

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Juliano Silva Damiani

**MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE UMA ESTIMATIVA DA SEÇÃO EM
FALTA E ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DO USO DE SISTEMAS MULTIAGENTES**

Santa Maria, RS
2022

Juliano Silva Damiani

**MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE UMA ESTIMATIVA DA SEÇÃO EM FALTA E
ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO USO DE
SISTEMAS MULTIAGENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Dr. Ghendy Cardoso Junior

Juliano Silva Damiani

**MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE UMA ESTIMATIVA DA SEÇÃO EM FALTA E
ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO USO DE
SISTEMAS MULTIAGENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 31 de maio de 2022:

Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Jean Pereira Rossini, Me. (UFSM)

Mairon Gallas, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, Cezar Augusto Damiani e Sonia Maria Silva Damiani, pelo apoio e amor incondicional, pelos inúmeros ensinamentos, pela minha formação moral, por sempre exigirem meu máximo e por proporcionarem a base de toda esta trajetória acadêmica e pessoal. Serei eternamente grato a vocês.

Ao meu irmão, Vinicius Silva Damiani, pelos incontáveis conselhos e conversas ao longo de toda minha vida, por sempre zelar meu desenvolvimento e mostrar o caminho correto.

A todos os meus familiares que depositaram confiança em mim, sempre me auxiliaram e torceram pelo meu sucesso nesta caminhada.

Ao meu orientador, professor Dr. Ghendy Cardoso Junior, pela orientação ao longo de toda a graduação, pela confiança e apoio cedidos a este trabalho.

Agradeço a todos os integrantes, amigos e colegas do Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos (LAPES), onde tive contato com uma ampla colaboração e orientação desde o começo. Em especial, agradeço ao Guilherme Braga da Costa, que tive oportunidade de trabalhar e auxiliar ao longo do desenvolvimento de sua tese.

Aos meus amigos, colegas da graduação, ex-colegas do colégio, que sempre me motivaram e apoiaram em todas as ocasiões.

A todos os professores, orientadores e tutores que tive durante minha vida, que auxiliaram minha formação técnica e profissional.

A Universidade Federal de Santa Maria, pelo ensino de qualidade e excelência, pelos seus serviços e todo seu núcleo universitário educacional.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pelo apoio financeiro durante grande parte da graduação.

Por fim, agradeço ao Grande Arquiteto do Universo pelo dom da vida.

Nullius in verba
(Royal Society)

RESUMO

MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE UMA ESTIMATIVA DA SEÇÃO EM FALTA E ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO USO DE SISTEMAS MULTIAGENTES

AUTOR: Juliano Silva Damiani
ORIENTADOR: Ghendy Cardoso Junior

As Redes Elétricas Inteligentes (REIs) possibilitam um melhor gerenciamento, controle e monitoramento da distribuição e consumo de energia elétrica. Mediante o cenário de uma REI, com medidores inteligentes que possibilitam a troca de informações na rede, a utilização de Sistemas Multiagentes (SMA) torna-se viável para auxiliar a comunicação entre equipamentos existentes, interligando-os, permitindo manter os altos índices de desempenho e qualidade da energia exigidos pelos órgãos reguladores. A utilização do SMA torna a rede mais autônoma e flexível, possibilitando recomposição, análise e gerenciamento da qualidade no fornecimento de energia elétrica e, a estimativa da seção em falta. Mediante a isso, foi realizada a modelagem e simulação de uma rede de distribuição genérica. O sistema teste foi desenvolvido via *software* HYPERSIM, da OPAL-RT *Technologies*. Posteriormente, foi projetado uma arquitetura de SMA para implementar na rede elétrica. Para criação e desenvolvimento dos agentes foi utilizado o *framework Java Agent Development (JADE)*. O intuito é estimar a seção da falta, possibilitando uma maior velocidade em termos de restauração do trecho afetado e correção do problema. Foram desenvolvidos estudos de possíveis cenários de falta no sistema teste, dentre os casos analisados destacam-se: ramal de ligação do medidor, lado de baixa tensão do transformador e rede de média tensão do transformador. Além disso, busca-se analisar também a qualidade do fornecimento da energia elétrica para consumidores residenciais, respeitando os indicadores técnicos. Os resultados obtidos para todos os cenários analisados foram satisfatórios, as seções atingidas pelas faltas foram corretamente localizadas, possibilitando o reestabelecimento do fornecimento de energia.

Palavras-chave: Sistemas Multiagentes. Redes Elétricas Inteligentes. Medidores Inteligentes. Qualidade da Energia Elétrica. Estimativa da Seção em Falta.

ABSTRACT

METHOD FOR OBTAINING A FAULT SECTION ESTIMATION AND ANALYSIS OF POWER QUALITY THROUGH THE USE OF MULTI-AGENT SYSTEMS

AUTHOR: Juliano Silva Damiani
ADVISOR: Ghendy Cardoso Junior

Smart Grids (SG) enable better management, control and monitoring of the distribution and consumption of electricity. Under the scenario of an SG, with smart meters that allow the exchange of information in the network, the use of Multi-Agent Systems (MAS) becomes viable to assist the communication between existing equipment, interconnecting them, allowing to maintain the high performance indexes and power quality required by regulatory agencies. The use of MAS makes the network more autonomous and flexible, enabling restoration, analysis and quality management in the supply of electric energy and, fault section estimation. Therefore, the modeling and simulation of a generic distribution network. The test system was developed using the HYPERSIM software, by OPAL-RT Technologies. Subsequently, an MAS architecture was designed to implement in the electrical grid. For the creation and development of agents, the Java Agent Development framework (JADE) was used. The intention is to estimate with good precision the section that the fault occurred, allowing a greater speed in terms of restoration of the affected section and correction of the problem. Studies of possible fault scenarios were developed in the test system, among the cases analyzed, the following stand out: meter connection branch, low voltage side of the transformer and medium voltage network of the transformer. In addition, it also seeks to analyze the power quality supplied to residential consumers, respecting technical indicators. The results obtained for all the analyzed scenarios were satisfactory, the faults were correctly located, allowing the reestablishment of the energy.

Keywords: Multi-Agent Systems. Smart Grids. Smart Meter. Power Quality. Fault Section Estimation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama básico do agente	18
Figura 2.2 – Modelo Geral da plataforma dos agentes.....	20
Figura 2.3 – Principais elementos da arquitetura da plataforma JADE.....	21
Figura 3.1 – Diagrama unifilar da rede de distribuição em estudo.....	28
Figura 3.2 – Arquitetura do SMA proposto.....	29
Figura 3.3 – Topologia aplicada do framework	33
Figura 3.4 – Plataforma remota de gerenciamento de agentes do JADE	33
Figura 3.5 – Fluxograma do SMA proposto para estimação da seção em falta.	34
Figura 3.6 – Fluxograma do SMA proposto para o gerenciamento da QEE.....	36
Figura 3.7 – Sistema implementado no <i>software</i> HYPERSIM	37
Figura 4.1 – Diagrama de comunicação- Cenário 1- Falta no ramal do medidor	40
Figura 4.2 – Diagrama de Comunicação- Cenário 2- Falta na BT do Transformador.	41
Figura 4.3 – Diagrama de Comunicação- Cenário 3- Falta na MT dos Transformadores.	43
Figura 4.4 - Gráfico das tensões fornecidas para (a) Residência 1 (b) Residência 2 (c) Residência 3.....	45
Figura 4.5 - Diagrama de comunicação - Distorção da forma de onda da tensão.	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Quadro comparativo entre REI e rede convencional.....	16
Quadro 2.2 – Faixa de valores para classificação da tensão.....	25
Quadro 2.3 – Faixa de valores para classificação do desequilíbrio de tensão.....	26
Quadro 4.1 – Informação dos medidores inteligentes	38
Quadro 4.2 – Parâmetros das faltas analisadas.....	39
Quadro 4.3 – Classificação da tensão de cada caso analisado.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	<i>Agent Communication Language</i>
AE	Analisador de Energia
AID	<i>Agent Identifier</i>
AMS	<i>Agent Management System</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
DF	<i>Directory Facilitator</i>
DRC	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária
FD	Fator de Desequilíbrio
FIPA	<i>Foundation for Intelligent Physical Agents</i>
GD	Geração Distribuída
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IA	Inteligência Artificial
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
JADE	<i>Java Agent Development framework</i>
MI	Medidor Inteligente
MT	Média Tensão
MTS	<i>Message Transport System</i>
PRODIST	Procedimentos dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
REI	Redes Elétricas Inteligentes
RMA	<i>Remote Management Agent</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIL	<i>Software-In-the-Loop</i>
SMA	Sistemas Multiagentes
TC	Transformador de Corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
1.2	MOTIVAÇÃO.....	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.3.1	Objetivos Gerais.....	13
1.3.2	Objetivos Específicos	14
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	16
2.2	MEDIDORES INTELIGENTES	17
2.3	SISTEMAS MULTIAGENTES.....	18
2.4	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS COM SISTEMAS MULTIAGENTES.....	22
2.5	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA.....	24
3	METODOLOGIA PROPOSTA.....	28
3.1	ARQUITETURA DO SISTEMA MULTIAGENTE	29
3.2	COMPORTAMENTO DOS AGENTES.....	30
3.2.1	Agente Medidor.....	30
3.2.2	Agente Transformador	30
3.2.3	Agente Chave.....	31
3.2.4	Agente Subestação	31
3.2.5	Agente Equipe	31
3.2.6	Agentes Instrínsecos da Plataforma JADE.....	32
3.3	IMPLEMENTAÇÃO	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1	ESTIMAÇÃO DA SEÇÃO EM FALTA.....	39
4.1.1	Cenário 1 – Falta no Ramal de Ligação do Medidor.....	39
4.1.2	Cenário 2 – Falta na Rede de Baixa Tensão do Transformador.....	41
4.1.3	Cenário 3 – Falta na Rede de Média Tensão do Transformador.....	42
4.2	ANÁLISE DA QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	43
5	CONCLUSÃO.....	48
5.1	TRABALHOS FUTUROS	49
5.2	TRABALHOS PUBLICADOS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	APÊNDICE	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O fornecimento de energia elétrica sempre foi ponto fundamental de preocupação de muitas concessionárias. Com a evolução da tecnologia e a crescente demanda por energia elétrica, buscam-se novas formas de analisar, automatizar e proteger as redes elétricas, tornando-as mais eficientes, resilientes e confiáveis. Frequentemente, as concessionárias investem em estudos para modernização das atuais redes convencionais, com o intuito da implementação de fluxo de informação na rede e aumentar os índices de confiabilidade.

As Redes Elétricas Inteligentes (REIs) possibilitam monitorar, controlar e gerenciar a distribuição e consumo de energia elétrica de uma forma eficaz, com fluxo bidirecional de dados. Além disso, as REIs permitem uma alta transferência de dados devido a utilização de equipamentos modernos e interligados por redes de comunicação (MERABET et al., 2014). Todas essas características intrínsecas fazem destas redes foco de análise deste trabalho.

O crescente uso e implementação de Medidores Inteligentes (MIs), que é o principal elemento das REIs, favorece a coleta de uma ampla gama de informações, compartilhadas por meio dos sistemas de comunicações, além de atuação local via comandos remotos (FORTES et al., 2017). Logo, estudos e desenvolvimentos de novas funcionalidades e métodos utilizando MIs são foco de pesquisa e interesse nos últimos anos.

Mediante este cenário, passa a ser cogitada a utilização de Sistemas Multiagentes (SMA) e sua implementação torna-se viável para auxiliar a comunicação entre os equipamentos existentes, interligando-os, permitindo manter os altos índices de desempenho e qualidade de energia exigidos pelos órgãos reguladores.

A utilização do SMA torna a rede mais autônoma e flexível, possibilitando reconfigurações, recomposição, análise e gerenciamento da qualidade de energia e, em especial, uma estimativa da seção em falta. Nota-se que a busca pela localização e identificação da falta é um problema recorrente no âmbito de sistemas elétricos de potência.

Logo, desenvolver um método de estimativa da seção em falta que leva em consideração os principais fundamentos da inteligência artificial aplicados em uma REI é de grande importância em um mundo moderno. Uma rápida localização da falta permite reduzir o tempo de manutenção e restauração da rede, essa é uma das principais variáveis desejadas pelas distribuidoras de energia.

Outro parâmetro ao qual deve-se atentar é quanto a Qualidade da Energia Elétrica (QEE). A QEE varia de acordo com flutuações de tensão, transientes, variações de curta

duração, desequilíbrio, afundamento de tensão, sobretensão e componentes harmônicas. Todos estes parâmetros são mensurados e especificados pelo PRODIST - Módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), 2021). Conseqüentemente, torna-se atrativo desenvolver métodos para o controle e gerenciamento em tempo real da QEE, visando a qualidade do produto e garantindo a continuidade no fornecimento de energia, monitorando a conformidade no nível de tensão, desequilíbrio de tensão, distúrbios, etc.

1.2 MOTIVAÇÃO

Atualmente, a determinação e localização da seção em falta em sistemas de distribuição é de forma indireta. Perceba que, para obter o local exato da falta, inicialmente o consumidor deve relatar o problema para a distribuidora, muitas vezes isto é feito por ligação telefônica. Após relatado o problema, será acionada a equipe para se deslocar até o local, e então irá procurar visivelmente o local do defeito na rede elétrica. Note que, as faltas podem causar sérios danos tanto para a rede elétrica quanto para os indivíduos que estão próximo ao trecho afetado. Logo, uma restauração do sistema de forma rápida e segura torna-se necessária.

Observe que, existe um determinado intervalo de tempo até o consumidor avisar para a distribuidora sobre o problema em sua residência. Além disso, existe um intervalo de tempo para o deslocamento da equipe até o local exato do problema. Mediante a isso, a metodologia desenvolvida neste trabalho, busca reduzir o tempo gasto na restauração da rede elétrica, por meio de uma precisa e rápida localização da seção sob falta, além de acionar automaticamente a equipe de campo para o restabelecimento da energia elétrica, diminuindo a ação por parte do consumidor para detectar o problema.

Ademais, a restauração da energia elétrica de forma rápida, segura e prática, é uma variável de interesse de muitas distribuidoras, principalmente para melhorar os indicadores técnicos de qualidade de energia, possibilitando assim reduzir possíveis multas e compensações.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Gerais

- Desenvolver e implementar um método para obter uma estimativa da seção em falta, de forma precisa e autônoma, através do uso de SMA;

- Analisar a qualidade do fornecimento da energia elétrica por meio da aplicação do SMA como um paradigma de controle e atuação em tempo real no gerenciamento da energia;

1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar e implementar um SMA para localizar possíveis faltas em uma rede elétrica;
- Atender as exigências de qualidade de energia para as concessionárias, visando melhorar os indicadores técnicos e reduzir o número de reclamações dos clientes;
- Realizar simulações em uma rede de distribuição genérica para implementar ambos os métodos propostos, possibilitando analisar sua viabilidade;
- Utilizar *software* de simulação em tempo real para modelar possíveis cenários de falta que ocorrem na prática;
- Programar o SMA em uma plataforma de desenvolvimento de agentes confiável e que opere em conjunto com as simulações elétricas;
- Visualizar a troca de informação entre os agentes e compreender suas tomadas de decisões.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos pré-estabelecidos, o presente trabalho foi estruturado da seguinte forma:

No capítulo 1 é apresentada a introdução, contendo o paradigma geral, relevância, foco da pesquisa, objetivos gerais e específicos do trabalho.

