta caracterização de agente emissor e agente receptor é importante, pois as mensagens são emitidas na forma de *broadcasting*. Assim, qualquer agente próximo fisicamente (não necessariamente eletricamente) pode receber a mensagem. Então, a primeira coisa que o agente deve fazer é saber se ele é o destinatário daquela mensagem. Se não for, simplesmente ele ignora a mensagem. Este fato é importante, pois um dos fundamentos da lógica proposta é que a comunicação só se estabelece entre agentes adjacentes. E se for, ele estabelece a comunicação com o agente emissor, dando origem a uma segunda parte da troca de mensagens.

A segunda parte da troca de mensagens se inicia com a verificação da veracidade da mensagem através de um esquema de soma dos dígitos que deve dar sempre um número de dois algarismos iguais. Em seguida, o agente receptor envia a mesma mensagem para o agente emissor. Este, ao recebê-la, a valida novamente, a compara com a sua mensagem prévia e se for igual, envia novamente a mensagem. Quando o agente receptor recebe esta segunda mensagem, a valida e compara com a anterior, se for igual, ele começa seu processo de tomada de decisão com base nela.

Neste capítulo também foi apresentada a Função de Retaguarda. Esta função é acionada quando um agente não responde corretamente a uma troca de mensagens. A função de retaguarda, aqui proposta, é mais abrangente do que o conceito de retaguarda existente na proteção convencional, pois envolve não só a proteção, mas também a operação.

Nela são consideradas como retaguarda não só chaves a montante (como na proteção convencional), mas também as chaves a jusante. O agente da chave de retaguarda a montante é utilizado quando o agente da chave que deveria comandar o processo não atua corretamente; enquanto as chaves a jusante são de retaguarda quando o agente da chave adjacente ao agente

que comanda um determinado processo apresenta problema. Isto faz com que na memória local de cada agente, quando na sua instalação ou da expansão da rede, devam ser colocadas as chaves adjacentes a ele e as chaves adjacentes as suas chaves adjacentes.

6 Procedimentos para as Funções relativas à Resposta à Demanda

Este capítulo apresenta funções propostas para o agente inteligente que estão ligadas à carga e ao seu comportamento horário, ou seja, funções que estão ligadas ao que modernamente se convencionou chamar de “resposta à demanda” (da carga).

Inicialmente são propostas duas funções, a saber: de Sobrecarga e de Subtensão. Estas funções podem vir a ocorrer por um carregamento expressivo da rede elétrica, seja pela própria carga, seja por algum de seus elementos que ficou indisponível, refletindo assim em cargas maiores que as nominais dos equipamentos.

Em seguida, são apresentadas mais duas funções: de Corte de Carga e de Priorização de Cargas. A Função de Corte de Carga está relacionada com as duas funções anteriores, pois só é acionada quando a integridade da rede está em risco, normalmente em altas sobrecargas ou em grandes afundamentos de tensão permanentes. A Função de Priorização de Cargas é aquela que classifica as cargas mais importantes e que, se possível, devem ser cortadas somente em último caso.

Finalmente, é apresentada a Função de Evolução da Carga, que é necessária estar presente no agente inteligente, pois as suas ações não devem somente contemplar a carga atual, mas a carga futura (nas próximas horas). Para que isto venha a ocorrer é necessário que ele estabeleça ações levando em consideração esta evolução da carga (que pode ser positiva – determinando um aumento, ou negativa – determinando sua diminuição).

6.1 Função de Sobrecarga

Com a evolução normal da carga, mesmo a rede sem contingências, podem vir a ocorrer sobrecargas na rede. Elas devem ser analisadas quanto ao seu tempo de permanência, pois uma sobrecarga se apresenta na maioria das vezes através de uma sobrecorrente. É sabido que uma sobrecorrente causa problemas aos equipamentos por efeitos térmicos. Assim, para que eles aconteçam é necessário decorrer em um certo período. O malefício de uma sobrecorrente industrial (ou seja, permanente e a 60 Hz) é sempre uma relação de intensidade de corrente *versus* o tempo de exposição do equipamento. Desta forma, uma função que possa auxiliar neste processo de análise é desejável.

A Função de Sobrecarga teria a missão de verificar se os equipamentos poderiam ser afetados quando da presença de uma sobrecorrente e, principalmente, determinar quando a rede deve ser alterada por causa dela. Esta função faz uso dos resultados da Função de Evolução da Carga, para saber como a carga vai evoluir e impactar os equipamentos do sistema.

A Função de Sobrecarga é acionada por uma ação do Nível 3, de Trabalho Anormal, do agente e existem algumas formas disto ocorrer.

6.1.1 Acionamento através do Nível 2

A primeira forma de a Função de Sobrecarga ser acionada é quando, ao ler a corrente atual da chave, a regra do Nível 2 a compara com a corrente máxima de chave e verifica que ela é maior do que a capacidade nominal da chave. Se não for, nenhuma ação é tomada. Se sim, a regra do Nível 2 aciona um conjunto de regras no Nível 3, colocando o agente em modo de Trabalho Anormal. Este nível por sua vez aciona a Função de Sobrecarga, que se encontra no Nível 4.

Somente uma lembrança antes de continuar, a corrente atual já foi verificada antes pelas regras do Nível 1 para saber se ela é uma corrente de curto-circuito. Se for o caso, a regra do Nível 2 nem é ativada.

Continuando, a Função de Sobrecarga ao ser acionada verifica em qual estágio de sobrecarga se encontra esta corrente. Propõe-se neste trabalho dois valores percentuais de sobrecarga, definindo três estágios de sobrecarga, a saber:

- valor percentual de sobrecarga 1 – que define o primeiro estágio de sobrecarga (que vai da corrente máxima até a corrente máxima mais o valor percentual 1), onde ele, mesmo não sendo desejado, pode deixar ocorrer por um tempo indeterminado; e
- valor percentual de sobrecarga 2 – que define os dois próximos estágio, que são: segundo estágio – aquele que vai da corrente máxima mais o valor percentual 1 até a corrente máxima mais o valor percentual 2, e o terceiro estágio – os valores superiores ao da corrente máxima mais o valor percentual 2.

No segundo estágio, a corrente pode se manter por um tempo determinado, sem que o agente solicite nenhuma ação. A ação só é tomada se este tempo for excedido. De esta forma o valor percentual de sobrecarga 2 deve ser acompanhado de um valor de tempo. Todos estes valores são colocados no agente quando de sua implantação em campo.

No terceiro estágio, a corrente atual apresenta um valor superior ao aceitável e uma ação deve ser tomada de imediato.

A ação do segundo estágio, quando excedido o tempo máximo de sobrecarga, e do terceiro estágio é a mesma; ela aciona a Função de Corte de Carga, que será vista um pouco mais a frente neste capítulo.

6.1.2 Acionamento através do Nível 3 durante uma Restauração

O acionamento da Função de Sobrecarga também pode ser feito durante um processo de restauração de uma rede após, por exemplo, um curto-circuito.

Suponha o primeiro exemplo, apresentado na seção 4.3.1, que utiliza o sistema teste 1, Figura 12. Nele ocorreu um curto-circuito entre os agentes 3 e 4, com seu isolamento feito através da abertura dessas chaves. Com isto, o ramal entre as chaves S4 e S5 ficou sem energia e com uma carga de pré-falta de 20A. Como a capacidade remanescente do circuito 2 era de 30A, o agente da chave S5 pode fechar sem causar sobrecarga ao circuito 2.

Assuma agora uma mudança neste exemplo, onde a carga de pré-falta ao invés de 20A seja de 40A. Se a capacidade remanescente do circuito 2 permanecer de 30A, o agente S5 deveria conhecer, além da capacidade remanescente do circuito, as faixas de seus agentes (no exemplo, S6, S7, S8 e S9) para poder saber qual a sua real capacidade de auxílio ao circuito com problema. Para isto, o agente da chave S5 que inicia o processo de consulta ao seu sistema por ter tensão de um lado da chave e não ter do outro, deveria não só indagar sobre a capacidade remanescente de cada agente (chave), mas também de seus dois valores percentuais de sobrecarga, com a finalidade de saber ao final a capacidade remanescente do circuito com suas faixas de sobrecarga. Como proceder a este cálculo será apresentado na próxima seção. Contudo, pode-se assumir neste momento que a capacidade remanescente do circuito seja 30A e que a primeira faixa vá até 12A e a segunda vá até 18A. Com isto, a chave S5 ao fechar pode causar uma sobrecarga, mas que vai estar ainda na faixa 1, pois 30A estão na capacidade remanescente e os 10A restante (para perfazer 40A) estão ainda na faixa 1, que permite um tempo indefinido de funcionamento.

Este cálculo extra da capacidade remanescente do circuito deve substituir o cálculo anteriormente apresentado. Em verdade, é o mesmo cálculo (ou seja, o mesmo procedimento) somente que ao invés de comunicar um valor de capacidade remanescente, são comunicados este valor e mais os valores das faixas.

Estas regras por serem da Função de Restabelecimento estão no Nível 3 do agente inteligente.

6.1.3 Obtenção das Faixas de Sobrecarga de um Circuito

A melhor forma de apresentar este cálculo de obtenção das faixas de sobrecarga de um circuito é através de um exemplo. Então, seja novamente o sistema teste 1, mas com as condições operacionais descritas na Figura 52. Nela podem ser observados: valores entre colchetes que são as correntes nas chaves (e em S4 a corrente pré-falta, carga a ser suprida do ramal entre S4 e S5); e entre chaves os valores da capacidade remanescente, o valor limite da primeira faixa de sobrecarga em A e o valor limite da segunda faixa em A. Então, nesta figura, a chave do agente S6 tem passando por ela 10A, uma capacidade remanescente de 40A (levando a conclusão que sua capacidade nominal é de 50 A), seu valor limite da primeira faixa de sobrecarga de 55 A (levando a conclusão de que a percentagem de sobrecarga da chave é de 10%) e seu valor limite da segunda faixa de 75A (concluindo-se que seu segundo limite é de 50%).

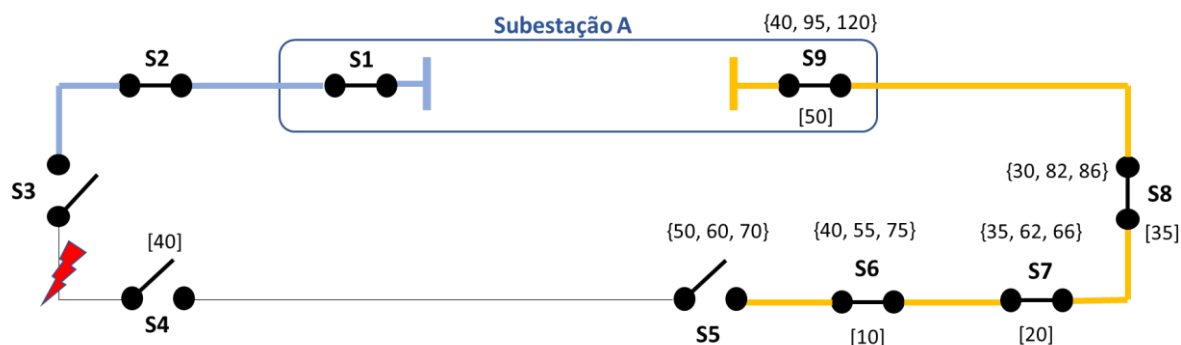


Figura 52. Sistema teste 1, com cargas mais elevadas.

O cálculo dos dois valores das faixas para o circuito é feito da mesma forma que o da capacidade remanescente do circuito, ou seja, por comparação e tomando-se o menor valor entre todos os elementos remanescentes do circuito. Desta forma, os valores utilizados para comparação são os valores remanescentes para o limite da faixa 1 e da faixa 2. Estes valores são obtidos pela diferença entre o valor atual menos a corrente atual da carga. No caso, para a chave S6 os seus valores remanescentes são 45A (= 55-10) e 65A (= 75-10), para os limites da

faixa 1 e da faixa 2, respectivamente. Fazendo-se estes cálculos para cada uma das chaves obtém-se como limite da faixa 1: 60A, 45A, 42A, 47A e 45A; e para a faixa 2: 70A, 65A, 46A, 51A e 70A, para as chaves S5, S6, S7, S8 e S9, respectivamente. Estes valores estão representados na Figura 53, para facilidade de visualização.

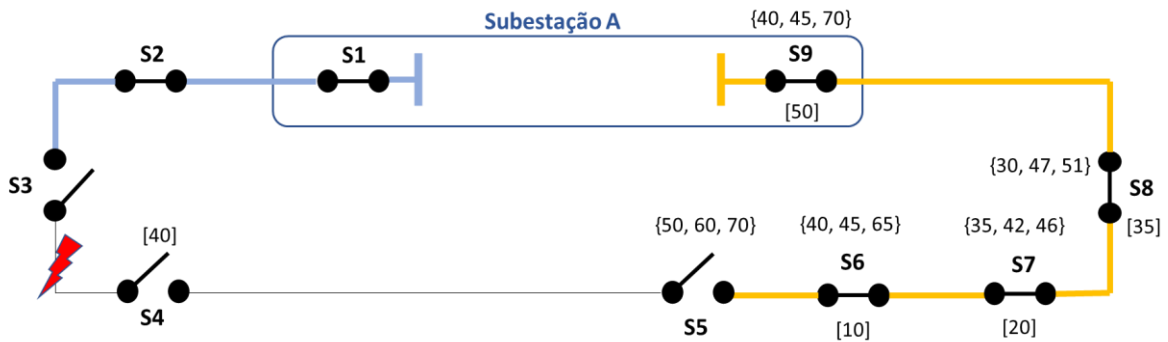


Figura 53. Sistema teste 1, com cargas mais elevadas, com representação da capacidade remanescente de cada chave do circuito de socorro e da capacidade remanescente para as faixas 1 e 2 de sobrecarga.

Assim, observando-se os valores do circuito 2, encontra-se para a capacidade remanescente do circuito o valor de 30A (menor valor entre 50A, 40A, 35A, 30A e 50A), para a capacidade remanescente do limite da faixa 1 o valor de 42A (menor valor entre 60A, 45A, 42A, 47A e 45A) e para o limite da faixa 2 o valor de 46A (menor valor entre 70A, 65A, 46A, 51A e 70A). Assim, após fechar a chave S5, a carga de 40A do ramal entre S4 e S5 vai ser suprida pelo circuito 2, ficando a configuração do sistema conforma mostrado na Figura 54, e espera-se que uma (ou algumas) das chaves deste circuito estejam operando na faixa 1 de sobrecarga.

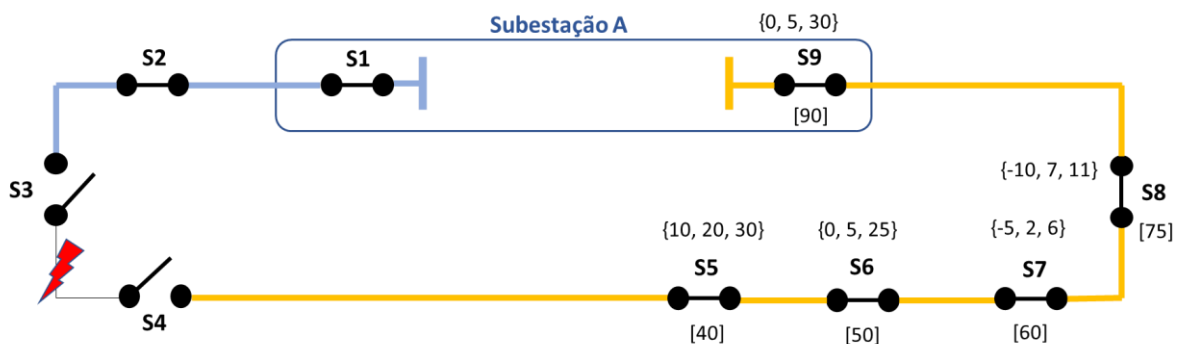


Figura 54. Sistema teste 1, restabelecido pelo circuito 2 para uma carga de 40A.

Nota-se que com este suprimento deste novo ramal, as chaves do circuito 2, obviamente, mantiveram seus limites das faixas de sobrecorrente e as suas capacidades remanescentes foram alteradas. No exemplo, a chave S5 ainda tem uma capacidade remanescente de 10A, as chaves S6 e S9 não têm mais nenhuma capacidade remanescente e as chaves S7 e S8 já estão na primeira faixa de sobrecarga.

Pode-se agora somente por exercício criar uma situação análoga à apresentada acima, mas onde a carga a ser suprida fosse de 45A (e não mais de 40A). Observando-se os valores da capacidade remanescente do circuito 2 (30A) e das capacidades remanescentes dos valores limites de sobrecarga (42A e 46A), ao suprir novo valor de carga a sobrecarga no circuito estará na faixa 2. E ainda, continuando este exercício, se a carga fosse de 50A, o circuito 2 se fechasse a chave S5 entraria imediatamente na faixa 3, pois, pelo menos, uma de suas chaves estaria nesta faixa.

Desta forma, verifica-se que para o valor de 40A, a chave S5 pode fechar e o circuito 2 continuar a operar indefinidamente (pois está na faixa 1). Para o valor de 45A, a chave S5 pode fechar, mas como, pelo menos, uma chave está na faixa 2, existe um tempo finito para esta alimentação. Finalmente, para o valor de 50A, a chave S5 não pode fechar, pois colocaria, pelo menos, uma das chaves do circuito 2 na faixa 3 de sobrecarga.

6.1.4 Procedimento da Função de Sobrecarga

Conforme relatado anteriormente, a sobrecarga em um agente pode ser classificada em três faixas, nas quais: na primeira nada precisa ser feito; na segunda, deve-se esperar um tempo definido para acionar a Função de Sobrecarga; e, na terceira, esta função deve ser acionada imediatamente.

A Função de Sobrecarga está situada no Nível 4 do agente inteligente e é formulada para manter a integridade física dos componentes do sistema elétrico. Desta forma, ela deve reduzir a carga. Para isto, ela coordena o acionamento de duas outras funções, a saber: de Corte de Carga e de Priorização de Carga que serão vistas mais a frente neste capítulo.

6.2 Função de Subtensão

A subtensão nas redes urbanas de distribuição ocorre quando os reguladores de tensão da subestação ou aqueles espalhados na rede não conseguem ajustar o perfil de tensão ao longo do circuito. Normalmente, isto ocorre quando se tem uma carga muito alta. A subtensão pode causar alguns problemas aos clientes e aos equipamentos da rede, como aumento da corrente em certas cargas e desligamentos de processos industriais (gerenciados por Controladores Lógicos Programáveis – CLPs). Assim, a existência de uma função no agente que pode auxiliar a operação neste processo é importante.

Esta função, como dito, está ligada a um consumo da carga, então pode ser mitigada pelo corte de carga. Obviamente, não é qualquer subtensão que deve levar ao corte de carga. A função precisa analisar a carga atual, a evolução da carga e onde poderia vir a acontecer o chaveamento. Elementos como cargas prioritárias, cargas dos ramais e circuitos de socorro devem ser incluídos na análise quando a função decide que deve haver um corte de carga.

Nela também deve existir a possibilidade de não efetuar nenhuma ação, mesmo que o corte de carga seja sugerido. Isto pode vir a ocorrer quando ocorrer uma subtensão no exemplo da Figura 30 (sistema teste 3), onde não existem circuitos de socorro. Deste modo, a Função de Subtensão deve decidir o melhor cenário entre manter a subtensão em alguns ramais, mantendo toda a carga alimentada, ou abrir algumas chaves (cortando carga) e restaurar a tensão para níveis suportáveis.

Esta Função de Subtensão vai estar no Nível 4 do agente inteligente, por ser um processo de otimização, e deverá acionar a memória do agente com informações sobre os limites operacionais de subtensão para seus ramais, definidos por estudos anteriores e pelas regras da ANEEL.

Esta função não é alvo de estudo deste trabalho, pois para que houvesse medição da tensão para se conhecer o percentual de subtensão seria necessário um dispositivo que medisse o valor da tensão. O dispositivo de tensão proposto no agente inteligente deste trabalho simplesmente verifica se existe ou não tensão, sem medir seu valor. Contudo esta função teria características semelhantes a Função de Sobrecarga, podendo ser acionada por regras nos níveis 2 e 3 do agente.

6.3 Função de Corte de Carga

A função de corte de carga é aquela que deve ser acionada quando um circuito não consegue suprir a carga total que ele está alimentando. Isto pode ocorrer por diversos fatores, tais como um restabelecimento após um curto-circuito ou o próprio aumento da carga ao longo do dia. Esta função, normalmente, é acionada pela Função de Sobrecarga (como no agente proposto), mas ela poderia ser acionada por outros mecanismos (ou funções) existentes no agente. Um exemplo disto, seriam políticas de operação de rede elétrica, que definiriam procedimentos operacionais, por exemplo, para manobras e desligamentos programados.

A Função de Corte de Carga, no caso do agente proposto, visa então eliminar a sobrecarga, retirando-a na faixa 2 (ou faixa 3) e passando para o limite da faixa 1. Com isto, observa-se que, na implementação proposta, esta função não elimina a sobrecarga, mas somente a reduz. Isto foi concebido desta forma, pois como já descrito anteriormente os equipamentos podem trabalhar de forma contínua sem sofrer danos e, como as redes normalmente já estão operando no seu limite, os ramais que ficarão sem energia podem ser reduzidos. A este valor de redução da sobrecarga dá-se o nome de montante de corte de carga.

6.3.1 Acionamento Inicial da Função pelo Agente em Sobrecarga

Como dito acima, a Função de Corte de Carga de um agente é acionada pela Função de Sobrecarga, quando esta classifica a sobrecarga na faixa 2 (cumprido um certo tempo de espera) ou na faixa 3 (de forma imediata).

A primeira ação da Função de Corte de Carga é verificar com os agentes adjacentes dos times 1 e 2 para onde a energia está fluindo. Isto é feito através da soma das correntes dos agentes do time 1 e da soma dos agentes do time 2, aquele time que apresenta menor valor desta soma é onde o agente vai buscar cortar carga.

Neste momento, o agente verifica se ele mesmo deve fazer o corte de carga, ou seja, se ele mesmo deve abrir sua chave. Isto ocorre quando a soma das correntes do time em que se busca o corte de carga é inferior ao montante corte de carga que se deseja.

Um exemplo numérico deste caso pode ser visto no sistema teste 4 apresentado agora com a configuração da Figura 55. Suponha que a chave do agente S13 está em sobrecarga e que a sua Função de Corte de Carga foi acionada. Ela verificou que o montante de corte de carga

(#) a ser feito é 50A. Com isto, questionou os agentes do time 1 (S14 e S16) e do time 2 (S5), verificando que a energia flui de S5→S13→S14-S16, pois a somatório a das correntes de carga (entre colchetes) do time 1 é 45A (=25+20) e do time 2 é de 70A. Ora, mesmo abrindo as chaves S14 e S16, o alívio da sobrecarga seria de apenas 45A, mas se necessita 50A. Com isto, deve-se abrir a própria chave do agente S13 para que se possa proceder este alívio.

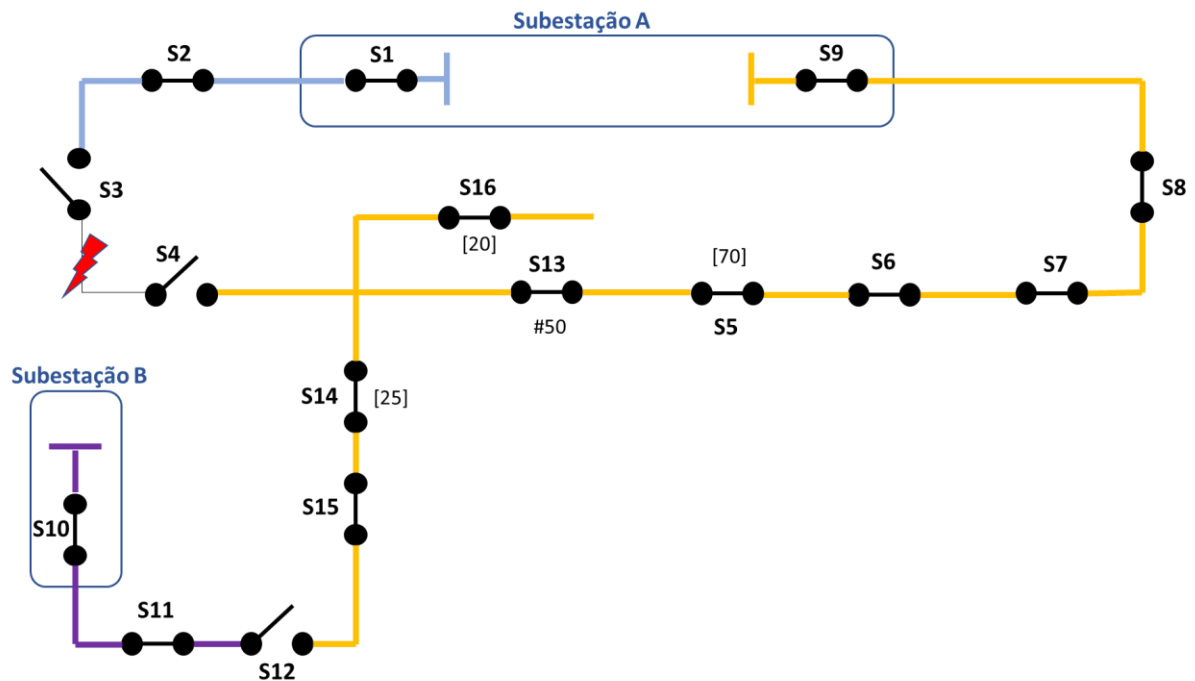


Figura 55. Sistema teste 4, com sobrecarga na chave S13, com montante de corte de carga de 50A.

6.3.2 Prosseguimento da Atuação da Função de Corte de Carga

Caso não ocorra a abertura da própria chave que se encontra em sobrecarga, isto denota que o sistema possa vir a ter um corte de carga reduzido. Atingida esta fase, o agente que sentiu a sobrecarga envia um comando para os agentes do time que ocorrerá corte de carga, junto com o montante de corte de carga, para que eles possam auxiliar neste processo.

Ao receber este comando, o agente da chave do time de corte de carga verifica se existe outra chave neste time, se não, ela deve verificar a possibilidade de corte de carga próprio ou por outro time; se sim, ocorrerá uma disputa para saber quem deve abrir e auxiliar no processo de corte de carga.

No primeiro caso em que existe apenas um agente no time, ele faz o mesmo procedimento inicial relatado na seção anterior, ou seja, verifica se ele deve abrir a sua chave e ele mesmo efetuar o corte de carga. O procedimento inicial de cada agente é o mesmo sempre.

No segundo caso, ocorre uma disputa entre agentes, ou seja, dois ou mais agentes receberam o comando de corte de carga. Este comando de corte de carga é de disputa (ou seja, comando de corte de carga de disputa), que é diferente do comando de corte de carga anterior.

No comando de corte de carga de disputa, o procedimento inicial é feito, mas só que em conjunto entre os agentes que recebem este sinal de disputa. Os procedimentos deste comando estão relatados a seguir para diversos valores do montante de corte de carga. Assume-se nestes exemplos a carga de 15A na chave do agente S15.

Os exemplos a seguir mostram patamares de corte de carga em redes sem e com auxílio de um circuito de socorro.

a) Montante de Corte de Carga de 12A, sem auxílio de outro circuito

Com este valor de montante de corte de carga a abertura de qualquer das chaves dos agentes (S14 ou S16) eliminariam a sobrecarga, mas elas consultam os agentes do outro time para saber se existe um corte de carga melhor (ou seja, com menor valor). O agente da chave S16 não tem outra chave, então ela vai para a disputa com seu valor de 20A. Além disto, o seu outro time (ou, no caso, a falta dele), também não apresenta nenhum circuito de socorro. Este fato pode interferir na disputa também. Ela então envia um sinal para S14 com o seu valor de corte de carga, porém com valor de -20A. O valor do sinal denota que não existe circuito de socorro e fica esperando a resposta de S14 para tomar uma decisão.

O agente da chave S14 verifica com o agente de chave S15 seu valor de corrente que no caso é de 15A e que este é maior do que o montante de corte de carga; assim, S14 envia um comando de corte de carga de disputa para S15.

O agente S15 verifica que ele pode satisfazer o corte de carga e verifica os agentes do outro time (no caso, o agente S12, que é uma chave separadora de circuitos). Então, o agente S15 pergunta ao agente S12 a sua capacidade remanescente.

Ao receber esta pergunta, o agente da chave S12 efetua o procedimento descrito na seção 4.3.1 deste documento sobre o cálculo da capacidade remanescente de um circuito. A resposta de S12 a S15 pode levar a dois procedimentos distintos dependendo do seu valor. Se a resposta for 15A ou um valor superior, significa que a carga que passa pelo agente S15 pode ser assumida pelo circuito 3 (em roxo, com a abertura da chave S15 e fechamento da chave S12). Se a

resposta for inferior a 15A, é como se não houvesse um circuito de socorro, pelo menos no momento).

Neste item, descreve-se um exemplo sem auxílio de outro circuito, ou seja, este é o caso de a resposta ser inferior a 15A. Assim, o agente S15 envia uma resposta para S14 com a sua capacidade de corte de carga com sinal negativo (no caso, -15A – lembrando que o sinal negativo informa que não existe circuito de socorro, pelo menos no momento).

Ao receber este sinal de S15, o agente S14 o repassa a chave S16. Em seguida, o agente S14 que já recebeu a informação de S16 (-20A), compara os valores: -15A (vindo de S15), -20A (vindo de S16) e 12A (do montante de corte de carga), ele concluiu que o corte de -15A é a melhor situação; então envia um sinal para o agente S15 informando que a chave que informou -15A deve abrir e encerra seu procedimento,

O agente S15 ao receber o comando de abrir enviado pelo agente S14, verifica se foi dele a informação de -15A, se não, repassa para os agentes do outro time; se sim (como é o caso deste exemplo), ele abre sua chave, ficando o ramal S15-S12 sem energia.

