

Sistema de Recomposição Automática para Rede de Distribuição de Energia Desenvolvido em JADE

Lucas S. Melo¹, Raimundo F. Sampaio¹, Ruth P. S. Leão¹, Giovanni C. Barroso².

¹Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Ceará (UFC)
Caixa Postal 6001 – Fortaleza – CE – Brazil

²Departamento de Física
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Fortaleza, CE – Brazil

{rfurtado@dee.ufc.br, lucassmelo@dee.ufc.br, rleao@dee.ufc.br,
gcb@fisica.ufc.br}

Abstract. *Traditionally, automatic recomposition systems (ARS) are developed with centralized intelligence integrated to SCADA. However, smart grids demand self-healing systems with distributed intelligence, in which Multiagent Systems are the most promising technique. This work aims to present a Multiagent Automatic Recomposition System (MARS) implemented and tested in four computers of Smart Grids Research Group (SGRG) - UFC laboratory. The results showed the potential of MAS for developing self-healing systems applied to smart grids.*

Resumo. *Tradicionalmente sistemas de recomposição automáticos (SRA) são desenvolvidos com inteligência centralizada integrados SCADA. No entanto, as Smart Grid demandam por sistemas self-healing com inteligência distribuída. Dentro deste contexto, a técnica de sistemas multiagentes (SMA) é indicada na literatura como mais promissora. Esse artigo tem como objetivo apresentar um Sistema Multiagente de Recomposição Automática (SMRA) implantado e testado em quatro computadores do Laboratório do Grupo de Redes Elétricas Inteligentes da UFC. Os resultados dos testes demonstraram o potencial da técnica de SMA para desenvolvimento de sistemas selfhealing aplicado as Smart Grid.*

1. Introdução

Nos últimos anos o setor elétrico mundial vem experimentando transformações norteadas a partir do conceito de Redes Elétricas Inteligentes (REI) que incorporam soluções tecnológicas em infraestrutura, sistemas de comunicação, controle e automação com o objetivo de tornar-se mais eficiente, confiável e ambiental e economicamente sustentável (Momoh, 2012). As principais características das REI são: integração de diferentes recursos renováveis, participação ativa de consumidores, uso eficiente dos ativos,

operação eficiente da rede elétrica, auto recomposição mediante distúrbio na rede, aplicação de controle pervasivo e ativo, e baixo impacto ambiental (Ma, Chen, Huang, & Meng, 2013).

A operação das REI demanda inovações nos recursos operacionais para isolar áreas afetadas por faltas e restabelecer o fornecimento de energia aos consumidores de forma automática, rápida e segura (Ma et al., 2013). A função de recomposição automática consiste na capacidade da rede elétrica, diante de uma falta, blackout, ou ação maliciosa, e com base no monitoramento de seu estado, executar ações para reconfigurar a rede elétrica e restabelecer o fornecimento de energia com segurança e sem violação das restrições operativas (Ma et al., 2013).

As REI têm proporcionado o crescente desenvolvimento de Sistema Multiagente (SMA) aplicados a sistemas elétricos (Zidan, El-Saadany, & El Chaar, 2011). SMA é uma técnica que por sua capacidade de modelagem, simulação e controle distribuído pode ser aplicada nos segmentos de geração, transmissão, distribuição, comercialização e consumo de energia elétrica, como por exemplo em: diagnóstico de falta (Davidson, McArthur, McDonald, Cumming, & Watt, 2006); monitoramento de transformador (Khamphanchai, Pipattanasomporn, Kuzlu, Zhang, & Rahman, 2015); controle de microrrede (Ansari, Gholami, & Kazemi, 2015); controle geração distribuída (Elkhatib, El-Shatshat, & Salama, 2011); recomposição automática de sistemas elétricos (Jayasinghe & Hemapala, 2015); proteção adaptativa (Do Nascimento & Rolim, 2013); qualidade de energia (Dominguez, Cerqueira, Dominguez, Frias, & Iglesias, 2015); automação residencial e industrial (Ruta, Scioscia, Loseto, & Di Sciascio, 2014), etc.

Neste artigo é apresentado um SMRA, desenvolvido em JADE que é uma plataforma de agentes desenvolvida em linguagem de programação Java. O SMRA foi implantado em quatro computadores do laboratório do Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) da Universidade Federal do Ceará (UFC), integrados em rede local via comunicação sem fio, utilizando o protocolo de comunicação TCP/IP. Um simulador da rede elétrica de distribuição foi desenvolvido em também utilizando a linguagem de programação JAVA para testes e validação do SMRA.