No capítulo 2 é abordada a revisão bibliográfica, conceituando os principais fundamentos a respeito do SMA, comportamento, autonomia e tomada de decisão dos agentes. Além disso, explica-se os conceitos de redes elétricas inteligentes e medidores inteligentes, elencando suas vantagens em comparação as redes e medidores convencionais. Ademais, apresenta-se uma análise geral sobre localização e identificação de faltas em sistemas de distribuição. Por fim, descreve-se os indicadores da qualidade no fornecimento de energia elétrica.

No capítulo 3 é descrito a metodologia proposta para solucionar a problemática, contendo a arquitetura, comportamento dos agentes e sua implementação em simulação computacional.

O capítulo 4 compreende os resultados e discussões. As metodologias desenvolvidas foram avaliadas por meio dos diferentes cenários de estudo. Cada cenário será discutido em um tópico específico. Além disso, é apresentado os resultados das simulações via plataforma de desenvolvimento dos agentes JADE e do *software* de simulações elétricas HYPERSIM, da *OPAL-RT Technologies*.

Por fim, o capítulo 5 é discutido as conclusões gerais do trabalho, elencando os principais tópicos desenvolvidos no trabalho e também é apresentado algumas sugestões de trabalhos futuros. Além disso, é elencado os trabalhos publicados e desenvolvidos neste assunto pelo autor.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão das principais referências e os conceitos de maior relevância para a pesquisa e compreensão do tema, obtendo uma visão geral sobre SMA, plataforma JADE, conceituação de REIs, vantagens do uso de MIs, localização e identificação de faltas em sistemas de distribuição e os principais indicadores técnicos da QEE.

2.1 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

De acordo com Northcote-Green e Wilson (2007), a automação de redes de distribuição consiste num conjunto de tecnologias que permitem ao operador da rede monitorar, coordenar, e operar remotamente por meio de dispositivos, possibilitando reconfigurações, restaurações, tornando a rede mais observável ao operador.

Mediante este cenário, as REIs (do inglês “*smart grids*”) são o principal foco de estudos e pesquisas nos últimos anos, devido as possibilidades de automatização e controle. Com a crescente necessidade evolutiva do sistema de distribuição, as redes inteligentes são um novo conceito de sistema que utiliza recursos tecnológicos para monitorar e gerenciar o transporte de energia em tempo real.

O Quadro 2.1 apresenta a comparação entre as características das REIs em relação as redes convencionais.

Quadro 2.1 – Quadro comparativo entre REI e rede convencional

Rede Convencional	Rede Elétrica Inteligente
Medidor Eletromecânico/Eletrônico	Medidor Digital
Comunicação Unidirecional	Comunicação Bidirecional
Hierarquia de Transmissão	Sem Hierarquia
Geração Centralizada	Geração Distribuída
Poucos Sensores	Muitos Sensores
Restauração Manual	Auto Restauração
Controle Manual	Controle Remoto
Controle Limitado	Controle Ilimitado
Sem Monitoramento	Auto Monitoramento
Poucas Opções de serviços ao Usuário	Várias Opções de serviços ao Usuário

Fonte: Adaptado de Rigodanzo (2015).

As concessionárias de energia estão passando por transformações providas da evolução digital. Os sistemas de energia também estão passando por um processo de transformação,

modernizando seus procedimentos, equipamentos e dispositivos. Logo, as REIs possuem papel fundamental neste processo, para garantir uma alta segurança, qualidade e eficiência econômica no fornecimento da eletricidade (CHAKRABORTY et al., 2021).

É importante salientar que a infraestrutura do sistema elétrico não será modificada imediatamente. Espera-se que aos poucos sejam adicionadas novas funcionalidades e dispositivos a rede convencional até atingir o conceito de REI (RIGODANZO, 2015).

Sob o cenário de REIs, muitas possibilidades se abrem, desde mudanças na geração, armazenamento de recursos, eficiência, restauração automática, fluxo bidirecional de dados, e inclusive, o monitoramento da QEE.

2.2 MEDIDORES INTELIGENTES

O monitoramento de dados é uma das principais variáveis desejadas por engenheiros de proteção de sistemas de potência. Para coletar esses dados são utilizados MIs (do inglês “*smart meter*”) instalados nas unidades consumidoras. Estes dispositivos possibilitam interação em tempo real com consumidores e fluxo bidirecional de dados.

As informações de consumo de energia refinadas em tempo real coletadas pelo MI permite que o centro de controle (concessionária) de energia tenha funções como faturamento, previsão, monitoramento de carga e resposta à demanda (ZHANG; RONG; WANG, 2020). Para integrar a infraestrutura de rede inteligente com os sistemas de distribuição, os MIs desempenham função principal neste processo.

A crescente busca pela medição com boa precisão no sistema elétrico, potencializa a disseminação da ideia de implementação dos MIs. Porém, o uso de medição inteligente resulta numa substituição dos atuais medidores. Logo, é notório a dificuldade na implementação devido a questão financeira por parte da concessionária, conseqüentemente há a ausência de investimentos para o desenvolver desse processo.

Em 2015, nos Estados Unidos, as companhias de energia instalaram cerca de 65 milhões de MIs (CHAKRABORTY et al., 2021). Estima-se que em 2020 seja de 90 milhões de medidores instalados. Já na Europa, a União Europeia planeja substituir 80% dos medidores eletromecânicos por MIs até 2020, sempre que for rentável fazê-lo. Com isso, estima-se a implementação de 200 milhões de MIs até 2020.

Conforme Fortes et al. (2017), o Brasil tem cerca de 78 milhões de medidores para serem trocados. Este número representa um grande desafio para as companhias de energia e para o

governo brasileiro. É de suma importância as políticas de incentivo tanto na universalização da energia elétrica para todos os brasileiros, quanto a modernização na medição da energia.

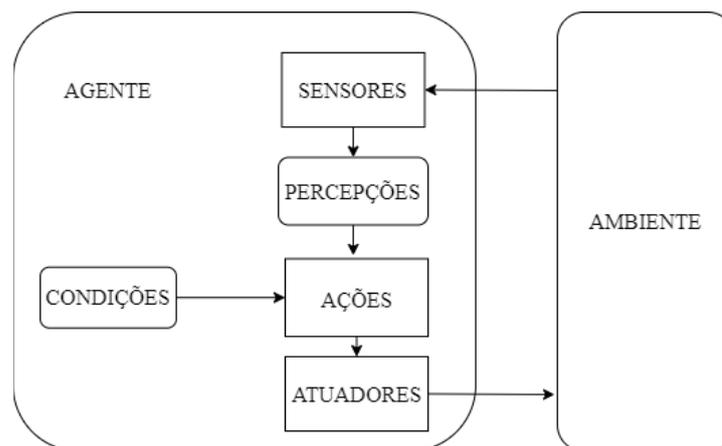
Uma das grandes vantagens dos MIs é a possibilidade de informar automaticamente as alterações no nível de tensão fornecida ao consumidor. Por meio deste método, o processo de QEE torna-se rápido e eficiente, adequando as concessionárias as normas regulatórias.

2.3 SISTEMAS MULTIAGENTES

Sendo um dos ramos de aplicação da Inteligência Artificial (IA), os SMAs consistem em um sistema computacional em que vários agentes cooperam para atingir um objetivo global ou específico. De acordo com Shobole e Wadi (2021), os agentes são sistemas computacionais inteligentes que atuam com autonomia, e tem a habilidade de realizar decisões críticas utilizando informação local ou global para atingir os objetivos designados.

Segundo Mwifunyi, Kissaka e Mvungi (2019), agentes podem ser unidades de *hardware* ou *software* com alto nível de abstração, inseridos em um determinado ambiente, com a capacidade de interpretar dados e executar ações autônomas que alteram o estado do ambiente ao qual está inserido. A Figura 2.1, apresenta o esquemático básico da funcionalidade de um agente e sua relação com o ambiente.

Figura 2.1 – Diagrama básico do agente



Fonte: Adaptado de Mwifunyi, Kissaka e Mvungi (2019).

Na Figura 2.1 percebe-se que os agentes são constituídos por sensores e atuadores. Os sensores são capazes de analisar e compreender as mudanças no ambiente e após isso, passa por uma série de etapas até a tomada de decisão, por meio de uma ação, por meio dos atuadores.

As técnicas de IA podem ser implementadas dentro dos agentes, possibilitando ao agente uma maior capacidade computacional e uma melhor tomada de decisão, de acordo com suas percepções, seus objetivos e as mudanças no ambiente em que está inserido Shobole e Wadi (2021).

Conforme Jennings, Sycara e Wooldridge (1998), o SMA pode ser utilizado em tarefas complexas, pois baseia-se no princípio de “dividir e conquistar”, ou seja, estes sistemas permitem que a tarefa seja subdividida em várias outras menores e mais simples, facilitando a solução do problema.

As principais razões para a escolha do SMA são devido a capacidade de fornecer robustez e eficiência para a rede elétrica, além de permitir a interoperação com sistemas existentes e a grande capacidade de resolver problemas de forma distribuída, possibilitando uma solução mais rápida e automática.

De acordo com Eremia, Liu e Edris (2016) existem diversas aplicações utilizando SMA, desde aplicações comerciais (gerenciamento de informações, comércio eletrônico), industriais (controle de tráfego aéreo, logística, controle em tempo real), médicas (monitoramento de pacientes), e em especial, aplicações no setor elétrico, foco deste trabalho.

A inteligência artificial permitiu ao SMA possíveis abordagens para auxiliar, e até mesmo substituir o operador humano da rede elétrica, especialmente em casos de aplicações em redes automatizadas (HASANUZZAMAN SHAWON et al., 2019). Além disso, os métodos baseados em agentes podem lidar com a vasta gama de dados provindos das REIs, favorecendo e viabilizando seu funcionamento em conjunto. Segundo (SHIRAZI; JADID, 2019), o SMA surgiu como a tecnologia responsável por aplicar estratégias de controle distribuído em sistemas de potência.

Os protocolos de comunicação entre os agentes são desenvolvidos e padronizados, por meio da *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA). A FIPA faz parte da *IEEE Computer Society* que é principalmente ligada as áreas de ciência da computação, engenharia elétrica e eletrônica.

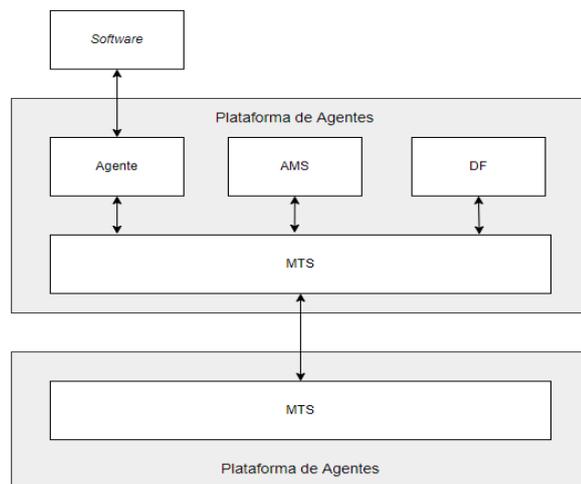
Os protocolos estabelecidos pela FIPA são de suma importância para garantir a correta cooperação, coordenação e negociação entre os agentes. O padrão FIPA dispõe uma normalização na comunicação entre os agentes, especificando seus protocolos de interação.

Os agentes conseguem cooperar entre si por meio da *Agent Communication Language* (ACL). Esta linguagem de comunicação de agente permite suportar o compartilhamento e entendimento do conteúdo da mensagem, sua semântica e o contexto de comunicação da mensagem (POSLAD, 2007). A ACL é a linguagem de comunicação mais utilizada entre

agentes. Vale ressaltar que o tipo de mensagem é padronizado e demonstra qual sua intenção (por exemplo: INFORM /informar, REQUEST/solicitar, REFUSE/recusar).

Na Figura 2.2 é apresentado a plataforma dos agentes, em que é constituída basicamente por: *Agente*, *Agent Management System* (AMS), *Directory Facilitator* (DF) e *Message Transport System* (MTS).

Figura 2.2 – Modelo Geral da plataforma dos agentes



Fonte: Adaptado de Bellifemine et al. (2010).

O AMS é o agente responsável por gerenciar e supervisionar a plataforma e pela prestação de serviço nas páginas brancas. Para obter um *Agent Identifier* (AID) válido, o agente precisa se registrar em um AMS. O AID é basicamente um código identificador que cada agente possui. Cada plataforma de agentes possui DF, AMS e os agentes.

O DF fornece o serviço de páginas amarelas que gerencia uma lista de serviços que cada agente pode oferecer (por exemplo, leitura de tensão, topologia de rede, manutenção etc.). Salienta-se que as páginas amarelas e brancas são subdivisões de atribuições dos padrões estabelecidos pela FIPA.

Já o MTS é responsável por transportar e transmitir as informações para outra plataforma de agentes, permitindo a correta comunicação e troca de informações entre agentes e entre outras plataformas remotas.

Existem várias ferramentas para o desenvolvimento de agentes, dentre as principais destacam-se: JASON (*framework* baseado em agentes BDI utilizando linguagem *AgentSpeak*), JADE (*framework* baseado em linguagem de programação JAVA), SPADE (plataforma baseada

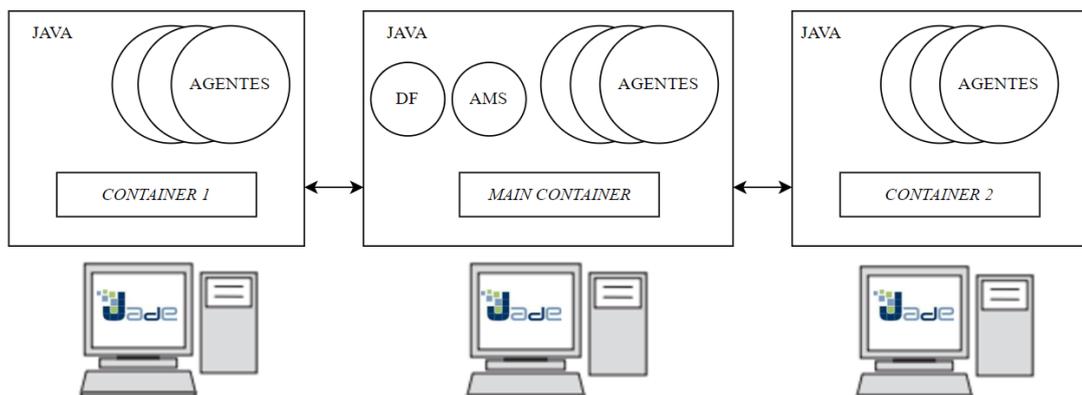
em linguagem de programação Python), JACK (desenvolvimento comercial de agentes baseado em JAVA), entre outras.