O agente S16 ao receber a informação de S14, compara os valores: -20A (próprio), -15A (vindo de S14), e 12A (do montante de corte de carga); chegando à conclusão que existe uma corte de carga melhor que a abertura de sua chave e encerra o processo.

A Figura 56 ilustra temporalmente a execução da Função de Corte de Carga deste exemplo. No instante t , o agente S13 percebe que o tempo máximo de permanência na sobrecarga faixa 2 (ou que a faixa 3 de sobrecarga) foi atingido. Daí envia perguntas para os agentes dos dois times adjacentes (time 1: S4, S14 e S16; e time 2: S5) para saber suas cargas. No instante $t+1$, ocorre a resposta desses agentes e o agente S13 infere duas coisas. Primeiro, que a soma das correntes ($45A = 25 + 20$) é maior do que a sobrecarga a ser eliminada (#12A), fazendo do que o corte de carga possa ser feito por outra(s) chave(s); e, segundo, que o time 1 é que pode auxiliar no processo de corte de carga.

Antes de continuar esta explanação, cabe ressaltar que na descrição acima o agente S4 não foi incluído simplesmente para deixar mais clara a explicação. A chave do agente S4 está bloqueada devido ao curto-circuito e seu retorno sempre é -999A, denotando este estado operativo e que este valor não entra nos cálculos. Aqui, ela será descrita para deixar o exemplo completo, pois recebe e envia sinais.

No instante $t+2$, o agente S13 envia um comando de corte de carga de disputa (junto com o valor do montante de corte de carga) para os agentes de seu time 2. No instante $t+3$, os agentes S4, S14 e S16 processam este comando e este valor e ainda neste instante: (a) S4 envia uma informação para S14 e S16 informando que está bloqueada (valor -999); (b) S14 repassa

o comando de corte de carga para o seu outro time (agente S15); e (c) S16 informa a S4 e S14 que entrará na disputa com o valor de -20A (sua carga e com valor negativo, denotando não haver circuito de socorro).

No instante $t+4$, o agente S15 repassa o comando de corte de carga para o seu outro time (agente S12). Nos instantes $t+5$, o agente S12 cujo a chave está aberta e recebe este comando, verifica que deve verificar a capacidade remanescente do circuito, o que ocorre até o instante $t+9$. Ao receber esta informação, no instante $t+10$, o agente S15 infere que ela é inferior à sua carga atual e repassa sua resposta (que é de -15A, 15 relativo à carga atual e sinal negativo por não ter circuito de socorro) ao agente S14.

No instante $t+11$, o agente S14 envia a informação aos agentes S4 e S16 sobre o seu valor de disputa (-15A); em seguida, infere que o valor de 15A é superior ao valor de 12A e inferior ao valor de 20A (S16) e 999A (S4), enviando um comando para o agente S15 para abertura da chave que produziu o valor de -15A.

No instante $t+12$, o agente S4 recebe a informação, mas não infere nada, pois sua chave está bloqueada; o agente S16 verifica que ele perdeu a disputa (pois $20 > 15 > 12$, pois existia um outro agente que poderia cortar uma quantidade menor de carga); e o agente S15 verifica que 15A é a sua corrente de carga e que sua chave deve abrir, chegando-se à configuração do circuito teste 4, mostrado na Figura 57.

Porém, deve-se ressaltar aqui que com a abertura de S15, o ramal S12-S15 ficará sem energia (15A). Isto faz com que as regras de agente S12 sejam acionadas para tentar suprir de energia este ramal. Na verdade, S15 envia novamente sua carga (15A) ao agente S12, ele irá novamente verificar a capacidade remanescente no circuito e inferirá que não é possível alimentar o ramal sem energia.

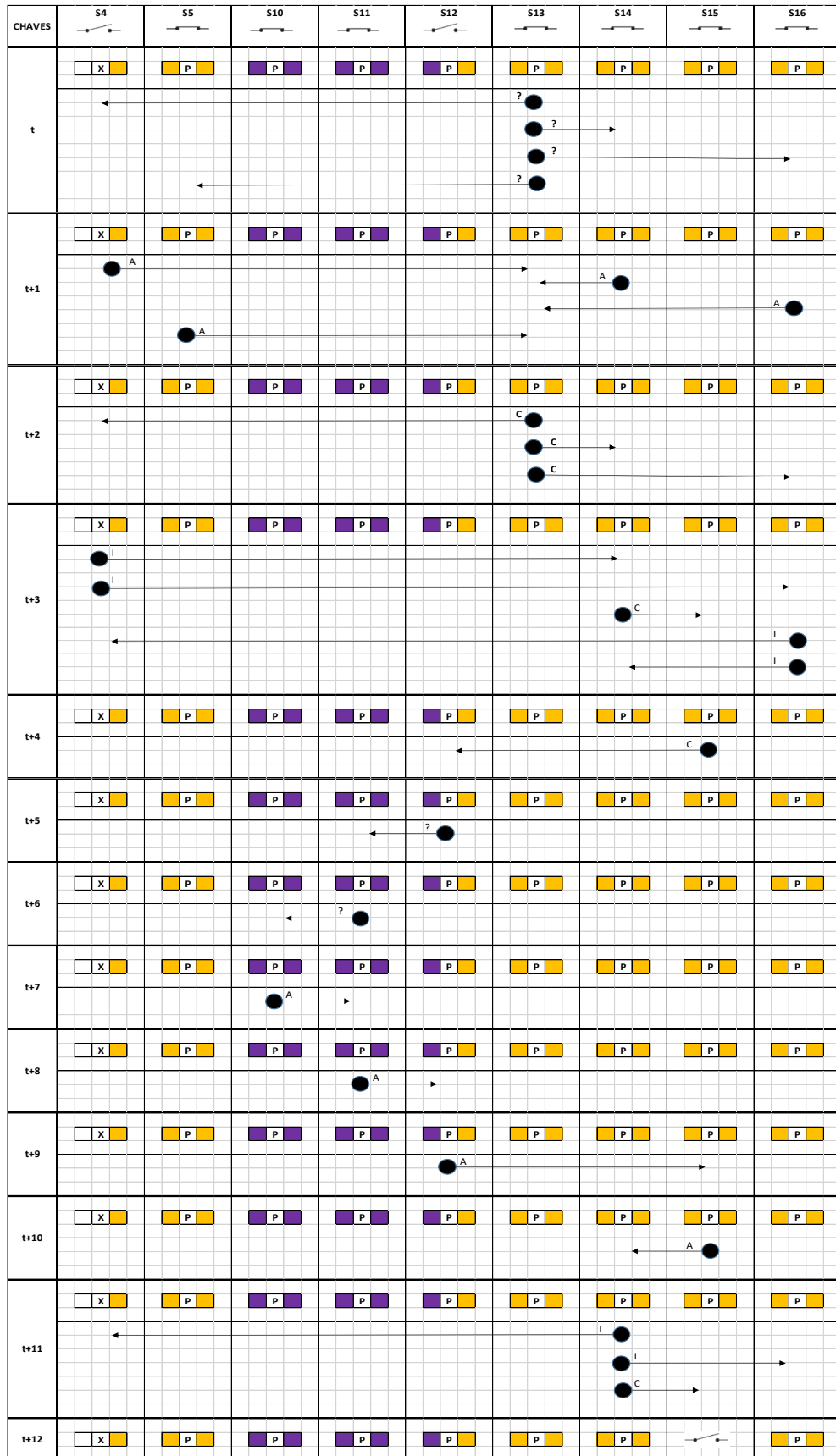


Figura 56. Ações operativas no sistema teste 4, com sobrecarga na chave S13, com montante de corte de carga de 12A, sem circuito de socorro.

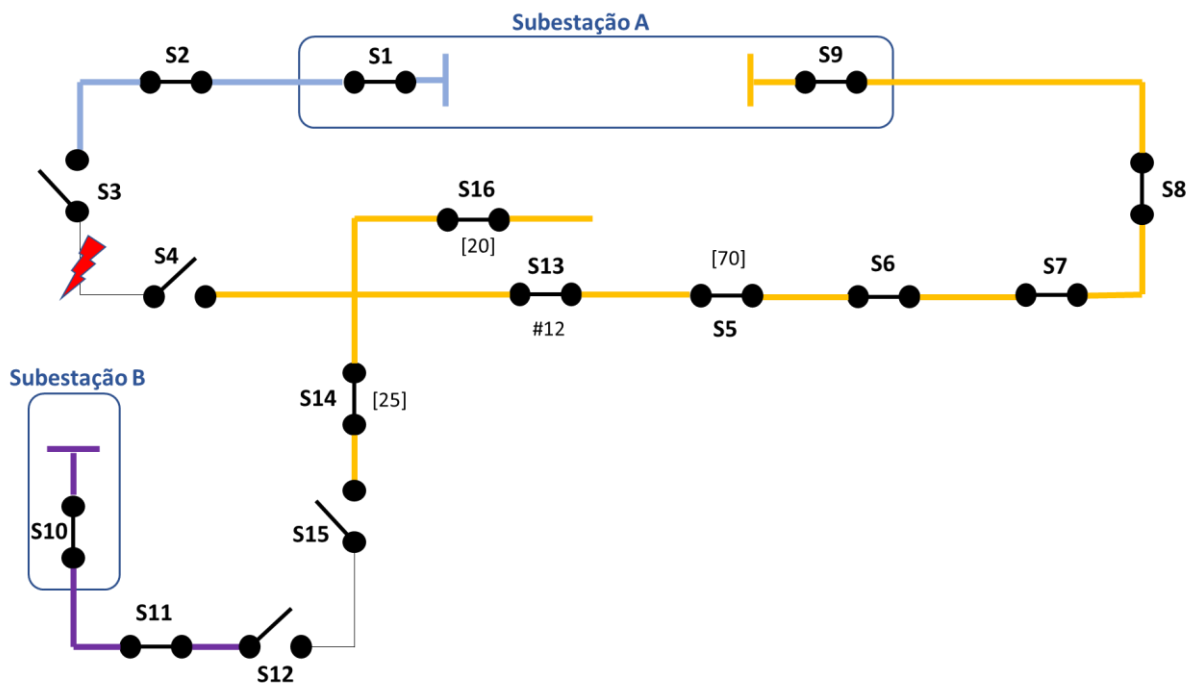


Figura 57. Sistema teste 4, após a eliminação da sobrecarga de 12A na chave S13, com montante de corte de carga de 15A.

b) Montante de Corte de Carga de 18A, sem auxílio de outro circuito

Utilizando a Figura 55, mas com o valor de montante de corte de carga de #18A, verifica-se que a abertura de qualquer das chaves dos agentes (S14 ou S16) eliminaria a sobrecarga. Da mesma forma mostrado no item anterior, elas consultam os agentes do outro time para saber se existe um corte de carga com menor valor. O agente da chave S16 não tem outra chave, então ela vai para a disputa com seu valor de -20A. O agente S14 verifica com o agente de chave S15 seu valor de corrente que no caso é de 15A e que este é menor do que o montante de corte de carga; mesmo assim, S15 continua o processo, não mais para saber o valor, mas para descobrir o sinal. Assumindo o mesmo caso que no item anterior (capacidade remanescente do circuito 3 menor do que 15A), ele informa o valor de -15A ao agente S15.

O agente S14, ao receber o valor -15A de S15, infere que o seu valor de disputa é de -25A. Assim, envia este valor a S16 e como já recebeu o valor de -20A (de S14), infere que não deve fazer nada, pois $25 > 20 > 18$, existindo assim uma outra chave que poderá cortar menos carga. O agente S16 ao receber o valor de -25A (de S14), infere que ela deve abrir, pois ($25 > 20 > 18$) ela é a chave que cortará o menor de carga.

Na configuração final, o ramal depois de S16 (agora aberta) ficará sem energia, resultando em 20A de corte de carga e mitigando a sobrecarga de S13.

c) Montante de Corte de Carga de 38A, sem auxílio de outro circuito

Utilizando ainda a configuração da Figura 55, mas com o valor de montante de corte de carga de #38A, verifica-se que a abertura de apenas uma das chaves dos agentes (S14 ou S16) não eliminaria a sobrecarga. Os procedimentos dos agentes são os mesmos relatados nos dois exemplos anteriores. O agente da chave S16 não tem outra chave, então ela vai para a disputa com seu valor de -20A. O agente S14 verifica com o agente de chave S15, que lhe retorna um valor de -15A (ou seja, sua carga e sem circuito de socorro). Com isto, S14 entra na disputa com o valor de -25A, que é repassado ao agente S16.

O agente S14 continua seu processo de inferência em nota que o montante de corte de carga é maior que sua carga e da carga do agente S16 ($38 > 25 > 20$), então ele infere que ele deve abrir pois somente com a soma das cargas é de o valor do montante de corte de carga será (igualado ou) ultrapassado, ou seja, $25 + 20 > 38$. Então a chave do agente S14 abre.

O agente S16 ao receber o valor de S14 (-25A) também infere que ela também deve abrir para contribuir para a adição de corte de carga ($25 + 20 > 38$) e sua chave abre.

A configuração final da rede para esta situação de corte de carga é mostrada na Figura 58, onde os ramais S14-S15, S12-S15 e S16 ficaram sem energia e houve um corte de carga de 45A.

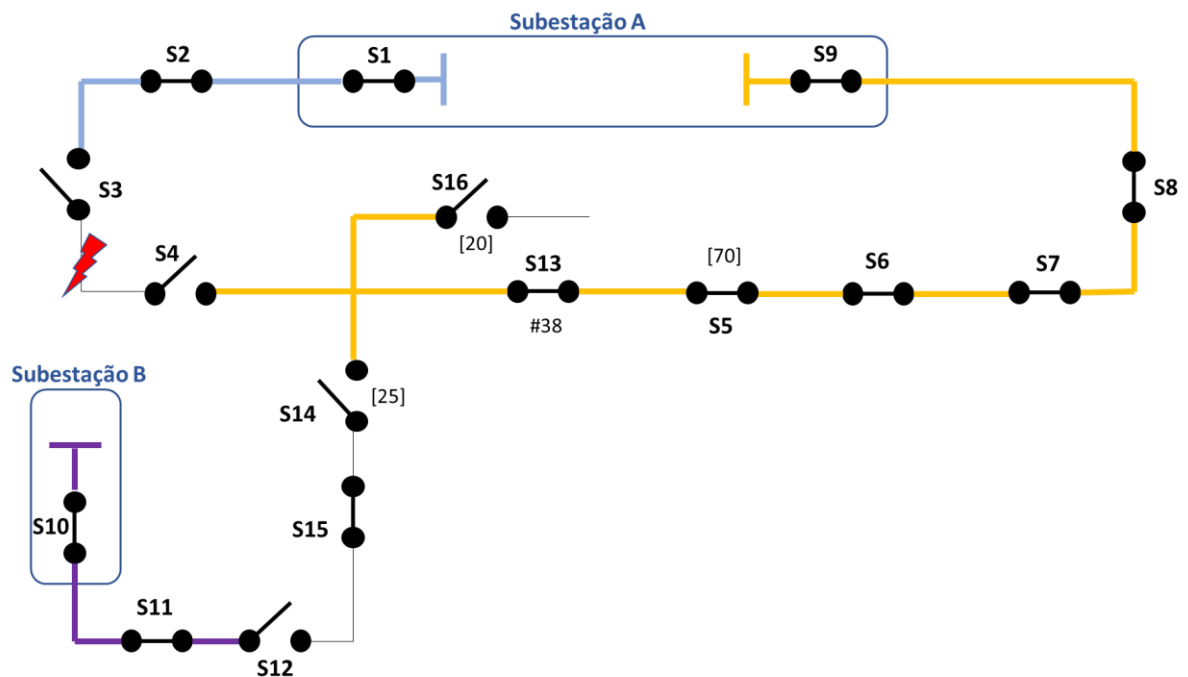


Figura 58. Sistema teste 4, após a eliminação da sobrecarga de 38A na chave S13, com montante de corte de carga de 45A.

d) Montante de Corte de Carga de 12A, com auxílio de outro circuito

Neste item retoma-se o valor de montante de corte de carga de #12A, mas agora o circuito 3 tem capacidade remanescente suficiente para auxiliar no processo de restabelecimento após o corte de carga.

O processo se inicia da mesma forma, com S16 informando a S14 o valor de -20A e ficando no aguardo do valor de S14.

O agente S14 repassa o comando de corte de carga ao agente S15. Este, por sua vez, repassa este comando para S12, que verifica a capacidade remanescente do circuito 3 e verifica que ela é maior do 15A (por exemplo, 22A). Então, S15 envia a resposta de 15A para o agente S14. Nota-se que o valor agora é positivo, pois ele pode ser suprido pelo circuito (de socorro) 3. Então, o agente S14 envia o valor de 15A para S16 e infere que a chave com corrente de 15A deve abrir e enviar este sinal para S15 e encerra seu processamento de corte de carga.

O agente da chave S16 verifica que existe uma outra chave melhor para o corte de carga e encerra seu processamento.

O agente S15, ao receber o comando de abrir, verifica que é dele a corrente de 15A, então ele abre sua chave, desenergizando o ramal S12-S15 e envia um sinal com sua carga para os agentes do outro time (no caso, S12). Este verifica novamente a capacidade remanescente

do circuito 3, verifica que é possível suprir o ramal S12-S15 e fecha alimentando-o pelo circuito 3.

e) Montante de Corte de Carga de 38A, com auxílio de outro circuito

Retomando também o exemplo anterior do valor de montante de corte de carga de #38A, mas agora com o auxílio de um circuito de socorro.

O procedimento é exatamente o mesmo, a única alteração é o valor repassado de S15 para S14, este depende da capacidade remanescente do circuito 3. Assumem-se para continuação deste exemplo dois valores para capacidade remanescente, o primeiro de 22A e o segundo de 30A.

O processo de disputa é o mesmo e o valor repassado de S15 para S14 é de 15A (valor positivo, denotando agora neste exemplo que existe um circuito de socorro com, pelo menos, parte de suprir o corte de carga).

O valor repassado de S14 para S16 pode ser de -25A ou de 25A, para as capacidades remanescentes apresentadas acima, respectivamente. O sinal negativo de -25A é quando o circuito de socorro não é suficiente para alimentar todos os ramais que serão afetados (pois a capacidade remanescente é de 22A). O valor positivo de 25A é quando circuito de socorro permite suprir todos os ramais que serão afetados.

No caso em tela neste exemplo, S14 e S16 inferem que devem abrir, ficando os ramais S14-S15, S12-S15 e S16 sem energia.

Para o ramal depois de S16 nada pode ser feito, mas o processo de restabelecimento para o ramal S12-S15, se inicia com a chave S12, que fica com tensão de um lado, mas não do outro lado. Assim, se a capacidade remanescente do circuito de socorro for de 22A, o agente S12 envia um comando para S15 abrir e a chave de S12 fechar. Aí, a chave S15 por ter tensão de um lado e não ter do outro, verifica a capacidade remanescente do circuito 3 e infere que não dá para alimentar o ramal S14-S15.

Porém, se a capacidade remanescente do circuito 3 for de 30A, o mesmo procedimento é feito. S12 consulta os agentes do circuito 3, manda abrir S15 e fecha sua chave. Agora, S15 que verifica a capacidade remanescente do circuito 3 e infere que é possível alimentar o ramal S14-S15, então ela manda um sinal para S14 abrir (na verdade ela já está aberta) e fecha, alimentando o ramal pelo circuito 3.

6.4 Função de Priorização de Cargas

A Função de Priorização de Cargas está modelada para trabalhar em conjunto com a Função de Corte de Carga, pois como o próprio nome mostra ela é uma função que determina cargas que só devem ser cortadas em último caso. Normalmente, constam do elenco de cargas prioritárias: hospitais, delegacias de polícia, prefeitura, entre outros.

A Função de Priorização de Cargas tem a missão no processo de corte de carga de rearrumar a ordenação das cargas que devem ser cortadas, mas é importante notar que ela não impede que uma carga seja cortada se isto vier a ter que correr.

Esta função é mostrada a seguir através de três exemplos, onde deve-se supor que exista uma carga prioritária no ramal S12-S15.

a) Montante de Corte de Carga de 12A, sem auxílio de outro circuito

No exemplo, no item (a) da seção anterior, o valor de montante de corte de carga era de #12A, verificou-se a disputa entre os agentes S14 e S16, onde o agente S14 “representava” o agente S15, e os agentes inferiram que S15 deveria abrir pois ela tinha a menor carga, deixando o ramal S12-S15 sem energia.

Todo o processo se passa da mesma forma, somente que, quando o agente S15 informar a sua carga ao agente S14, irá junto da mensagem um comentário informando que -15A* é prioritário. Esta informação de prioridade deve constar no dicionário mencionado na seção 5.1.1. Aqui neste texto, informa-se a prioridade através de um asterisco (*) após a unidade de corrente. Assim, a disputa entre S14 e S16 vai ocorrer com os valores de: -15A*, -20A (da chave S16) e #12A (do montante de corte de carga que deve ser feito).

O agente S14 observando estes três valores infere que mesmo 15A maior que 12A e menor que 20A, o corte de carga deve ser feito pela chave de 20A, pois na chave de 15A existe uma carga prioritária. Então, ele infere que nada deve ser feito.

O agente S16 ao receber de S14 o valor de -15A*, também avalia os três valores e da mesma forma que S14¹ infere que a chave que deve efetuar o corte de carga é a chave com 20A, ou seja, ela própria então o agente S16 manda abrir sua chave.

Assim, a configuração final da rede é com um corte de carga de 20A, mas deixando-se a carga prioritária do ramal S12-S15 ainda atendida. Diferentemente, do exemplo (a) da seção

¹ Obviamente, isto acontece, pois as regras dos agentes são as mesmas.

passada, onde o corte de carga foi de 15A (já atendendo os 12A necessários), aqui por se ter uma carga prioritária o corte de carga foi maior.

b) Montante de Corte de Carga de 38A, sem auxílio de outro circuito

Seja agora o exemplo (c) da seção anterior, onde o montante de corte de carga era de #38A e que ao final as chaves dos agentes S14 e S16, tiveram que abrir, cortando 45A.

Todo o processo se passa como no exemplo imediatamente anterior. Existirá uma disputa entre S14 e S16, com os seguintes valores: -25A* (da chave S14), -20A (da chave S16) e #38A (do montante de corte de carga que deve ser feito). O valor -25A* foi obtido com 25A (da carga do agente S14), o sinal negativo (-) resultante de não haver circuito de socorro e o asterisco (*) informando que existe uma carga prioritária neste ramal.

O agente S14 observando estes três valores mais a sua própria carga infere que para atender o montante de corte de carga, sua chave deve abrir, mas que ele esteja atendendo uma carga prioritária. Então, a chave de S14 abre e corta 25A de carga.

O agente S16, ao receber de S14 o valor de -25A*, também avalia os três valores e infere que a chave que deve abrir sua chave, cortando 20A.

Assim, o resultado é o mesmo que o do exemplo (c) da seção anterior, cortando 45A de carga, mesmo que isto venha a afetar o suprimento de energia da carga prioritária. Como dito anteriormente, a prioridade sempre é manter a integridade da rede, a prioridade de carga vem depois disto.

c) Montante de Corte de Carga de 12A, com auxílio de outro circuito

Seja agora o exemplo (d) da seção anterior, onde o montante de corte de carga era de #12A, mas existia um circuito de socorro, que tinha uma capacidade remanescente para atender a carga do ramal S12-S15. Assim, o agente S15 repassou um valor de 15A para S14 efetuar a disputa com S16. Os agentes inferiam (cada um por si) que as chaves dos agentes S14 e S16 deveriam continuar fechadas e o agente S15 deveria abrir sua chave. Isto faria acionar o agente S12 que fecharia e supriria de energia

No presente exemplo, o valor enviado de S15 para S14, levando-se em consideração que existe uma carga prioritária em S12-S15 é o mesmo, ou seja, 15A. Poder-se-ia pensar que o valor enviado era de 15A*, mas não, pois esta carga prioritária pode ser suprida pelo outro circuito, então para a disputa entre S14 e S16, ela deixa de ser prioritária. E a solução do corte de carga, se passa igualmente ao apresentado no exemplo (d) da seção anterior.

6.5 Função de Evolução da Carga

Quando ocorre uma contingência na rede, a equipe de manutenção é informada, mas decorre um tempo até que ela seja restaurada. Este tempo depende da abrangência da ocorrência, do número de ocorrências que aconteceram simultaneamente, das condições climáticas, da hora do dia que ela ocorreu, entre outros aspectos. Desta forma, pode ser que a nova configuração da rede, após concluído o processo de restauração, por exemplo, permaneça por um tempo bastante grande, inclusive podendo acontecer neste período variações expressivas da carga, para mais ou para menos.

Suponha que o curto-circuito do exemplo apresentado na seção 4.3.4 deste documento tenha ocorrido às 17 horas e que os circuitos 2 e 3 alimentassem, prioritariamente, cargas industriais e cargas residenciais, respectivamente. Sabe-se que, a partir deste horário, as cargas industriais urbanas tendem a diminuir, enquanto as cargas residenciais tendem a aumentar. Desta forma, pode-se supor que a capacidade remanescente do circuito 2 (de 30A) tenderia a aumentar, enquanto a capacidade remanescente do circuito 3 (de 50A) tenderia a diminuir. Se as cargas do circuito 1 forem residenciais o valor de 20A (do exemplo original) tenderia a aumentar, agravando ainda mais o resultado da disputa que resultou na configuração de cada estudo. Sobrecargas poderiam vir a ocorrer.

Desta forma, quando se analisam todos os exemplos anteriores de restauração, deve-se levar em consideração a hora do dia que o curto ocorreu, o perfil de carga diário do circuito e dos ramais e o tempo médio de reparo de cada ramal pela concessionária; além da corrente pré-falta, que já está sendo utilizada neste processo de restauração. A hora do dia é obtida por um relógio interno da unidade de processamento. O perfil de carga diário dos ramais de seus times é obtido ao longo do tempo pela diferença de carga entre as chaves adjacentes e, constantemente, registrada na memória. O tempo médio de reparo do ramal é colocado no agente quando de sua instalação física na rede.

A Função de Evolução da Carga estará localizada no Nível 4, pois trata-se de um processo de predição e ela aciona um programa “externo” de previsão de carga, conforme estrutura mostrada anteriormente na Figura 5.

6.5.1 Regras para o Nível 2

Antes de descrever esta função é necessário acrescentar uma ação complementar ao Nível 2, de Trabalho Normal. A cada hora inteira, ela aciona a Função de Evolução da Carga para que esta proceda o cálculo dos valores típicos horários semanais. Em verdade, são calculados e registrados valores que formam três curvas de cargas horárias. A primeira é da própria corrente que passa pela chave do agente. A segunda e a terceira curvas são as curvas de carga de cada um dos ramais adjacentes ao agente. Os valores horários dessas curvas são obtidos pela diferença entre a corrente do agente e a corrente dos agentes adjacentes.

Estes cálculos neste nível (ou seja, quando a operação é normal) são feitos a cada hora e por um período de uma semana. Esta corrente (que representa a carga) é então agregada ao valor de corrente já existente na memória do agente, atualizando-a. Para tal, é utilizada a seguinte expressão: o valor final da corrente é igual ao valor da corrente existente na memória vezes 3 somando ao valor da corrente atual e dividido por 4. Este valor final da corrente é o novo valor que ficará registrado na memória como o valor representativo da corrente naquela hora da semana. Esta fórmula é empírica e busca preservar um certo histórico da corrente, mas também dar importância a corrente atual. Esta consideração é importante, pois os processos de tomada de decisão do agente são feitos para uma solução naquele instante e que pode durar, no máximo, poucos dias. Assim, é muito mais significativo se ter a carga relativa a última semana do que a carga de, por exemplo, dos últimos seis meses.

Obviamente, no início de funcionamento do agente, ele ou terá valores colocados quando da sua instalação como valores típicos de corrente pelo ramal ao longo da semana, ou demorará algumas semanas para a criação desta base histórica.

Para o correto funcionamento do programa de evolução da carga, pelo menos, uma semana inteira de operação o agente deve ter completado.

6.5.2 Regras para os Níveis 3 e 4

A Função de Evolução da Carga também pode ser acionada pelo Nível 3, de Trabalho Anormal, quando a corrente não era 0 (zero), no instante $t-1$, e se torna 0 (zero), no instante t , ou seja, deixa de passar corrente pela chave. De imediato, a Função de Evolução da Carga, ao receber o valor zero, aciona, sem a necessidade de transferir num valor, o programa de previsão de carga. Este programa, por sua vez, busca todos os seus dados na memória local do agente. O

primeiro dado a ser lido é a hora, daí ele compara a corrente imediatamente anterior ao evento (da corrente se tornar zero) com a corrente registrada na memória da hora mais próxima (por exemplo, se o evento ocorrer às 17:16h, ele assume a corrente como 17:00h; e se o evento ocorrer às 17:36h ele assume a corrente atual com de 18h). A partir daí, o cálculo de previsão é via “regra de três”, e os valores dos cálculos para as próximas M horas são proporcionais aos valores da memória. O valor de M necessário para cada agente está ligado ao tempo de reparo da concessionária, podendo ir de 1 hora até algumas horas (por exemplo, $M=8$). Assim, são calculados e escritos na memória M valores pelo programa de previsão de carga. Estes valores, calculados para as três curvas de corrente, serão utilizados por outros programas e funções. Ao finalizar esta tarefa, o programa de previsão de carga informa à Função de Evolução da Carga que já efetuou os cálculos demandados.

Vale a pena comentar que o Programa de Previsão de Carga é “externo”, ou seja, ele pode ser substituído por um programa com técnicas numéricas e/ou inteligentes mais avançadas; porém como se trata de uma previsão a curtíssimo-prazo, normalmente a previsão é via “regra de três”, apresentando resultados satisfatórios para as demais funções do agente que utilizarão os valores previstos.

O acionamento da Função de Evolução da Carga pode ser demandado por outras funções dos Níveis 3 e 4.