O restante do artigo está organizado como se segue. Na Seção 2 são apresentadas as estratégias e técnicas para desenvolvimento de SMRA. Os conceitos de agentes e de SMA são apresentados na Seção 3. A Seção 4 descreve as funcionalidades do SMRA. O simulador para teste e validação do SMRA é apresentado na Seção 5. Nas Seções 6 e 7 são apresentados, respectivamente, os resultados das simulações e as conclusões do artigo.

2. Técnicas para Desenvolvimento de Sistemas de Recomposição Automático

Nas últimas décadas, pesquisadores do mundo inteiro vêm investigando diferentes métodos para desenvolvimento e implantação de Sistemas de Recomposição Automática (SRA) (Sudhakar & Srinivas, 2011). SRA é um aplicativo de suporte à operação de redes elétricas, capaz de detectar distúrbios, isolar os segmentos sem falta, reconfigurar a rede e restabelecer com segurança o fornecimento, segundo critérios de prioridade pré-definidos pela concessionária. Os benefícios proporcionados pelo SRA são: recomposição automática da rede; redução de custos de operação e manutenção para deslocamento de equipes a campo; redução do tempo de interrupção de energia; e

melhoria dos indicadores de qualidade de serviço, de satisfação do cliente e da imagem da concessionária de energia (Sampaio et al., 2012).

Existem várias técnicas para desenvolvimento de um SRA. As diferentes técnicas podem ser classificadas em doze grupos, a saber: base de conhecimento, sistemas especialistas, busca heurística, lógica fuzzy, otimização determinística, inteligência artificial, redes de Petri, algoritmos genéticos, algoritmo de busca por colônia de formigas, pesquisa tabu, redes neurais artificiais e modelos híbridos (Sudhakar & Srinivas, 2011). Praticamente todos esses métodos utilizam abordagem centralizada. Os SMA vêm sendo destacados como uma das técnicas mais promissoras para desenvolvimento da função recomposição automática de redes elétricas (Jayasinghe & Hemapala, 2015).

3. Sistemas Multiagentes

3.1. Definição e Características dos Agentes

Agentes são entidades, em hardware ou software, com alto nível de abstração, residentes em um determinado ambiente, com capacidade de interpretar dados e executar, de forma autônoma, ações que alteram o estado deste ambiente, caracterizados por seu comportamento e ontologia (FIPA, 2015). O ambiente compreende tudo que é externo aos agentes e que pode ser observado e alterado por eles. O ambiente pode ser físico, como por exemplo, o sistema elétrico (monitorado através de sensores) ou computacional como, por exemplo, base de dados e recursos computacionais. O agente pode alterar o ambiente sistema elétrico através de ações físicas como abrir e fechar equipamentos ou de ações não físicas como, por exemplo, o armazenamento de informações de diagnósticos em base de dados para outros acessos (Wooldridge, 2009).

Os agentes apresentam características como autonomia, reatividade, proatividade e sociabilidade (Wooldridge, 2009). A autonomia consiste na capacidade de o agente ter controle sobre suas ações, não dependendo da intervenção direta de humanos ou de outros agentes. A reatividade é a capacidade do agente, em tempo hábil, reagir a mudanças em seu ambiente e tomar decisão com base nessas mudanças e na função para a qual foi projetado. A proatividade é a capacidade do agente de mudar seu comportamento dinamicamente para alcançar suas metas e atingir seus objetivos, independente de estímulos externos. A habilidade social atribui ao agente a capacidade de interagir, cooperar e negociar uns com os outros a fim de atingir metas individuais e satisfazer um objetivo comum ou concorrente que sirva aos seus próprios interesses, satisfazendo o objetivo do SMA como um todo (Wooldridge, 2009). Para aplicação na engenharia elétrica, os agentes podem ser encapsulados, construídos em arquitetura aberta, distribuída e tolerante a falhas, consequentemente, flexível e expansível (Wooldridge, 2009). A flexibilidade refere-se à capacidade de um agente analisar várias alternativas possíveis para realizar determinada tarefa e escolher a alternativa mais adequada. A expansibilidade consiste na capacidade do sistema ou agente permitir a adição de novas funcionalidades ou atualização de funcionalidade existente, sem necessidade de novos desenvolvimentos. Enquanto sistema tolerante à falha, o SMA tem a capacidade de atingir as metas para o qual foi projetado, mesmo se uma parte do sistema falhar (Wooldridge, 2009).