Devido a sua adaptabilidade com outros *softwares* de simulação de redes, como MATLAB/*Simulink*, HYPERSIM, e por ser de código aberto (“*open source*”), o *Java Agent Development framework* (JADE) vêm sendo utilizado em várias pesquisas para o desenvolvimento e implementação de SMA. O objetivo principal da plataforma JADE é estabelecer uma facilidade no desenvolvimento de agentes, garantindo padrões de operação, programação e de uma série de serviços disponíveis. Vale ressaltar que todas estas especificações e serviços estão de acordo com as normas estabelecidas pela FIPA.

Além disso, o JADE disponibiliza uma interface gráfica (GUI) que possibilita a visualização da troca de mensagens entre os agentes de forma clara e concisa. Essa interação entre usuário e agentes, favorece sua utilização, e acrescenta tópicos a serem analisados quanto a troca de informações e tomada de decisão dos agentes.

A Figura 2.3 apresenta os principais elementos da arquitetura JADE. Uma plataforma JADE é composta por *containers* que são compostos pelos agentes. Existe um *container* principal, designado por padrão de *main container*, que representa o ponto de inicialização da plataforma. Esse container principal é o primeiro *container* a ser registrado e desenvolvido na plataforma e todos os outros são registrados nele.

Figura 2.3 – Principais elementos da arquitetura da plataforma JADE



Fonte: Adaptado de Bellifemine, Caire e Greenwood (2007).

Nota-se que o *main container* hospeda o DF e o AMS, os dois agentes especiais que fornecem o gerenciamento dos agentes e serviço de páginas brancas e o serviço de páginas amarelas, devido ao padrão já mencionado da plataforma.

2.4 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS COM SISTEMAS MULTIAGENTES

Os sistemas de distribuição devem operar corretamente em todo tempo, mesmo em condições de falhas e distúrbios. De acordo com Hussein e Rao, (2016), as faltas são qualquer distúrbio que resulta em uma corrente elétrica anormal no sistema. Quando o SEP opera sob condição de falta, o operador do sistema recebe informações, e conseqüentemente, deve tomar decisões para a restauração do sistema, de forma ágil e precisa, evitando possíveis acidentes e danos a rede elétrica.

Entretanto, em muitos dos casos, essa tomada de decisão torna-se extremamente complexa ao avaliar todos os fatores e critérios. Além disso, existem diversos tipos de faltas, e realizar a localização e identificação da falta de forma precisa e rápida passou a ser o foco de interesse de muitas concessionárias de energia.

Mediante a isso, surgem diversos métodos para realizar o diagnóstico de falta, localização, isolamento e restauração do serviço, tornando a rede resiliente. Vale ressaltar que a localização de falta é um problema recorrente no âmbito do SEP. Diversos métodos já foram desenvolvidos para a localização e identificação de faltas em sistemas de distribuição.

Dentre os principais tipos de métodos de localização de falta, destacam-se: métodos baseado em impedância aparente, métodos baseado em ondas viajantes, métodos baseado em equações diferenciais e métodos inteligentes utilizando inteligência artificial (DASHTI; GHASEMI; DAISY, 2018).

Os métodos inteligentes consistem em soluções baseadas nos fundamentos da IA aplicando redes neurais artificiais, sistemas multiagentes, sistema de inferência *Fuzzy*, entre outros. Todos estes métodos podem auxiliar os operadores e engenheiros. Com o uso destes métodos o tempo de resposta à distúrbios é reduzido substancialmente, além de evitar possíveis erros humanos (HUSSEIN; RAO, 2016).

Em Mohamed et al., (2019), os autores propõem um novo método híbrido utilizando SMA para localizar e isolar a falta, e realizar a restauração do sistema. Para a estimação da distância em que ocorreu a falta, foi utilizado o método da impedância em conjunto com o SMA, em que os agentes identificam alguma perturbação no sinal da tensão/corrente, acionam um comando de *trip* para os disjuntores isolarem a falta. Para a modelagem da rede e desenvolvimento dos agentes utilizou o MATLAB/*Simulink* junto com a plataforma JADE, comunicação realizada por meio da biblioteca MACsimJX.

Similar a abordagem anterior, Chellaswamy e Rani, (2019) descrevem uma proposta de solução automática para restauração do sistema, com localização, isolamento da falta, e utiliza-se

do SMA para o serviço de restauração, considerando *smart grids*. Assim como o trabalho anterior, o *software* de simulação foi o MATLAB/*Simulink* conectado com o JADE. Neste caso, a proposta faz o uso da corrente e tensão RMS para a localização e isolamento da seção em falta. Foi utilizado um valor pré-definido de *threshold* baseado em simulações de curto-circuito para o acionamento da proteção. Os agentes alocados na rede são responsáveis pelos comandos de controle para a abertura/fechamento das chaves para isolamento.

No artigo de Ghorbani, Choudhry e Feliachi, (2016), os autores apresentam uma abordagem de SMA para localização e isolamento da falta, e colabora com um novo algoritmo para otimização na restauração. Este algoritmo é baseado em mecanismos de aprendizagem e possibilitam ao agente realizar uma melhor tomada de decisão para a restauração. O foco principal é minimizar o tempo de restabelecimento do sistema, auxiliando as concessionárias e restaurando o serviço para o máximo de cargas possíveis. Uma topologia hierárquica distribuída do SMA foi utilizada. Para as simulações elétricas foi utilizado o MATLAB/*Simulink*. Para sincronização das simulações e dos agentes, foi utilizado uma API *S-function* que habilita a interação entre os sistemas.

O trabalho publicado por Azeroual et al., (2021) propõem um sistema inteligente por meio da localização de falta via SMA, considerando redes ativas, com Geração Distribuída (GD), focando especificamente a geração eólica, devido a sua capacidade de geração de energia limpa. Os dados de tensão e corrente são coletados por meio de unidades de medição fasorial e enviadas para os agentes. Também é uma abordagem que utilizou o JADE conectado com o ambiente MATLAB/*Simulink* via MACSimJX. Nesse método, se a corrente exceder um limiar de ativação, os agentes enviam o sinal de *trip* fazendo a abertura dos disjuntores.

Uma abordagem utilizando Controle em Hardware-In-Loop (CHIL) foi desenvolvida em Hoang, Tuan Tran e Besanger, (2019). O trabalho apresenta uma proposta de solução para localização e isolamento de faltas em redes com GD, com alta integração de painéis fotovoltaicos. As simulações foram desenvolvidas em tempo real utilizando uma ferramenta da OPAL-RT que é o simulador eMEGAsim OP5000. O desenvolvimento dos agentes foi implementado em linguagem *Python*, mediante comunicação baseada na IEC 61850. Utilizou-se de funções lógicas para definir as tomadas de decisão de cada agente. Este estudo considerou tanto faltas temporárias quanto permanentes, e também fez prevenção caso ocorra uma falha nos dispositivos de proteção. Novamente é estipulado um limiar pré-definido para atuação e identificação de falta.

Em De Freitas et al., (2019), os autores descrevem uma abordagem de SMA por meio do *middleware* PADE. Seu principal foco está em demonstrar o processo de restauração de

energia após falha de equipamento em Média Tensão (MT). Além disso, traz comparações entre o PADE e a plataforma JADE. Os agentes monitoram possíveis perturbações nos sinais de tensão e corrente. A restauração do sistema está baseada na comunicação ponto a ponto entre os agentes, permitindo isolar a falta e iniciar o processo de restauração.

Já em Li et al., (2021), os autores desenvolveram uma integração das estratégias de localização de falta e isolamento baseado em um SMA totalmente descentralizado, em redes com GD. Caso haja uma falha no dispositivo de proteção primária, a estratégia desenvolvida coordena os sistemas de proteção para agir corretamente e contornar o problema. Utilizou-se funções lógicas binárias para realizar a estrutura de controle para localização de faltas. Considerou possíveis falhas no TC, na comunicação entre os agentes e no disjuntor. Com isso, o método desenvolvido é resiliente e serve como um sistema de restauração própria (“*self-healing*”).

Após a análise geral do estado da arte, e com os trabalhos elencados, constatou-se que grande parte das abordagens não fornece uma análise voltada ao consumidor. Ou seja, muitos dos estudos e pesquisas desenvolvidas sobre o tema, não focam na rede de BT voltada a qualidade do fornecimento de energia ao cliente, auxiliando tanto na localização da falta quanto na adequação dos níveis exigidos pelas normas regulatórias, fazendo com que o SMA seja uma ferramenta potencial para diversas aplicações como controle, tomada de decisão, proteção e seja um meio de conexão com vários outros sistemas disponíveis na rede elétrica.

2.5 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A ANEEL é responsável pela regulamentação do setor elétrico. Logo, ela estipula os documentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas nos sistemas de distribuição. Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), reúnem diversos documentos elaborados pela ANEEL, dispostos em módulos. O Módulo 8 é o documento responsável por estabelecer os procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Nesta norma, existem diversos critérios de qualidade do produto (conformidade na forma de onda da tensão), qualidade de serviço (continuidade do fornecimento de energia elétrica) e qualidade comercial (atendimento e tratamento das reclamações, cumprimento de prazos). As concessionárias de energia buscam novas formas para atender estes critérios, evitando multas, reclamações e compensações aos consumidores.

A QEE, em relação ao produto, varia de acordo com flutuações de tensão, transientes, variações de curta duração, variações de longa duração, desequilíbrios de tensão, afundamento de tensão, sobretensão e a presença de componentes harmônicas, responsáveis por distorcer o sinal desejado. O PRODIST- Módulo 8 descreve os critérios de medição, cálculo e registro dos indicadores técnicos. Além disso, este documento apresenta os prazos para a compensação ao consumidor, caso ocorra a transgressão de algum indicador.

Ademais, sabe-se que a tensão em regime permanente deve ser acompanhada em todo o sistema de distribuição. Mediante a isso, este trabalho tem a finalidade de gerenciar e analisar tanto a conformidade no formato de onda da tensão, quanto o desequilíbrio de tensão, possibilitando melhorias e adequações na QEE fornecida aos consumidores, evitando reclamações, compensações financeiras e reduzindo o tempo de restauração ao nível adequado de tensão em regime permanente.

Para realizar a classificação da tensão, segundo o PRODIST- Módulo 8, deve ser coletada a tensão a cada 10 minutos por no mínimo uma semana. Desta forma, são necessárias 1008 leituras para realizar a devida classificação da tensão fornecida. A norma utiliza dois índices para as transgressões: um para a Duração Relativa a Transgressão de Tensão Precária (DRP), e outro para a Duração Relativa a Transgressão de Tensão Crítica (DRC). Ambos os indicadores são calculados, respectivamente, por (2.1) e (2.2).

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100\% \quad (2.1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100\% \quad (2.2)$$

O limite do indicador DRP aceito pela norma é de 3% e do indicador DRC é de 0,5%. Os termos *nlp* e *nlc* representam o maior valor entre as fases do número de leituras localizadas nas faixas precária e crítica, respectivamente. No Quadro 2.2 estão apresentados os valores limites de tensão para cada classificação, conforme o PRODIST- Módulo 8.

Quadro 2.2 – Faixa de valores para classificação da tensão

Classificação da Tensão	Tensão (V)
Crítica	$V < 191$
Precária	$191 \leq V < 202$
Adequada	$202 \leq V \leq 231$
Precária	$231 < V \leq 233$
Crítica	$V > 233$

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021).

O processo de análise da tensão fornecida começa quando o cliente faz uma reclamação. Após a solicitação do consumidor, o prazo para as concessionárias no Brasil realizarem a coleta dos dados e fazerem as medições instantâneas é de 30 dias. O resultado com os valores de transgressão decorrentes da medição de 168h (1 semana), deve ser informado ao consumidor em até 30 dias. Caso seja identificada a infração na medição, os prazos para regularização serão de 15 dias quando houver infração relativo tanto ao DRP quanto ao DRC.

Outro principal indicador da qualidade da energia elétrica é o desequilíbrio de tensão. Mensurar o desequilíbrio de tensão é de suma importância, pois se as tensões estiverem desequilibradas, podem provocar maiores perdas na rede, o que aumenta o custo de operação e alguns equipamentos podem apresentar mau funcionamento, como por exemplo: os transformadores.

Para o cálculo do desequilíbrio de tensão, conforme módulo 8 do PRODIST, utilizam-se (2.3) e (2.4):

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.3)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.4)$$

A norma permite apenas 5% das leituras realizadas cujo Fator de Desequilíbrio de tensão (FD) seja maior que 3%, para tensão nominal inferior ou igual a 1kV. Ou seja, como foram realizadas 1008 leituras válidas, apenas 50 delas podem apresentar FD maior que 3%. O Quadro 2.3 fornece os limites aceitos para possíveis transgressões nas leituras.

Quadro 2.3 – Faixa de valores para classificação do desequilíbrio de tensão

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V < 230\text{kV}$
FD95%	3%	2%

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2021).

Vale ressaltar que, após a reclamação do consumidor, a distribuidora deve identificar as possíveis ocorrências no sistema elétrico que possa ter relação com o surgimento do desequilíbrio de tensão, podendo inclusive tentar realizar um rastreamento e investigação de acordo com os problemas relatados.

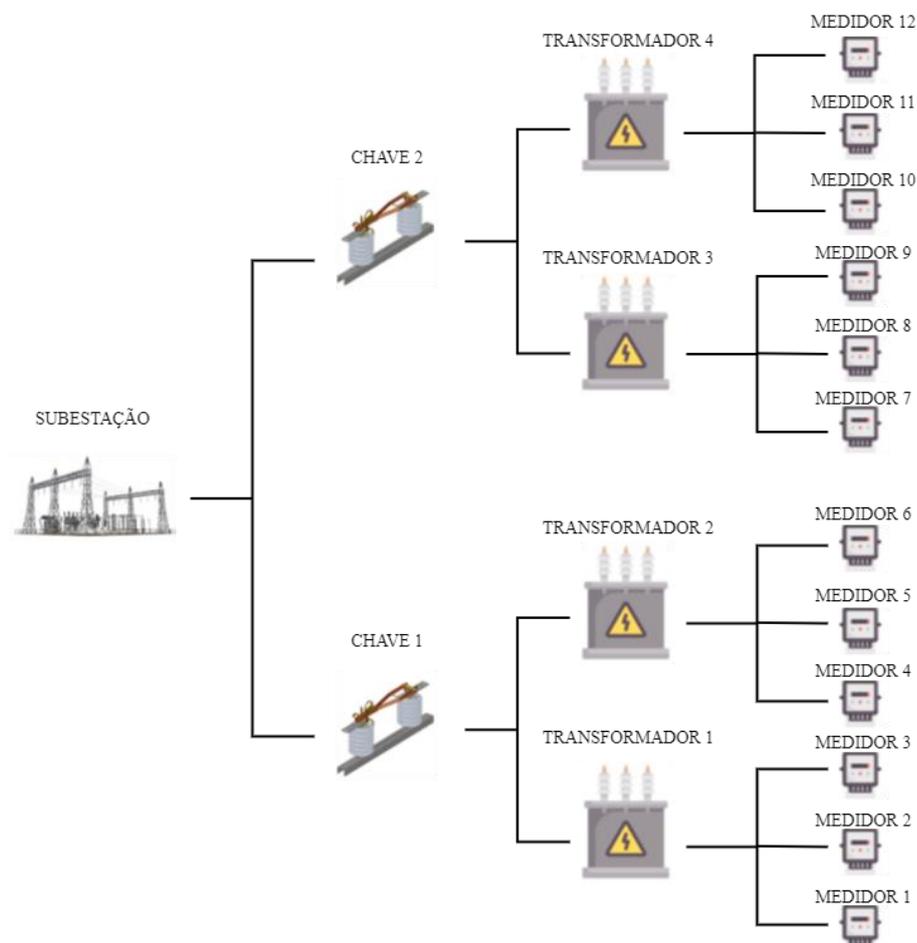
Existe também a possibilidade de ser um problema interno às instalações do consumidor. A distribuidora tem um prazo de 30 dias para elaboração de relatório com o parecer técnico sobre a ocorrência.