6.5.3 Primeiro Exemplo: Solução de um Problema com Evolução da Carga

Este primeiro exemplo utiliza o sistema teste 1, apresentado na Figura 12 da seção 4.3.1, onde se apresenta a verificação da capacidade de um circuito para auxiliar outro no processo de restauração de seus ramais sem energia. Assim, o objetivo daquela seção era apresentar como os agentes inteligentes deveriam se comportar para solucionar o problema. Nele foi observado que a carga interrompida (e que deveria ser suprida no ramal entre os agentes S4 e S5) era de 20A e a capacidade remanescente do circuito 2 (após consulta a todos os seus agentes) era de 30A. Com isto, a chave S5 poderia fechar e alimentar o ramal sem energia.

No exemplo desta seção, este mesmo exemplo é retomado, mas agora mostrando como seria resolvido com a Função Evolução da Carga. Daí, surgem quatro possibilidades de análise, que são:

(a) a carga do ramal (que era 20A) tende a diminuir e a capacidade remanescente no circuito 2 (que era de 30A) tende a aumentar;

(b) a carga do ramal tende a diminuir e capacidade remanescente no circuito 2 tende a diminuir também;

(c) a carga do ramal tende a aumentar e capacidade remanescente no circuito 2 tende a aumentar também; e

(d) a carga do ramal tende a aumentar e capacidade remanescente no circuito 2 tende a diminuir.

O caso (a) é o que acarreta, com certeza, menos problema, pois a carga que já era menor que a capacidade de suprir o problema tende a diminuir enquanto a capacidade de suprir energia tende a aumentar. O caso (b), os dois valores tendem a diminuir; deve-se então verificar as taxas de diminuição para que sempre seja mantida a relação: carga do ramal menor ou igual a capacidade remanescente; caso contrário haverá sobrecarga. O caso (c) é similar ao caso (b), só que no sentido inverso. Da mesma forma, deve-se verificar as taxas de crescimento de aumento para que a relação apresentada seja mantida. O caso (d) é, com certeza, o pior dos casos, pois a carga está aumentando e a capacidade de supri-la está diminuindo. Assim, este é o caso analisado neste exemplo.

Para tal, seja o exemplo de evolução de cargas mostrado na Figura 59. Entre chaves são mostradas as capacidades remanescentes e entre colchetes as correntes atuais de cada chave. Na chave S6, entre parêntesis, também é mostrada a evolução da carga prevista para as próximas 5 horas. Cada chave tem a sua própria evolução, que não está mostrada na figura, mas sim na Tabela 3. Na chave S4, mostrada na figura, contém entre colchetes o valor a carga pré-falta e, entre parêntesis, a evolução da carga do ramal entre S4 e S5 (ramal a ser suprido). Observa-se então que este é o caso (d) mencionado acima, em que a carga a ser alimentada vai aumentar ao longo das próximas horas e a capacidade remanescente vai diminuir (pois o carregamento do circuito 2 vai aumentar). Adotou-se aqui arbitrariamente um tempo de 5 horas a frente para se fazer esta análise; entretanto, este é o tempo sugerido por este trabalho, devido ao fato de que este lapso de tempo comporta as principais variações de carga (aumento ou diminuição) ao longo do dia.

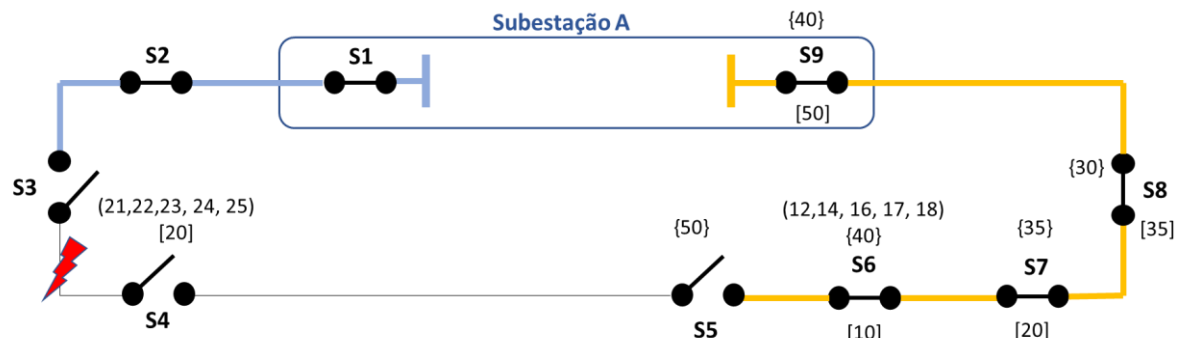


Figura 59. Sistema teste 1, com dados de evolução da carga.

Tabela 3. Dados de Evolução da Carga

Agente	Evolução da Carga para as próximas 5 horas (A)				
	t+1h	t+2h	t+3h	t+4h	t+5h
S6	12	14	16	17	18
S7	23	26	27	29	31
S8	37	42	46	48	53
S9	57	61	70	74	80

Cada agente possui seus dados e é capaz de calcular a sua capacidade remanescente para cada uma das 5 horas vindouras. Para isto, basta efetuar a diminuição de sua capacidade nominal pela carga que passará por ele. A capacidade nominal de cada chave está contida implicitamente nos dados apresentados acima, bastando para encontrá-la efetuar a soma da carga atual da chave mais a sua capacidade remanescente (por exemplo, para S7 é de $55A = [20] + \{35\}$). A Tabela 4 mostra a capacidade remanescente de cada chave a cada hora. Então verifica-se que se pode também obter, via interação entre os agentes, a capacidade remanescente do circuito 2 a cada hora, de maneira análoga a que foi obtida a capacidade remanescente do circuito no exemplo da seção 4.3.1. Este valor consta na tabela e representa a menor capacidade remanescente entre as chaves do circuito. Por facilidade de análise, foi incluída também na tabela mais uma linha com a evolução da carga no ramal a ser suprido.

Tabela 4. Valor das Capacidades Remanescentes das Chaves e do Circuito e Evolução da Carga a ser Suprida

Agente	Capacidade Nominal (A)	Evolução da Carga para as próximas 5 horas (A)				
		t+1h	t+2h	t+3h	t+4h	t+5h
S6	50	38	36	34	33	32
S7	55	32	29	28	26	24

S8	65	28	23	19	17	12
S9	90	33	29	20	16	10
Circuito 2	-	28	23	19	16	10
Carga s/energia	-	21	22	23	24	25

Ao se comparar as duas últimas linhas da Tabela 4 verifica-se que nos instantes $t+1h$ e $t+2h$, o circuito 2 consegue suprir a energia necessária ao seu “novo” ramal (ramal S4-S5); porém em um instante entre $t+2h$ e $t+3h$ começará a haver sobrecarga no circuito 2 e a Função de Sobrecarga vai ser acionada pelo agente que estiver nesta condição.

6.5.4 Segundo Exemplo: Disputa entre Circuitos com Evolução da Carga

Este segundo exemplo utiliza o sistema teste 2, apresentado na Figura 22 da seção 4.3.2, onde se apresenta a disputa de dois circuitos para saber qual seria o melhor para suprir o ramal que ficou sem energia (ramal S4-S5-S12) após o isolamento do curto-circuito. Neste segundo exemplo, a carga pré-falta do ramal sem energia é de 20A e as capacidades remanescentes dos circuitos 2 e 3 são de 30A e 50A, respectivamente. Com isto, o circuito 3, por ter uma capacidade remanescente maior “venceu” a disputa.

No exemplo desta seção, este mesmo exemplo é retomado, mas agora mostrando como seria resolvido com a Função Evolução da Carga. Suponha a seguinte situação operacional mostrada na Tabela 5, onde as capacidades remanescentes dos circuitos 2 e 3 são apresentadas para as próximas 5 horas, bem como a evolução da carga do ramal para o mesmo lapso temporal.

Tabela 5. Valor das Capacidades Remanescentes dos Circuitos 2 e 3 e Evolução da Carga a ser Suprida

Agente	Evolução da Carga para as próximas 5 horas (A)				
	t+1h	t+2h	t+3h	t+4h	t+5h
Circuito 2	28	23	19	16	10
Circuito 3	35	20	18	15	9
Carga s/energia	21	22	23	24	25

Observando-se esta tabela, nota-se que existe um expressivo crescimento da carga no circuito 3 nas próximas horas; fato que leva a uma expressiva redução de sua capacidade remanescente. Já na primeira hora, a capacidade que inicialmente era de 50A foi para 35A e, em seguida, para 20A. Ou seja, com a evolução da carga, nota-se que, se a carga for alimentada

pela chave S12, haverá sobrecarga em instante entre $t+1h$ e $t+2h$, enquanto, se a carga for alimentada pela chave S5, haverá sobrecarga depois, entre os instantes $t+2h$ e $t+3h$, e de menor intensidade. Então, a solução do problema, antes observando-se somente os valores do instante da restauração apontavam para a solução do fechamento da chave S12 por ter uma maior capacidade remanescente. Agora, levando em consideração a evolução da carga do sistema, a solução aponta para o fechamento da chave S5, alterando a solução inicial.

6.5.5 Terceiro Exemplo: Disputa Indireta entre Circuitos com Evolução da Carga

Este terceiro exemplo utiliza o sistema teste 4, apresentado na Figura 34 da seção 4.3.4. Este exemplo mostra a mesma disputa relatada na seção anterior, mas apenas com diversos agentes entre os agentes que disputavam suprir de energia os ramais que ficaram desenergizados após o isolamento da falta. Inicialmente, levando-se em consideração somente o valor atual da capacidade remanescente dos circuitos: o agente S12 foi o vencedor; porém, com a evolução da carga sendo levada em consideração, o agente S5 foi o vencedor e sua chave fecha para alimentar os ramais desenergizados. A Figura 60 apresenta a rede com esta configuração.

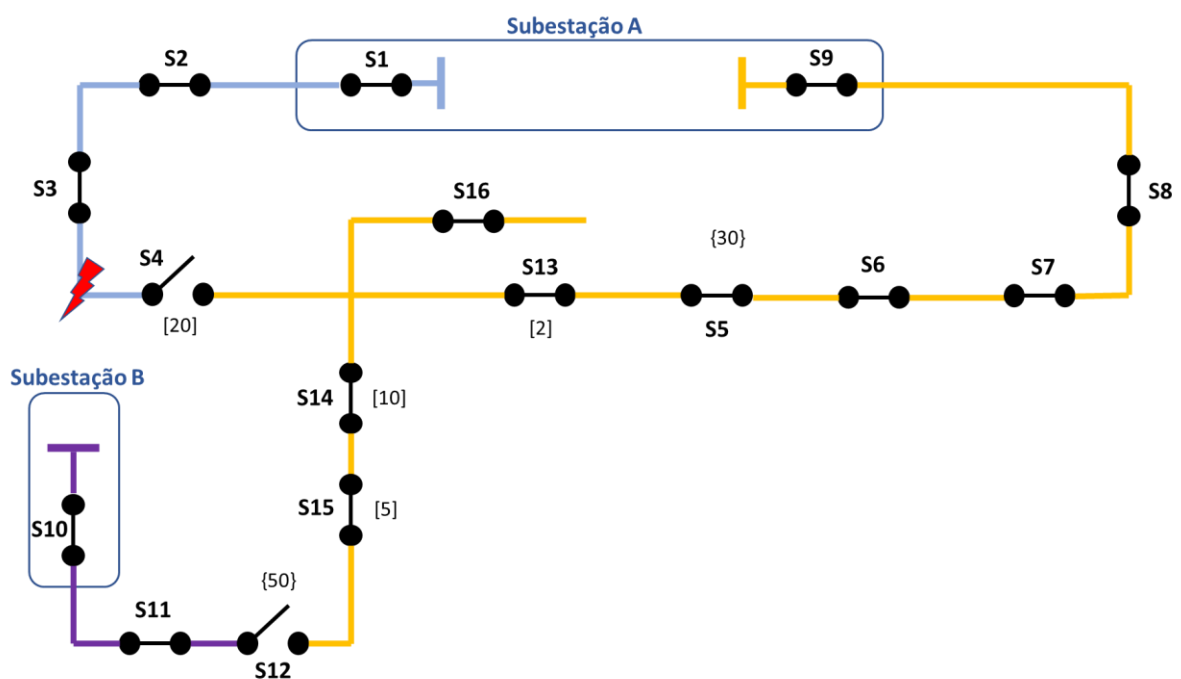


Figura 60. Sistema teste 4, com socorro pela chave S5.

Adotando-se os dados da Tabela 4 também para este exemplo, observando-se que a sobrecarga ocorrerá primeiro entre os instantes $t+2h$ e $t+3h$ na chave S8 e/ou na chave S9, fato que pode ser notado pela ultrapassagem do valor da carga sem energia e dos valores das capacidades remanescentes de cada chave.

Então, supõe-se que o sistema esteja operando na configuração mostrada na Figura 60 e que no instante $t+2h+\Delta_1$, onde Δ_1 representa minutos depois de duas horas, a chave S8 entre em sobrecarga e, no instante $t+2h+\Delta_2$, onde Δ_2 representa minutos depois de duas horas ($\Delta_1 \leq \Delta_2$), a chave S9 também entra em sobrecarga. Neste caso, a entrada nas faixas de sobrecarga ocorreu por evolução da carga, assim, isto normalmente acontece pela faixa 1 (onde nada precisa ser feito). Suponhamos que no instante $t+3h+\Delta_3$, onde Δ_3 representa minutos depois de três horas, a chave do agente S8 entra da faixa 2 de sobrecarga e comece a contagem do tempo para estar nesta faixa. Continuando, no instante $t+3h+\Delta_4$, onde Δ_4 representa minutos depois de três horas ($\Delta_3 < \Delta_4$), o limite de tempo na faixa 2 seja atingido. Então, imediatamente, o agente S8 aciona a sua Função de Sobrecarga, que aciona a Função de Corte de Carga.

Neste instante, a Função de Corte de Carga calcula qual o montante de carga que deve ser cortado com a finalidade de trazer a sobrecarga do agente para o limite da faixa 1 da sobrecarga. Porém, agora levando-se em consideração a evolução da carga, não é o valor atual que irá ser repassado, mas o maior valor entre o valor atual e este mesmo valor para as próximas 3 horas. Suponha que este valor é de 13A.

Conforme relatado na seção anterior, este valor é levado agente por agente até que chegue em uma carga cuja corrente atual seja menor que este valor; então o agente desta chave comunica ao agente da chave anterior (de quem recebeu a mensagem de corte de carga) para ela abrir. Suponha que isto venha a ocorrer na chave do agente S15 mandando o agente da chave S14 abrir.

Ao abrir a chave S14, o problema de sobrecarga se resolveu, mas causou um outro que foi a desenergização dos ramais S14-S15 e S15-S12, conforme mostrado na Figura 61.

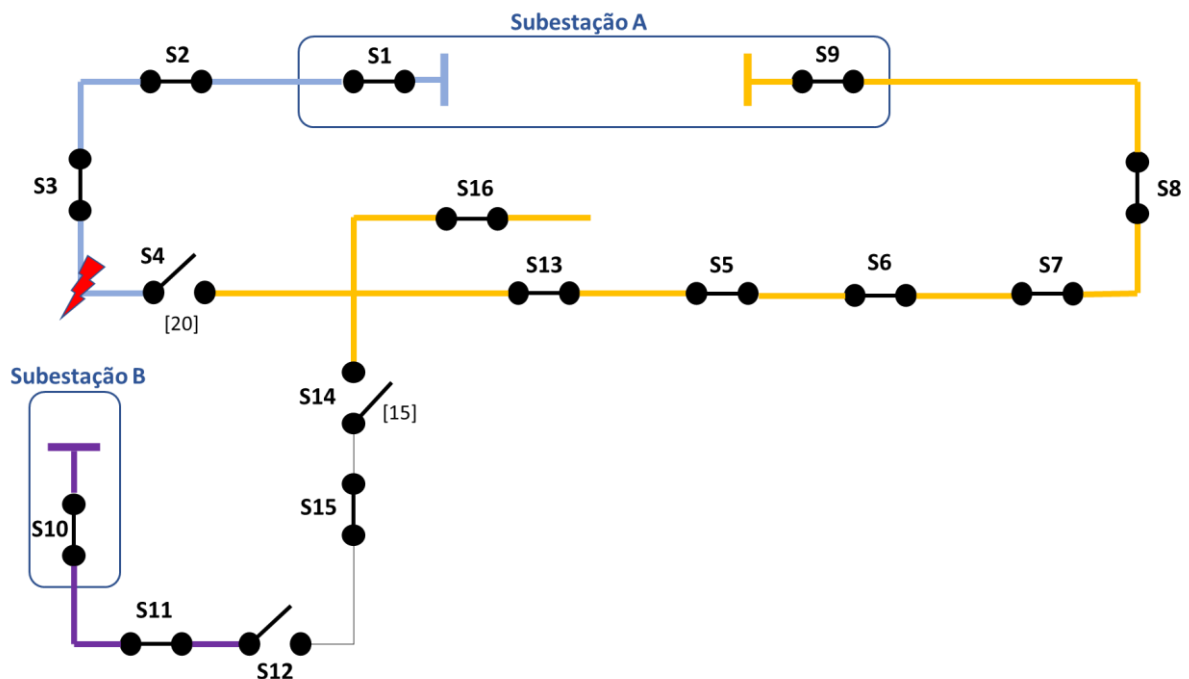


Figura 61. Sistema teste 4, com socorro pela chave S5, com abertura da chave S14 para eliminação da sobrecarga de S8, com corte de carga.

Porém, neste momento, se inicia pelo agente S14 que abriu, um procedimento de restauração. Ela envia a sua carga de pré-evento (de 15A) para a chave S15 e esta, por sua vez, contata o seu agente adjacente S12. Por ser S12 uma chave com tensão de um lado e não do outro, ela verifica a capacidade remanescente do seu circuito e ao receber este valor, ele fecha tentando suprir a carga.

Finalmente, uma última análise pode ser feita neste exemplo: quando do fechamento de S12, houver sobrecarga e esta tiver de ser eliminada. Então, novo processo de corte de carga é feito, a partir do agente cuja chave atingiu esta sobrecarga. Assim, no exemplo, isto pode resultar em uma das duas configurações finais para eliminação da sobrecarga: abertura de S15 ou abertura de S12.

6.6 Sumarizando a Estrutura do Agente com as Regras deste Capítulo

Esta seção sumariza as principais ações do agente inteligente para as Funções de Resposta à Demanda.

6.6.1 Modo de Acionamento da Função de Sobrecarga

A primeira forma de verificação da sobrecarga começa com uma regra no Nível 2, que simplesmente compara a corrente atual na chave (I_{chAt}) com a capacidade nominal da chave (I_{chN}). Ambos os valores estão em posições pré-definidas na memória do agente. Se o valor da corrente atual ultrapassar a sua capacidade nominal, as regras do Nível 3 podem vir a ser acionadas, isto está associado com o valor percentual desta sobrecarga que deve ser calculado.

Na memória estão registrados dois valores percentuais, definindo três faixas de sobrecarga. A primeira faixa, que vai de uma sobrecarga zero até o primeiro valor percentual, permite que o equipamento opere nesta condição por tempo indefinido. A segunda faixa, entre os valores percentuais, permite que o equipamento opere por um tempo t , também pré-registrado na memória, e que quando atingido as regras de contagem de tempo do Nível 3 devem ser acionadas. A terceira faixa contém valores acima do segundo valor percentual e determinam o imediato acionamento das regras do Nível 4 (da Função de Corte de Carga). Desta forma, deve-se verificar em que faixa a sobrecarga se encaixa.

Assim, estas regras podem ser escritas da seguinte forma:

- Verificação do percentual de sobrecarga na chave. Ação: ler a corrente atual da chave (I_{chAt}), ler a capacidade nominal da chave (I_{chN}), calcular o percentual de sobrecarga na chave pela expressão $I_{ch\%} = (I_{chAt} - I_{chN}) / I_{chN}$.
 - Se a corrente atual da chave (I_{chAt}) > capacidade nominal da chave (I_{chN}), então calcular o percentual de sobrecarga na chave pela expressão $I_{ch\%} = (I_{chAt} - I_{chN}) / I_{chN}$.
- Verificação da faixa do percentual de sobrecarga na chave. Ação: ler o percentual de sobrecarga na chave ($I_{ch\%}$) e determinar a faixa que ele se encontra; se faixa 1, nada a fazer; se faixa 2 começar a contar o tempo e atingido acionar as regras de contagem de tempo do Nível 3; e se faixa 3, acionar as regras de corte de carga do Nível 4.
 - Se valor percentual 1 < o percentual de sobrecarga na chave ($I_{ch\%}$) < valor percentual 2 então contar o tempo e quando atingido acionar as regras de contagem de tempo do Nível 3.
 - Se o percentual de sobrecarga na chave ($I_{ch\%}$) > valor percentual 2 então o acionar as regras de corte de carga do Nível 4.

A contagem de tempo pode ser feita através de uma outra posição de memória que vai comparar um tempo inicial com o tempo atual e compará-lo com o tempo limite pré-definido para a faixa 2 de sobrecarga. Esta regra pode ser escrita da seguinte forma:

- Verificação do tempo de permanência da sobrecarga no Nível 2. Ação: contar o tempo de sobrecarga no Nível 2, com o tempo excedido, acionar regras de corte de carga.
 - Se $(\text{tempo atual} - \text{tempo inicial da sobrecarga no Nível 2}) \geq \text{tempo registrado de sobrecarga no Nível 2}$, então acionar regras do corte de carga.

6.6.2 Cálculo das Novas Capacidades Remanescentes

Ao considerar as faixas 1 e 2 de sobrecarga pode-se estabelecer “novos” valores para a capacidade remanescente em cada chave. Originalmente, a capacidade remanescente era calculada como sendo a capacidade nominal da chave menos a sua carga atual. Com a Função de Sobrecarga ativada, pode-se estabelecer mais dois valores de capacidade remanescente.

O primeiro valor de capacidade remanescente, que pode operar de forma indefinida na chave, inclui a faixa 1 de sobrecarga neste cálculo, o qual é calculado como sendo a capacidade nominal da chave mais o Nível 1 de sobrecarga menos a sua carga atual.

O segundo valor de capacidade remanescente engloba a faixa 2, e que é sabido pode funcionar sobre por um tempo pré-determinado. Seu cálculo é feito como sendo capacidade nominal da chave mais a faixa 1 mais a faixa 2 de sobrecarga menos a sua carga atual.

Então existem três capacidades remanescentes que podem ser utilizadas, a critério do tipo de operação, que a concessionária deseja estabelecer nas suas redes elétricas. Uma estratégia interessante, que é a preconizada no agente proposto, é que a capacidade remanescente que engloba a faixa 1 seja utilizada fora do período de ponta, já que ela não afeta os equipamentos, e pode ser utilizada indefinidamente; enquanto a capacidade remanescente que engloba a faixa 2 seja utilizada somente no período de ponta.

As regras para a utilização do cálculo correto da capacidade remanescente são:

- Cálculo da capacidade remanescente de uma chave. Ação: verificar a hora do dia: se fora da ponta: capacidade nominal da chave mais a faixa 1 de sobrecarga menos a sua carga atual; se período de ponta: capacidade nominal da chave mais a faixa 1 mais a faixa 2 de sobrecarga menos a sua carga atual.
 - Se período fora de ponta, então capacidade remanescente = capacidade nominal da chave + Nível 1 de sobrecarga menos a sua carga atual.

- Se período de ponta, então capacidade remanescente = capacidade nominal da chave + Nível 1 + Nível 2 de sobrecarga menos a sua carga atual.

Deve-se lembrar que todas as regras e operações matemáticas que utilizam o valor da capacidade remanescente continuam as mesmas.

6.6.3 Verificação do Corte de Carga pelo próprio Agente em Sobrecarga

A primeira verificação de corte de carga é feita pelo próprio agente que está sofrendo a sobrecarga. Ele deve verificar inicialmente o sentido que flui a energia. Isto é feito através da consulta das cargas dos agentes adjacentes dos times 1 e 2 e posterior o cálculo da somatória de cada time, tirando a conclusão de para onde a energia está fluindo. Para isto são aplicadas as seguintes regras:

- Verificação das correntes do time 1 e verificação das correntes do time 2. Ação: somatória das correntes do time 1, somatória das correntes do time 2, se somatória das correntes do time 1 > somatória das correntes do time 2, então o corte de carga ocorre no time 2; senão o corte de carga ocorre no time 1.
 - Se Σ correntes do time 1 > Σ correntes do time 2 então corte de carga no time 2.
 - Se Σ correntes do time 1 < Σ correntes do time 2 então corte de carga no time 1.

Em seguida, verifica-se se o corte de carga deve ser feito pelo próprio agente que está em sobrecarga. Isto ocorre se o montante de corte de carga é igual ou maior do que a somatória das correntes no time que sofrerá corte de carga. Caso isto não venha a ocorrer, o agente em sobrecarga deve repassar o comando de corte de carga e o valor de montante de corte de carga para os agentes do time que sofrerá corte de carga. Assim, são aplicadas as regras:

- Montante de corte de carga \geq somatória das correntes do time que sofrerá corte de carga. Ação: abrir a chave do agente; caso contrário, enviar comando de corte de carga e o valor do montante a ser cortado.
 - Se montante de corte de carga \geq somatória das correntes do time que sofrerá corte de carga, então abrir a chave do agente.
 - Se montante de corte de carga < somatória das correntes do time que sofrerá corte de carga, então enviar comando de corte de carga e o valor do montante a ser cortado.

6.6.4 Regras de Montagem de Valores e de Priorização

A primeira parte da regra de montagem do valor a ser repassado para uma disputa de corte de carga é composto pelo valor da corrente de carga associado (ou não) a um sinal negativo (-). A inclusão do sinal negativo ocorre se não houve possibilidade da carga de seu ramal ser alimentada por um circuito de socorro, ou seja, se a capacidade remanescente do circuito de socorro não puder suprir a carga do ramal. Então, a formação da mensagem é feita pela seguinte regra:

- Para a montante do valor de corte de carga de um agente: verificar o valor da capacidade remanescente do circuito de socorro (se houver). Ação: se este valor for menor do que a carga da chave do agente, então inserir o sinal negativo no valor da carga atual da chave.
 - Se capacidade remanescente do circuito de socorro < carga atual da chave, então inserir o sinal negativo no valor da carga atual a ser repassado.

A segunda parte da regra de montagem do valor está relacionada a regra da Função de Priorização de Carga, ou seja, se ela deve ou não repassar que existe carga prioritária no ramal (no caso no presente texto, se o valor deve ser acompanhado de “*” ou não). A inclusão do sinal de “*” ocorre se não existe a possibilidade de alimentação através de um circuito de socorro, ou seja, se a carga for cortada e não puder ser restabelecida. Assim, a regra para a formação da mensagem é a seguinte:

- Inclusão da priorização: verificar o valor da capacidade remanescente do circuito de socorro (se houver) e se existem cargas prioritárias nos ramais. Ação: se este valor for menor do que a carga da chave do agente e existe carga prioritária nos ramais, então inserir incluir a informação de carga prioritária.
 - Se capacidade remanescente do circuito de socorro < carga atual da chave e existe carga prioritária nos ramais, então inserir o sinal negativo no valor da carga atual a ser repassado e a informação de carga prioritária (*).

Note nesta regra que a carga prioritária não necessita estar diretamente no ramal alimentado pela chave do agente, basta que esta informação venha dos agentes adjacentes para que sempre a informação de carga prioritária seja mantida.

6.6.5 Cálculo das Cargas Horárias

O cálculo das três cargas horárias (que na verdade são das três correntes horárias) semanais é sempre feito quando o sistema está em operação normal, ou seja, as regras estão no Nível 2, e conta para seu disparo com o relógio interno do sistema de processamento do agente. A cada hora inteira ele aciona este cálculo, que possui as seguintes regras:

- Cálculo da carga na chave. Ação: ler a corrente atual da chave (I_{chAt}), ler a corrente registrada nesta hora na curva de carga da chave ($I_{ch}(t)$), efetuar o cálculo $(I_{chAt} + 3 * I_{ch}(t)) / 4$ e escrever o resultado em $I_{ch}(t)$.
 - Se t é uma hora inteira e a corrente atual da chave (I_{chAt}) não for zero, então ler a corrente registrada nesta hora na curva de carga da chave ($I_{ch}(t)$), efetuar o cálculo $(I_{chAt} + 3 * I_{ch}(t)) / 4$ e escrever o resultado em $I_{ch}(t)$.
- Cálculo da carga no ramal 1. Ação: perguntar e receber as correntes atuais dos agentes adjacentes do lado 1 ($\sum I_{chAt R1}$), ler a corrente atual da chave (I_{chAt}), fazer a diferença entre elas (I_{AtR1}), ler a corrente registrada nesta hora na curva de carga da chave ($I_{R1}(t)$), efetuar o cálculo $(I_{chR1} + 3 * I_{R1}(t)) / 4$ e escrever o resultado em $I_{R1}(t)$.
 - Se t é uma hora inteira e a corrente atual da chave (I_{chAt}) não for zero, então perguntar e receber as correntes atuais dos agentes adjacentes do lado 1 ($\sum I_{chAt R1}$), fazer a diferença entre elas (I_{AtR1}), ler a corrente registrada nesta hora na curva de carga da chave ($I_{R1}(t)$), efetuar o cálculo $(I_{chR1} + 3 * I_{R1}(t)) / 4$ e escrever o resultado em $I_{R1}(t)$.
- Cálculo da carga no ramal 2. Ação: perguntar e receber as correntes atuais dos agentes adjacentes do lado 2 ($\sum I_{chAt R2}$), ler a corrente atual da chave (I_{chAt}), fazer a diferença entre elas (I_{AtR2}), ler a corrente registrada nesta hora na curva de carga da chave ($I_{R2}(t)$), efetuar o cálculo $(I_{chR2} + 3 * I_{R2}(t)) / 4$ e escrever o resultado em $I_{R2}(t)$.
 - Se t é uma hora inteira e a corrente atual da chave (I_{chAt}) não for zero, então perguntar e receber as correntes atuais dos agentes adjacentes do lado 2 ($\sum I_{chAt R2}$), fazer a diferença entre elas (I_{AtR2}), ler a corrente registrada nesta hora na curva de carga da chave ($I_{R2}(t)$), efetuar o cálculo $(I_{chR1} + 3 * I_{R2}(t)) / 4$ e escrever o resultado em $I_{R2}(t)$.