3.2. Padronização dos Agentes

A FIPA é uma organização internacional vinculada à sociedade de computação do IEEE que define especificações para padronização de comunicação, gerenciamento e arquitetura de agentes. O padrão FIPA visa garantir a interoperabilidade entre agentes, desenvolvidos por diferentes companhias e organizações, presentes em uma mesma plataforma ou em diferentes plataformas (FIPA, 2015).

O modelo de protocolo definido pela FIPA é orientado a serviços em que a camada de aplicação possui múltiplas subcamadas, ao invés de somente uma como nos modelos OSI ou TCP/IP. A FIPA definiu um conjunto de protocolos de interação entre os agentes, a exemplo do FIPA-Request-Protocol, FIPA-ContractNet e FIPA-Subscribe, utilizados neste trabalho. Para comunicação entre agentes a FIPA especificou a linguagem FIPA-ACL (Agent Communication Language). A FIPA-ACL descreve os requisitos necessários à troca de mensagens entre os agentes e utiliza ontologias para que agentes entendam o conteúdo das mensagens repassadas por outros agentes de um determinado domínio de conhecimento (Bellifemine, Caire, & Greenwood, 2007). Se o domínio é recomposição da rede elétrica, por exemplo, faz-se necessário o entendimento comum sobre trecho, carga, potência, estado de equipamentos, função de proteção, prioridade de recomposição.

3.3. Arquitetura de Sistemas Multiagentes

A FIPA define um padrão de plataforma, na qual os agentes residem e operam, que permite a criação, localização, remoção e a comunicação de agentes. Cada plataforma de SMA padrão FIPA provê containers distribuídos, onde residem os agentes desenvolvidos (Classe Agente) e os agentes públicos, Agente Gerenciador de Serviço (AMS), obrigatório, e Diretório Facilitador (DF), opcional, que estão em um container principal. Cada agente registrado na plataforma deve ter uma única Identificação de Agente (AID) (FIPA, 2015). O agente AMS fornece a cada agente uma identificação - AID (Agent Identifier). O agente DF provê o serviço de páginas amarelas para outros agentes. O SMRA proposto não utiliza o agente DF.

4. Formulação do Problema e Estrutura do SMRA

4.1 Formulação do SMRA

O SMRA possui uma função objetivo que pode realizar a recomposição de forma otimizada a partir da meta a ser alcançada, como por exemplo a quantidade de carga, número máximo de clientes, ou até mesmo número de eletro-dependentes recompostos. A expressão (1) representa a função objetivo do sistema.

$$\max \sum_{i \in A} w_i \quad (1)$$

em que w_i pode assumir valores de potência de carga, número de clientes ou número de eletrodependentes em cada trecho presente no conjunto A que representa todos os trechos da rede. A função objetivo escolhida vai depender da configuração do SMRA.

Durante o processo de recomposição, o SMRA analisa se o aumento de carga em decorrência da nova configuração do sistema não causa sobrecarga nos transformadores da subestação, ou se o aumento da corrente de carga no alimentador não ultrapassa os limites térmicos dos condutores. Essas restrições operativas são verificadas por:

$$S_{j \in T} < S_{max} \quad (2)$$

$$I_{i \in A} < I_{max} \quad (3)$$

em que $j \in T$ é o conjunto dos transformadores das subestações, sendo S a capacidade do transformador; e $i \in A$, conjunto de todos os trechos da rede, sendo I a corrente que circula no trecho i .

O SMRA, conforme mostrado no fluxograma da Seção 4.4, analisa as restrições operativas, verifica se a carga transferida devido à reconfiguração do sistema não causa sobrecarga no transformador da subestação e não excede a capacidade atual dos condutores.

4.2 Arquitetura de Comunicação dos Agentes no SMRA

O SMRA proposto foi concebido com quatro tipos de agentes: agente subestação (AS), agente alimentador (AA), agente trecho (AT) e agente equipamento (AE), distribuídos em diferentes containers na plataforma JADE. Após a ocorrência de uma falta permanente, os agentes AS, AA, AE e AT, distribuídos ao longo da rede elétrica, cooperam entre si, compartilhando informações, negociando potência e tomando decisões com o objetivo de recompor a rede elétrica. Nesse processo, os agentes realizam as seguintes tarefas/funções: localizar a falta; identificar e isolar os trechos afetados pela falta; negociar potência de reserva; analisar as restrições operativas; e recompor trechos. O diagrama de blocos apresentado na Figura 1 ilustra a interação entre os diferentes tipos de agentes presentes no SMRA. O arquivo de dados XML (eXtensible Markup Language) é explicado a seguir.