3 METOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para estimação da seção em falta, além da análise da QEE de unidades consumidoras por meio da utilização de SMA, considerando um cenário de REI.

A Figura 3.1 apresenta o diagrama unifilar de uma rede de distribuição genérica composta por medidores inteligentes nas unidades consumidoras, transformadores de distribuição, chaves e a subestação para alimentação do sistema. Esta topologia de rede será a base de estudo para o desenvolvimento e projeto da arquitetura do SMA.

Figura 3.1 – Diagrama unifilar da rede de distribuição em estudo.



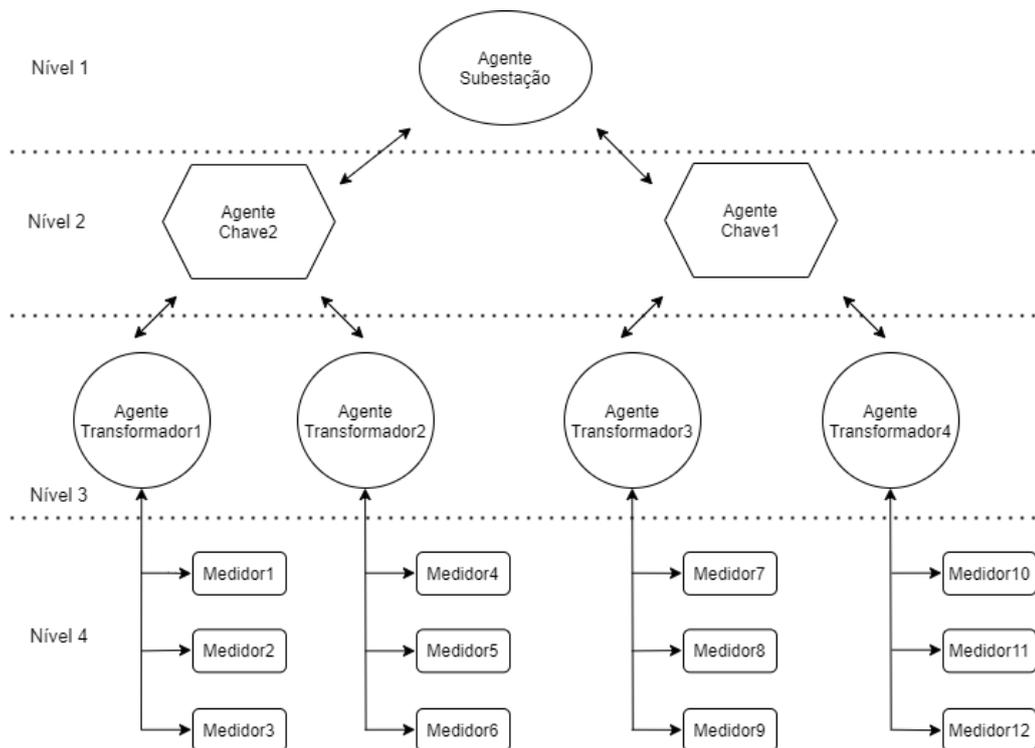
Fonte: Adaptado de COSTA et al. (2021).

Vale salientar que cada dispositivo ou equipamento será implementado como um agente. A união e cooperação de todos os agentes formam o SMA em análise. O método desenvolvido produz um diagnóstico de falta e um gerenciamento da qualidade do fornecimento de energia.

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA MULTIAGENTE

A Figura 3.2 ilustra a estrutura da arquitetura do SMA. Esta arquitetura foi baseada em Costa et al., (2021). Basicamente, utilizou-se de uma estrutura hierárquica contendo agentes distribuídos em 4 níveis: Agente Subestação, Agente Chave, Agente Transformador e Agente Medidor.

Figura 3.2 – Arquitetura do SMA proposto.



Fonte: Adaptado de COSTA et al. (2021).

Vale ressaltar que existem na plataforma do JADE os agentes padrões (AMS, RMA e DF). Além disso, foi utilizado o Agente Equipe que é responsável pela realização da manutenção na rede elétrica. Este agente não se encontra classificado em nenhum nível da arquitetura, pois possui a função de se comunicar com todos os agentes, independentemente do nível hierárquico.

Para a aplicação da localização de falta, todos os agentes estarão em operação. Entretanto, para o gerenciamento da QEE, apenas o Agente Medidor e o Agente Equipe serão utilizados.

Inicialmente, a primeira ação de cada agente é registrar seu serviço no DF. Este procedimento visa encontrar o agente responsável por cada serviço de forma eficiente, precisa e rápida.

3.2 COMPORTAMENTO DOS AGENTES

3.2.1 AGENTE MEDIDOR

Os MIs presentes nas unidades consumidoras são considerados como agentes. Este agente é responsável por monitorar a tensão e a corrente fornecida ao consumidor. Caso ocorra a detecção de algum distúrbio, via limiar de ativação, o curto-circuito ou ausência de energia elétrica, o agente envia uma mensagem para o Agente Subestação pedindo qual seu transformador a montante. Após receber a resposta, o Agente Medidor envia a informação para o Agente Transformador relatando o distúrbio, com seu identificador e as fases afetadas.

Para o caso da análise da QEE, se o fornecimento de energia estiver fora dos padrões estabelecidos pelo PRODIST módulo 8, o agente envia automaticamente uma mensagem ao Agente Equipe solicitando manutenção na unidade consumidora.

3.2.2 AGENTE TRANSFORMADOR

Os transformadores de distribuição da rede elétrica foram implementados como agentes. O Agente Transformador tem a função de monitorar as solicitações dos medidores no seu circuito de baixa tensão, e verificar se é um problema individual da unidade consumidora, ou é um problema no próprio transformador.

Mediante a isso, após receber a mensagem do Agente Medidor, inicia-se uma contagem de um tempo pré-definido (estipulado o valor de 30 segundos, porém, esta variável pode ser facilmente alterada). Caso haja mais um comunicado do mesmo circuito de baixa tensão dentro deste intervalo de tempo, o Agente Transformador considera que há um problema em seus terminais e informa ao Agente Chave sua situação.

Se ao término da contagem não houver mais solicitações de outro Agente Medidor no circuito de baixa tensão, o Agente Transformador considera que foi um problema individual na unidade consumidora e solicita manutenção ao Agente Equipe para aquele medidor específico.

3.2.3 AGENTE CHAVE

As chaves do sistema de distribuição foram implementadas como agentes. O Agente Chave é responsável por monitorar as situações dos transformadores de distribuição de seus respectivos trechos.

Após receber a informação do Agente Transformador, inicia-se uma contagem de um tempo pré-definido (30 segundos). Caso ocorra mais um comunicado do Agente Transformador dentro deste intervalo de tempo, o Agente Chave considera que há um problema em todo o trecho, pois ambos os transformadores relataram possíveis distúrbios. Logo, faz a abertura dos contatos e solicita manutenção ao Agente Equipe.

Se ao término da contagem não houver mais solicitações de outro Agente Transformador, o Agente Chave considera que foi um problema individual no transformador de distribuição e solicita manutenção ao Agente Equipe para aquele transformador específico.

3.2.4 AGENTE SUBESTAÇÃO

A subestação que provê energia ao sistema de distribuição foi implementada como agente. O Agente Subestação tem a função de dispor a informação da topologia da rede. Além disso, este agente possui as informações de cada situação que ocorre na rede, ou seja, caso ocorra a abertura ou fechamento de chaves e outras manutenções, este agente sempre é informado.

3.2.5 AGENTE EQUIPE

As equipes de campo que realizam a manutenção da rede elétrica foram implementadas como agente. Quando algum agente envia uma mensagem REQUEST solicitação manutenção, o Agente Equipe pode decidir se aceita ou recusa a solicitação de acordo com sua localização e condições (climáticas, de trânsito, fadiga dos colaboradores, horário, disponibilidade de combustível, etc.) no momento da solicitação.

Vale ressaltar que problemas de logística, deslocamento, e diversos outros fatores que podem influenciar na tomada de decisão de uma equipe de campo para aceitar a solicitação foram desconsideradas deste trabalho. Logo, optou-se por trabalhar com um modelo simplificado do Agente Equipe, pois o foco principal está em realizar a correta localização da seção em falta, restaurar com agilidade a rede elétrica e readequar o sistema aos níveis exigidos pelas normas regulatórias.

3.2.6 AGENTES INSTRÍNSECOS DA PLATAFORMA JADE

Vale ressaltar que a plataforma JADE possui alguns agentes padrões. O primeiro deles é o DF, conforme já mencionado, este agente faz o gerenciamento e controle das páginas amarelas, é nele que consta qual o serviço que cada agente realiza.

Outro agente padrão da plataforma é o *Remote Management Agent* (RMA). Este agente faz o gerenciamento e manutenção da plataforma remota do JADE, permitindo que o usuário verifique e visualize por meio da GUI a divisão dos agentes em seus respectivos *containers*.

Por fim, existe também o agente *sniffer*, cuja principal função é realizar o rastreamento das trocas de informações de cada agente presente na plataforma.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO

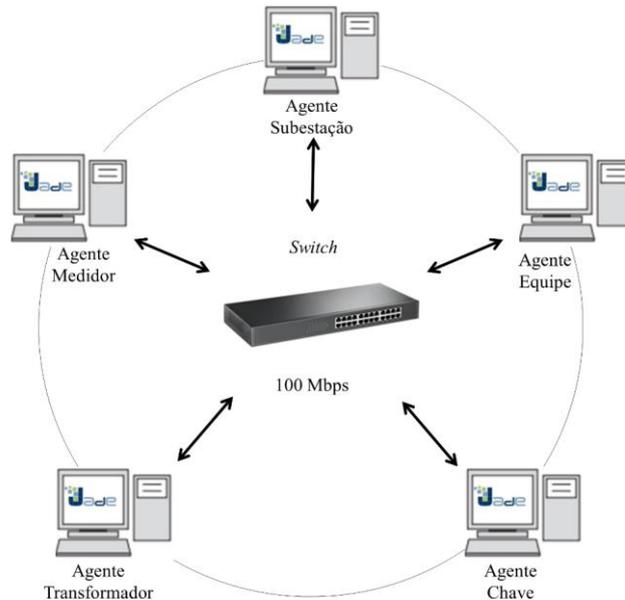
Para colocar em prática a metodologia proposta, foi utilizado o *software* HYPERSIM juntamente com a plataforma JADE. A comunicação entre os *softwares* foi realizada via TCP/IP. Para existir a troca de informações entre as plataformas foi utilizada programação em JAVA nativo possibilitando conectar com bibliotecas escritas em outras linguagens de programação, por exemplo C e C++. Basicamente, o método desenvolve as variáveis de interesse do HYPERSIM em programação C, e faz uso por meio da memória variável do sistema possibilitando assim obter acesso em linguagem de programação JAVA.

Para implementar a proposta de SMA foi utilizado a plataforma JADE. Este *middleware* é escrito em linguagem JAVA e é utilizado para desenvolvimento e execução em tempo real de aplicações *peer-to-peer* que usam agentes. Todas as comunicações entre os agentes são realizadas por meio do protocolo FIPA. Para realizar a programação e compilação do código em JAVA foi utilizado o *software* Eclipse.

A plataforma JADE possui inúmeras funcionalidades que possibilitam o desenvolvimento do SMA. Além de fornecer uma plataforma de execução de agentes, o JADE fornece recursos de comunicação em rede com agentes de diferentes dispositivos e uma interface gráfica que permite visualizar e monitorar as ações realizadas pelos agentes durante o processo de troca de informações e negociações.

A Figura 3.3 expõe a topologia aplicada do *framework* JADE. Cada tipo de agente foi implementado em um *container* específico, conectados na rede de comunicação via protocolo TCP/IP por um *switch* de 100 Mbps. Na prática desenvolvida utilizou-se apenas um servidor para todos os agentes.

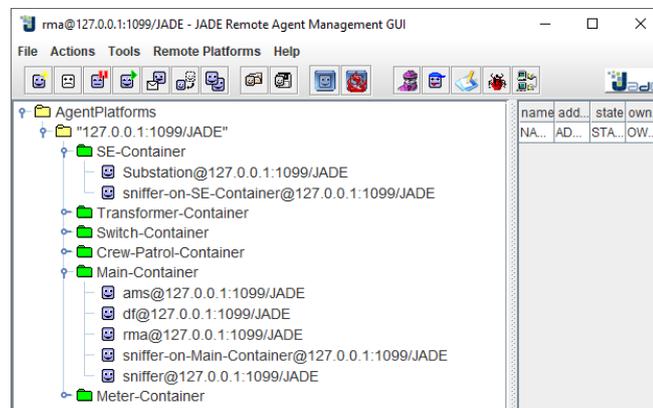
Figura 3.3 – Topologia aplicada do framework



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 3.4 demonstra a subdivisão dos agentes em seus respectivos *containers* por meio do RMA. Conforme mencionado anteriormente, o JADE possui inúmeras ferramentas, dentre elas destaca-se a interface gráfica presente na plataforma remota de gerenciamento de agentes. Sua função é de auxiliar o usuário a estabelecer corretamente as adequações e execuções dos agentes.