A condição da corrente atual da chave (I_{chAt}) não ser zero é imposta nas regras, pois com este valor ela não irá contribuir em nada para o histórico de carga, muito pelo contrário, irá ao longo do tempo eliminando-o. Corrente igual a zero pode ser obtida no Nível 2, quando a chave opera aberta, separando dois circuitos, ou seja, com tensão dos dois lados da chave.

6.6.6 Cálculo da Previsão das Cargas Horárias

O cálculo da previsão das três cargas (correntes) horárias é sempre feito sob demanda de uma função ou quando a corrente se torna zero. As regras para o disparo dessas ações estão nos Níveis 3 e 4.

A regra do Nível 3 é a que verifica que a corrente passou a ser zero, ou seja, no instante $t-1$ ela não era zero e no instante t , passou a ser zero. Isto é feito através da leitura da corrente atual no instante (t) e no instante ($t-1$). Quando isto ocorre, a regra seguinte é ativada e aciona a regra de previsão de carga (no Nível 4):

- Verificação da corrente atual da chave (I_{chAt}) de alterada para zero. Ação: ler a corrente atual da chave no instante t ($I_{chAt}(t)$), verificar se ela é zero, a corrente atual da chave no instante $t-1$ ($I_{chAt}(t-1)$), verificar se ela é diferente de zero, acionar função de previsão de carga.
 - Se a corrente atual da chave no instante t ($I_{chAt}(t)$) igual a zero e a corrente atual da chave no instante $t-1$ ($I_{chAt}(t-1)$) for diferente de zero, então acionar função de previsão de carga.

As regras da função de previsão de carga, que estão no Nível 4, definem os valores que são utilizados pelo programa “externo” de previsão de carga. As regras verificam, no relógio do sistema de processamento, a hora atual e a arredondam para o valor horário mais próximo, entregando-o ao programa de previsão de carga. A regra este nível é a seguinte.

- Acionada a função de previsão de carga. Ação: ler a hora atual, arredondar a hora atual e acionar o programa de previsão de carga entregando este valor.
 - Se a função de previsão de carga é acionada, então ler hora atual, arredondar hora atual, entregar este valor para o programa de previsão de carga.

Ao receber este valor, o programa de previsão de carga entende que está sendo acionado. Então, ele lê os seguintes valores na memória local do agente: o valor de M (para ele, número

de previsões que deve ser realizado a frente), lê a corrente atual da chave no instante t ($I_{chAt}(t)$) – onde t é o valor repassado pela função de previsão de carga e lê os $M+1$ valores a partir das curvas de carga ($I_{ch}(t)$, ..., $I_{ch}(t+M)$, $I_{R1}(t)$..., $I_{R1}(t+M)$, $I_{R2}(t)$..., $I_{R2}(t+M)$). De posse destes valores, ele calcula via regra de três simples os valores previstos. Por exemplo, para a carga na chave no instante $t+1$, o cálculo previsto seria: $I_{chPr}(t+1) = (I_{ch}(t+1) * I_{chAt}(t)) / I_{ch}(t)$. São então calculados $3*M$ valores e escritos em posições pré-definidas na memória com seus registros de tempo.

6.7 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou as diversas funções relacionadas à “resposta à demanda” da carga. Inicialmente, foi apresentada a Função de Sobrecarga que estabelece três faixas operativas de sobrecarga: a faixa 1, em que os componentes podem operar de forma indefinida sem causar problemas; a faixa 2, em que os componentes podem operar durante um determinado período pré-fixado e depois dele acionam a Função de Corte de Carga; e, finalmente, a faixa 3, no qual a Função de Corte de Carga deve ser imediatamente acionada.

Ele também apresentou a Função de Corte de Carga, que proporciona uma busca entre os carregamentos das diversas chaves com a finalidade de efetuar o desligamento da menor parcela possível de carga (através da abertura de chaves) que elimine a sobrecarga apresentada pela chave. Nesta estratégia de corte de carga devem ser verificados as capacidades remanescentes dos circuitos de socorro que possam vir a restaurar a energia dos ramais após o processo de corte de carga.

Neste processo de corte de carga pode existir a influência de cargas prioritárias, que devem, sempre que possível, ficar isentas da falta de energia, ou seja, fora do processo de corte de carga, mesmo que isto signifique uma corte de carga superior. Entretanto, estas cargas não têm prioridade sobre a integridade dos componentes da rede elétrica e se elas tiverem a necessidade de serem cortadas, isto deve ocorrer.

Finalmente, o capítulo apresentou uma estratégia de evolução da carga e de análise de sobrecarga e corte de carga levando em consideração. Inicialmente, é apresentado o cálculo realizado no Nível 2 do agente, que é feito a cada hora inteira, através do cálculo dos valores típicos horários semanais. Em verdade, são calculados e registrados valores que foram três curvas de cargas horárias: um com a própria corrente que passa pela chave do agente e as outras

duas curvas de carga de cada um dos ramais adjacentes ao agente. Estas curvas servem como referência, quando o agente está atuando em seus Níveis 3 ou 4 e que aciona o programa externo de previsão de carga, que calcula valores para M valores a frente, onde M é um valor pré-estabelecido para cada agente e está ligado ao tempo de reparo da concessionária.

7 Procedimentos de Integração dos Agentes Inteligentes com os Dispositivos das Redes Tradicionais

As redes elétricas de distribuição têm se estruturado e operado, desde seu início, para atender as necessidades da carga, que sempre está evoluindo e apresentando novas demandas e problemas operativos. Assim, os sistemas de distribuição se tornam cada vez maiores em extensão e mais complexos na sua operação, com novos desafios para se entregar uma energia de qualidade, a qual também cada vez mais os consumidores estão exigindo.

Nas redes tradicionais de distribuição, o sistema de proteção sempre teve papel de suma importância para impedir que problemas em um ponto da rede se espalhem e venham a causar distúrbios em outras partes do circuito. Além disto, eles criam uma garantia operativa importante, pois agem de forma autônoma, visando a segurança da rede e das pessoas que estão perto dela.

Com o advento dos novos dispositivos e filosofias das redes inteligentes (REIs), poderá existir em qualquer sistema de distribuição uma troca paulatina de um dispositivo tradicional por um dispositivo inteligente (das REIs). Isto faz com que durante em certo período os dois dispositivos e as duas filosofias venham a conviver. Este tempo de implantação pode ir de poucos meses ou a vários anos, dependendo da capacidade de investimento e da necessidade operativa da concessionária. Assim, existe a necessidade de um estudo de implantação das funções dos dispositivos inteligentes das REIs junto com os esquemas de proteção tradicional. Este capítulo tem exatamente esta função de apresentar uma proposta de integração do agente inteligente com os dispositivos existentes nos sistemas de proteção das redes de distribuição existentes.

Inicialmente, o capítulo faz uma apresentação de alguns tópicos e conceitos que são úteis na integração do agente inteligente proposto com os dispositivos tradicionais de proteção. Em seguida, é apresentada uma função do agente inteligente para integração com os fusíveis existentes na rede. Após, é apresentada uma função que integra a atuação de religadores e seccionadores nas REIs.

7.1 Dispositivos Tradicionais de Proteção e as REIs

Observando-se as estruturas de proteção existentes atualmente nas redes de distribuição urbana, verifica-se que elas possuem alguns elementos interruptores de curto-circuito ao longo de seus circuitos, tais como disjuntores, fusíveis e religadores.

O fusível é um elemento que interrompe a corrente de curto-circuito através da queima de seu filamento, tendo que ser substituído fisicamente por uma equipe de manutenção da concessionária. Este reparo, por vezes, pode demorar horas (entre a detecção na falha e o deslocamento até o local), embora a troca em si seja feita em apenas alguns minutos.

Os religadores, normalmente associados a seccionalizadores, são dispositivos que têm a capacidade de eliminar curtos-circuitos, inclusive com todo o procedimento de tentativa de religamento para a verificação de curtos não permanentes.

Os seccionalizadores, com dito, atuam em conjunto com os religadores, mas não têm capacidade de eliminar curtos-circuitos. Se um seccionalizador observa uma corrente de curto-circuito, em uma das aberturas do religador, ele abre e permanece aberto isolando a alimentação do curto-circuito e permitindo que o restante do circuito continue a operar.

Outro aspecto da proteção das redes urbanas tradicionais engloba a sua coordenação e a sua seletividade. Estes dois conceitos são muito importantes. A coordenação é o ato de dispor dois ou mais equipamentos de proteção em série, de acordo com uma determinada ordem. A seletividade é a capacidade de os dispositivos protetores atuarem antes de seus dispositivos de retaguarda. Por exemplo, quando ocorre um curto-circuito, apenas um dispositivo de proteção deve atuar, sendo aquele que está o mais próximo possível do curto. Quando isto ocorre, diz-se que existiu uma coordenação entre os dispositivos de proteção e que houve seletividade entre eles. Um exemplo contrário é quando alguns (ou todos os) dispositivos de proteção que viram a corrente de curto-circuito atuam. Neste caso, diz-se que não existiu seletividade, mas que ocorreu a coordenação. Finalmente, quando o dispositivo de proteção mais próximo não atuou e um (ou mais) de retaguarda atuou diz-se que não ocorreu nem seletividade e nem coordenação. A Figura 62 mostra estas situações.

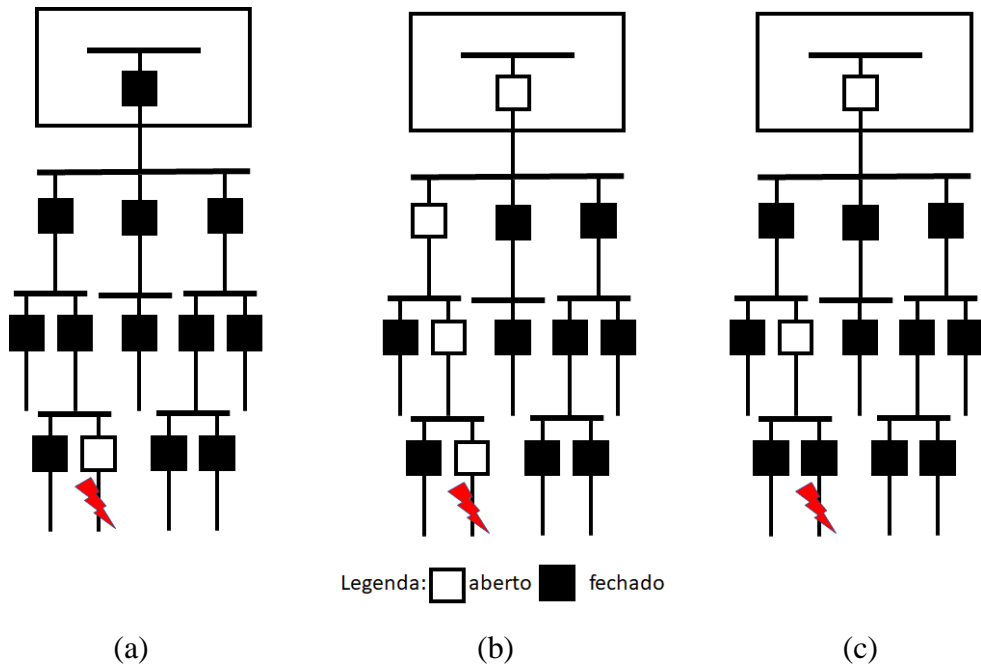


Figura 62. Situações de atuação da proteção: (a) com coordenação e seletividade, (b) com coordenação, mas sem seletividade, e (c) sem coordenação e sem seletividade

Quando os artigos da revisão bibliográfica deste trabalho foram analisados, eles mostraram que as chaves de ramal das REIs poderiam ser de dois tipos: nenhuma com capacidade de eliminação de curto-circuito (somente a da subestação) ou todas com capacidade de eliminação de curto-circuito. Porém, nenhuma delas precisa de manutenção após a eliminação do curto.

Nota-se, no entanto, que nenhuma dessas situações correspondem à realidade existente nas redes urbanas tradicionais, com seus fusíveis e religadores. Os fusíveis, por queimarem e necessitarem ser substituídos, embora sendo de baixo custo, têm uma aplicação nula nos artigos das REIs analisadas, devido ao tempo de restauração do sistema, que pode passar de alguns segundos (em redes completamente automatizadas) para horas. Neste trabalho, a seguir, mostra-se uma possível solução para este problema, com a continuação da utilização dos fusíveis em casos especiais.

Os religadores, quando associados a um agente, são tratados nas REIs como chaves que podem interromper correntes de curto-circuito, inclusive com todo o procedimento de tentativa de religamento para a verificação de curtos não permanentes, realizado pelos seccionalizadores. Esta utilização de agentes com religadores e seccionalizadores, que é proposta a seguir neste trabalho, também não é encontrada na literatura.

Vale reforçar que os agentes devem efetuar decisões que promovam, sempre que possível, uma solução que contemple a coordenação e a seletividade entre os dispositivos de proteção, sendo que este aspecto leva a próxima seção.

7.2 Função de Atuação com Fusíveis

Conforme comentado anteriormente, uma das funções que se propõe é a junção do agente inteligente (AI), proposto neste trabalho, com fusíveis; isto permitiria uma introdução mais gradual dos elementos das REIs junto às redes tradicionais urbanas. Com o passar do tempo e com disponibilidade financeira, poder-se-ia pensar na substituição dos fusíveis por agentes inteligentes.

Para a implementação desta função no AI, não basta simplesmente temporizá-lo para que os elos dos fusíveis se rompam antes dele atuar. O AI deve monitorar esta perda de carga e ter uma função de supervisão, ou seja, ele deve tomar uma ação de informar a central de operação sobre o rompimento do elo fusível e a consequente perda de carga. Isto possibilita que, antes de começar a receber chamadas dos consumidores sem energia, a concessionária possa enviar a equipe de manutenção para a troca do fusível, reduzindo o tempo de interrupção de energia, melhorando os índices DEC e DIC, uma das vantagens de uma REI.

Esta supervisão de atuação dos fusíveis a jusante do agente e monitoração de perda de carga decorrente de sua abertura é fácil de entender, mas para sua implementação necessita de um conjunto de cálculos que devem ser feitos em função da redução de corrente vista pelo agente, envolvendo comportamento diário da carga e previsão de carga. A função de percepção da redução de carga está no Nível 2, que detecta variações “anormais” na corrente, e coloca o agente no Nível 3. A função de verificação da redução de carga por abertura do elo fusível está no Nível 3; enquanto as funções que ela demanda estão no Nível 4 (comportamento diário da carga e previsão de carga).

Para exemplificar esta função, seja a Figura 63, onde os dispositivos de proteção S7 e S8 são agentes inteligentes e os dispositivos S9, S10, S11, S12 e S13 são fusíveis. O agente S7 supervisiona os fusíveis S12 e S13; enquanto o agente S8 supervisiona os fusíveis S9, S10 e S11.

Assim, quando o fusível S11 abrir, S7 e S8 verificam a redução de carga. Eles devem se comunicar para que descubram se isto ocorreu nos fusíveis supervisionados por S7 ou por

S8. Se ambos viram, a perda está no agente S8, mas se só S7 viu está nos fusíveis que ele supervisiona. No caso, ambos viram, então é um dos fusíveis supervisionados por S8, e ele deve iniciar um processo de análise para saber se foi o elo de S9, S10 ou S11 que se rompeu.

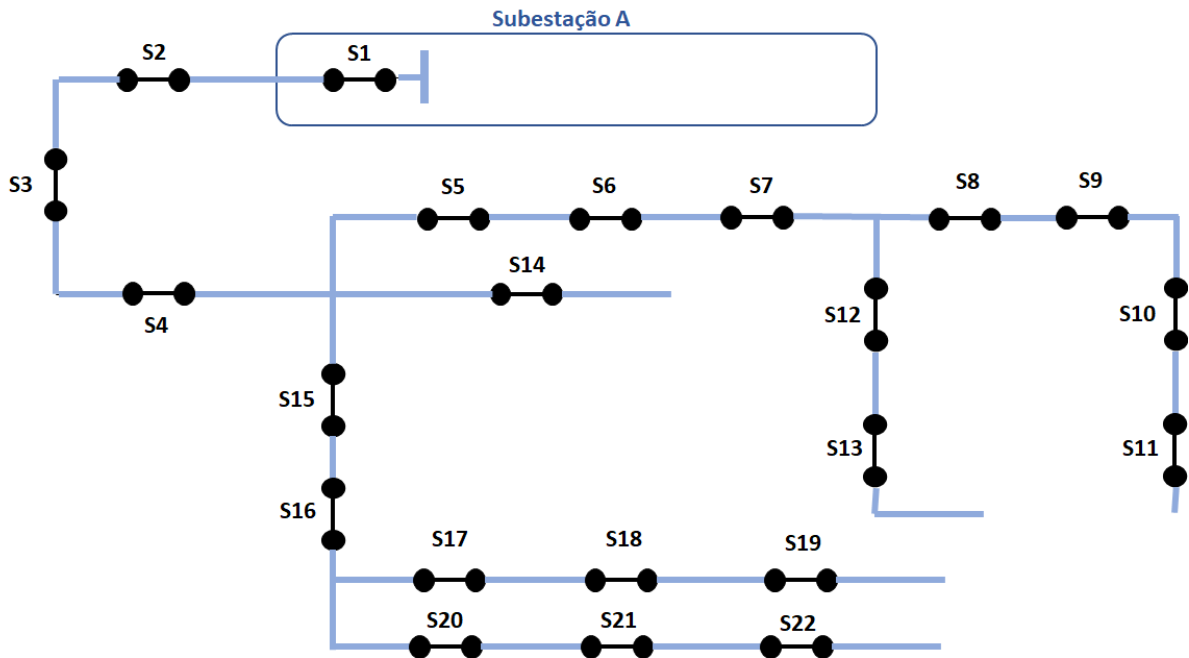


Figura 63. Rede de Análise 1

7.2.1 Procedimento de Verificação do Fusível com Problema

Estabelecido que o agente é o responsável pelo possível fusível que atuou, este procedimento de verificação se inicia com o agente inteligente inferindo se a redução abrupta da carga ocorreu devido a abertura de um fusível supervisionada por ela ou devido a uma simples saída de um grande bloco de carga (por exemplo, uma indústria). Esta verificação é feita através de um procedimento que apura se ocorreu, imediatamente antes da saída de um grande bloco de carga, uma corrente de curto-circuito. Se isto ocorreu existe fortes chances do elo fusível ter se rompido; caso contrário, deve ter havido uma saída de carga. Porém fica a pergunta: estas afirmações são completamente verdadeiras? A resposta para esta pergunta é não, pois o curto-circuito pode ter ocorrido dentro da indústria e seu disjuntor principal ter

retirado a indústria, sem queima do elo fusível; ou, na segunda hipótese, o elo fusível ter se queimado devido a uma sobrecarga no circuito².

Não obstante do fato deste procedimento não ser totalmente infalível, ele aumenta a observabilidade da rede elétrica, pois um agente mais próximo ao evento tem uma maior sensibilidade para poder direcionar os esforços de manutenção da rede do que a total falta de observabilidade que ocorre nas redes com proteções tradicionais puras.

Após a verificação da ocorrência de uma corrente de curto-circuito, o agente calcula a queda de carga ocorrida, em valores percentuais, ou seja, pela diferença entre a corrente de pré-falta e a corrente atual dividida pela corrente de pré-falta; este valor percentual é utilizado nos próximos passos deste procedimento.

O agente verifica se o valor da queda da carga percentual foi maior do que um valor Δ pré-estabelecido: se sim, o processo de inferência continua para o próximo passo; se não, ele é concluído e o agente volta a atuar no Nível 2. Este valor Δ é permite que pequenas variações típicas de carga não venham a ser confundidas com quedas de carga.

Com o processo continuando, o próximo passo é verificar junto a memória do agente inteligente o particionamento de carga de cada ramal, a qual é ali colocada quando da configuração inicial do agente.

Este particionamento de carga é feito através da carga horária esperada nos ramais e ela representa a carga horária típica do ramal durante uma semana. Normalmente, ramais puramente residenciais apresentam perfis de carga semelhantes, somente deslocando-se a curva dos dados na vertical, já outros tipos de perfis de carga (industrial ou comerciais ou compostos de vários tipos de carga) possuem perfis diversos. As concessionárias de energia possuem estes dados, pois efetuam campanhas de medição para outros propósitos.

Assim, com o horário que a inferência está sendo feita (ou o horário do evento, que é o mesmo), busca-se o horário inteiro mais próximo, calcula-se a carga de cada chave para este horário e os valores de particionamento em percentagem. Daí, comparam-se estes valores de particionamento com o valor percentual de queda de carga, verificando o mais próximo. O valor mais próximo define o fusível que atuou. Então, o agente deve enviar uma informação em direção a subestação informando o elo fusível que se rompeu, com a finalidade de agilizar o processo de manutenção e volta de energia ao(s) ramal (ramais).

² Deve-se lembrar que o elo fusível guarda uma “memória” dos eventos que por ele passaram. Esta memória ocorre, pois não necessariamente ele se funde de uma só vez. Cada vez que passa por ele uma sobrecarga ou uma corrente de curto-circuito (que ele não seja responsável primário por abrir) ele vai se degradando. Lembrar que este processo de degradação é térmico e irreversível.

7.2.2 Exemplo da Integração de Fusíveis com as REIs

Seja a Figura 63, onde, conforme relatado acima, o agente S7 supervisiona os fusíveis S12 e S13, e o agente S8 supervisiona os fusíveis S9, S10 e S11. Suponha ocorra um curto-circuito no ramal S10-S11. Com isto, a proteção correta, pelos critérios de coordenação, a atuar é o fusível S10 interrompendo a alimentação tanto do ramal S10-S11, quanto do ramal após S11.

Com o curto-circuito ocorrendo no ramal S10-S11, os agentes inteligentes S7 e S8 observaram a corrente de curto-circuito³.

O agente S7 nota que, pelo menos, um dos agentes de cada time também observou a corrente de curto e, por esta razão, infere que não deve tomar nenhuma ação, pois o curto não ocorreu na sua área de observabilidade.

O agente S8, pelo contrário, em um time não consegue esta informação, daí infere que o curto ocorreu em sua área de observabilidade. Daí, este agente realiza a diferença entre a corrente de pré-falta e a corrente atual. Supondo-se, que este valor sejam de 45A e 32A, respectivamente, calcula-se o valor percentual de queda de carga, 29 % ($= (45-32) / 45 * 100\%$).

Supondo-se que o valor de Δ seja de 4%, o agente infere que ocorreu a abertura de um dos elos fusíveis que ele supervisiona. Então, suas regras observam o horário corrente e tomam a hora inteira mais próxima. Adotando-se neste exemplo, um instante 17:42h de uma sexta-feira, são acessados os dados de carga típica de 18:00h de cada ramal. Por exemplo, os dados mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores típicos de carga para os ramais no tempo de 18h de uma sexta-feira.

Carga nos Ramais às 18h de um sexta-feira			
S8-S9	S9-S10	S10-S11	S11-X
15A	15A	15A	5A

³ Outros agentes também podem ter observado a corrente de curto-circuito, mas por simplicidade de explanação, relatam-se somente as inferências os agentes S7 e S8, já que os demais agentes verificam que eles não devem tomar nenhuma ação, como ocorre, no caso com o agente S7.

De posse destes valores, o agente monta as cargas de cada dispositivo e calcula o particionamento em percentagem. Os valores finais estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7. Cargas típicas no agente S8 e os fusíveis S9, S10 e S11 no tempo de 18h de uma sexta-feira.

Cargas às 18h de um sexta-feira			
S8	S9	S10	S11
50A	35A	20A	5A
	70%	40%	10%

Então, o agente confronta os valores percentuais da Tabela 7 com o valor percentual da queda de carga de 29%, inferindo que foi o elo fusível S10 que rompeu.

7.3 Função de Atuação com Religadores e Seccionalizadores

Os outros dispositivos que têm sido utilizados na proteção tradicional das redes urbanas são os religadores e os seccionalizadores. O funcionamento dos religadores, como dito anteriormente, é semelhante aos disjuntores existentes nas subestações. Eles também possuem capacidade de eliminação de um curto-circuito e um automatismo que permite a interrupção temporizada da corrente de curto-circuito com dois objetivos principais: verificar se o curto-circuito é transitório e permitir a operação dos outros dispositivos de proteção mais próximos à falta. Os seccionalizadores também observam a corrente de curto-circuito, mas não têm a capacidade de interrompê-la. Sua abertura só ocorre em uma das interrupções provocadas pelo religador. Podem existir vários seccionalizadores trabalhando um conjunto com um religador. Por exemplo, no circuito da Figura 63, o dispositivo de proteção S15 é um religador, e os dispositivos S17 e S20 são seccionalizadores. A ideia desta configuração é que faltas nos ramais após S17 (ou S20) venham a ser interrompidas, não por S15, mas pelos seccionalizadores responsáveis pelo ramal, fazendo com que os problemas da falta fiquem restritos a menor parcela possível da rede.

É importante mencionar que estes dois dispositivos podem não estar no mesmo time, mas a contagem do número de vezes que o religador efetua sua ação pode ser contada pelo agente do seccionizador. Este fato é semelhante ao primeiro exemplo da seção 4.3.1, onde o

agente da chave S3 conta o número de tentativas de religamento feita pela chave S1 (disjuntor da subestação), antes de iniciar o processo de isolamento do curto.

7.3.1 Procedimento da Função de Integração com Religadores e Seccionalizadores

Para exemplificar a Função de Integração com Religadores e Seccionalizadores, seja o circuito da Figura 63, onde o dispositivo de proteção S15 é um religador, os dispositivos S17 e S20 são seccionalizadores, S4, S5, S14, S16 e S18 são chaves com o agente proposto neste trabalho e S19, S21 e S22 são chaves fusíveis. É importante notar que S15, S17, S19, S20, S21 e S22 são dispositivos tradicionais sem o agente proposto incorporado. Desta forma, os times formados, nesta área de interesse do exemplo, são: S4-S5-S14-S16, S16-S18.

O procedimento desta função é semelhante ao apresentado na seção passada para a Função de Atuação com Fusíveis, com o conceito de perda de bloco de carga. Lá esta perda era feita com a abertura do fusível (rompimento de seu elo); aqui esta perda é feita com a abertura do religador ou de um seccionalizador. Então é importante saber qual agente monitora qual dispositivo.

Neste exemplo, S4 monitora S15, S16 monitora S17, S20, S21 e S22 e S18 monitora S19. Observe que para o agente não existe diferença entre a monitoração de um fusível (S21 ou S22) e de um dispositivo (S17 ou S20 – seccionalizadores), pois o que importa simplesmente é saber a partição de carga em cada ramal para que o cálculo descrito anteriormente possa vir a ser realizado pelo agente que monitora estes dispositivos de proteção (que no caso é S16).

Três casos ilustrativos são estudados nesta seção, com curtos nos ramais entre S17 e S18, entre S21 e S22 e entre S16, S17 e S20.

No primeiro caso, o curto-circuito ocorre no ramal S17-S18. Daí, a proteção atua da seguinte maneira: S15 verifica se o curto é temporário ou permanente e sendo este segundo, em uma de suas aberturas o seccionalizador S17 abre. Então, após a eliminação do curto, os agentes começam o seu processo de verificação e possível restauração dos ramais. Os agentes S4 e S16 observaram a corrente de curto; enquanto S18 não a observou.

Assim, o agente S4 concluiu que nada deve fazer pois o curto não está localizado em seu time (pois S16 também observou a corrente de curto). O agente S18 não observou então nada faz de imediato. O agente S16, que também observou a corrente de curto, contacta o agente S18 e verifica que o curto correu depois dele e que não está além do agente S18.

Como o agente S16 monitora os dispositivos de proteção S17, S20, S21 e S22, este agente deve verificar qual dispositivo atuou. Isto é feito pelo mesmo processo de partição de carga mostrado anteriormente. Desta forma, determina-se que S17 foi o dispositivo que atuou.

Poder-se-ia também se ter uma regra suplementar que indicaria se existem dispositivos de proteção entre S16 e S18 (que ficou sem energia) e se este segundo agente ficou sem energia é porque ocorreu a atuação de um dispositivo de proteção entre eles. Esta regra serve para verificação da veracidade de conclusão realizada pelo agente S16. E também quando o agente infere que um dispositivo atuou e envia um sinal em direção à subestação informando esta atuação (no caso, do dispositivo S17).

No segundo caso, o curto-circuito ocorre no ramal S21-S22. Daí, a proteção atua de maneira análoga: S15 verifica o tipo de curto e sendo permanente, em uma de suas aberturas o elo fusível S21 abre. Então, após a eliminação do curto, os agentes começam o seu processo de verificação e possível restauração dos ramais. Os agentes S4 e S16 observaram a corrente de curto; enquanto S18 não a observou. Então, o agente S16 infere que o curto correu depois dele e que não está além do agente S18.

O agente S16 contacta o agente S18, que lhe informa sua corrente atual. Desta forma, o agente, como tem os dispositivos de proteção S17, S20, S21 e S22 sob seu monitoramento, efetua o cálculo da perda de carga com o processo de partição de carga e verifica o dispositivo que está mais próximo à perda de carga efetuada, que no caso deve ser S21, enviando esta informação para a subestação.

Também aqui, no meio deste processo é feita a verificação da veracidade de conclusão, utilizando a regra, que confirma que se S18 também tem corrente é porque S17 não atuou.

Estes dois casos têm atuações similares e todas baseadas somente na partição de cargas entre os ramais. O próximo caso é um pouco diferente.

No terceiro caso, o curto-circuito ocorre no ramal S16-S17-S20. Daí, a proteção atua de maneira similar as passadas: S15 verifica se o tipo de curto e sendo permanente, como nenhum outro dispositivo atuou, ele abre. Então, após a eliminação do curto, os agentes começam o seu processo de inferência. Os agentes S4 e S16 observaram a corrente de curto; enquanto S18 não a observou. Então, o agente S16 infere que o curto correu depois dele e que não está além do agente S18. Ele também verifica que está sem corrente de carga, então infere que deve começar o processo de isolamento do curto.

Então, o agente S16 começa este processo, abrindo, travando e enviando uma mensagem para que S18 também abra e trave. Caso houvesse circuitos de socorro, o processo de restauração continuaria da mesma forma que foi apresentado anteriormente neste documento.

Ao abrir S16 envia um sinal, no caso, para S4, informando que o disjuntor pode fechar. Como existe corrente de carga em S4 e ele monitora um dispositivo de proteção tradicional, ela transforma esta mensagem em uma mensagem de atuação da proteção S15 e que existem um problema no ramal depois de S16 e antes de S18 (ramais S16-S17-S20, S17-S18, S20-S21, S21-S22 e S22-X). Quando o religador S15 atingir seu tempo de espera, ele automaticamente se fecha, não existindo mais a alimentação do curto e o ramal S15-S16 volta a ter energia.

7.3.2 Incorporação do Agente Proposto em Religadores e Seccionalizadores

O agente proposto está estruturado para atuar em qualquer tipo de chave, ou seja, com ou sem capacidade de eliminar a corrente de curto-circuito. Até este momento no trabalho, o agente foi utilizado de duas formas: nas chaves das subestações (disjuntores – que abrem corrente de curto) e nas chaves de ramal (seccionadoras – que não abrem corrente de curto). Porém vale lembrar que a estrutura do agente é a mesma para cada uma dessas chaves, não importando seu tipo.

Desta forma, a inclusão do agente proposto junto com religadores e seccionalizadores não traz nenhum tipo de problema, pois os primeiros são semelhantes (em sua atuação) aos disjuntores, enquanto os segundos são semelhantes (em sua atuação) às seccionadoras. Obviamente, deve-se manter as filosofias de coordenação e seletividade na estrutura de proteção tradicional.

Tendo-se os agentes colocados nos dispositivos de proteção S15, S17 e S20 da Figura 63, os novos times formados, na área de interesse, são: S4-S5-S14-S15, S15-S16, S16-S17-S20 e S17-S18.

7.4 Aplicação da Função de Integração Proposta com Dispositivos da Proteção Tradicional

Esta seção apresenta alguns exemplos ilustrativos da função de integração com elementos da proteção tradicional, ou seja, fusíveis, religadores e seccionalizadores. Para tal, é utilizado um circuito de uma rede real de uma concessionária brasileira [66], [67], conforme ilustrado na Figura 64. Nesta figura cada barra possui um dos elementos tradicionais de proteção urbana.

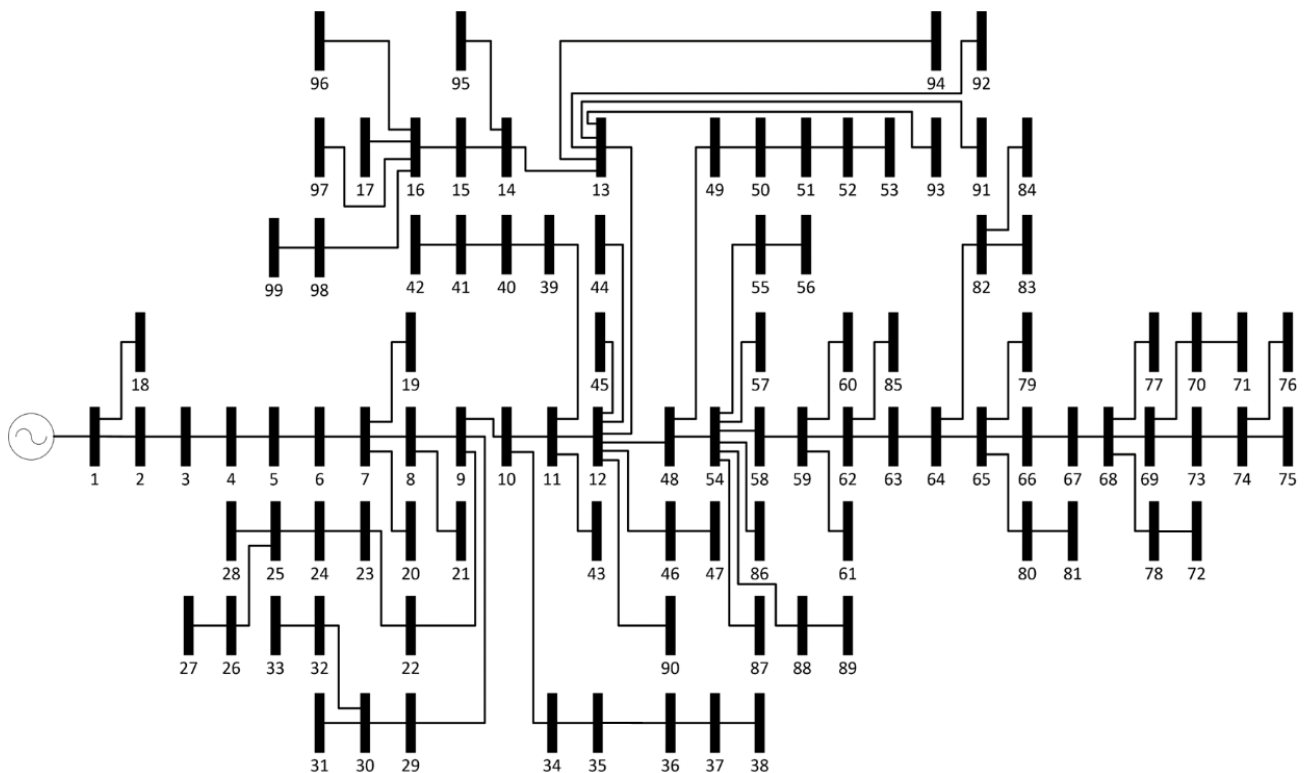


Figura 64. Diagrama unifilar de um circuito de distribuição real

Para este exemplo, a parte da rede que interessa é aquela situada após a barra 64 (inclusive). São instalados agentes inteligentes nas barras 64 e 68, sendo que o agente da barra 64 é instalado sobre um religador. Existem seccionalizadores das barras 69, 70 e 78; enquanto as demais barras (65, 66, 67, 69, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84) possuem fusíveis. Os dados de carga horários de cada ramal são divididos em dias de semana, sábados e domingos (incluindo aqui os feriados). Estes dados foram extraídos de um projeto piloto em mais 7000 consumidores residenciais ou comerciais de baixa tensão [68], [69].

Observando a Figura 64, verifica-se que o agente 64 supervisiona as proteções 65, 66, 67, 79, 80, 81, 82, e 83; e o agente 68 supervisiona as seguintes proteções: 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, e 78. Deve-se notar que os ramais terminais não estão representados na figura; entretanto, eles existem. Por exemplo, após da chave 76, existe um ramal com consumidores e carga. Isto foi feito para se manter o desenho da estrutura original apresentado nas referências [66], [67].

Três exemplos ilustrativos são apresentados a seguir. Neles, são introduzidos curtos-circuitos nos ramais 82–83, 70–71, e 74–76 para avaliar o desempenho da função de integração

proposta. Tem-se também um quarto exemplo no qual a proteção tradicional não atua corretamente.

7.4.1 Exemplo Ilustrativo 1: Curto-circuito no Ramal 82-83

Neste primeiro exemplo ilustrativo, o curto-circuito ocorre no ramal 82–83. Assim, a proteção tradicional elimina o curto através do fusível 82, que se rompe. Como o agente 64 observou a corrente de curto-circuito, ele estabelece uma comunicação com o próximo agente adjacente (no caso, o agente 68) e verifica que ele não observou a corrente de curto-circuito. Desta forma, o agente 64 infere que o curto-circuito ocorreu na área supervisionada por ele, iniciando o processo de verificação de qual proteção deve ter atuado.

O processo de cálculo do particionamento da carga ocorre, então, para os ramais por ele observados, que são: 64–65, 65–66, 66–67, 67–68, 64–82, 82–83, 82–84, 65–79, 65–80, 80–81, 79–X, 81–X, 83–X, e 84–X.

O agente verifica a corrente atual, calcula a diferença entre a corrente pré-falta e a corrente atual, e computa o valor da percentagem de queda de carga. Em seguida, a hora atual é checada e os dados para esta hora e tipo de dia são extraídos da memória do agente.

A carga em cada barra é transformada em valores percentuais utilizando os dados extraídos da memória. O agente, comparando o valor percentual da queda da carga e os valores percentuais de cada barra. Deve-se lembrar que as cargas na memória do agente estão registradas por ramal e a comparação é feita na barra, ou seja, a carga na barra é a somatória de todos os ramais após ela. Assim, o agente detecta que o dispositivo 82 atuou (ou seja, o fusível 82 se rompeu). Imediatamente, o agente envia uma mensagem à subestação informando a falta de energia pela atuação do fusível 82.

7.4.2 Exemplo Ilustrativo 2: Curto-circuito no Ramal 70-71

Neste segundo exemplo, o curto-circuito acontece no ramal 70-71. A proteção tradicional que elimina o curto-circuito é feita através do religador 64 e do seccionizador 70. Após três tentativas de fechar o circuito pelo religador 64, o seccionizador 70 abre, interrompendo a energia nos ramos 70-71 e 71-X. Se o seccionizador 70 tivesse um problema

de abertura, na quarta tentativa de fechar o circuito, o seccionalizador 69 (a proteção de *backup* de 70) poderia abrir, mas este não foi o caso.

Em seguida, os agentes 64 e 68 notam que ambos observaram a corrente de curto-circuito. Eles estabelecem comunicação entre eles. O agente 64 infere que o curto-circuito não estava localizado em sua área supervisionada, pois o seu agente adjacente 68 também notou a corrente de curto-circuito. O agente 68 infere que o curto-circuito aconteceu na área supervisionada. Assim, foi em um dos ramais 69-70, 70-71, 69-73, 73-74, 74-75, 74-76, 71-X, 75-X e 76-X, que o curto correu.

O agente 68 segue a mesma estratégia apresentada no estudo de caso anterior, medindo a corrente real, calculando a diferença entre pré-falta e corrente real, e calculando o valor percentual da queda da carga. Depois disso, os dados são pesquisados na memória (de acordo com o tempo atual), e a carga em cada barra é composta e transformada em um valor percentual. Comparando o valor percentual de queda de carga com os valores percentuais de cada barra, o agente 68 inferiu que a atuação ocorreu no dispositivo 70, por isso envia uma mensagem com essas informações para a subestação.

7.4.3 Exemplo Ilustrativo 3: Curto-circuito no Ramal 74-76

Este exemplo apresenta um curto-circuito no ramo 74-76, e através da proteção tradicional, o fusível 74 atuou, interrompendo o curto-circuito. Os processos de inferência nos agentes 64 e 68 são semelhantes aos do exemplo ilustrativo 2. O agente 64 infere que o curto-circuito aconteceu fora de sua área supervisionada. O agente 68, por sua vez, inicia o particionamento de carga de cada ramo, concluindo, no final, que o fusível 74 atuou, então ele envia essas informações para a subestação.

7.4.4 Exemplo Ilustrativo 4: Atuação errada da Proteção Tradicional

Suponha que o fusível 74 não tenha atuado no exemplo anterior e sua proteção de *backup* (fusível 73) atuou. Esse fato não é um problema para o processo de inferência de agentes inteligentes, e os agentes promovem o processo de inferência da mesma forma. O agente 64 não faz nada porque o curto-circuito não está na área supervisionada. Em contrapartida, o agente

68 calcula a divisão de carga de cada ramo, concluiria que o fusível 73 atuou e envia essas informações para a subestação.

A resposta está correta porque o fusível 73 atuou, mas apenas a equipe de manutenção verificará o mau funcionamento do sistema de proteção nesta parte da rede.

7.5 Sumarizando a Estrutura do Agente com as Regras deste Capítulo

Esta seção sumariza as principais ações do agente inteligente para a integração com os dispositivos de proteção tradicionais, que foram publicadas em [70].

7.5.1 Verificação da Atuação de um Dispositivo de Proteção Tradicional

A primeira parte da regra é verificar se o agente inteligente é o responsável pela busca da possível atuação de um dispositivo de proteção tradicional (fusível, religador ou seccionizador). Para isto, ele deve se comunicar com os agentes adjacentes a ele e verificar se eles também viram a corrente de curto-circuito; se, pelo menos um dos agentes de cada time viu esta corrente de curto, ele não é o agente responsável por fazer esta verificação. Porém, se nenhum dos agentes de um de seus times observou a corrente de curto-circuito, ele é o responsável por fazer a busca por uma possível atuação do dispositivo. As regras para isto são:

- Verificou a corrente de curto-circuito, verifica que pelo menos um agente de um time observou a corrente de curto, verifica que nenhum agente do outro time verificou a corrente de curto. Ação: buscar o dispositivo que atuou.
 - Se ICC foi registrada, se existe um dos times que não observou ICC então buscar atuação do dispositivo.
 - Se ICC foi registrada, se algum dos agentes dos dois times que observou ICC então retornar ao Nível 2.

A segunda parte da regra, que é aplicada somente ao agente que passou por sua primeira parte, é verificar se ocorreu a atuação do dispositivo de proteção tradicional, com uma consequente perda de um bloco de carga. Assim, quando a corrente voltar ao “normal”, deve-se verificar se a diferença entre a corrente de pré-falta e a corrente atual é superior a um valor

Δ (pré-fixado, que é menor do que a partição de carga dos ramais): se sim, deve-se assumir que houve uma atuação de um dos dispositivos supervisionados pelo agente; se não, assume-se que não ocorreu atuação da proteção supervisionada e o agente retorna ao Nível 2. As regras para isto são:

- Verifica a diferença entre a corrente pré-falta e a corrente atual e ela é maior que Δ .
Ação: continuar a busca pelo dispositivo que atuou.
 - Se $I_{Pré-Falta} - I_{Atual} > \Delta$ então continuar a busca pelo dispositivo que atuou.
 - Se I_{CC} foi registrada, se algum dos agentes dos dois times que observou I_{CC} então retornar ao Nível 2.

A terceira parte da regra é a busca pelo dispositivo que operou e isto está relacionado com a queda de carga (diferença entre a corrente pré-falta e a corrente atual no agente) e a hora do dia. Existe de forma pré-registrada no agente que supervisiona fusíveis a partição de carga que eles têm de forma horária. Assim, o agente deve aproximar a hora atual para a hora inteira mais próxima e comparar a percentagem de queda de carga, com as partições neste horário, inferindo que o fusível que atuou foi aquele com partição mais próxima. As regras para esta terceira parte são:

- Transformar a diferença entre a corrente pré-falta e a corrente atual para um valor percentual e verificar o horário atual (assumindo o horário inteiro mais próximo). Ação: buscar o valor percentual mais próximo.
 - Se $d = I_{Pré-Falta} - I_{Atual}$ e assumir o horário H:00 então verificar a partição mais próxima de d para H.

7.5.2 Verificação da Veracidade de Conclusão

Esta regra é utilizada para confirmar (ou alterar) a lista de verificação de dispositivos que proporcionaram a queda de carga. Isto ocorre quando estes dispositivos estão entre dois agentes inteligentes. Existem duas situações possíveis para a utilização destas regras, que sempre são ativadas após a definição da localização do curto pelo agente em um de seus times.

O primeiro caso é quando o agente após a eliminação do curto possui corrente de carga e o outro agente não possui. O segundo caso é quando ambos possuem corrente de carga após a eliminação do curto. Com isto, no primeiro caso, verifica-se que o dispositivo que atuou está entre os dois agentes e que todos os dispositivos entre dois é que compõe a lista a ser verificada.

No segundo caso, concluiu-se que nenhum dos dispositivos entre os dois agentes aturaram e, com isto, nenhum dos dispositivos deve estar na lista a ser verificada.

Não obstante estes fatos, todos os dispositivos devem estar presentes na composição do cálculo de partição da carga.

As regras para esta verificação da veracidade de conclusão são as seguintes:

- Verificar as correntes de carga dos agentes, se ambas são diferentes de zero. Ação: eliminar da lista de solução os dispositivos entre estes agentes.
 - Se I_{Atual} do agente $\neq 0$ e I_{Atual} do agente $\neq 0$ então eliminar da lista de solução os dispositivos entre estes agentes.
- Verificar as correntes de carga dos agentes, e uma delas é zero. Ação: a lista de solução é composta pelos dispositivos entre estes agentes.
 - Se I_{Atual} do agente $\neq 0$ e I_{Atual} do agente $= 0$ então a lista de solução é composta pelos dispositivos entre estes agentes.

7.6 Considerações Finais do Capítulo

O objetivo este capítulo foi o de compatibilizar os agentes das redes inteligentes, notadamente, o agente proposto neste trabalho, com os dispositivos de proteção tradicionais das redes elétricas de distribuição urbana. Este estudo de compatibilização é necessário, pois os dispositivos de proteção vão sendo trocados passo-a-passo, e durante um período de tempo razoável eles atuam em conjunto, principalmente em concessionárias sem grandes recursos financeiros. Desta forma, se os agentes puderem, desde o seu começo de atuação nas redes, interagir com os dispositivos de proteção (mesmo de forma indireta), aumentando a observabilidade da rede, seria bastante útil.

O agente proposto tem exatamente esta finalidade, ou seja, aumentar a observabilidade da rede para os centros de operação, reduzindo tempos de começo de intervenção na rede e auxiliando na diminuição dos índices de DIC e DEC.

A primeira função analisada é interação com chaves fusíveis, tentando verificar qual dos fusíveis supervisionados pelo agente teve seu elo rompido quando de um curto-circuito. Isto é feito com a métrica comparativa de proporcionalidade de carga. Obviamente, que quando menos chaves fusíveis forem observadas pelo agente, maior será a sua acurácia. Como o método proposto atua com cargas proporcionais típicas, nem sempre ele é infalível, mas antes

apresentar um falso positivo para o centro de operação do que esperar a reclamação dos consumidores para que uma ação seja tomada.

Em seguida, foi analisada a função de interação com religadores e seccionalizadores, onde eles são monitorados de forma análoga aos fusíveis. Não obstante terem uma atuação na proteção completamente diversa aos fusíveis; eles, na sua integração com os agentes inteligentes, são tratados de forma análoga, sendo feita uma métrica comparativa de proporcionalidade de carga da mesma forma.

Assim, ao final trata-se os dispositivos de proteção urbana, que continuam a ter suas atuações de forma completamente igual a tradicional, passando a ter um tratamento igual somente na análise de queda de carga.

Foi também apresentada neste capítulo a possibilidade de integração do agente inteligente nos religadores e seccionalizadores existentes nas redes de distribuição. Isto pode ser feito sem que nenhuma ação adicional necessite vir a ser feita, pois os religadores são chaves que abrem correntes de curto-circuito e se assemelham aos disjuntores de uma subestação, enquanto os seccionalizadores, que não abrem correntes de curto-circuito, se assemelham às seccionadoras. Tanto os disjuntores quanto as seccionadoras são as chaves que estão recebendo o agente inteligente proposto neste trabalho. Assim, esta incorporação é feita sem a inclusão de nenhum elemento extra.

8 Resultados Computacionais da Metodologia Proposta

Este capítulo apresenta alguns pacotes computacionais desenvolvidos para efetuar testes com a metodologia proposta do agente inteligente. Para facilitar a compreensão dos testes e de seus resultados, foram montados três pacotes computacionais, a saber: o primeiro testa o SMA proposto para situações de autorrecuperação da rede, o segundo mostra a função de integração do agente inteligente com a proteção tradicional e o terceiro programa faz uma validação estatística da função de integração. Todos os programas foram desenvolvidos em Python.

8.1 Testes na Função de Autorrecuperação

A criação de um pacote computacional para testes em um sistema multiagente é bastante complexa, pois diversos elementos que surgem na prática (por exemplo, pela variação normal da carga) devem ser alterados. Na prática, as correntes de carga existem naturalmente pelo suprimento ocorrido e no pacote elas devem ser geradas aleatoriamente e através de um programa de fluxo de carga estabelecer o fluxo das correntes nas diversas chaves e agentes.

8.1.1 Estrutura do Pacote Computacional de Autorrecuperação

O pacote computacional inicia-se com o carregamento das informações das chaves, como o seu nome, tipo, estado e modo de operação dentro do circuito, o programa busca as chaves vizinhas, formando os times e por fim, são carregadas as medições, o instante de tempo e a memória.

Toda vez que é executado o passo dentro do pacote, ou seja, uma comunicação entre chaves adjacentes, o programa retorna se o passo tem uma continuação ou se ele se encerra. Para cada passo, carregam-se as informações sobre as chaves, o circuito, o instante de tempo em que o passo está acontecendo e a memória.

Para todas as chaves do circuito, identifica-se as chaves de subestação, via o tipo dela, pois são chaves com capacidade de abertura em curto-circuito, desta forma, a chave estando fechada e em modo sobrecorrente, significa que há um alarme, ou seja, a presença de uma falta. A chave é aberta e o seu modo passa a ser de *self-healing*. É escrito na memória que existe um curto-circuito e no passo seguinte as chaves adjacentes irão ler esta mensagem. A mensagem é

composta pelo identificador que deu origem a mensagem, o recipiente ou destino, o tipo de comando e o valor, caso houver.

Assim, para cada mensagem recebida, verifica-se qual tipo de comando que a mensagem contém. Os comandos podem ser: *SearchFault*, *AreaIsolate*, *IsolateInfo*, *SearchRemai*, *IKARemai* e *AreaHelp*.

O comando *SearchFault* é uma pergunta sobre se as chaves viram a sobrecorrente, a sobrecorrente vira um valor de resposta podendo ser afirmativo ou negativo. A mensagem de busca pelas chaves que viram a sobrecorrente é propagada passo a passo até encontrar uma chave que responder que não viu a sobrecorrente. A chave ao receber uma resposta negativa, abre e inicia-se o comando *AreaIsolate*. Assim, é enviado um comando de abertura para as chaves adjacentes a ela que não viram o curto-circuito, e no passo seguinte, o ramal em falta é isolado e o comando de *IsolateInfo* é inicializado. Este comando tem a finalidade de informar que o ramal em curto está isolado. A chave de subestação, que está em modo *self-healing*, ao receber este comando pode fechar para alimentar o ramal desenergizado. A chave de socorro ao receber este comando inicia o comando *SearchRemai*, que é um comando que faz a pergunta da capacidade remanescente. A pergunta pela capacidade remanescente é propagada passo a passo até encontrar uma chave de subestação. A resposta da capacidade remanescente é feita através do comando *IKARemai*. O menor valor de capacidade de capacidade remanescente dentre as chaves é propagado até a chave que abriu e isolou o curto. Por fim, o comando *AreaHelp* é inicializado, a fim de buscar o circuito de socorro que tem a maior capacidade remanescente para que possa auxiliar no restabelecimento de energia dos ramais afetados.

Depois que rodar todas as mensagens de todas as chaves, o passo é incrementado, até que não haja mais mensagens. O instante de tempo é incrementado, faz-se o fluxo de carga e carrega-se as medições.

Este pacote computacional pode ser acessado em [71].

8.1.2 Simulações de Autorrecuperação

Esta seção apresenta dois exemplos de atuação do pacote computacional de autorrecuperação, com curtos-circuitos aplicados nos ramais entre as chaves S3 e S4 e entre as chaves S8 e S9. Em ambos os exemplos é utilizada a configuração do sistema teste 5, mostrado na Figura 39.

Assim, simulando um curto-circuito entre S3 e S4, tem-se que a chave S1 observa a falta e entra em modo sobrecorrente. Deste modo, por ser uma chave com capacidade de abertura para curtos-circuitos, ela abre e interrompe o fluxo de energia. Assim, a chave entra em modo *self-healing* e o processo de localização e isolamento do curto se inicia.

A chave S1 inicia o processo de localização de falta executando o comando *SearchFault*. O comando é uma pergunta sobre se as chaves também viram a sobrecorrente. No caso teste, a chave adjacente a ela é a chave S2. Como S2 registrou a sobrecorrente, no instante de tempo seguinte, a chave S2 recebe a pergunta e responde para a chave S1 que também viu a sobrecorrente. Neste caso, como a chave S2 também viu a sobrecorrente, significa que a falta não está localizada no ramal entre as chaves S1 e S2, assim, a pergunta deve continuar sendo feita até encontrar uma chave que não viu a sobrecorrente.

Nos instantes de tempo seguinte, a pergunta é propagada pelas chaves S2 e S3 até encontrar a chave S4. A chave S4 não registrou sobrecorrente, deste modo, a chave S3 que recebeu uma resposta negativa vinda da chave S4, assume que a falta está localizada no ramal entre as chaves S3 e S4, inicia o comando *AreaIsolate*. Neste mesmo instante, a chave abre e trava, e envia um comando de abertura para a chave S4 com a finalidade de isolar o ramal com curto-circuito. No instante seguinte, a chave S4 abre trava, e se dá o início do comando *IsolateInfo*. A chave S4 envia uma informação para todas as chaves adjacentes a ela, informando que procura por uma chave de socorro. Assim, a chave informa a chave S3, S13, S14 e S16 que busca por chaves que possam auxiliar no processo de restauração da rede. Nos instantes seguintes, estas chaves, por serem chaves normalmente fechadas, propagam a informação para as chaves adjacentes a elas, até encontrarem uma chave de socorro. A chave S1, que está em modo *self-healing*, ao receber esta informação, vinda da chave S2, entende que o curto-circuito foi isolado e por ela ser uma chave de subestação e como não está travada, deve ser fechada. Assim, S1 fecha alimentando os trechos entre S1, S2 e S3. As chaves S5 e S17 e a chave S12, por serem chaves de socorro, ao receberem a informação de curto-circuito isolado das chaves S13 e S15, respectivamente, iniciam o comando *SearchRemai*.

O comando *SearchRemai* é uma pergunta sobre a capacidade remanescente das chaves dos circuitos que podem auxiliar no processo de restauração. A pergunta é propagada passo a passo até encontrar uma chave de subestação. No caso teste, as chaves S9, S10 e S19 recebem esta pergunta e respondem através do comando *IKARemai*. O menor valor de capacidade remanescente dentre as chaves dos circuitos que podem auxiliar no processo de restauração é propagado até a chave que abriu e isolou o curto-circuito. Uma vez que todas as respostas retornaram para a chave S4, que abriu e isolou a falta, é possível iniciar o comando *AreaHelp*.

Este comando busca o circuito de socorro que tem a maior capacidade remanescente. Assim, S4 entende que a capacidade remanescente vinda de S13 é a maior dentre as correntes das outras chaves adjacentes e envia um comando de fechamento. A chave S13, por ser uma chave normalmente fechada sabe que deve replicar este comando, então envia este comando para a chave adjacente que respondeu com a maior valor de capacidade remanescente. A chave que entregou um maior valor de capacidade remanescente, foi a chave S5. Assim, a chave S5, sendo uma chave normalmente aberta e com tensão em um dos lados fecha e alimenta os trechos afetados pelo curto-circuito, restaurando a rede.

O Apêndice B – Resultado Passo a Passo das Simulações apresenta as saídas passo-a-passo deste exemplo.

No segundo exemplo desta seção é simulado um curto-circuito entre as chaves S8 e S9. Assim, tem-se que a chave S9 observa a falta e entra em modo sobrecorrente. Por ser uma chave com capacidade de abertura para curtos-circuitos, ela abre e interrompe o fluxo de energia. A chave S9 inicia o processo de localização de falta executando o comando *SearchFault*. Neste caso, a chave adjacente a ela é a chave S8. Então, a chave S9 pergunta para a chave S8 se ela também viu a sobrecorrente. No instante de tempo seguinte, a pergunta é recebida pela chave S8. A chave S8 como não registrou a sobrecorrente, responde para a chave S9 que não viu o curto-circuito. No instante seguinte a chave S9 abre e trava, entendendo que o curto-circuito está no ramal entre as chaves S9 e S8. Neste mesmo instante, inicia-se o comando *AreaIsolate*. A chave S9 envia um comando de abertura para a chave S8 com a finalidade de isolar o curto-circuito. No instante de tempo seguinte, a chave S8 abre trava, dando início ao comando *IsolateInfo*. A chave S8 envia uma informação para todas as chaves adjacentes a ela, informando que procura por uma chave de socorro. Assim, a chave S8 informa para a chave S7 que busca por uma chave que possa auxiliar na recomposição do sistema. A chave S7, por ser uma chave normalmente fechada, propaga esta informação até encontrar uma chave normalmente aberta com tensão somente em um dos lados.

As chaves S5, S17 e S12, por serem chaves de socorro, ao receberem a informação de curto-circuito isolado iniciam o comando *SearchRemai*. A pergunta sobre a capacidade remanescente é propagada passo a passo até encontrar uma chave de subestação. Neste caso, as chaves S1, S10 e S19 ao receberem a pergunta, respondem através do comando *IKARemai*. O menor valor de capacidade remanescente é propagado até a chave que abriu e isolou o curto-circuito. Uma vez que todas as respostas retornaram para a chave S8, é iniciado o comando *AreaHelp*. Este comando busca o circuito de socorro que tem a maior capacidade remanescente. Assim, S8 envia um comando de fechamento para a chave S7. A chave S7, por ser uma chave

normalmente fechada, replica o comando para a chave S6, que também é uma chave normalmente fechada, que por sua vez, replica o comando de fechamento para a chave S5. Assim, a chave S5, sendo uma chave normalmente aberta e com tensão em um dos lados fecha e alimenta os trechos que foram afetados pelo curto-circuito.

O Apêndice B – Resultado Passo a Passo das Simulações também apresenta as saídas passo-a-passo deste exemplo.

8.2 Teste da Função de Integração com a Proteção Tradicional

Este pacote computacional, composto por diversos programas, foi preparado para validar a abordagem proposta da função de integração com a proteção tradicional. Esta seção apresenta os resultados dos programas computacionais desenvolvidos após a realização de muitos testes.