Figura 3.4 – Plataforma remota de gerenciamento de agentes do JADE



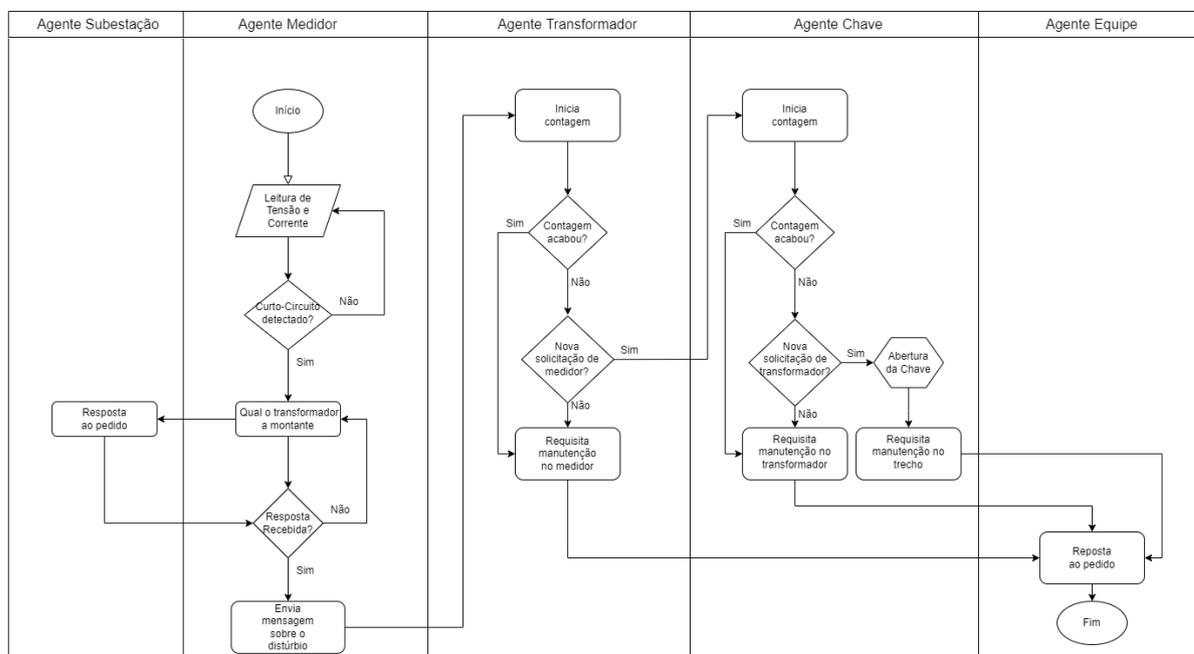
Fonte: Autoria Própria.

Analisando a Figura 3.4, nota-se a presença no *Main-Container* dos agentes padrões da plataforma JADE, são eles: DF, AMS e RMA. Observa-se também, a presença do agente *sniffer*, que realiza o rastreamento das mensagens entre os agentes e permite uma análise nas tomadas de decisões do SMA.

O fluxograma do comportamento do SMA para obtenção de uma estimativa da seção em falta pode ser visualizado na Figura 3.5. Observa-se que a detecção do curto-circuito pode ser implementada por qualquer método de detecção, ou até mesmo por um limiar de ativação. Neste trabalho, o desenvolvimento de algoritmo para detecção de curto-circuito foi ignorado, pois não está no escopo do trabalho, ressalta-se que a localização e estimação da seção em falta é a principal variável em análise. Logo, trabalhou-se como um bloco fechado para a detecção. Neste bloco pode ser implementado qualquer método de detecção. A partir do disparo de detecção de algum possível distúrbio na rede elétrica, inicia-se o método proposto.

O agente subestação possui a informação completa sobre a topologia da rede de distribuição, a quantidade de equipamentos, suas respectivas localizações, distâncias, etc. Isso permite um menor uso de memória e uma melhor coordenação ao SMA utilizado.

Figura 3.5 – Fluxograma do SMA proposto para estimação da seção em falta.



Fonte: Autoria Própria.

Salienta-se que foi considerado apenas a proteção para a rede após a subestação. Além disso, não foram considerados possíveis cenários de falhas em equipamentos, ou falhas na comunicação entre os agentes.

Ademais, não foram considerados problemas de logística e otimização dos serviços da equipe de campo para a realização da manutenção nos trechos, pois o principal foco está em desenvolver ferramentas e métodos para solucionar problemas no âmbito da engenharia elétrica. Logo, possíveis fatores como distância entre o trecho afetado e a localização da equipe, disponibilidade de horários de atendimento, intempéries climáticas, entre outros, foram desconsiderados.

Para realizar a análise da qualidade do fornecimento de energia elétrica foi abordado dois indicadores: a distorção na forma de onda da tensão e o desequilíbrio de tensão. Quando as tensões estiverem fora dos limites estipulados pelas normas reguladoras, ações corretivas imediatas devem ser tomadas pela concessionária.

Uma má qualidade de energia fornecida pela rede pode resultar em falhas em equipamentos, erros de operação, perdas, falhas no fornecimento e outros danos. Um correto reconhecimento do distúrbio permite que a concessionária execute uma tomada de decisão mais eficiente e assertiva, melhorando assim o fornecimento de energia e consequentemente os indicadores da QEE.

Assim, a utilização de MIs em conjunto com o SMA permite que a concessionária verifique continuamente os níveis de tensão fornecidos e obtenha tomadas de decisões autônomas conforme os objetivos estipulados para os agentes.

Os MIs serão responsáveis pela leitura da tensão, classificação e solicitação de manutenção. No SMA proposto, tanto o medidor inteligente quanto a equipe de campo estão implementados como agentes.

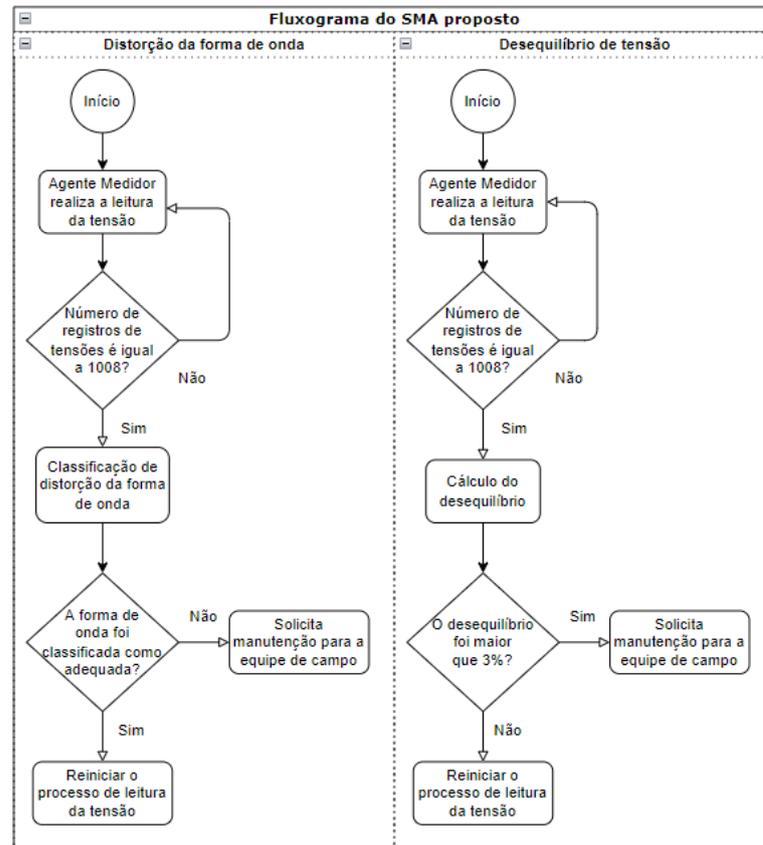
Nesta aplicação em específico, o foco está em desenvolver ferramentas de cálculo e tomada de decisão para os agentes do nível 4 da arquitetura expressa na Figura 3.2 deste documento.

A Figura 3.6 apresenta o esquemático do comportamento em cada caso desenvolvido. Observa-se a comunicação direta entre o Agente Medidor e o Agente Equipe, possibilitando assim, uma redução do tempo de espera para a restauração do sistema, além de dispensar a solicitação do cliente/consumidor referente a realização de reparos em sua unidade consumidora.

Note que o agente medidor monitora a tensão e corrente, verifica as 1008 leituras necessárias estabelecidas pelo módulo 8 do PRODIST, então faz a classificação da forma de

onda da tensão e o cálculo do desequilíbrio de tensão. Caso os valores estejam fora dos limites estabelecidos pela norma, o agente solicita manutenção para a equipe de campo.

Figura 3.6 – Fluxograma do SMA proposto para o gerenciamento da QEE.



Fonte: Autoria Própria.

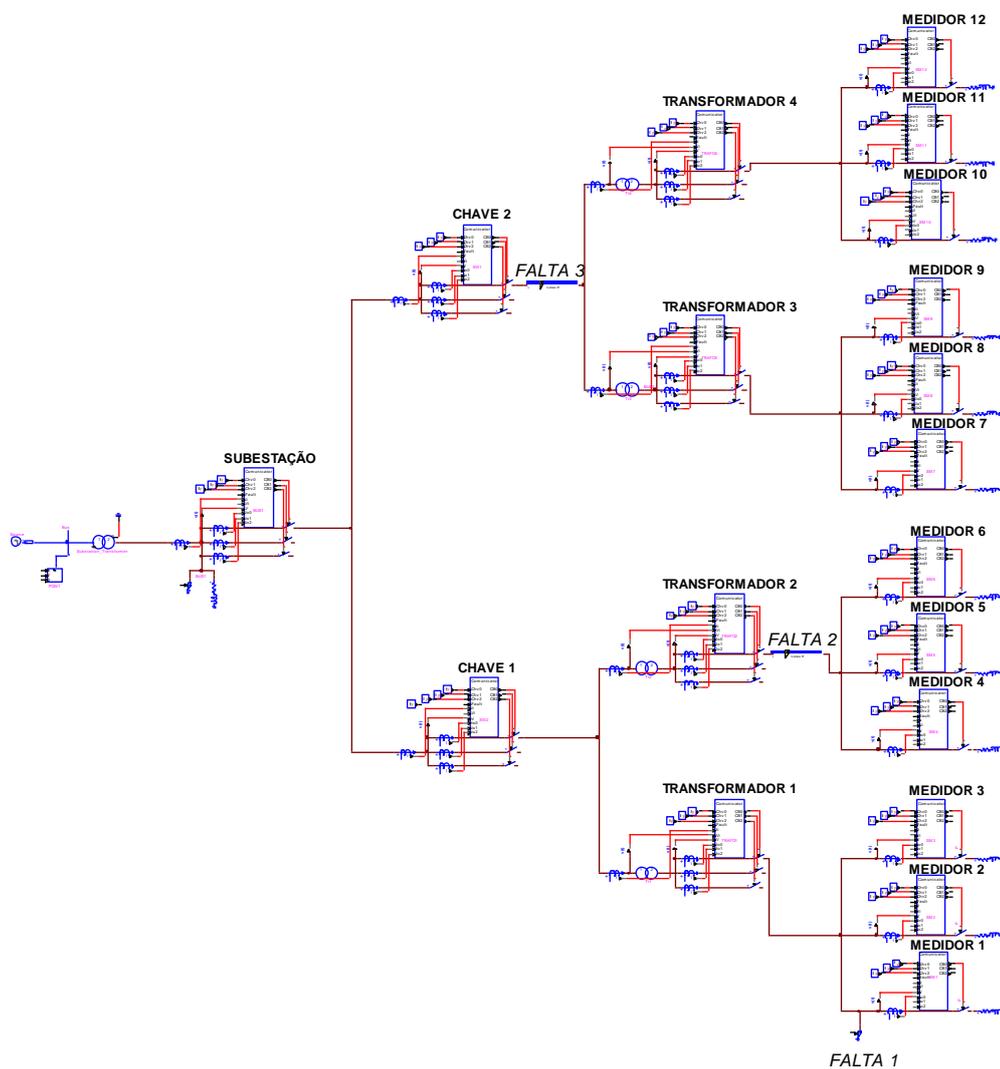
Para realizar a modelagem e simulação do sistema de distribuição foi utilizado o *software* HYPERSIM da OPAL-RT Technologies. A escolha do *software* foi feita baseada na possibilidade de operação em tempo real e realização de testes para validação em uma plataforma confiável e renomada.

A ideia principal é utilizar-se de simulações em *Software-In-the-Loop* (SIL), devido ao ambiente de simulação virtual prático, possibilitando o desenvolvimento e teste de estratégias de controle para o sistema proposto. Ademais, muitas aplicações podem ser testadas com o SIL, uma delas é testar e modificar direta e iterativamente os sistemas por meio de uma simulação de um modelo digital da planta, e isso reduz a necessidade de realizar testes em sistemas, protótipos e em bancada de testes.

Para a validação do método proposto será realizado simulações *offline* disponibilizadas pelo *software* HYPERSIM, possibilitando analisar a conexão entre HYPERSIM e JADE, além de verificar o correto funcionamento do SMA desenvolvido.

A Figura 3.7 ilustra a modelagem no *software* HYPERSIM do sistema de distribuição. Os dados dos condutores, parâmetros dos transformadores de distribuição e do alimentador (modelado como uma subestação) podem ser visualizados no Apêndice A deste documento.

Figura 3.7 – Sistema implementado no *software* HYPERSIM



Fonte: Autoria Própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo, mostra os resultados obtidos com a metodologia proposta para a estimação da seção em falta e análise automática da qualidade do fornecimento de energia elétrica. Salienta-se que a rede de distribuição analisada é uma REI. Logo, os medidores presentes na rede são considerados inteligentes, com alta capacidade de medição e transferência de dados.

Para realizações das simulações elétricas foi utilizado o *software* HYPERSIM, da OPAL-RT *Technologies*, e para o desenvolvimento dos agentes que compõem o SMA, foram implementados por meio da plataforma JADE.

Vale ressaltar que as simulações no *software* HYPERSIM foram realizadas em tempo real de forma *offline*. Além disso, foi considerado um passo de simulação (“*timestep*”) de 520 μ s. Os MIs foram implementados com o bloco UCM, descrito em linguagem de programação C. Este bloco faz a leitura das tensões e permite fazer a conexão com os agentes programados em JAVA. O Quadro 4.1 descreve os dados, as informações de conexão e identificação dos MIs da rede elétrica de distribuição analisada.

Quadro 4.1 – Informação dos medidores inteligentes

Código do MI	Transformador a Montante	Tipo de Conexão	Fases
Medidor 1	Transformador 1	3 ϕ	ABC
Medidor 2	Transformador 1	3 ϕ	ABC
Medidor 3	Transformador 1	3 ϕ	ABC
Medidor 4	Transformador 2	1 ϕ	A
Medidor 5	Transformador 2	3 ϕ	ABC
Medidor 6	Transformador 2	3 ϕ	ABC
Medidor 7	Transformador 3	1 ϕ	B
Medidor 8	Transformador 3	3 ϕ	ABC
Medidor 9	Transformador 3	3 ϕ	ABC
Medidor 10	Transformador 4	3 ϕ	ABC
Medidor 11	Transformador 4	1 ϕ	C
Medidor 12	Transformador 4	3 ϕ	ABC

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2021).