A primeira subseção a seguir apresenta a estrutura do pacote computacional desenvolvido para testar a validade da abordagem proposta; enquanto a segunda subseção descreve como o programa desenvolvido com o algoritmo proposto foi executado uma vez para determinar uma lista de *switches* operados, criando um único curto-circuito separado para cada ramal. Na terceira subseção, o pacote computacional é executado milhares de vezes para se conseguir alguma medida estatística sobre a validação da função de integração proposta.

8.2.1 Estrutura do Programa de Teste da Função de Integração

A Figura 65 apresenta o fluxograma do pacote computacional desenvolvido. No início, o agente é carregado com a estrutura da rede monitorada, as posições dos interruptores e as posições dos agentes adjacentes. Em seguida, é apresentado a ele um conjunto aleatório de cargas (expressas em corrente) para cada ramal. O próximo passo é calcular a corrente inicial (I_0) que passa através do agente usando a carga aleatória de cada ramal. O agente utiliza essas cargas nas etapas seguintes. Esta parte do algoritmo é equivalente à abordagem proposta quando o agente acessa a carga horária de cada ramal registrada na memória local.

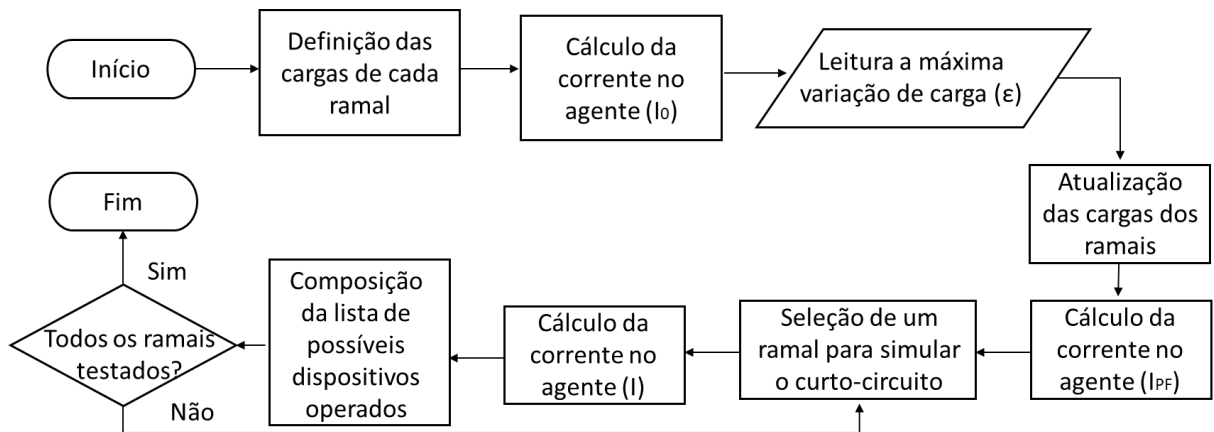


Figura 65. Fluxograma do pacote computacional de teste da função de integração

Depois disso, o programa lê um valor de ε (percentual), a variação máxima, para modificar os ramais de carga. Na etapa seguinte, cada ramal de carga é modificado usando valores aleatórios entre $-\varepsilon$ e $+\varepsilon$ sorteados individualmente para cada ramal. Isto é equivalente à variação de carga durante a operação regular. Então, a corrente no agente é calculada usando essas novas cargas. Esta corrente é a corrente pré-falta (I_{PF}) na abordagem proposta. Observe que essas novas cargas são usadas para determinar o dispositivo operado, mas apenas para calcular a corrente pré-falta, e em alguns passos à frente, a corrente real (I).

O algoritmo então inicia o teste em cada ramal, simulando um curto-circuito e a consequente operação do dispositivo responsável por eliminá-lo. Esse processo é realizado individualmente para todos os ramos observados do agente. Após a escolha de um ramal, a corrente real (I) é calculada, eliminando os ramais que tiveram a sua carga interrompida.

A lista de dispositivos operados é então composta após estas ações: (1) atualização dos valores iniciais de carga de ramo com a relação I_{PF}/I_0 ; (2) utilizando a configuração inicial do sistema, determinar a corrente em cada barra; (3) calcular a diferença entre $I_{PF} - I$, determinando a perda de um bloco de carga; e (4) compor uma lista com os possíveis dispositivos, observando os valores mais próximos de interrupção de carga. Todas essas ações estão representadas no fluxograma em uma única caixa.

O próximo passo verifica se todos os ramos foram testados ou não. Se não, o processo continua no próximo ramal; se sim, o processo é encerrado.

Este fluxograma apresenta uma única execução do algoritmo de validação. No entanto, na prática, o algoritmo é executado mil vezes, e para cada execução, um novo conjunto de cargas para os ramais é escolhido, mas o valor de ε não é modificado. Manter uma constante ε

é feito para saber o desempenho do algoritmo para uma determinada variação de carga. Observe que a mudança de carga para cada ramal continua a ocorrer.

Este pacote computacional pode ser acessado em [72].

8.2.2 Resultado de Testes

Neste exemplo, parte do circuito apresentado na Figura 64 é utilizado, como mostrado na Figura 66. Nesta seção, dois exemplos são mostrados. No primeiro, o agente está localizado no religador 64; no segundo exemplo, dois agentes estão situados nos dispositivos 64 e 68.

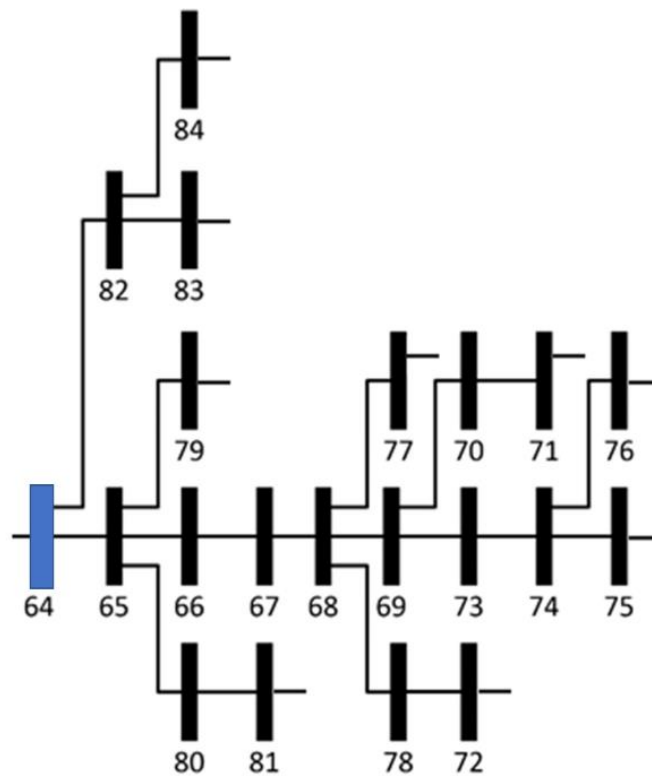


Figura 66. Parte do diagrama unifilar de uma rede real mostrada na Figura 64

No primeiro exemplo, suponha que o agente tenha sido montado no religador (dispositivo 64). Este agente é responsável por observar os switches numerados entre 65 e 81.

Nesta situação, o programa é executado, fornecendo uma carga aleatória para cada ramo, incluindo os ramais após as últimas barras (como 84, 83, 79, e assim por diante). Esses ramais também estão incluídos na lista de ramal onde ocorrem os curtos-circuitos.

Para se apresentar um exemplo numérico completo, os valores intermediários computados pelo pacote computacional são apresentados.

Na etapa inicial, a estrutura da rede após o dispositivo 64 é introduzido no programa. Depois disso, o programa cria cargas aleatoriamente (I_{0SW_x} , em pu) para cada ramal, conforme mostrado abaixo na segunda coluna na Tabela 8.

Tabela 8. Cargas utilizadas no exemplo.

Barra	Carga Inicial (I_{0SW_x})	Carga Pré-Falta (I_{PF_x})	Carga Inicial Ajustada (I_{0SW_x-novo})
64	5,067	5,168	5,062
65	1,259	1,239	1,258
66	2,836	2,738	2,833
67	2,522	2,637	2,519
68	5,786	5,691	5,780
69	5,421	5,199	5,415
70	6,796	6,521	6,789
71	1,675	1,733	1,674
72	3,798	3,837	3,794
73	1,312	1,352	1,310
74	2,515	2,573	2,512
75	4,342	4,358	4,338
76	1,292	1,353	1,291
77	2,379	2,350	2,377
78	5,242	5,269	5,237
79	4,511	4,660	4,506
80	2,483	2,512	2,480
81	4,792	4,966	4,787
82	6,132	6,179	6,125
83	1,138	1,161	1,135
84	6,114	5,836	6,098

Utilizando a estrutura da rede de distribuição e as cargas dos ramais (I_{0SWx}), o programa calcula a corrente inicial do agente (I_0), que é, para este exemplo, de 77,414 pu.

Neste exemplo, o valor (ϵ) foi definido como 5%. Esse valor está relacionado ao erro de previsão de carga, e este pode ser classificado como muito grande. Normalmente, esse valor está abaixo de 1% na previsão de uma hora. Em seguida, as cargas dos ramais são modificadas aleatoriamente com valores entre -5% e $+5\%$, obtendo-se a terceira coluna da Tabela 8, ou seja, o valor das cargas pré-falha (I_{PFx}) em cada ramal. Em seguida, utilizando a estrutura de rede e essas novas cargas dos ramais, o programa calcula a corrente de pré-falha (I_{PF}) no agente, que é de 77,332 pu.

Na prática, ou seja, durante a operação do agente nos sistemas de distribuição, esta etapa não existe, pois a corrente de pré-falha (I_{PF}) no agente é simplesmente medida pelo seu sensor de corrente.

Em seguida, o valor inicial de carga (I_{0SWx}) é atualizado utilizando o valor 0,9989 ($=I_{PF}/I_0 = 77,332/77,414$), gerando um novo conjunto de valores dos ramais de carga ($I_{SWx-novo}$), conforme mostrado na quarta coluna da Tabela 8. Neste caso, este cálculo de atualização de carga não é relevante, mas às vezes pode ser. Isto depende do tipo de variação da carga nos ramais.

Depois disso, o pacote computacional começa a estabelecer curtos-circuitos em cada ramal, testando cada dispositivo de proteção individualmente. Para cada curto, a corrente pós-falha (I) no agente 64 é definida pela nova estrutura da rede (sem as partes da rede que foram afetadas pela abertura do dispositivo de proteção) e pelas cargas modificadas (são utilizadas as cargas dos ramais na condição pré-falha, terceira coluna da Tabela 8). A perda do bloco de carga é obtida a partir da diferença entre $I_{PF} - I$.

Então o agente 64 compara esta perda do bloco de carga com as correntes de cada carga inicial modificada para compor a lista de possíveis dispositivos operados. A Tabela 9 mostra os resultados dos curtos-circuitos aplicados em todos os ramais da rede estudadas. Ele apresenta o dispositivo que atuou, a lista de possíveis dispositivos operados e a posição na lista do dispositivo operado correto.

Tabela 9. Resultado de curtos-circuitos aplicados nos ramais e a lista de possíveis dispositivos operados gerados pelo agente 64.

Dispositivo que atuou	Lista ordenada de possíveis dispositivos operados	Posição do Dispositivo Correto
------------------------------	--	---------------------------------------

64	[64, 65, 66, 67, 68, 69, 82, 73, 78, 70, 74, 80, 84, 81, 79, 75, 72, 77, 71, 76, 83]	1
65	[65, 66, 67, 64, 68, 69, 82, 73, 78, 70, 74, 80, 84, 81, 79, 75, 72, 77, 71, 76, 83]	1
66	[66, 67, 68, 65, 69, 64, 82, 73, 78, 70, 74, 80, 84, 81, 79, 75, 72, 77, 71, 76, 83]	1
67	[67, 68, 66, 65, 69, 82, 73, 78, 64, 70, 74, 80, 84, 81, 79, 75, 72, 77, 71, 76, 83]	1
68	[68, 67, 66, 69, 65, 82, 73, 78, 70, 74, 80, 84, 81, 79, 75, 72, 64, 77, 71, 76, 83]	1
69	[69, 82, 73, 78, 70, 74, 80, 68, 84, 81, 79, 75, 72, 67, 77, 71, 76, 83, 66, 65, 64]	1
70	[74, 70, 78, 80, 73, 84, 81, 79, 75, 72, 82, 77, 71, 76, 83, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	2
71	[71, 76, 83, 77, 72, 75, 79, 81, 84, 80, 74, 70, 78, 73, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
72	[72, 75, 79, 81, 77, 84, 71, 76, 83, 80, 74, 70, 78, 73, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
73	[73, 78, 70, 74, 80, 82, 84, 81, 79, 75, 72, 77, 71, 76, 83, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
74	[74, 70, 78, 80, 73, 84, 81, 79, 75, 72, 82, 77, 71, 76, 83, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
75	[75, 79, 81, 72, 84, 77, 71, 80, 76, 83, 74, 70, 78, 73, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
76	[76, 83, 71, 77, 72, 75, 79, 81, 84, 80, 74, 70, 78, 73, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
77	[77, 71, 76, 83, 72, 75, 79, 81, 84, 80, 74, 70, 78, 73, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
78	[78, 73, 70, 74, 80, 84, 82, 81, 79, 75, 72, 77, 71, 76, 83, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
79	[81, 79, 75, 72, 84, 77, 80, 71, 76, 83, 74, 70, 78, 73, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	2
80	[80, 74, 70, 84, 78, 73, 81, 79, 75, 72, 77, 71, 82, 76, 83, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
81	[81, 79, 75, 84, 72, 80, 77, 71, 74, 70, 76, 83, 78, 73, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
82	[82, 73, 78, 70, 74, 80, 84, 81, 79, 75, 72, 69, 77, 71, 76, 83, 68, 67, 66, 65, 64]	1
83	[83, 76, 71, 77, 72, 75, 79, 81, 84, 80, 74, 70, 78, 73, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
84	[84, 81, 79, 75, 80, 72, 74, 70, 78, 77, 73, 71, 76, 83, 82, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1

Ao observar os resultados da Tabela 9, é possível verificar que a abordagem proposta atingiu o alvo na maioria dos testes. Por exemplo, no primeiro exemplo, o curto-circuito foi aplicado no ramal 64-65 com o funcionamento do dispositivo 64; observe que este interruptor está em primeiro lugar na lista de possíveis dispositivos operados. A solução correta foi encontrada em segundo lugar quando os dispositivos 70 e 79 foram operados.

No segundo exemplo, dois agentes estão localizados nos dispositivos 64 e 68 da Figura 66, dividindo a observabilidade desta parte da rede entre estes dois agentes. Foram utilizados os mesmos dados da Tabela 8 e os resultados deste segundo exemplo, após feitos todos os passos e operações, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Resultado de curtos-circuitos aplicados nos ramais e a lista de possíveis dispositivos operados gerados pelos agentes 64 e 68.

Dispositivo que atuou	Lista ordenada de possíveis dispositivos operados	Posição do Dispositivo Correto
64	[64, 69, 65, 73, 74, 70, 66, 75, 67, 78, 76, 77, 68, 72, 71, 82, 79, 80, 83, 84, 81]	1
65	[65, 69, 66, 67, 68, 64, 73, 74, 70, 75, 78, 76, 77, 72, 71, 82, 79, 80, 83, 84, 81]	1
66	[66, 67, 68, 69, 65, 73, 74, 82, 70, 64, 75, 78, 76, 77, 72, 71, 79, 80, 83, 84, 81]	1
67	[67, 66, 68, 69, 65, 73, 74, 82, 70, 75, 64, 78, 76, 77, 72, 71, 79, 80, 83, 84, 81]	1
68	[68, 67, 66, 69, 65, 73, 82, 74, 70, 75, 78, 79, 80, 76, 77, 83, 84, 64, 72, 71, 81]	1
69	[69, 73, 82, 68, 74, 67, 66, 70, 75, 78, 79, 80, 76, 77, 83, 84, 72, 71, 81, 65, 64]	1
70	[70, 75, 78, 79, 80, 76, 77, 83, 84, 72, 71, 81, 74, 82, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
71	[81, 71, 72, 84, 77, 83, 76, 80, 79, 78, 75, 70, 74, 82, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	2
72	[72, 71, 81, 84, 77, 83, 76, 80, 79, 78, 75, 70, 74, 82, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
73	[73, 82, 74, 70, 75, 69, 78, 79, 80, 76, 77, 83, 84, 72, 71, 81, 68, 67, 66, 65, 64]	1
74	[74, 82, 73, 70, 75, 78, 79, 80, 76, 77, 83, 84, 72, 71, 81, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
75	[75, 70, 78, 79, 80, 76, 77, 83, 84, 72, 71, 81, 74, 82, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
76	[76, 83, 77, 80, 79, 78, 84, 72, 71, 81, 75, 70, 74, 82, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
77	[76, 83, 77, 80, 79, 78, 84, 72, 71, 81, 75, 70, 74, 82, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	3
78	[78, 79, 80, 76, 77, 83, 75, 84, 72, 71, 81, 70, 74, 82, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
79	[80, 79, 83, 84, 81, 71, 72, 77, 76, 78, 75, 70, 82, 74, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	2
80	[80, 79, 83, 84, 81, 71, 72, 77, 76, 78, 75, 70, 82, 74, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
81	[81, 84, 83, 80, 79, 71, 72, 77, 76, 78, 75, 70, 82, 74, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
82	[82, 71, 72, 77, 76, 78, 75, 70, 79, 80, 83, 84, 81, 74, 73, 68, 67, 66, 69, 65, 64]	1
83	[83, 80, 84, 79, 81, 71, 72, 77, 76, 78, 75, 70, 82, 74, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1
84	[84, 83, 80, 79, 81, 71, 72, 77, 76, 78, 75, 70, 82, 74, 73, 69, 68, 67, 66, 65, 64]	1

A maioria dos testes também acerta o dispositivo que atuou; isto apenas não ocorre nas interrupções promovidas pelos dispositivos 71 e 79, que estão classificadas em segundo lugar, e pelo dispositivo 77, que está no terceiro lugar.

Observa-se, comparando o resultado das duas últimas tabelas, que com dois agentes a classificação do dispositivo que atuou foi pior. Isto na maioria das vezes não ocorre, pois com uma maior observabilidade da rede, a discriminação das cargas nos ramais é também maior. Porém, este fato, não impede que algumas vezes isto não venha a ocorrer, como neste segundo

exemplo. Esta foi a razão deste segundo exemplo ter sido escolhido, entre, literalmente, milhares de simulações executadas.

8.2.3 Validação Estatística da Função de Integração

Observe que o programa usa valores de carga aleatórios e cada vez que o programa é executado, um resultado aparece. Desta forma, o pacote computacional foi alterado para ser executado milhares de vezes como o objetivo de validar a abordagem proposta e criar resultados estatísticos fundamentados. Este pacote computacional pode ser acessado em [73].

A cada interação do pacote computacional, ele gera diferentes cargas nos ramais, utiliza valores aleatórios de ϵ para cada ramal e simula curtos-circuitos em cada um dos ramais da rede.

No primeiro exemplo de validação, foi utilizada a rede mostrada na Figura 66, e o agente também foi localizado no religador 64. Foram realizadas mil execuções do programa para cada valor de ϵ , sendo que os valores escolhidos foram de 1%, 2%, 5% e 10%, portanto foram realizadas 4.000 execuções. A Tabela 11 mostra esses resultados.

Tabela 11. Resultados corretos da lista de possíveis dispositivos operados gerado pelo agente 64 (em percentagem).

ϵ	Posição na Lista				Erro	Acerto	Erro	Erro
	1°	2°	3°	4°	Total	Total	1°	1° + 2°
1%	96,19%	3,81%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	3,81%	0,00%
2%	95,24%	4,29%	0,48%	0,00%	0,00%	100,00%	4,76%	0,48%
5%	92,00%	4,67%	3,33%	0,00%	0,00%	100,00%	8,00%	3,33%
10%	74,29%	18,57%	6,19%	0,48%	0,48%	99,52%	25,71%	7,14%

Ao observar os resultados obtidos nas colunas “posição na lista” da tabela, é possível verificar se o número de acertos (96,19%) que estão em primeiro lugar na lista é maior quando o valor de ϵ é pequeno. Este fato é esperado, pois a diferença entre as cargas modificadas e as cargas iniciais modificadas aumenta com o valor de ϵ .

O pior resultado (74,29%) ocorreu quando ϵ foi igual a 10%, mesmo assim o grau de acerto é alto. Entretanto, esse valor na prática não existe porque, como mencionado

anteriormente, o valor de ϵ está relacionado à previsão de carga. Este tamanho de troca de carga não é comum em uma operação de distribuição. Este exemplo foi incluído para verificar a qualidade da detecção da abordagem proposta mesmo em situações extremas.

As duas próximas colunas “erro total” e “acerto total” são complementares e informam quando o dispositivo que atuou não está nas quatro primeiras posições da lista de possíveis dispositivos operados. Observa-se que, para este exemplo, para erros menores ou iguais a 5%, eles sempre estão nas três primeiras posições da lista. Executando-se este pacote computacional outras vezes, em algumas delas existem dispositivos classificados na quarta posição, para erros menores ou iguais a 5%, mas nunca ocorreu do grau de acerto não ser 100%, considerando-se as quatro primeiras posições da lista.

As duas últimas colunas da Tabela 11 mostram o nível de erro esperado quando a lista enviada ao operador contém apenas um elemento (um dispositivo) ou dois elementos (dois dispositivos). Por exemplo, quando o valor de ϵ é de 2%, esses valores são de 4,76% e 0,48%, respectivamente. O valor máximo atingido para esta percentagem de erro sempre foi inferior a 8% na lista de um elemento e 3% na lista de dois elementos; refletindo que se forem enviados ao operador dois possíveis dispositivos que foram operados o grau de acerto será maior do que 97%.

O segundo exemplo de validação utiliza agentes inteligentes localizados nos dispositivos 64 e 68. Nesta situação, esta parte do circuito é dividida em duas partes: uma observada pelo agente 64 (monitorando os dispositivos 65-67 e 79-84) e outra observada pelo agente 68 (monitorando os dispositivos 69-78). Os mesmos testes descritos acima foram realizados para estes dispositivos, e os resultados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12. Resultados corretos da lista de possíveis dispositivos operados gerado pelos agentes 64 e 68 (em percentagem).

ϵ	Posição na Lista				Erro	Acerto	Erro	Erro
	1°	2°	3°	4°	Total	Total	1°	1° + 2°
1%	99,52%	0,48%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,48%	0,00%
2%	95,71%	3,81%	0,48%	0,00%	0,00%	100,00%	4,29%	0,48%
5%	92,86%	6,67%	0,48%	0,00%	0,00%	100,00%	7,14%	0,48%
10%	79,05%	14,29%	3,33%	2,38%	0,95%	99,05%	20,95%	6,66%

Nota-se, observando-se os resultados da tabela, que o grau de acerto na primeira posição quando se utiliza dois agentes é superior ao grau de acerto com apenas um agente. Por exemplo, para um valor de ϵ de 5%, o grau de acerto com 2 agentes é de 92,86% enquanto para um agente somente é de 92,00%. E mais, nos diversos casos executados para, por exemplo, um valor de ϵ igual a 5%, o valor do erro, enviando apenas um dispositivo nunca foi superior a 10% e enviando dois dispositivos ao operador nunca foi superior a 3%, ou seja, com um grau de acerto superior a 97% do dispositivo que atuou.

Ainda em relação aos resultados das duas tabelas anteriores, verifica-se que o nível de grau de acerto aumentou. Isso também era esperado pois a rede sendo a mesma, teria uma melhor observabilidade quando se divide este monitoramento por dois agentes.

Após a execução do pacote muitas vezes, o erro foi continuamente inferior a 3%, o que valida a abordagem proposta nos piores casos. Mesmo um erro acima de 10% seria aceito porque o operador do sistema não tem nenhuma observabilidade nas redes tradicionais de distribuição. Assim, qualquer contribuição é muito bem-vinda durante a operação, mesmo que parcialmente não confiável. A abordagem proposta pode atingir esse nível de erro (em torno de 10%) quando um agente inteligente monitora a proteção de centenas de ramais. No entanto, este caso ocorre apenas quando o número de agentes inteligentes é pouco comparado com o número de dispositivos de proteção supervisionados.

9 Conclusões

Esta tese de doutorado apresentou a proposta de um sistema multiagente inteligente de autorrecuperação das redes de distribuição urbanas quando elas sofrem intercorrências, tais como curto-circuito em seus ramais, deixando parte de seus consumidores sem energia.

O sistema multiagente proposto é baseado no trabalho conjunto de agentes inteligentes híbridos que estão espalhados ao longo da rede elétrica e que operam na posição de uma chave que está na rede. Cada agente se comunica somente com os agentes adjacentes a ele, formando assim, times que são compostos por chaves e ramais.

Os agentes propostos nesta tese são ditos inteligentes, pois utilizam técnicas inteligentes em seus processos internos, e híbridos, pois podem reunir várias técnicas inteligentes e podem utilizar várias programas e rotinas matemáticas, durante o seu processo de tomada de decisão. É importante notar que os agentes propostos, a serem associados às chaves, são os mesmos independentemente da posição e tipo da chave que ele comanda. Ou seja, o agente inteligente proposto é único, e ele conhece, através de um conjunto de parâmetros ajustados no momento de sua instalação física e de seus procedimentos internos, o tipo da chave e a sua posição atual.

9.1 Realizações da Tese

Esta tese iniciou com um estudo aprofundado e crítico da literatura existente de autorrecuperação e da aplicação de multiagente na solução deste problema. Nela, identificou-se alguns pontos fortes da solução via multiagente descentralizada face a outros tipos de solução, principalmente quanto a sua expansibilidade e ao tratamento local do problema. Na expansibilidade, nota-se que não existe um número máximo de agentes e nem uma limitação de processamento, já que os agentes trabalham de forma autônoma e o processamento das informações ocorre internamente. O tratamento local do problema refere-se à obtenção de uma solução que fique o mais próxima possível do problema (por exemplo, do ramal em curto). Esta característica é desejável, pois assim os operadores atuam. Eles preferem sempre restringir a área de solução de um problema mesmo que uma solução ótima não seja a encontrada.

A revisão bibliográfica apontou um ponto fraco na solução via sistema multiagente descentralizado, que é a grande troca de mensagens e a necessidade de se ter algum tipo de redundância e de verificação. Mesmo com este ponto fraco, optou-se nesta tese por desenvolver

um sistema multiagente descentralizado e se tratar deste problema de comunicação entre agentes.

Estes dois aspectos, distribuída e descentralizada, são características muitas vezes buscadas por sistemas que vêm sendo publicados com estas características, mas sem que realmente isto ocorra em todos os níveis do processo de decisão. Muitas vezes, algumas decisões são tomadas localmente, mas outras dependem de um processamento central.

O agente inteligente híbrido proposto é composto por duas partes principais: uma física e outra lógica. A parte física possui como entes principais três sensores, um atuador, um sistema de comunicação, uma memória local e uma unidade de processamento. Os sensores, responsáveis pela percepção das grandezas do mundo exterior pelo agente, são compostos por dois sensores de tensão e por um medidor de corrente. Cada um dos sensores de tensão é instalado em um dos dois lados da chave controlada pelo agente. O atuador é o responsável por emitir o sinal de abrir, fechar ou travar comandando a posição final da chave. O sistema de comunicação, um dos pontos fundamentais deste trabalho e de sua diferença em relação aos demais trabalhos na área, tem como vantagem sua necessidade reduzida de alcance, já que cada agente só se comunica com os agentes das chaves adjacentes, ou seja, com os agentes das chaves de seus times. A memória local, didaticamente, pode ser dividida em três partes principais. A primeira é a responsável por conter um conjunto de dados que são inseridos quando o agente da chave é instalado. Assim, nesta parte da memória são colocados dados, tais como: tipo da chave, os agentes de seus times e capacidade nominal da chave. A segunda parte é onde se encontram os dados que são registrados pelos sensores e os valores calculados pelos processos de inferência na tomada de decisão que devem ser armazenados para futuras avaliações ou ações. Nesta área estão valores como a corrente pré-falta, a capacidade remanescente e as correntes típicas ao longo do dia. A terceira parte da memória local é destinada a ser um quadro-negro, ou seja, os valores são escritos durante um processo de tomada de decisão e apagados logo depois que o processo se encerra. Finalmente, a unidade de processamento é o ente que abriga a parte lógica do agente proposto.

Esta parte lógica, principal contribuição desta tese, foi dividida em quatro níveis hierárquicos, denominados: nível de instinto, nível de trabalho normal, nível de trabalho anormal e nível de otimização e predição. Todos estes níveis trabalham em conjunto e esta divisão foi feita somente para a apresentação do agente de uma forma mais didática. Contudo, as regras e procedimentos, internamente, são estruturadas para um melhor desempenho do agente, tanto em rapidez quanto em sua acurácia de resposta.

O primeiro nível, chamado nível de instinto, contém poucas regras e serve para que o agente tome decisões rápidas baseadas em poucas medidas feitas pelos sensores. Normalmente, elas agem durante o evento da intercorrência, como no curto-circuito. Estas decisões podem resultar em ações externas (como abertura de chave para eliminar um curto-circuito) ou ações internas (como registrar a corrente de pré-falta também durante um curto-circuito).

O segundo nível contém regras para serem utilizadas na operação normal da rede urbana. Neste nível é que são medidas e registradas, por exemplo, as cargas típicas nos vários instantes do dia, onde são verificadas possíveis alterações de tensão e carga (mas ainda dentro dos limites operacionais) e algumas ações de comunicação entre os agentes adjacentes. Neste nível, possíveis exemplos de ações são registros de valores de carga na memória local, registro de pequenos desvios na tensão ou na carga gerando o início de um processo de subtensão ou sobrecarga ou ações para o retorno ao estado inicial.