Subdivide-se os resultados encontrados em duas abordagens: a estimação da seção em falta e o gerenciamento da QEE. Observe que o SMA será a parte de controle em tempo real para o restabelecimento e readequação aos níveis normais de operação da rede elétrica.

4.1 ESTIMAÇÃO DA SEÇÃO EM FALTA

Para validação do método de estimação da seção em falta foram analisados 3 cenários com diferentes tipos de falta. A partir destes estudos foi possível discorrer sobre a eficácia da metodologia proposta. No primeiro cenário, foi analisado uma falta no ramal de ligação do medidor 1. Já para o segundo cenário, uma falta foi aplicada na rede de baixa tensão do transformador 2. Por fim, no último cenário fez-se um estudo de falta na rede de média tensão dos transformadores 3 e 4.

O Quadro 4.2 estabelece os parâmetros e os tipos de faltas realizadas no HYPERSIM em cada cenário analisado. Foram selecionados 3 tipos de falta, em que a impedância de falta é nula. O método proposto pode compreender todos os tipos de falta.

Quadro 4.2 – Parâmetros das faltas analisadas

Cenário	Tipo de Falta	Fase sob Falta	Localização da Falta	Medidor Sensibilizado
1	Trifásica	ABC	Ramal de Ligação	Medidor 1
2	Monofásica	A	BT do Transformador 2	Medidor 4
				Medidor 5
				Medidor 6
3	Bifásica	BC	MT dos transformadores 3 e 4	Medidor 7
				Medidor 8
				Medidor 9
				Medidor 10
				Medidor 11
				Medidor 12

Fonte: Adaptado de Costa et al. (2021).

A correta identificação e estimação da seção em falta e das fases afetadas tem-se como principal objetivo da metodologia desenvolvida, além de fazer a correta restauração do serviço.

4.1.1 CENÁRIO 1 – FALTA NO RAMAL DE LIGAÇÃO DO MEDIDOR

O primeiro cenário analisado é para casos de curto-circuito em ramais de ligação de medidores. Então, simulou-se uma falta trifásica no ramal do medidor 1.

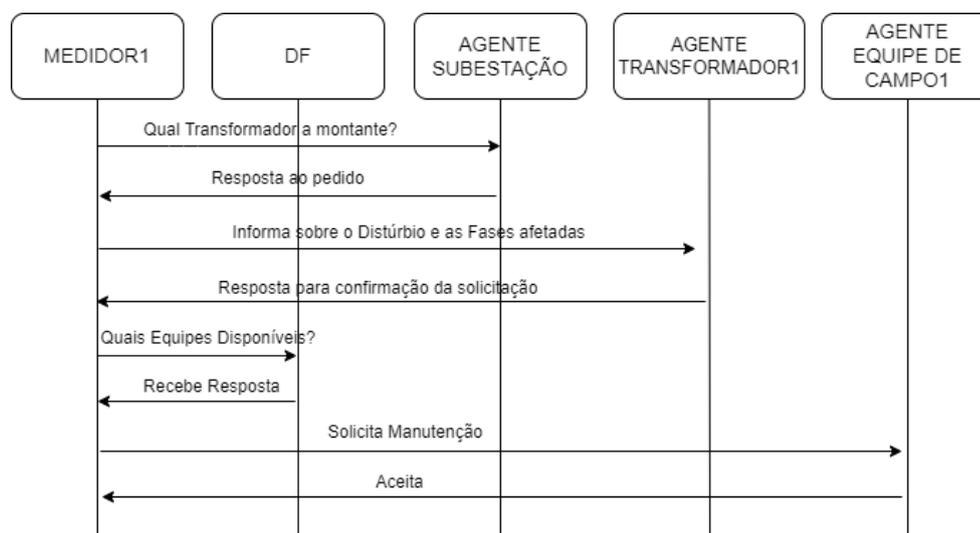
Conforme estipulado no fluxograma do comportamento dos agentes, para este caso o Agente Medidor 1 reconhece o distúrbio e busca informação por meio do Agente Subestação,

para saber qual seu transformador a montante. Com a resposta obtida, informa sua situação para o Agente Transformador 1.

Como apenas um medidor informou sobre distúrbio, o Agente Transformador 1 percebe que é uma falta/distúrbio naquele trecho do medidor. Então, busca informação no DF para descobrir quais as equipes de campo que estão disponíveis para realizar a manutenção e restauração do serviço.

Após receber a resposta do DF o Agente Transformador solicita manutenção ao Agente Equipe disponível, informando localização, o identificador do medidor e as fases afetadas. A figura 4.1 ilustra o diagrama de comunicação simplificado entre os agentes.

Figura 4.1 – Diagrama de comunicação- Cenário 1- Falta no ramal do medidor



Fonte: Autoria Própria.

Observe que, as trocas de informação entre os agentes estão de acordo com a metodologia proposta, evidenciando o bom funcionamento para este caso em análise.

Nota-se que, o objetivo específico do Medidor 1 foi atingido após informar para o Agente Transformador 1 sobre o distúrbio detectado. Os objetivos específicos do Agente Transformador 1 (reconhecer possível distúrbio em seus terminais, realizar a solicitação de manutenção no trecho específico do medidor), também foram atingidos. O Agente Subestação também atingiu seu objetivo ao enviar a resposta ao pedido do medidor.

Logo, o SMA proposto atingiu tanto os objetivos específicos de cada agente, quanto o objetivo geral da arquitetura que é estimar a seção sob falta e realizar os procedimentos para restauração.

No Apêndice B, pode ser encontrado o rastreamento das trocas de mensagens, através do *sniffer*, ilustradas na interface gráfica que a plataforma JADE disponibiliza.

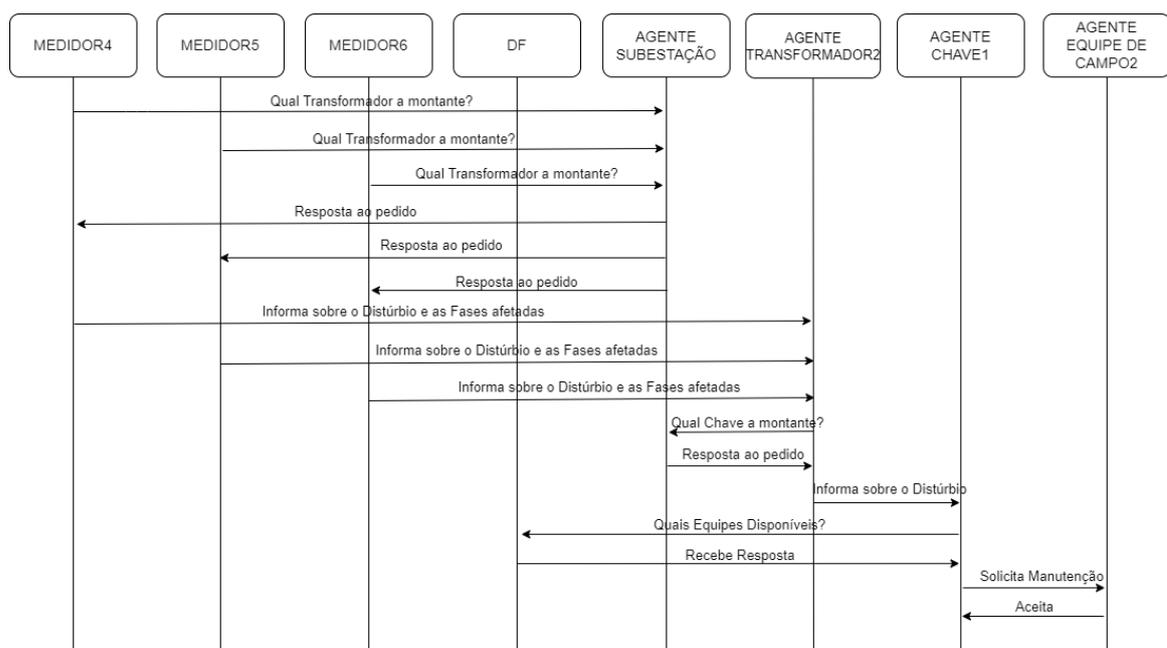
4.1.2 CENÁRIO 2 – FALTA NA REDE DE BAIXA TENSÃO DO TRANSFORMADOR

Neste cenário foi abordado uma falta na baixa tensão do transformador. Neste caso apenas a fase A foi afetada, sensibilizando os medidores 4, 5 e 6. Observa-se que os medidores foram sensibilizados tanto por corrente quanto por tensão. Assim como o caso anterior, cada medidor percebe o distúrbio, pois todos estão conectados a fase A. Então, buscam informação via Agente Subestação para saber qual seu respectivo transformador a montante. Após receber a resposta, informam ao Agente Transformador 2.

O transformador é responsável por analisar as informações e concluir através de sua lógica desenvolvida que é uma falta em sua rede de BT. Com isso, informa ao Agente Chave 1 sobre a situação, sua localização e a fase afetada.

Por fim o Agente Chave conclui que é um problema apenas naquele trecho do transformador, então solicita as equipes disponíveis para realizar a manutenção e restaurar o serviço. A Figura 4.2 ilustra o diagrama de comunicação simplificado do SMA implementado via plataforma JADE.

Figura 4.2 – Diagrama de Comunicação- Cenário 2- Falta na BT do Transformador.



Fonte: Autoria Própria.

Logo, após análise das trocas de mensagens entre os agentes, pode-se confirmar que a metodologia e a lógica desenvolvida é resiliente para este caso em análise, visto que o SMA foi capaz de identificar o local da falta e estabelecer as condições necessárias para realizar a devida manutenção no trecho afetado.

Além disso, note que curto-circuito monofásico (fase-terra) é um dos distúrbios mais frequentes em sistemas de distribuição de energia. Logo, deve-se utilizar ferramentas e métodos confiáveis para sua detecção, localização e restauração do sistema. Conforme apresentado, percebe-se que o SMA pode solucionar esta problemática.

4.1.3 CENÁRIO 3 – FALTA NA REDE DE MÉDIA TENSÃO DO TRANSFORMADOR

No último cenário, foi simulado uma falta bifásica entre as fases B e C na rede de MT dos transformadores 3 e 4. Com isso, os medidores 7, 8, 9, 10, 11 e 12 são sensibilizados pelo distúrbio.

Vale ressaltar que curto-circuito bifásico e bifásico-terra são pouco frequentes em sistemas de distribuição quando comparados aos curtos monofásicos. Porém, deve-se atentar a estes curtos devido a ocasionarem correntes desequilibradas ao sistema de distribuição, causando possíveis problemas para as cargas conectadas (unidades consumidoras).

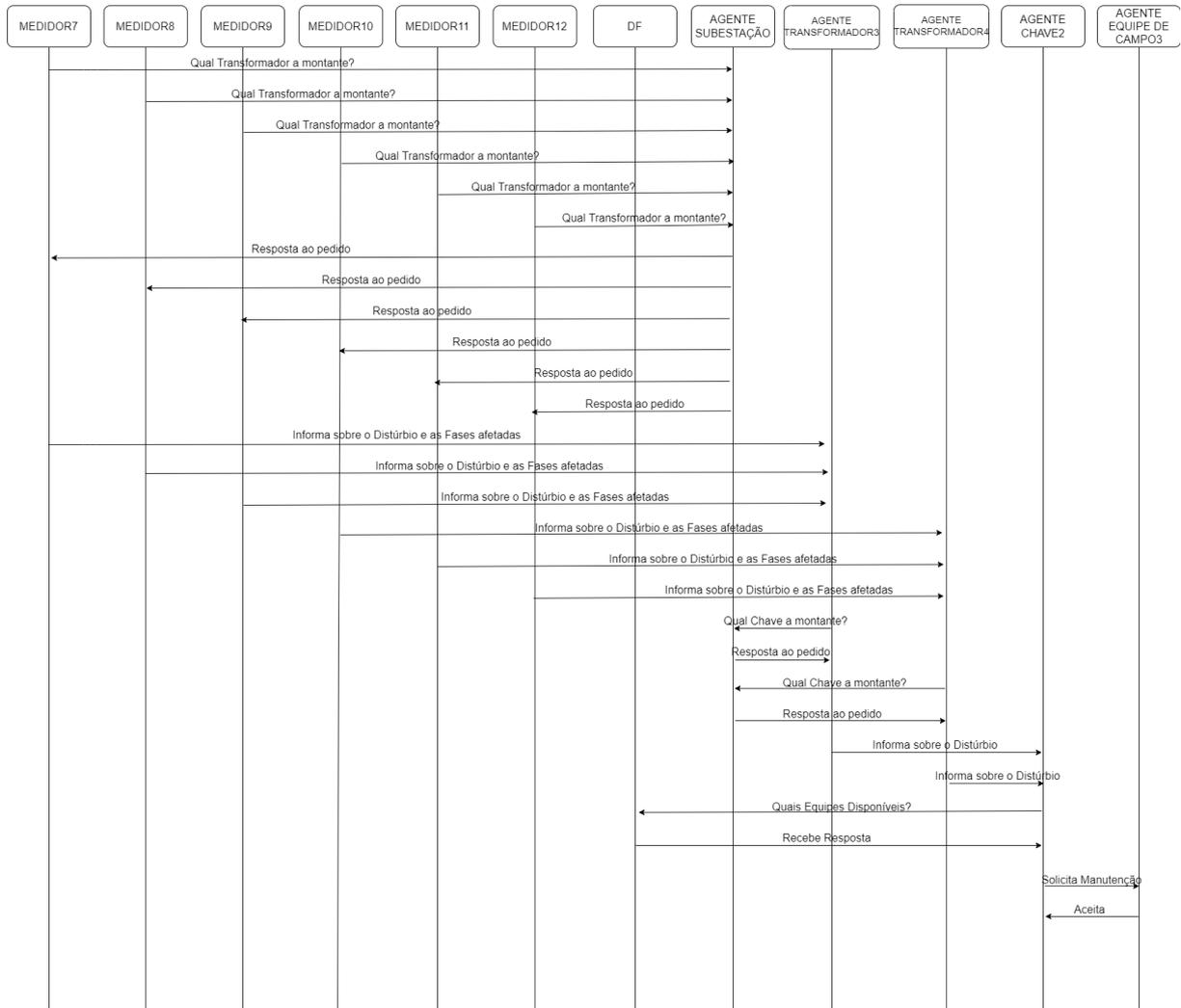
A lógica de localização da seção em falta permanece a mesma, em que os medidores relatam o distúrbio aos seus respectivos transformadores. Ou seja, os medidores 7, 8 e 9 informam as fases afetadas e sua localização para o transformador 3, assim como os medidores 10, 11 e 12 informam as fases afetadas para o transformador 4.

Após isso, ambos os transformadores informam para sua respectiva chave (Agente Chave 2) sobre possíveis problemas em seus trechos. Logo, a lógica programada para a chave faz com que ela conclua que é um problema em todo o trecho de alimentação dos transformadores, no caso a rede de MT, resultando na abertura dos seus contatos para a isolação da falta.

Por fim, o Agente Chave 2 busca no facilitador de diretório (DF) quais as equipes que estão disponíveis para realizar manutenção naquele trecho em específico. Após receber a resposta, envia solicitação para as equipes de campo, para realização da manutenção no trecho identificado.

A Figura 4.3 esboça a comunicação simplificada entre os agentes do cenário analisado.

Figura 4.3 – Diagrama de Comunicação- Cenário 3- Falta na MT dos Transformadores.



Fonte: Autoria Própria.

Após analisar a troca de mensagens e envio de solicitações, percebe-se que o SMA implementado está funcionando conforme o esperado, a metodologia proposta atendeu os critérios de isolamento e obteve uma correta localização da seção sob falta.

As fases foram corretamente identificadas e informadas para as equipes de manutenção que realizam o processo de restabelecimento do fornecimento de energia elétrica as unidades consumidoras.

4.2 ANÁLISE DA QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para validar a metodologia proposta, um Analisador de Energia (AE) foi instalado em três residências na cidade de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Foi utilizado

o AE modelo ITAE-3600, da empresa *Instrutemp*. O AE coletou 1008 valores de tensão para cada residência, conforme requerido pelo PRODIST- Módulo 8. Dentre os dados coletados foram analisados dois cenários.

No primeiro cenário, o método utilizado avalia e gerencia a qualidade do fornecimento do nível de tensão da concessionária. Ou seja, verifica se ocorre distorções na forma de onda da tensão fornecida. Já no segundo cenário, avaliou-se o método que informa automaticamente sobre o desequilíbrio de tensão. Em todos os cenários, foi utilizada a comunicação entre dispositivos inteligentes (agentes), por meio do SMA.

De acordo com a metodologia proposta, se a tensão é classificada como precária ou crítica, a concessionária deve realizar ações necessárias para normalizar o fornecimento de energia ao nível adequado. O Agente Medidor requisita manutenção automaticamente para o Agente Equipe, tornando assim o processo de restauração dos níveis adequados de tensão mais rápido.

O Quadro 4.3 descreve a classificação da tensão em cada residência bem como o tipo de ligação, os valores calculados de DRP e DRC em cada caso, além do desequilíbrio de tensão.

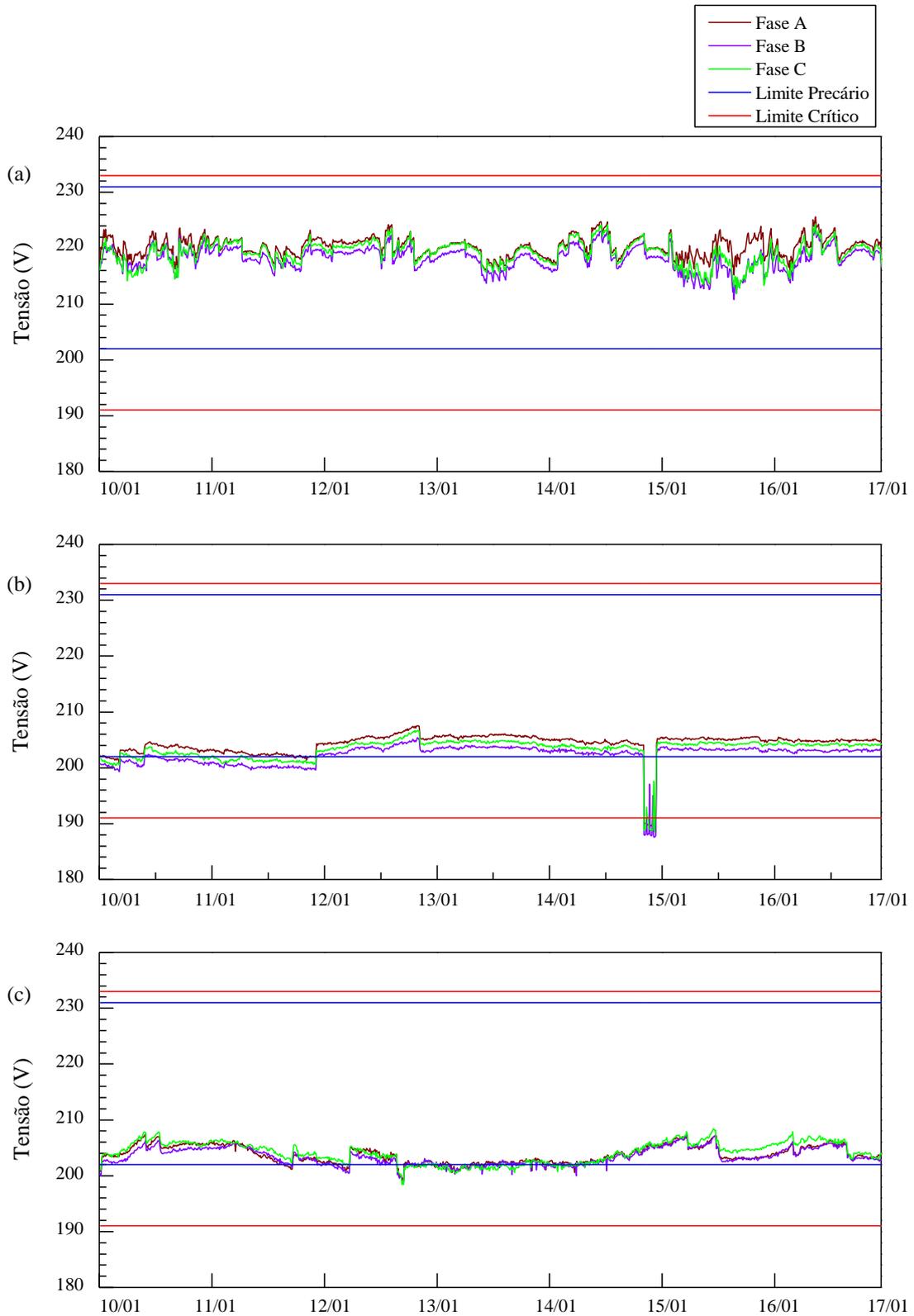
Quadro 4.3 – Classificação da tensão de cada caso analisado.

Residência		1	2	3
Figura		Fig. 4.4(a)	Fig. 4.4(b)	Fig. 4.4(c)
Tipo de Ligação		Trifásica	Trifásica	Trifásica
Classificação de Tensão		Adequada	Crítica	Precária
DRP (%)	Fase A	0	4,96	9,72
	Fase B	0	27,78	15,97
	Fase C	0	19,64	17,06
DRC (%)	Fase A	0	1,59	0
	Fase B	0	1,29	0
	Fase C	0	1,09	0
Desequilíbrio de Tensão		Não Ocorreu	Não Ocorreu	Não Ocorreu

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.4 ilustra os gráficos das leituras das tensões de cada residência e os limites de tensão estipulados pelo PRODIST- Módulo 8.

Figura 4.4 - Gráfico das tensões fornecidas para (a) Residência 1 (b) Residência 2 (c) Residência 3.



Fonte: Autoria Própria.

No primeiro caso, a classificação obtida da tensão foi precária, vide Figura 4.4 (c). Por meio das equações (2.1) e (2.2) foi possível calcular o DRP e DRC para cada fase desta residência. Com isso, o Agente Medidor responsável por esta residência deve requisitar automaticamente manutenção ao Agente Equipe.

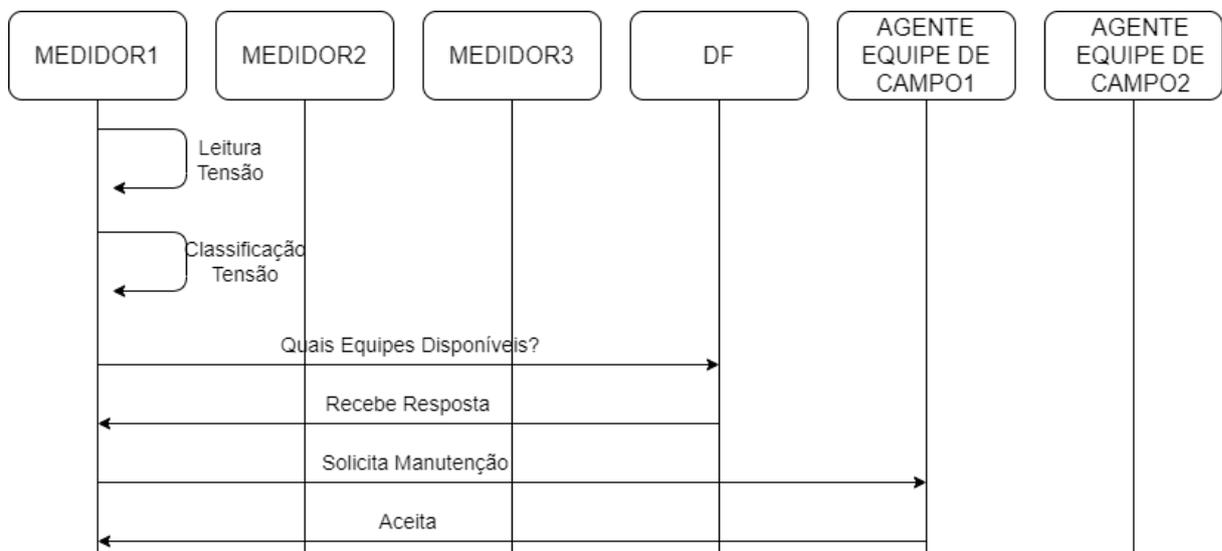
No segundo caso, a classificação obtida da tensão foi crítica, vide Figura 4.4 (b). Foram calculados ambos os indicadores DRP e DRC e classificou-se corretamente a tensão. Conforme o caso anterior, o Agente Medidor responsável por esta unidade consumidora deve solicitar manutenção para a equipe de campo automaticamente.

No último caso, a classificação obtida para a tensão fornecida é adequada para todas as fases, conforme ilustra a Figura 4.4 (a). Os valores dos índices DRC e DRP foram nulos. Neste caso o Agente Medidor não realiza nenhuma ação para manutenção devido a classificação obtida ser adequada.

Após aplicar as equações (2.3) e (2.4), com os valores obtidos não foram registrados desequilíbrio de tensão para as unidades consumidoras analisadas.

A Figura 4.5 apresenta o diagrama de comunicação simplificado das trocas de mensagens entre os agentes para o cenário de distorção da forma de onda da tensão.

Figura 4.5 - Diagrama de comunicação - Distorção da forma de onda da tensão.



Fonte: Autoria Própria.

A troca de mensagens obtidas por meio da plataforma JADE está de acordo com o esperado teórico, os agentes conseguiram classificar a tensão corretamente, além de acionar manutenção automaticamente.

A grande vantagem de utilizar o SMA com os MIs para capturar e classificar os dados de tensão é tornar o processo mais ágil, considerando que, segundo o PRODIST- Módulo 8, as concessionárias tem 30 dias para realizar todo o procedimento após a reclamação do consumidor.

O grande objetivo não é analisar o melhor método para classificar a tensão fornecida pela concessionária, mas mostrar a viabilidade do uso de SMA em conjunto com uma técnica de inteligência artificial, possibilitando acelerar processos e obter respostas eficientes e automáticas.

Os testes desenvolvidos demonstraram rapidez e eficácia para a metodologia proposta que visava avaliar a QEE sem necessidade de qualquer ação por parte do consumidor.

Avaliou-se 2 critérios, que servem como indicadores de qualidade. O primeiro verificou o nível de distorção da forma de onda da tensão fornecida pela concessionária, já o segundo verificou o desequilíbrio de tensão da rede. Como já mencionado, existem várias categorias para indicar a QEE. Porém, escolheu-se utilizar somente os dois indicadores que refletem o comportamento das variáveis em análise para implementação.

5 CONCLUSÃO

Do ponto de vista tecnológico, um dos obstáculos das REIs é monitorar, controlar e coordenar a rede elétrica de forma eficiente com inteligência. Definitivamente, utilizar tecnologias baseadas em agentes pode ser considerada uma maneira bem-sucedida de enfrentar esses desafios, permitindo que sistemas de *software* flexíveis e autônomos resolvam um número expressivo de problemas complexos.

Para demonstrar a simplicidade e eficácia do método do gerenciamento da QEE foram considerados dois cenários diferentes. O primeiro cenário avaliou a distorção na forma de onda da tensão. Já o segundo cenário avaliou o desequilíbrio de tensão. Para verificar a viabilidade, o método foi testado considerando a leitura de tensão de três residências e foram obtidos resultados promissores.

Já para o método de estimação da seção em falta foram abordados três cenários de faltas, em diferentes trechos de uma rede de distribuição de energia elétrica genérica. Estes cenários foram analisados no ambiente de simulação do *software* HYPERSIM, da OPAL-RT *Technologies*. Todos os cenários demonstraram que o SMA pode auxiliar na localização da falta, além de realizar e auxiliar no processo de restauração do trecho afetado.

A plataforma JADE permitiu o desenvolvimento da arquitetura do SMA e demonstrou ser suscetível a conexões com outros *softwares* de simulação de sistemas elétricos possibilitando simulações completas, com uma vasta análise das variáveis de interesse. Além disso, a interface gráfica oportuniza a verificação do funcionamento da lógica implementada nos agentes e do correto funcionamento da arquitetura no geral.

Todos os casos simulados apresentaram resultados satisfatórios de acordo com a metodologia utilizada. Esta abordagem oferece grande flexibilidade para atender as exigências da qualidade de energia para as concessionárias, visando melhorar os indicadores técnicos e aumentar a satisfação, por parte do cliente, do serviço disponibilizado.

Com a metodologia proposta e com os resultados obtidos tanto para estimação da falta quanto para a análise e gerenciamento da QEE, acredita-se que o uso de SMA em REIs seja uma opção viável.