O terceiro nível contém regras para serem utilizadas durante uma operação anormal da rede urbana, por exemplo, durante os processos de isolamento de um curto, de restabelecimento da energia, de disputa entre agentes, entre outros. Este nível pode produzir vários tipos de ações e utiliza de forma extensiva a comunicação com os agentes de seus times. É neste nível que são produzidas respostas como capacidade remanescente de um circuito, verificação de valores de disputa entre agentes, envio de comandos, perguntas e informações, recebimento de respostas, entre outros.

O quarto nível também contém regras e procedimentos operativos que visam otimizar a operação da rede e efetuar predições para as diversas funções existentes no terceiro nível e neste próximo nível. Muitas vezes, para realizar estas tarefas, é necessário que programas externos ou rotinas computacionais venham a ser utilizados para realizar cálculos mais complexos, procedimentos matemáticos iterativos e/ou processos de otimização com técnicas matemáticas ou inteligentes. Normalmente, as ações deste nível são ligadas ao registro de valores na memória local ou de suprimento de dados e informações para os processos em curso no terceiro nível.

Este documento mostra a estruturação com os níveis do agente inteligente híbrido proposto. Sempre se relatou o caso mais significativo de ocorrência em uma rede de distribuição urbana, que é o curto-circuito em um de seus ramais e a perda de suprimento de carga para alguns outros ramais; porém esta estruturação pode ser utilizada para outros eventos como sobrecarga ou subtensões na rede, basta que parâmetros sejam estabelecidos para dar início ao funcionamento da estrutura lógica. Inclusive funções de resposta à demanda com situações de sobrecarga, corte de carga, priorização de carga e evolução da carga possuem funções

específicas nos agentes e são utilizadas quando dos processos de autorrecuperação, sendo definidores para a obtenção de uma resposta mais adequada possível diante da situação de emergência operativa imposta à rede elétrica.

A estratégia de solução deste problema de autorrecuperação foi efetuada pelo agente proposto para diversas situações operacionais. Inicialmente, cinco exemplos foram discutidos e as regras operacionais de cada nível da parte lógica foram apresentadas. Também junto com isto uma nova forma de representação temporal das ações foi feita para que se pudesse verificar como cada um dos agentes do sistema multiagente estava funcionando em um dado instante.

Nesta tese também é proposta uma forma de se representar uma análise temporal do funcionamento do agente de forma isolada e conjunto (como multiagentes). Tabelas temporais com comandos e interações entre agentes mostram uma forma de se verificar como cada agente está atuando em cada instante de tempo.

O ponto fraco dos sistemas multiagentes descentralizados, que é a comunicação e troca de mensagens entre os agentes, também foi alvo de estudos e proposições nesta tese. É proposta uma forma confiável, com redundância e agentes de retaguarda para solucionar o problema de troca de mensagens entre os agentes tornando-a verificável através de uma mensagem estruturada e de um dicionário comum. A função de retaguarda de um agente ocorre quando existe a falha da chave de um agente em executar o comando dado ou quando o agente não responde a um comando (ou mensagem) a ele enviado.

Outro elemento proposto neste trabalho são as funções de relacionamento dos agentes com os componentes dos sistemas de proteção tradicionais das redes urbanas. Estas funções permitem que REI incompletas ainda, possam se atuar em conjuntos com os elementos típicos de um sistema de proteção tradicional, como fusíveis, religadores e seccionadores. Os agentes passam a ter um caráter de observabilidade desses componentes e podem informar aos centros de operação e manutenção quando eles atuam, fazendo com que as equipes de manutenção possam ser rapidamente dirigidas a chave de atuou, reduzindo o tempo de reparo, uma das vantagens das REIs.

Finalmente, foram desenvolvidas plataformas para testes de sistemas multiagentes. A primeira plataforma serve para testar a atuação individual do agente proposto e dos agentes em conjunto produzido uma determinada solução. Ela permite a configuração de um sistema de distribuição com chaves, ramais e cargas. Ela internamente executa, de forma transparente ao usuário, um programa de fluxo de potência e um arquivo de entrada de dados temporal para que os valores de carga possam ser atualizados constantemente e que ações dos agentes possam ser manifestadas não só através dos atuadores, mas também de suas ações internas e de

comunicação. Isto possibilita a completa verificação das regras e procedimentos do agente em diversos casos. Assim, esta plataforma possibilita que existam estudos de vários tipos de curtos-circuitos, verificando a resposta a cada um deles do sistema multiagente proposto.

As outras duas plataformas desenvolvidas servem para testar os procedimentos junto ao sistema de proteção tradicional. A primeira testa a atuação específica de um agente em reconhecer qual dispositivo de proteção tradicional atuou. A segunda permite fazer um tratamento estatístico do grau de acerto da solução gerada pelo agente supervisor face a um grande conjunto de teste com múltiplas situações operativas.

9.2 Contribuições da Tese

Quatro foram as contribuições desta tese de doutorado, a saber:

- a estrutura hierárquica e híbrida do agente inteligente,
- a representação de uma análise temporal do funcionamento do agente de forma isolada e em conjunto na forma de multiagentes,
- o estabelecimento de uma mensagem estruturada, de um dicionário de identificação de mensagens e de um sistema de retaguarda, e
- a possibilidade de relacionamento com componentes dos sistemas de proteção tradicional.

O agente inteligente, da forma que ele está sendo proposto, ainda não foi apresentado na literatura, como mostra a revisão bibliográfica feita. E mais, a solução obtida, mesmo com uma comunicação realizada somente com os agentes de um mesmo time, produz um efeito de otimização da rede. A solução proposta inclui a utilização desses agentes em forma conjunta gerando um sistema multiagente inteligente que estará distribuído ao longo de toda a rede urbana e apresentando uma solução completamente descentralizada.

O sistema de representação e análise temporal do funcionamento do agente de forma isolada e em conjunto na forma de multiagentes também é inédita e permite que a cada instante do processo de funcionamento do sistema multiagente possa vir a ser detectado o estado do agente.

No sistema de comunicação proposto, a troca de mensagens funciona de forma expedita, envolvendo processos de validação, de integridade das mensagens e de redundância. Neste sistema de comunicação, mesmo simples, permite que todas as mensagens necessárias para a

perfeita sincronia de funcionamento do conjunto multiagentes possam ser efetuadas. Ele também leva em consideração possíveis falhas de atuação das chaves por eles comandadas e, a exemplo dos sistemas de proteção tradicionais, permite que existam atuações de retaguarda. Este é mais um ponto de originalidade desta tese, pois a maioria nos sistemas não trata deste ponto, sempre considerando que a atuação das chaves do sistema multiagente é infalível e a prática mostra que isto não é verdade.

E mais, o sistema multiagente proposto também trabalha com os dispositivos dos sistemas de proteção tradicionais das redes urbanas de eletricidade, ou seja, um agente pode supervisionar a atuação de dispositivos como religadores, seccionadores e fusíveis, que não possuem nenhum tipo de comunicação. Para tal, foi definida uma estratégia que também está incorporada à parte lógica dos agentes que permite inferir, com alto grau de acerto, qual dispositivo atuou e, em seguida, informar ao centro de operação para que possa ser acionada o mais breve possível a equipe de manutenção, reduzindo assim a duração da interrupção de energia aos clientes e melhorando o DEC e o DIC da empresa. Esta função do agente permite que ele aumente a observabilidade de rede elétrica por parte de seu operador, o qual pode passar a ter um papel mais ativo em sua operação. Esta parte da tese também é outra originalidade deste trabalho, pois nenhum outro tratou deste assunto anteriormente; além de ser de suma importância principalmente em redes de distribuição urbana onde os processos de automação podem levar anos para serem concluídos e a operação conjunta das novas tecnologias de redes inteligentes e da proteção tradicionais podem ter que conviver por vários anos, como é o caso das concessionárias brasileiras.

Sumarizando, a originalidade desta tese de doutorado reside na nova estrutura do agente inteligente proposto, com quatro níveis hierárquicos, acessando rotinas computacionais externas, com sistema de comunicação próprio e somente com os agentes adjacentes, que permitem criar um sistema multiagente capaz de solucionar de maneira mais eficaz problemas operativos das redes de distribuição atuais e futuras.

9.3 Trabalhos Futuros

O agente inteligente proposto neste trabalho possui uma estrutura aberta a qual permite que novas regras sejam continuamente inseridas e/ou modificadas de acordo com as novas situações operativas que se deseje que ele venha a participar. Nesta seção são apresentadas

quatro linhas de possíveis desenvolvimentos que podem ser feitos a partir da estrutura do agente proposto. As três primeiras envolvem mais conjuntos de regras que devem ser incorporados ao agente; enquanto o último trabalho futuro envolve a utilização do agente proposto sem nenhuma modificação, mostrando que da forma que ele está atualmente concebido pode ser útil para outros estudos também.

A primeira linha de trabalhos futuros envolve o controle de recursos energéticos distribuídos (REDs), notadamente as gerações distribuídas que cada vez vêm sendo interligadas as redes urbanas de distribuição. Estes sistemas têm sido implantados para suprimentos de energias locais (como *shopping-centers* e pequenas indústrias) ou pelos consumidores residenciais (que passam a ser denominados prossumidores). Estes podem ter seu excedente de energia produzida inserido na rede. Isto é feito através de um conjunto de sistemas de controle e de uma chave que pode interromper o fornecimento desta energia.

No caso deste trabalho, os REDs são conectados à rede através dos agentes inteligentes com suas respectivas chaves. Esta é mais uma função que pode vir a ser implementada no agente proposto neste trabalho. Contudo, deve-se ter em mente que o funcionamento dos REDs está regulado pelas normas da ANEEL, que ditam o curso das ações que ele deve tomar. Estas ações devem ser respeitadas quando da inclusão das regras no agente.

A segunda linha de trabalhos futuros envolve a resposta à demanda, REDs, a operação de microrredes e as unidades de armazenamento de energia. Algumas vezes, devido a problemas de contingências, certas partes da rede podem passar a operar de forma ilhada. Porém, se existissem REDs que pudesse operar de forma autônoma, talvez ela pudesse suprir a carga desses ramais em parte ou totalmente.

É importante mencionar que os REDs podem ser divididas em dois tipos principais: aquelas que podem gerar sua própria referência de sinal de tensão e de frequência (como os motogeradores à diesel) e aquelas que necessitam deste sinal para gerar (como os inversores dos painéis solares). Da mesma forma que nos sistema elétrico de potência, onde existe apenas uma usina que indica o sinal de referência, nos sistemas de distribuição não é diferente. Deve ocorrer uma disputa entre as REDs deste tipo para saber quem será a vencedora e comandará o sinal de referência; enquanto as demais REDs deste tipo seguirão seu sinal. As REDs que não geram sinal de referência não entram na disputa e passam a gerar tão logo recebam o sinal de referência estabilizado depois de encerrado o processo de disputa.

Uma outra missão da GD vencedora da disputa é que ela deverá gerenciar a possibilidade de volta a integrar a rede da concessionária, encerrando o ilhamento. Quando ocorre o ilhamento, o sinal de referência produzido normalmente é um pouco diferente do

produzido pela concessionária tanto em fase quanto em ângulo. Assim, com o passar do tempo ocorrerá um certo escorregamento (diferença) entre os sinais. Para que a chave possa fechar, deve haver o sincronismo correto entre as tensões de seus dois lados. Isto ocorrerá através de ações de controle na RED vencedora.

E mais, as concessionárias de distribuição de energia têm também agora começado a pensar em operar sua rede de distribuição em certos pontos e em determinados períodos do dia de forma ilhada, configurando microrredes. Isto pode ocorrer por exemplo, com a abertura de forma intencional de uma chave da rede de distribuição sem que ocorra o curto-circuito. Isto vem ocorrendo, pois elas não desejam que possíveis interferências na rede principal, como intervenções, venham a atingir outras partes da rede. Assim, pode-se desconectar parte da rede, que continuará com energia, realizar uma dada intervenção e depois integrar a microrrede com a rede principal. Obviamente que esta forma de operar o sistema ainda é nova e muitos ajustes dentro da rede e da concessionária devem ser feitos. Assim, muitas ações devem ser feitas para que isto venha a ocorrer, mas os agentes inteligentes propostos poderão efetuá-las de forma autônoma utilizando sua parte lógica.

A terceira linha está ligada às novas tecnologias que estão sendo trazidas dos sistemas de potência e que estão sendo incorporadas nas redes de distribuição, notadamente aquelas ligadas aos equipamentos que contêm eletrônica de potência. Já existem desenvolvimentos para que as redes urbanas deixem de ser completamente radiais e passem a operar parcial ou totalmente em anel. As mudanças de estrutura geram inúmeros novos desafios, porém traz mais confiabilidade a operação, diminuindo substantivamente a interrupção de energia nos consumidores e, de acordo com a estratégia utilizada, reduz perdas técnicas e melhora a regulação das linhas urbanas.

Esta nova estrutura operativa das redes de distribuição implica em algumas mudanças de regras no agente proposto neste trabalho, que considerava somente redes radiais, e deveria passar a considerar também operações em anel. Porém, a estrutura e a maioria das regras continuariam a valer e poderiam ser utilizadas.

A quarta linha, conforme dito anteriormente, faz uso do agente como ele está proposto para o planejamento da localização dos agentes inteligentes nas redes urbanas de distribuição. É sabido que, normalmente, cada circuito dessas redes pode possuir centenas de ramais e dezenas de dispositivos tradicionais de proteção. Então surge a questão: onde instalar os agentes inteligentes para que, além de sua função de autorrecuperação, eles possam vir a aumentar a observabilidade da rede por parte do operador quando uma contingência venha a ocorrer?

Técnicas inteligentes de busca meta-heurística podem ser utilizadas para minimizar uma função que envolve custo dos agentes inteligentes, valores de DEC e DIC e níveis diários de carga. Estas técnicas permitem os estudos a alocação dos agentes inteligentes, tanto em número quanto em posições na rede, gerando as suas melhores localizações na rede de distribuição.

10 Referências

- [1] L. A. N. Simabukulo, L. F. da S. Correa, M. M. O. dos Santos, and M. Martins, “Energia, Industrialização e Modernidade - História Social,” *Fundação Patrimônio Histórico da Energia de São Paulo*, pp. 1–34, 2006.
- [2] NERC, “Reliability Considerations from the Integration of Smart Grid,” *North American Electric Reliability Corporation*, no. December, 2010.
- [3] IEA and International Energy Agency - IEA, “Technology Roadmap - Smart Grid,” *International Energy Agency*, pp. 1–48, 2011.
- [4] S. M. Amin and A. M. Giacomoni, “Smart Grid, Safe Grid,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, no. 1, pp. 33–40, Jan. 2012, doi: 10.1109/MPE.2011.943112.
- [5] M. Amin, “Toward self-healing energy infrastructure systems,” *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 14, no. 1, pp. 20–28, 2001, doi: 10.1109/67.893351.
- [6] S. M. Amin, “National Infrastructures as Complex Interactive Networks,” in *Automat., Control and Compl.: An Integrated Approach*, T. Samad and J. Weyrauch, Eds. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp. 263–286.
- [7] T. Sakaguchi and K. Matsumoto, “Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 2, pp. 320–329, Feb. 1983, doi: 10.1109/TPAS.1983.317770.
- [8] Office of Electric Transmission and Distribution, “Grid 2030: A national vision for electricity’s second 100 years,” 2003.
- [9] A. G. Fonseca *et al.*, “Impact analysis of voltage regulators and distributed generation on self-healing,” in *2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA)*, Sep. 2014, vol. 2014-Octob, pp. 1–6. doi: 10.1109/TDC-LA.2014.6955244.
- [10] NETL, “A System View of the Modern Grid,” *U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability*, pp. 0–21, 2007.
- [11] B. S. Torres, “Proposta de um Sistema Distribuído para Autorrecuperação de Redes Elétricas Inteligentes,” Dissertação de Mestrado, LACTEC, Curitiba, Brasil, 2016.
- [12] K. Yamashita, S.-K. Joo, J. Li, P. Zhang, and C.-C. Liu, “Analysis, control, and economic impact assessment of major blackout events,” *European Transactions on Electrical Power*, vol. 18, no. 8, pp. 854–871, Nov. 2008, doi: 10.1002/etep.304.

- [13] M. J. Sullivan, T. Vardell, and M. Johnson, "Power interruption costs to industrial and commercial consumers of electricity," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 6, pp. 1448–1458, 1997, doi: 10.1109/28.649955.
- [14] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, "Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica," *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*. p. 88, 2021.
- [15] D. Fan, Y. Ren, Q. Feng, Y. Liu, Z. Wang, and J. Lin, "Restoration of smart grids: Current status, challenges, and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, no. June, p. 110909, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110909.
- [16] J. M. Solanki, S. Khushalani, and N. N. Schulz, "A multi-agent solution to distribution systems restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 1026–1034, 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.901280.
- [17] F. Ren, M. Zhang, D. Soetanto, and X. Su, "Conceptual design of a multi-agent system for interconnected power systems restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 732–740, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2177866.
- [18] T. Nagata and H. Sasaki, "A multi-agent approach to power system restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 457–462, May 2002, doi: 10.1109/TPWRS.2002.1007918.
- [19] A. Zidan *et al.*, "Fault Detection, Isolation, and Service Restoration in Distribution Systems: State-of-the-Art and Future Trends," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2170–2185, Sep. 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2517620.
- [20] S. S. Refaat, A. Mohamed, and P. Kakosimos, "Self-Healing control strategy; Challenges and opportunities for distribution systems in smart grid," in *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*, Apr. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/CPE.2018.8372610.
- [21] K. Moslehi and R. Kumar, "Vision for a self-healing power grid," *ABB Review*, no. 4, pp. 21–25, 2006.
- [22] Y. Oualmakran, J. Melendez, and S. Herraiz, "Self-healing for smart grids: Problem formulation and considerations," in *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Oct. 2012, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465856.
- [23] E. Shirazi and S. Jadid, "A multiagent design for self-healing in electric power distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 171, no. September 2018, pp. 230–239, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.02.025.

- [24] E. Shirazi and S. Jadid, "Autonomous Self-Healing in Smart Distribution Grids Using agent Systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 12, pp. 6291–6301, Dec. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2889741.
- [25] A. Zidan and E. F. El-Saadany, "A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1525–1539, Sep. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2198247.
- [26] M. Kezunovic, "Smart Fault Location for Smart Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 11–22, Mar. 2011, doi: 10.1109/TSG.2011.2118774.
- [27] I.-H. Lim *et al.*, "Design and Implementation of Multiagent-Based Distributed Restoration System in DAS," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 585–593, Apr. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2244923.
- [28] J. B. Leite and J. R. S. Mantovani, "Development of a Self-Healing Strategy with Multiagent Systems for Distribution Networks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2198–2206, Sep. 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2518128.
- [29] I. S. Baxevanos and D. P. Labridis, "Implementing Multiagent Systems Technology for Power Distribution Network Control and Protection Management," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 433–443, Jan. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.877085.
- [30] Y. Xu and W. Liu, "Novel Multiagent Based Load Restoration Algorithm for Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 152–161, Mar. 2011, doi: 10.1109/TSG.2010.2099675.
- [31] C. P. Nguyen and A. J. Flueck, "Agent Based Restoration With Distributed Energy Storage Support in Smart Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 1029–1038, Jun. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2186833.
- [32] W. Li *et al.*, "A Full Decentralized Multi-Agent Service Restoration for Distribution Network with DGs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1100–1111, 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2932009.
- [33] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4^a edition. Pearson, 2020.
- [34] M. J. Wooldridge, *An Introduction to MultiAgent Systems*, 1^a edition. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [35] S. D. J. J. McArthur *et al.*, "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1743–1752, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.908471.

- [36] S. D. J. McArthur *et al.*, “Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent Systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1753–1759, Nov. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2007.908472.
- [37] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *Proceedings of ICNN’95 - International Conference on Neural Networks*, pp. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [38] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni, “Ant system: optimization by a colony of cooperating agents,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 26, no. 1, pp. 29–41, Feb. 1996, doi: 10.1109/3477.484436.
- [39] K. P. Sycara, “Multiagent Systems,” *AI Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 79–92, 1998.
- [40] A. R. Aoki, “Uma Proposta de Arquitetura Multi-Agente para Operação de Sistemas Elétricos,” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2003.
- [41] M. H. Moradi, S. Razini, and S. Mahdi Hosseinian, “State of art of multiagent systems in power engineering: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 814–824, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.339.
- [42] V. N. Coelho, M. Weiss Cohen, I. M. Coelho, N. Liu, and F. G. Guimarães, “Multi-agent systems applied for energy systems integration: State-of-the-art applications and trends in microgrids,” *Applied Energy*, vol. 187, pp. 820–832, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.056.
- [43] B. S. Torres, L. R. Ferreira, and A. R. Aoki, “Distributed Intelligent System for Self-Healing in Smart Grids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 5, pp. 2394–2403, Oct. 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2845695.
- [44] A. Sharma, D. Srinivasan, and D. S. Kumar, “A comparative analysis of centralized and decentralized multi-agent architecture for service restoration,” *2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2016*, pp. 311–318, 2016, doi: 10.1109/CEC.2016.7743810.
- [45] T. Finin, R. Fritzson, D. McKay, and R. McEntire, “KQML as an agent communication language,” in *Proceedings of the third international conference on Information and knowledge management - CIKM ’94*, 1994, pp. 456–463. doi: 10.1145/191246.191322.
- [46] S. Talukdar, L. Baerentzen, A. Gove, and P. De Souza, “Asynchronous Teams: Cooperation Schemes for Autonomous Agents,” *Journal of Heuristics*, vol. 4, no. 4, pp. 295–321, 1998, doi: 10.1023/1009669824615.

- [47] A. Jadbabaie, Jie Lin, and A. S. Morse, "Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 6, pp. 988–1001, Jun. 2003, doi: 10.1109/TAC.2003.812781.
- [48] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 215–233, Jan. 2007, doi: 10.1109/JPROC.2006.887293.
- [49] L. Busoniu, R. Babuska, and B. De Schutter, "A Comprehensive Survey of Multiagent Reinforcement Learning," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 38, no. 2, pp. 156–172, Mar. 2008, doi: 10.1109/TSMCC.2007.913919.
- [50] A. L. Dimeas and N. D. Hatziargyriou, "Operation of a Multiagent System for Microgrid Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1447–1455, Aug. 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.852060.
- [51] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, and S. Rahman, "Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation," in *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Mar. 2009, pp. 1–8. doi: 10.1109/PSCE.2009.4840087.
- [52] K. Moslehi and R. Kumar, "A Reliability Perspective of the Smart Grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 57–64, Jun. 2010, doi: 10.1109/TSG.2010.2046346.
- [53] V. V. Vadlamudi and R. Karki, "Reliability-based appraisal of Smart Grid challenges and realization," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Jul. 2012, pp. 1–7. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345744.
- [54] A. Baggini, D. Chapman, and F. Buratti, "Reliability of Electricity Supply: Structure," in *Handbook of Power Quality*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008, pp. 383–402. doi: 10.1002/9780470754245.ch11.
- [55] A. A. Chowdhury and D. O. Koval, *Power Distribution System Reliability*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009. doi: 10.1002/9780470459355.
- [56] M. R. AlRashidi and M. E. El-Hawary, "A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 4, pp. 913–918, Aug. 2009, doi: 10.1109/TEVC.2006.880326.
- [57] W.-C. Wu and M.-S. Tsai, "Application of Enhanced Integer Coded Particle Swarm Optimization for Distribution System Feeder Reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1591–1599, Aug. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2094212.

- [58] J. C. Cebrian, S. Rahman, and N. Kagan, “Restoration in Distribution Systems to Reduce Financial Losses Related to Process Trips,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 219–227, Jan. 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2593105.
- [59] P. Mitra and G. K. Venayagamoorthy, “Implementation of an Intelligent Reconfiguration Algorithm for an Electric Ship’s Power System,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 5, pp. 2292–2300, Sep. 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2161849.
- [60] M. Eriksson, M. Armendariz, O. O. Vasilenko, A. Saleem, and L. Nordstrom, “Multiagent-Based Distribution Automation Solution for Self-Healing Grids,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2620–2628, Apr. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2387098.
- [61] A. M. Wildberger, “Autonomous adaptive agents for distributed control of the electric power grid in a competitive electric power industry,” in *Proceedings of 1st International Conference on Conventional and Knowledge Based Intelligent Electronic Systems. KES '97*, 1997, vol. 1, pp. 2–11. doi: 10.1109/KES.1997.616845.
- [62] A. Sharma, D. Srinivasan, and A. Trivedi, “A Decentralized Multiagent System Approach for Service Restoration Using DG Islanding,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2784–2793, 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2418334.
- [63] A. Sharma, D. Srinivasan, and A. Trivedi, “A Decentralized Multi-Agent Approach for Service Restoration in Uncertain Environment,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3394–3405, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2631639.
- [64] F. A. De Souza, C. U. Vila, F. Enembreck, and L. M. Carpes, “A multiagent framework for self-healing mechanisms considering priority-based load shedding and islanding with distributed generation in smart distribution grids,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 4, pp. 632–638, 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.7896348.
- [65] A. Abel Hafez, W. A. Omran, and Y. G. Hegazy, “A Decentralized Technique for Autonomous Service Restoration in Active Radial Distribution Networks,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1911–1919, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2602541.
- [66] L. C. Siebert, A. R. Aoki, G. Lambert-Torres, N. Lambert-de-Andrade, and N. G. Paterakis, “An Agent-Based Approach for the Planning of Distribution Grids as a Socio-Technical System,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 18, p. 4837, Sep. 2020, doi: 10.3390/en13184837.

- [67] E. Frederiks, K. Stenner, and E. Hobman, “The Socio-Demographic and Psychological Predictors of Residential Energy Consumption: A Comprehensive Review,” *Energies (Basel)*, vol. 8, no. 1, pp. 573–609, Jan. 2015, doi: 10.3390/en8010573.
- [68] L. Siebert, A. Sbicca, A. Aoki, and G. Lambert-Torres, “A Behavioral Economics Approach to Residential Electricity Consumption,” *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 6, p. 768, Jun. 2017, doi: 10.3390/en10060768.
- [69] L. C. Siebert, “Sistema de Otimização de Resposta à Demanda para Redes Elétricas Inteligentes,” Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2013.
- [70] B. S. Torres, L. E. Borges da Silva, C. P. Salomon, and C. H. V. de Moraes, “Integrating Smart Grid Devices into the Traditional Protection of Distribution Networks,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 7, p. 2518, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15072518.
- [71] “Distributed Intelligent System for SelfHealing in Smart Grids.” https://colab.research.google.com/github/carloshvmoraes/MASHSG/blob/main/MASH_SG_Basic.ipynb#scrollTo=oYE_CfQyzHAJ (accessed Apr. 15, 2022).
- [72] “Integrating Smart Grid Devices into the Tradiional Protection of Distribution Networks.” https://colab.research.google.com/github/carloshvmoraes/ISGDTPDN/blob/main/ISGD_basic.ipynb (accessed Apr. 15, 2022).
- [73] “Integrating Smart Grid Devices into the Traditional Protection of Distribution Networks.” https://colab.research.google.com/github/carloshvmoraes/ISGDTPDN/blob/main/ISGD_benchmark.ipynb (accessed Apr. 15, 2022).

Apêndice A – Tipos de Agentes

Segundo Russell [33], os agentes podem ser distribuídos em quatro grupos distintos, de acordo com sua estrutura interna: agentes reativos, agentes reflexivos com memória, agentes baseados em metas e agentes baseados em satisfação.

A.1 Agentes Reativos

Os agentes reativos, também chamado de agentes reflexivos simples, têm a função de perceber o ambiente e retornar uma ação a ser executada. O agente age de forma reativa à verificação de qualquer mudança no estado do ambiente. Uma vez detectada a variação, ele busca a primeira regra que corresponda a essa descrição de estado para atuar no ambiente. A Figura 67 ilustra a estrutura do agente.

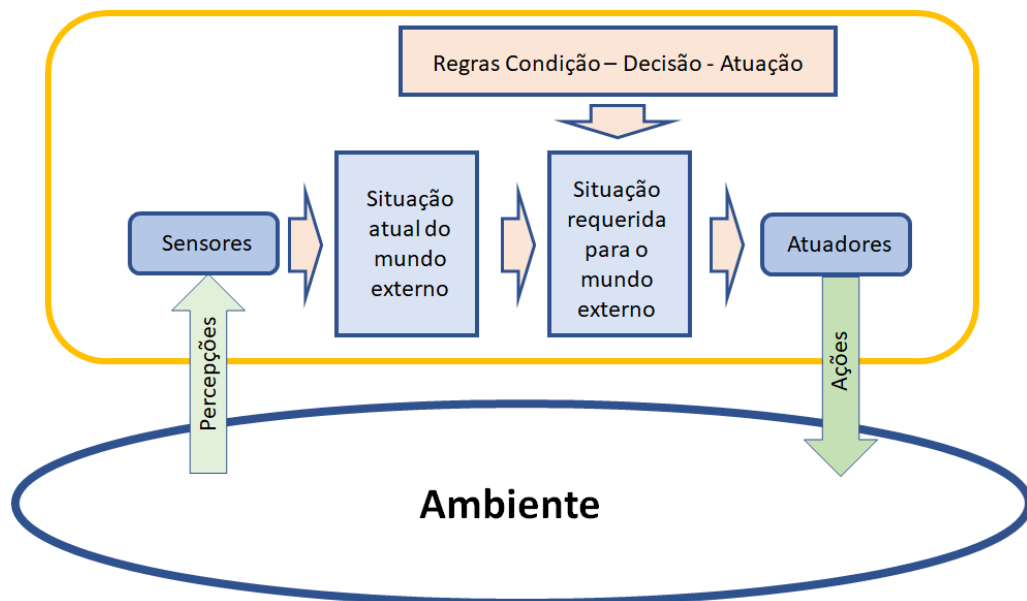


Figura 67. Agente reativo

A.2 Agentes Reflexivos com Memória

Os agentes reflexivos com memória, ou agentes baseados em modelo, armazenam uma quantidade de informação de ações recentemente executadas, e, ao assimilarem as entradas, executam as ações escolhidas. Podem ser conhecidos também como agentes reflexivos simples

com estado interno. O agente deve manter algum tipo de estado interno, onde necessita obter informações de acontecimentos passados e analisar alguns aspectos que ainda não tenham acontecido no estado atual. Nesse tipo de agente, a percepção atual é combinada com o antigo estado anterior, de forma a gerar uma descrição atualizada e sequencial dos estados. O agente incorpora uma espécie de previsão do que o fato percebido gera no ambiente, de acordo com estados anteriores guardados na memória. Baseado nessa visão e interpretação, ele escolhe a regra a ser utilizada. A Figura 68 ilustra a estrutura do agente, mostrando a percepção da situação atual com o estado interno antigo, com a finalidade de criar o novo estado interno.