Mediante ao exposto, conclui-se que a utilização de SMA, considerando a presença de REIs, é de suma importância para as concessionárias, devido ao grande potencial e flexibilidade do SMA, podendo obter um expressivo uso e desenvolvimento de ferramentas que auxiliam ao operador de rede e tornam a rede elétrica mais eficiente, resiliente, conseguindo introduzir os

principais fundamentos da IA para solucionar problemas complexos, presentes no âmbito de sistemas elétricos de potência.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Dentre os possíveis temas que podem ser explorados para a continuidade deste estudo, destacam-se:

- Expansão dos estudos em segurança cibernética, para garantir proteção e resiliência ao sistema desenvolvido e evitar possíveis ataques que afetam a operação correta tanto do SMA quanto da rede elétrica (aumentando dessa forma a confiabilidade da metodologia proposta);
- Aplicação do SMA na integração da rede elétrica com dispositivos inteligentes presentes em unidades consumidoras, realizando desta forma a intercomunicação da carga com o centro de operação da rede;
- Verificação e comparação da performance do método de estimação da seção em falta via SMA em relação aos métodos convencionais de detecção e localização (verificar a eficiência, rapidez, segurança e confiabilidade da metodologia);
- Desenvolvimento de um método automático para correção do fator de potência de unidades consumidoras tanto industriais quanto residenciais por meio do uso de sistemas multiagentes (realização do controle em tempo real da potência reativa necessária para garantir o valor correto do fator de potência estabelecido pelas normas regulatórias, especificando automaticamente o banco de capacitores necessário para a compensação na unidade consumidora);
- Realizar o desenvolvimento e implementação de métodos de detecção de falta de alta impedância aumentando a quantidade de faltas detectadas pela metodologia;
- Simular sistemas de distribuição com uma topologia de maior complexidade, e projetar a devida arquitetura do SMA para controlar e gerenciar corretamente o fornecimento de energia para as cargas e estimar com rapidez a localização de possíveis faltas que possam ocorrer nestes sistemas;

5.2 TRABALHOS PUBLICADOS

Ao longo das pesquisas realizadas a respeito deste tema, foram desenvolvidos e apresentados os seguintes trabalhos:

- **36ª JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA (JAI)** – Título da apresentação: *“Estimação da seção em falta através do uso de sistemas multiagentes em redes elétricas inteligentes”*. Apresentado em novembro de 2021.
- **ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH (EPSR)** – Título do artigo: *“A multi-agent approach to distribution system fault section estimation in smart grid environment”*. Aceito em outubro de 2021.
- **IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE)** – Título do artigo: *“Análise da qualidade do fornecimento de energia elétrica através do uso de sistemas multiagentes”*. Aceito em abril de 2022.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. [s.l: s.n.].
- AZEROUAL, M. et al. A multi-agent-based for fault location in distribution networks with wind power generator. **Wind Engineering**, p. 1–12, 2021.
- BELLIFEMINE, F. et al. **JADE Programmer’s Guide**. [s.l: s.n.].
- BELLIFEMINE, F. L.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. **Developing Multi-Agent Systems with JADE (Wiley Series in Agent Technology)**. [s.l: s.n.].
- CHAKRABORTY, S. et al. Smart meters for enhancing protection and monitoring functions in emerging distribution systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 127, n. December 2020, p. 106626, 2021.
- CHELLASWAMY, I.; RANI, J. V. S. P. Automatic fault isolation and restoration of distribution system using JADE based Multi-Agents. **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences**, v. 27, n. 3, p. 2226–2242, 2019.
- COSTA, G. B. et al. A multi-agent approach to distribution system fault section estimation in smart grid environment. **Electric Power Systems Research**, n. April, p. 107658, 2021.
- DASHTI, R.; GHASEMI, M.; DAISY, M. Fault location in power distribution network with presence of distributed generation resources using impedance based method and applying Π line model. **Energy**, v. 159, p. 344–360, 2018.
- DE FREITAS, B. K. et al. Exploiting PADE to the Simulation of Multiagent Restoration Actions. **2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2019**, p. 1–5, 2019.
- EREMIA, M.; LIU, C. C.; EDRIS, A. A. Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and AI Techniques. **Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and AI Techniques**, p. 1–1042, 2016.
- FORTES, M. Z. et al. Análise Da Adoção De Medidores Inteligentes Como Instrumento Da Política Pública De Eficiência Energética. **Engevista**, v. 19, n. 2, p. 316, 2017.
- GHORBANI, M. J.; CHOUDHRY, M. A.; FELIACHI, A. A multiagent design for power distribution systems automation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 1, p. 329–339, 2016.
- HASANUZZAMAN SHAWON, M. et al. Multi-agent systems in ICT enabled smart grid: A status update on technology framework and applications. **IEEE Access**, v. 7, p. 97959–97973, 2019.
- HOANG, T. T.; TUAN TRAN, Q.; BESANGER, Y. A Multiagent and IEC 61850-Based Fault Location and Isolation System for Distribution Network with High PV Integration - A CHIL

Implementation. **Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2019**, p. 0–5, 2019.

HUSSEIN, O. A.; RAO, P. V. R. Fault Location and Isolation Using Multi Agent Systems in 16 Buses Distribution System. v. 6, n. 1, p. 21–38, 2016.

JENNINGS, N. R.; SYCARA, K.; WOOLDRIDGE, M. A Roadmap of Agent Research and Development. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, v. 1, n. 1, p. 7–38, 1998.

LI, W. et al. A Fully Decentralized Multi-Agent Fault Location and Isolation for Distribution Networks with DGs. **IEEE Access**, v. 9, p. 27748–27757, 2021.

MERABET, G. H. et al. Applications of multi-Agent systems in smart grids: A Survey. **International Conference on Multimedia Computing and Systems -Proceedings**, p. 1088–1094, 2014.

MOHAMED, A. et al. A multi-agent system for fault location and service restoration in power distribution systems. **Multiagent and Grid Systems**, v. 15, n. 4, p. 343–358, 2019.

MWIFUNYI, R. J.; KISSAKA, M. M.; MVUNGI, N. H. Distributed approach in fault localisation and service restoration: State-of-the-Art and future direction. **Cogent Engineering**, v. 6, n. 1, 2019.

NORTHCOTE-GREEN, J.; WILSON, R. G. **Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems**. 1. ed. [s.l: s.n.]. v. 53

POSLAD, S. Specifying protocols for multi-agent systems interaction. **ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems**, v. 2, n. 4, 2007.

RIGODANZO, J. Instalação De Medidores Inteligentes No Brasil : Uma Análise Econômica. p. 120, 2015.

ROSSINI, J. P. **Metodologia de detecção e seleção de fases para faltas de alta impedância através da relação angular de componentes simétricas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

SHIRAZI, E.; JADID, S. A multiagent design for self-healing in electric power distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 171, n. February, p. 230–239, 2019.

SHOBOLE, A. A.; WADI, M. Multiagent systems application for the smart grid protection. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, n. June, p. 111352, 2021.

ZHANG, S.; RONG, J.; WANG, B. A privacy protection scheme of smart meter for decentralized smart home environment based on consortium blockchain. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 121, n. August 2019, p. 106140, 2020.

APÊNDICE

APÊNDICE A - MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO NO HYPERSIM

O sistema de distribuição modelado no *software* HYPERSIM possui um transformador na subestação, cujo dados modelados são apresentados no Quadro A.1.

Quadro A.1- Parâmetros modelados para o transformador da subestação.

Transformador	S_{base} (MVA)	Ligação	Tensão (kV)	X₀ (pu)	X₁ (pu)
Subestação	100	Δ -Yg	69/13,8	0,4995	0,4995

Fonte: Adaptado de Rossini (2021).

Além disso, o sistema conta com outros 4 transformadores de distribuição alocados ao longo da rede. Os dados de cada transformador estão expostos no Quadro A.2.

Quadro A.2- Parâmetros modelados para os transformadores de distribuição.

Transformador	Potência (kVA)	Ligação	Tensão (kV)	Z_{dispersão}		Z_{carga} (fase)	
				Z(%)	X/R	R(Ω)	X(Ω)
1	75	Δ -Yg	13,8/0,38	3,5	3,5	3,150545	1,525879
2	112,5			3,5	3,5	2,100363	1,017253
3	75			3,5	3,5	3,150545	1,525879
4	112,5			3,5	3,5	2,100363	1,017253

Fonte: Adaptado de Rossini (2021).

Por fim, na modelagem dos condutores utilizou-se os valores de impedância de sequência positiva e zero apresentados no Quadro A.3.

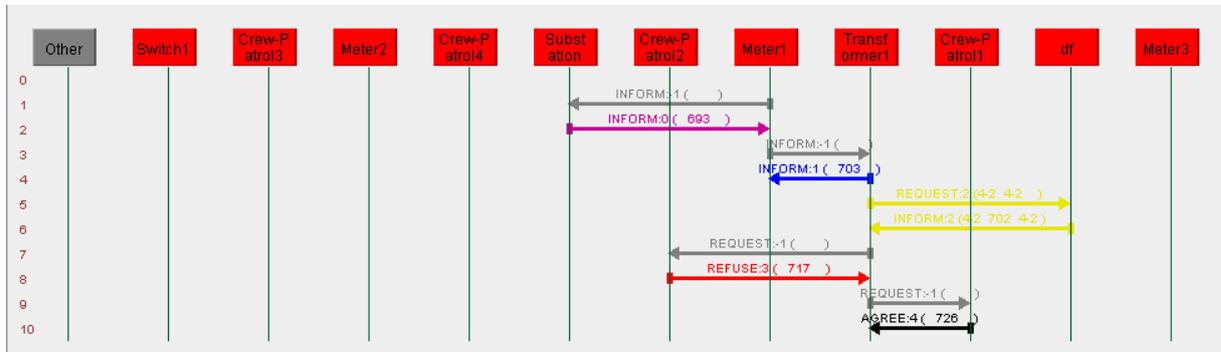
Quadro A.3- Parâmetros modelados para os condutores.

Condutor	R₀ (Ω/m)	X₀ (Ω/m)	R₁ (Ω/m)	X₁ (Ω/m)
A-336	0,000365573	0,002149252	0,000189423	0,000381195
A-40	0,000478011	0,00217239	0,000301399	0,000403384
A-10	0,000780316	0,002198594	0,000604569	0,00043058
A-02	0,00113948	0,002215417	0,000963061	0,000447552
A-04	0,001706262	0,002232942	0,001530003	0,000464651

Fonte: Adaptado de Rossini (2021).

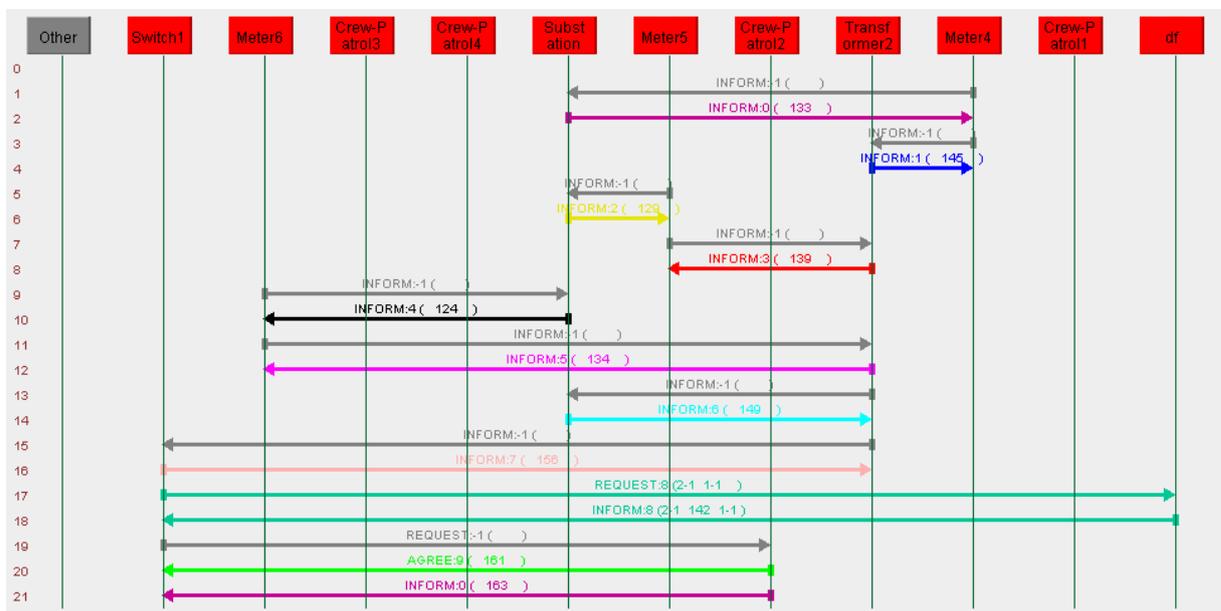
APÊNDICE B – TROCA DE MENSAGENS RASTREADAS ATRAVÉS DO SNIFFER DA PLATAFORMA JADE

Figura B.1 – Cenário 1 – Falta no ramal de ligação do medidor 1.



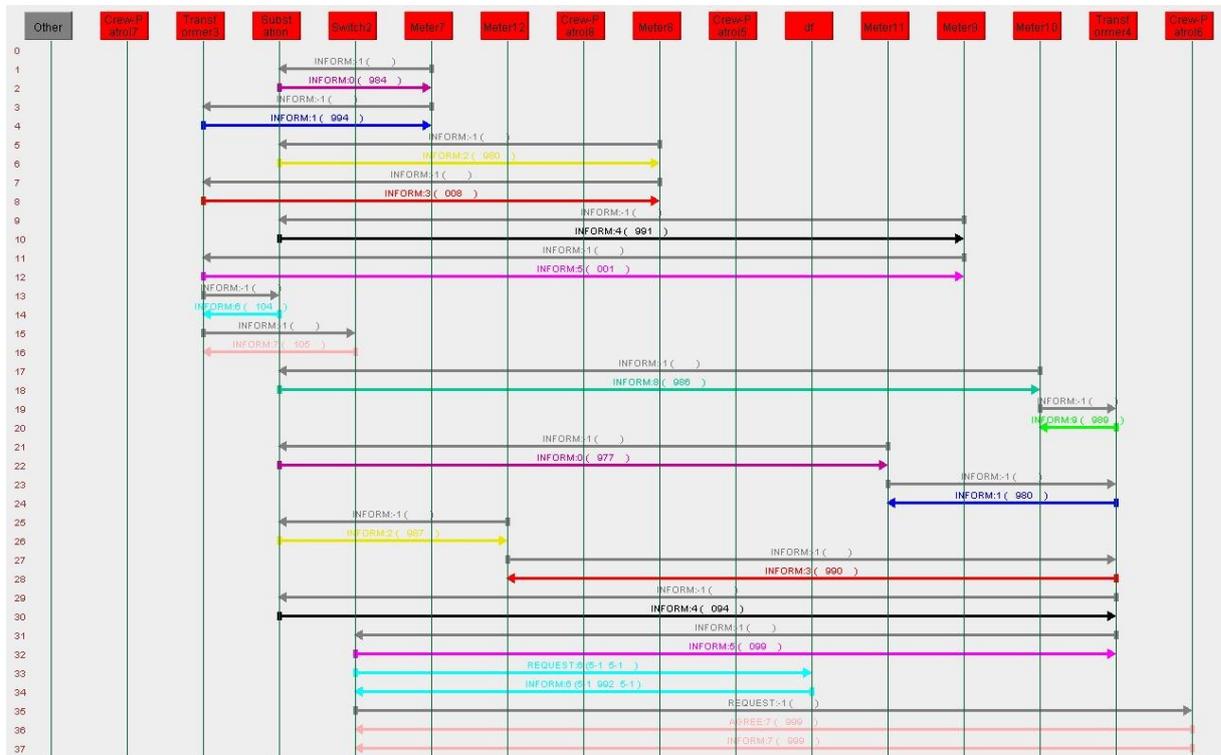
Fonte: Autoria Própria.

Figura B.2 – Cenário 2 – Falta na rede de BT do transformador 2.



Fonte: Autoria Própria.

Figura B.3 – Cenário 3 – Falta na rede de MT dos transformadores 3 e 4.



Fonte: Autoria Própria.