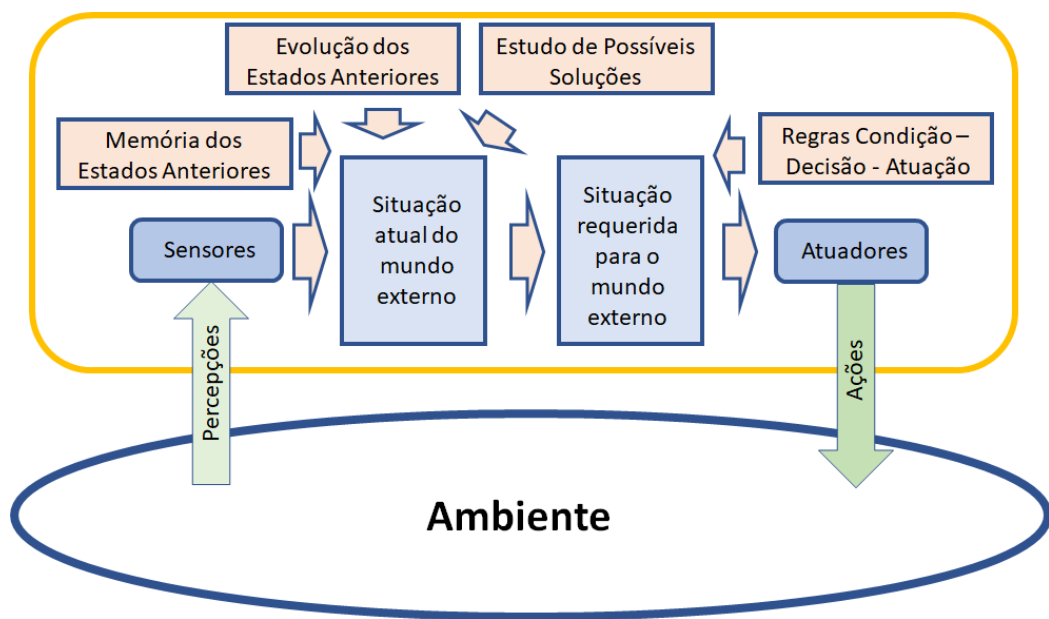


Figura 68. Agente reflexivo com memória

A.3 Agentes Baseados em Metas

Agentes baseados em metas são agentes que têm um objetivo ou uma série de objetivos para executar. Este tipo de agente necessita basear-se na descrição do estado atual e também precisa de alguma espécie de informação sobre os objetos que descrevam a situação desejável. Esse tipo de agente assume que apenas saber o estado atual do ambiente e os estados anteriores não é suficiente para decidir que ação tomar. Para ele, é preciso ter definida uma meta. Ele precisa ter uma noção do resultado que busca, precisa saber o que precisa fazer, para isso ele armazena algum tipo de meta na memória e, a partir dela, busca uma solução para alcançá-la. A Figura 69 ilustra a estrutura do agente.

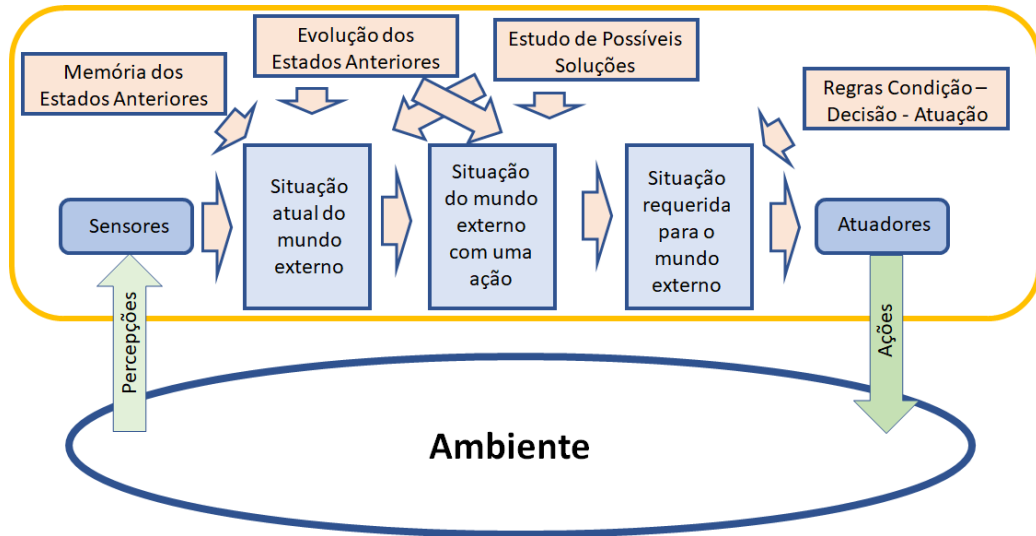


Figura 69. Agente baseado em metas

A.4 Agentes Baseados em Satisfação

Um agente baseado em satisfação é semelhante a um agente baseado em metas, mas além de tentar alcançar um conjunto de objetivos, o agente baseado em satisfação também tenta maximizar algum valor de utilidade. Agentes baseados em satisfação conseguem estabelecer preferências entre os passos de seus estados, oferecem aos agentes as possibilidades possíveis de se executar a ação desejada. A Figura 70 ilustra a estrutura do agente.

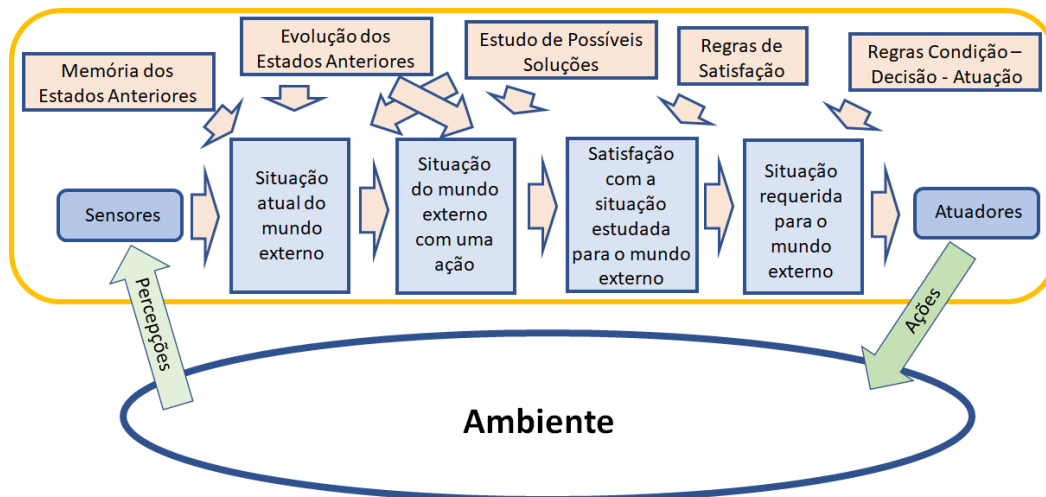


Figura 70. Agente baseado em satisfação

Apêndice B – Resultado Passo a Passo das Simulações

Este Apêndice apresenta o resultado passo-a-passo da simulação de dois curtos-circuitos promovidos nos ramais entre as chaves S3 e S4 e entre as chaves S8 e S9. A Figura 71 apresenta a configuração inicial do circuito estudado, como apresentado na saída do pacote computacional, que é o mesmo da Figura 39.

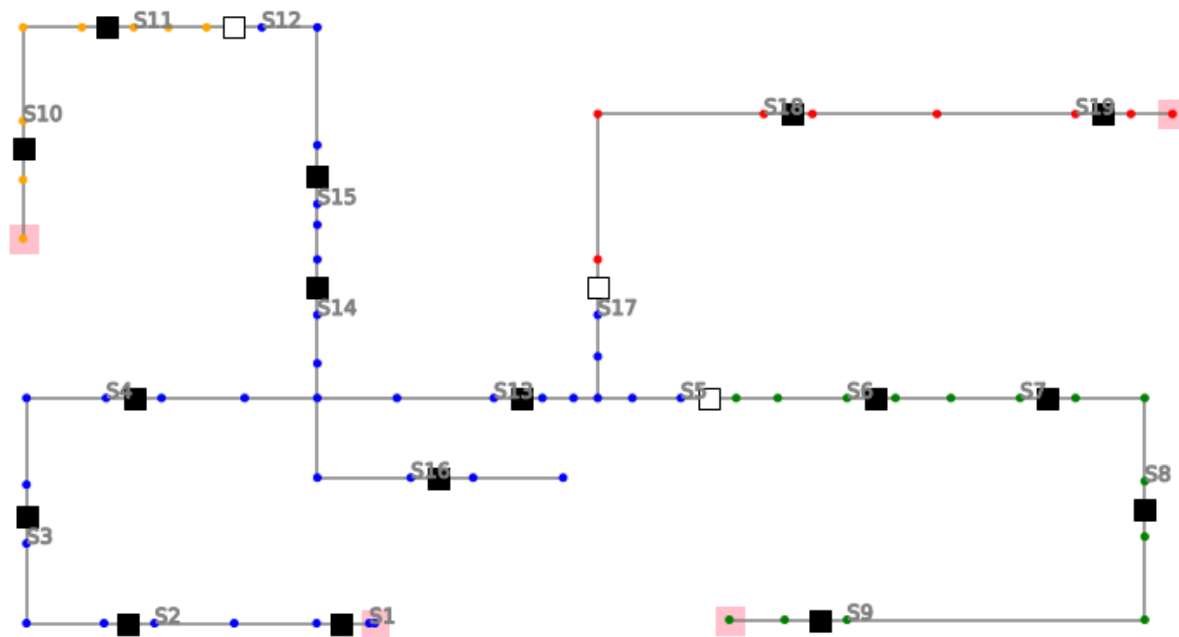


Figura 71. Sistema teste 5 da Figura 39, conforme mostrado no pacote computacional desenvolvido.

B.1 Curto-circuito entre as Chaves S3 e S4

A seguir são apresentadas passo-a-passo as saídas geradas pelo pacote computacional. A Figura 72 apresenta a configuração sistêmica após o processo de autorrecuperação efetuado pelos agentes.

i) Passo 1

- Sem mensagens
- Abertura da chave S1

ii) Passo 2

	sender	recipient	cmd	value
0	S1	S2	SearchFault	

- *SearchFault*: S1 envia uma pergunta para S2

iii) Passo 3

	sender	recipient	cmd	value
0	S2	S1	IsFault	True
1	S2	S3	SearchFault	

- *IsFault = True*: S2 responde para S1
- *SearchFault*: S2 envia uma pergunta para S3

iv) Passo 4

	sender	recipient	cmd	value
0	S3	S2	IsFault	True
1	S3	S4	SearchFault	

- *IsFault = True*: S3 responde para S2
- *SearchFault*: S3 envia uma pergunta para S4

v) Passo 5

	sender	recipient	cmd	value
0	S4	S3	IsFault	False

- *IsFault = True*: S4 responde para S3

vi) Passo 6

	sender	recipient	cmd	value
0	S3	S4	AreaIsolate	

- *AreaIsolate*: S3 abre e envia um comando de abertura para S4

vii) Passo 7

	sender	recipient	cmd	value
0	S4	S16	IsolateInfo	
1	S4	S13	IsolateInfo	
2	S4	S14	IsolateInfo	
3	S4	S3	IsolateInfo	

- *IsolateInfo*: S4 informa para S16, S13, S14 e S3 que busca por uma chave de socorro

viii) Passo 8

	sender	recipient	cmd	value
0	S3	S2	IsolateInfo	
1	S13	S5	IsolateInfo	
2	S13	S17	IsolateInfo	
3	S13	S16	IsolateInfo	
4	S13	S14	IsolateInfo	
5	S14	S15	IsolateInfo	
6	S14	S16	IsolateInfo	
7	S14	S13	IsolateInfo	
8	S16	S13	IsolateInfo	
9	S16	S14	IsolateInfo	

- *IsolateInfo*: S3 informa para S2 que busca por uma chave de socorro
- *IsolateInfo*: S13 informa para S5, S17, S16 e S14 que busca por uma chave de socorro
- *IsolateInfo*: S14 informa para S15 e S16 que busca por uma chave de socorro
- *IsolateInfo*: S16 informa para S13 e S14 que busca por uma chave de socorro

ix) Passo 9

	sender	recipient	cmd	value
0	S2	S1	IsolateInfo	
1	S5	S6	SearchRemai	
2	S5	S17	SearchRemai	
3	S15	S12	IsolateInfo	
4	S17	S18	SearchRemai	
5	S17	S5	SearchRemai	

- *IsolateInfo*: S2 informa para S1 que busca por uma chave de socorro
- *Fechamento da chave S1*
- *SearchRemai*: S5 pergunta a capacidade remanescente para S5 e S17

- *IsolateInfo*: S15 informa para S17 que busca por uma chave de socorro
- *SearchRemai*: S17 pergunta a capacidade remanescente para S5 e S18

x) Passo 10

	sender	recipient	cmd	value
0	S5	S6	SearchRemai	
1	S5	S13	SearchRemai	
2	S6	S7	SearchRemai	
3	S12	S11	SearchRemai	
4	S17	S18	SearchRemai	
5	S17	S13	SearchRemai	
6	S18	S19	SearchRemai	

- *SearchRemai*: S5 pergunta a capacidade remanescente para S6 e S13
- *SearchRemai*: S6 pergunta a capacidade remanescente para S7
- *SearchRemai*: S12 pergunta a capacidade remanescente para S11
- *SearchRemai*: S17 pergunta a capacidade remanescente para S18 e S13
- *SearchRemai*: S18 pergunta a capacidade remanescente para S19

xi) Passo 11

	sender	recipient	cmd	value
0	S7	S8	SearchRemai	
1	S11	S10	SearchRemai	
2	S13	S17	SearchRemai	
3	S13	S4	SearchRemai	
4	S13	S16	SearchRemai	
5	S13	S14	SearchRemai	
6	S19	S18	IkARemai	0.0168

- *SearchRemai*: S7 pergunta a capacidade remanescente para S8
- *SearchRemai*: S11 pergunta a capacidade remanescente para S10
- *SearchRemai*: S13 pergunta a capacidade remanescente para S17, S4, S16 e S14
- *IkARemai*: S19 responde a capacidade remanescente para S18

xii) Passo 12

	sender	recipient	cmd	value
0	S8	S9	SearchRemai	
1	S10	S11	IkARemai	0.0168
2	S14	S15	SearchRemai	
3	S14	S4	SearchRemai	
4	S14	S16	SearchRemai	
5	S16	S4	SearchRemai	
6	S16	S14	SearchRemai	
7	S18	S17	IkARemai	0.008399

- *SearchRemai*: S8 pergunta a capacidade remanescente para S9
- *IkARemai*: S10 responde a capacidade remanescente para S11
- *SearchRemai*: S14 pergunta a capacidade remanescente para S15, S4 e S16
- *SearchRemai*: S16 pergunta a capacidade remanescente para S4 e S17
- *IkARemai*: S18 responde a capacidade remanescente para S17

xiii) Passo 13

	sender	recipient	cmd	value
0	S9	S8	IkARemai	0.013577
1	S11	S12	IkARemai	0.008399
2	S15	S12	SearchRemai	
3	S17	S13	IkARemai	0.008399
4	S17	S5	IkARemai	0.008399

- *IkARemai*:S9 responde a capacidade remanescente para S8
- *IkARemai*: S11 responde a capacidade remanescente para S12
- *SearchRemai*: S15 pergunta a capacidade remanescente para S12
- *IkARemai*: S17 responde a capacidade remanescente para S13 e S5

xiv) Passo 14

	sender	recipient	cmd	value
0	S5	S6	IkARemai	0.008399
1	S5	S13	IkARemai	0.008399
2	S8	S7	IkARemai	0.013577
3	S12	S15	IkARemai	0.008399
4	S12	S11	SearchRemai	
5	S13	S5	IkARemai	0.008369
6	S13	S4	IkARemai	0.008369
7	S13	S16	IkARemai	0.008369
8	S13	S14	IkARemai	0.008369

- *IkARemai*:S5 responde a capacidade remanescente para S6 e S13
- *IkARemai*: S8 responde a capacidade remanescente para S7
- *IkARemai*: S12 responde a capacidade remanescente para S15
- *SearchRemai*: S12 pergunta a capacidade remanescente para S11
- *IkARemai*: S13 responde a capacidade remanescente para S5, S4, S16 e S14

xv)Passo 15

	sender	recipient	cmd	value
0	S4	S16	IkARemai	0.008369
1	S4	S14	IkARemai	0.008369
2	S4	S3	IkARemai	0.008369
3	S6	S7	IkARemai	0.008391
4	S7	S6	IkARemai	0.013577
5	S14	S15	IkARemai	0.008369
6	S14	S4	IkARemai	0.008369
7	S14	S16	IkARemai	0.008369
8	S15	S14	IkARemai	0.008363
9	S16	S4	IkARemai	0.008364
10	S16	S14	IkARemai	0.008364

- *IkARemai*: S4 responde a capacidade remanescente para S16, S14 e S3
- *IkARemai*: S6 responde a capacidade remanescente para S7
- *IkARemai*: S7 responde a capacidade remanescente para S6
- *IkARemai*: S14 responde a capacidade remanescente para S15, S4 e S16
- *IkARemai*: S15 responde a capacidade remanescente para S14
- *IkARemai*: S16 responde a capacidade remanescente para S4 e S14

xvi) Passo 16

	sender	recipient	cmd	value
0	S4	S13	AreaHelp	

- *AreaHelp*: S4 busca o vizinho que entregou a maior capacidade remanescente

xvii) Passo 17

	sender	recipient	cmd	value
0	S13	S5	AreaHelp	

- *AreaHelp*: S13 busca o vizinho que entregou a maior capacidade remanescente

xviii) Passo 18

- Sem mensagens
- Fechamento da chave S5

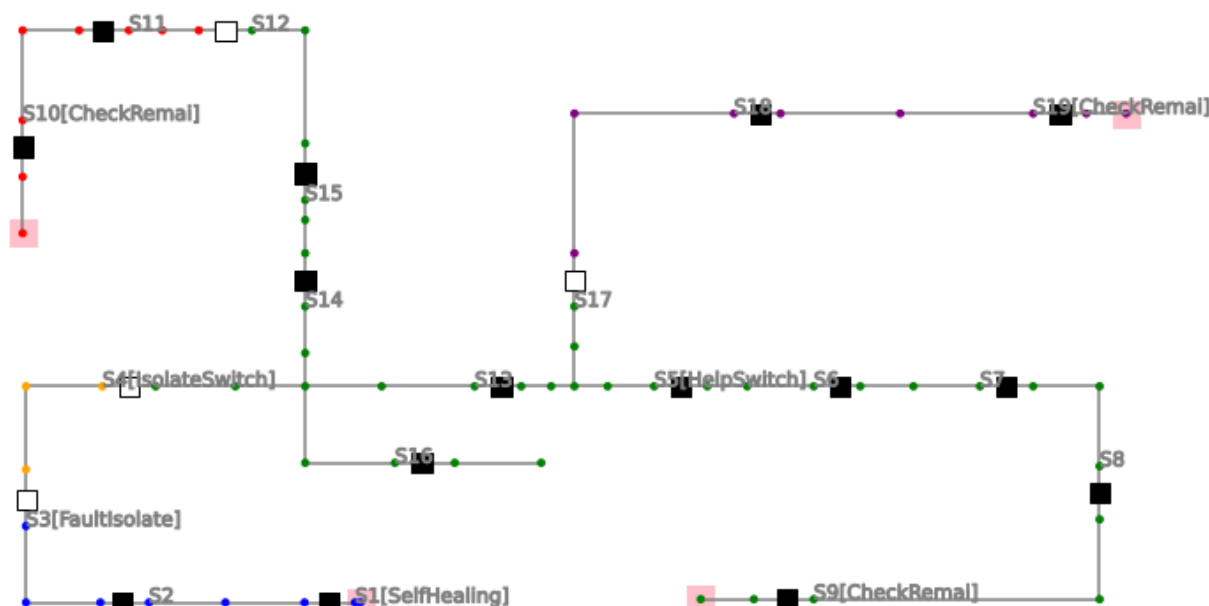


Figura 72. Sistema teste 5 da Figura 39, após o processo de autorrecuperação para um curto-circuito entre S3 e S4.

B.2 Curto-circuito entre as Chaves S8 e S9

A seguir são apresentadas passo-a-passo as saídas geradas pelo pacote computacional. A Figura 73 apresenta a configuração sistêmica após o processo de autorrecuperação efetuado pelos agentes.

i) Passo 1

- Sem mensagens
- Abertura da chave S9

ii) Passo 2

	sender	recipient	cmd	value
0	S9	S8	SearchFault	

- *SearchFault*: S9 envia uma pergunta para S8

iii) Passo 3

	sender	recipient	cmd	value
0	S8	S9	IsFault	False

- *IsFault = False*: S8 responde para S9

iv) Passo 4

	sender	recipient	cmd	value
0	S9	S8	Arealsolate	

- *Arealsolate*: S9 trava e envia um comando de abertura para S8

v) Passo 5

	sender	recipient	cmd	value
0	S8	S9	IsolateInfo	
1	S8	S7	IsolateInfo	

- *IsolateInfo*: S8 informa para S9 e S7 que busca por uma chave de socorro

vi) Passo 6

	sender	recipient	cmd	value
0	S7	S6	IsolateInfo	

- *IsolateInfo*: S7 informa para S6 que busca por uma chave de socorro

vii)Passo 7

	sender	recipient	cmd	value
0	S6	S5	IsolateInfo	

- *IsolateInfo*: S6 informa para S5 que busca por uma chave de socorro

viii) Passo 8

	sender	recipient	cmd	value
0	S5	S13	SearchRemai	
1	S5	S17	SearchRemai	

- *SearchRemai*: S5 pergunta a capacidade remanescente para S13 e S17

ix) Passo 9

	sender	recipient	cmd	value
0	S13	S17	SearchRemai	
1	S13	S4	SearchRemai	
2	S13	S16	SearchRemai	
3	S13	S14	SearchRemai	
4	S17	S18	SearchRemai	
5	S17	S13	SearchRemai	

- *SearchRemai*: S13 pergunta a capacidade remanescente para S17, S4, S16 e S14
- *SearchRemai*: S17 pergunta a capacidade remanescente para S18 e S13

x) Passo 10

	sender	recipient	cmd	value
0	S4	S16	SearchRemai	
1	S4	S14	SearchRemai	
2	S4	S3	SearchRemai	
3	S14	S15	SearchRemai	
4	S14	S4	SearchRemai	
5	S14	S16	SearchRemai	
6	S16	S4	SearchRemai	
7	S16	S14	SearchRemai	
8	S18	S19	SearchRemai	

- *SearchRemai*: S4 pergunta a capacidade remanescente para S16, S14 e S3
- *SearchRemai*: S14 pergunta a capacidade remanescente para S15, S4 e S16
- *SearchRemai*: S16 pergunta a capacidade remanescente para S4, S14
- *SearchRemai*: S18 pergunta a capacidade remanescente para S19

xi) Passo 11

	sender	recipient	cmd	value
0	S3	S2	SearchRemai	
1	S15	S12	SearchRemai	
2	S19	S18	IkARemai	0.0168

- *SearchRemai*: S3 pergunta a capacidade remanescente para S2
- *SearchRemai*: S15 pergunta a capacidade remanescente para S12
- *IkARemai*: S19 responde a capacidade remanescente para S18

xii)Passo 12

	sender	recipient	cmd	value
0	S2	S1	SearchRemai	
1	S12	S11	SearchRemai	
2	S18	S17	IkARemai	0.008399

- *SearchRemai*: S2 pergunta a capacidade remanescente para S1
- *SearchRemai*: S12 pergunta a capacidade remanescente para S11
- *IkARemai*: S18 responde a capacidade remanescente para S17

xiii) Passo 13

	sender	recipient	cmd	value
0	S1	S2	IkARemai	0.026999
1	S11	S10	SearchRemai	
2	S17	S13	IkARemai	0.008399
3	S17	S5	IkARemai	0.008399

- *IkARemai*:S1 responde a capacidade remanescente para S2
- *SearchRemai*: S11 pergunta a capacidade remanescente para S10
- *IkARemai*: S17 responde a capacidade remanescente para S13 e S5

xiv) Passo 14

	sender	recipient	cmd	value
0	S2	S3	IkARemai	0.018606
1	S5	S6	IkARemai	0.008399
2	S5	S13	IkARemai	0.008399
3	S10	S11	IkARemai	0.016800
4	S13	S5	IkARemai	0.008369
5	S13	S4	IkARemai	0.008369
6	S13	S16	IkARemai	0.008369
7	S13	S14	IkARemai	0.008369

- *IkARemai*:S2 responde a capacidade remanescente para S3
- *IkARemai*: S5 responde a capacidade remanescente para S6 e S13
- *IkARemai*: S10 responde a capacidade remanescente para S11
- *IkARemai*: S13 responde a capacidade remanescente para S5, S4, S16 e S14

xv)Passo 15

	sender	recipient	cmd	value
0	S3	S4	IkARemai	0.018606
1	S4	S16	IkARemai	0.008369
2	S4	S14	IkARemai	0.008369
3	S4	S3	IkARemai	0.008369
4	S6	S7	IkARemai	0.008391
5	S11	S12	IkARemai	0.008399
6	S14	S15	IkARemai	0.008369
7	S14	S4	IkARemai	0.008369
8	S14	S16	IkARemai	0.008369
9	S16	S4	IkARemai	0.008364
10	S16	S14	IkARemai	0.008364

- *IkARemai*: S3 responde a capacidade remanescente para S4

- *IkARemai*: S4 responde a capacidade remanescente para S16, S14 e S3
- *IkARemai*: S6 responde a capacidade remanescente para S7
- *IkARemai*: S11 responde a capacidade remanescente para S12
- *IkARemai*: S14 responde a capacidade remanescente para S15, S4 e S16
- *IkARemai*: S16 responde a capacidade remanescente para S4 e S14

xvi) Passo 16

	sender	recipient	cmd	value
0	S7	S8	IkARemai	0.008391
1	S12	S15	IkARemai	0.008399
2	S15	S12	IkARemai	0.008363

- *IkARemai*: S7 responde a capacidade remanescente para S18
- *IkARemai*: S12 responde a capacidade remanescente para S15
- *IkARemai*: S15 responde a capacidade remanescente para S12

xvii) Passo 17

	sender	recipient	cmd	value
0	S8	S9	IkARemai	0.008391
1	S8	S7	AreaHelp	

- *IkARemai*: S8 responde a capacidade remanescente para S19
- *AreaHelp*: S8 busca o vizinho que entregou a maior capacidade remanescente

xviii) Passo 18

	sender	recipient	cmd	value
0	S7	S6	AreaHelp	

- *AreaHelp*: S7 busca o vizinho que entregou a maior capacidade remanescente

xix) Passo 19

	sender	recipient	cmd	value
0	S6	S5	AreaHelp	

- *AreaHelp*: S6 busca o vizinho que entregou a maior capacidade remanescente

xx) Passo 20

- Sem mensagens
- Fechamento da chave S5

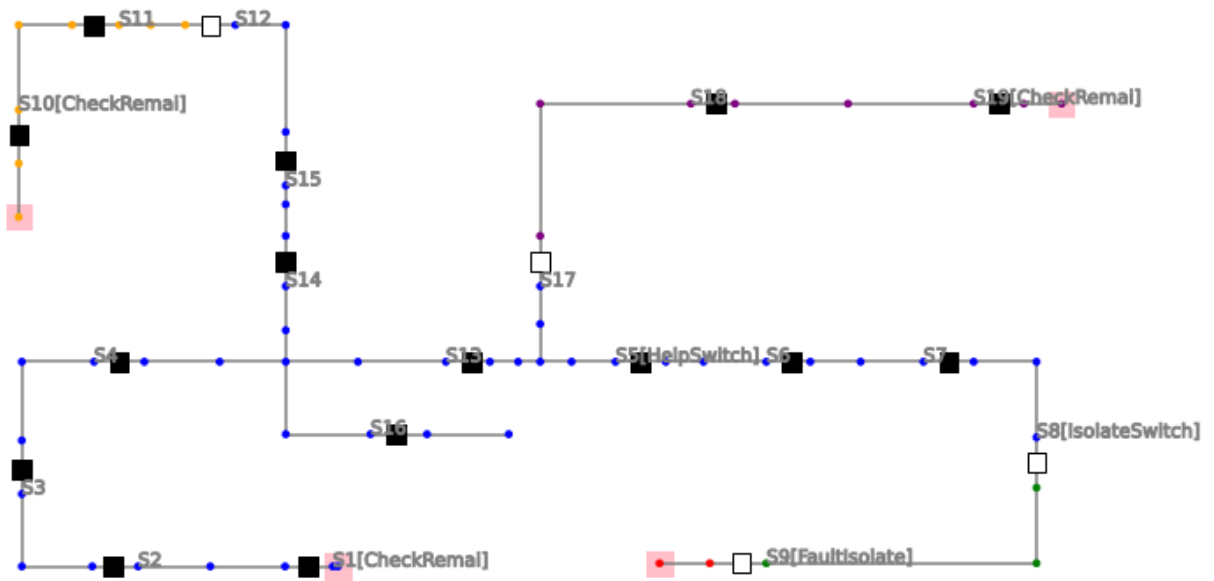


Figura 73. Sistema teste 5 da Figura 39, após o processo de autorrecuperação para um curto-circuito entre S8 e S9.