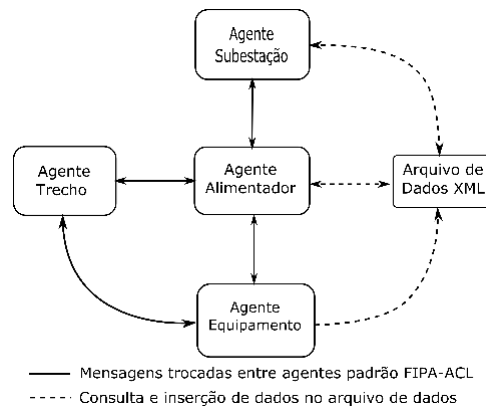


Figura 1. Diagrama de blocos representando comunicação entre agentes e com acesso ao arquivo de dados XML.

A base de dados XML é convertida em objeto JAVA, através da API JDOM, e transmitida como parâmetro de mensagem para outros agentes. Dessa forma a visão que cada agente tem da parcela do sistema sob sua supervisão é compartilhada entre os agentes interessados em atuar no ambiente mediante ocorrência de evento relacionado à sua área de atuação, implementando assim um comportamento de banco de dados distribuído.

Os AE atualizam a base de dados periodicamente, enquanto os AA consultam e modificam a base de dados XML no momento em que estão realizando negociação para recomposição da rede elétrica. Na Tabela 1 são apresentados os dados do arquivo XML acessados pelos agentes durante a recomposição do sistema de distribuição.

Tabela 1. Dados Armazenados pelos Agentes em Arquivo XML

Agentes	Dados/Atributos
Alimentadores	Nome, Estado e Recurso.
Trechos	Nome, Carregamento máximo e padrão, Número de Clientes, Número de Eletro-dependentes (consumidores com <i>home care</i> que dependem da energia elétrica para sobreviver) e Número de Cargas Prioritárias.
Equipamentos	Nome, Código, Estado, Porta de Comunicação.

4.4 Descrição e Modelagem dos Agentes do SMRA

O fluxograma na Figura 2 mostra a sequência de ações dos agentes do SMRA para recomposição automática de uma rede elétrica após uma falta.

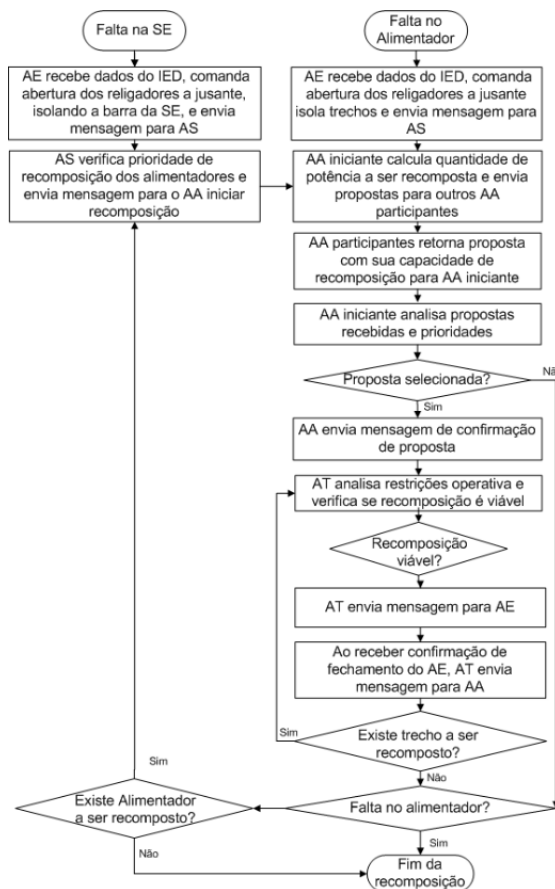


Figura 2. Sequência de ações do SMRA para recomposição da rede elétrica

5. Sistema Teste e Simulador de Sistema Elétrico para Validação do SMRA

5.1 Sistema Teste de Distribuição em Média Tensão

O SMRA foi testado e validado tomando como base o Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) da cidade de Aquiraz, no estado do Ceará, Brasil. A rede em 13,8 kV é suprida por 4 subestações: Aquiraz (SE AQZ), Jabuti (SE JAB), Messejana (SE MSJ) e Água Fria (SE AGF). Na Figura 3 é apresentado o diagrama unifilar do SDMT Aquiraz em que estão respresentados elementos como barramentos de 69,0kV e 13,8kV, trechos

de cada um dos alimentadores, chaves de seccionamento NF e de encontro NA e transformadores de força.

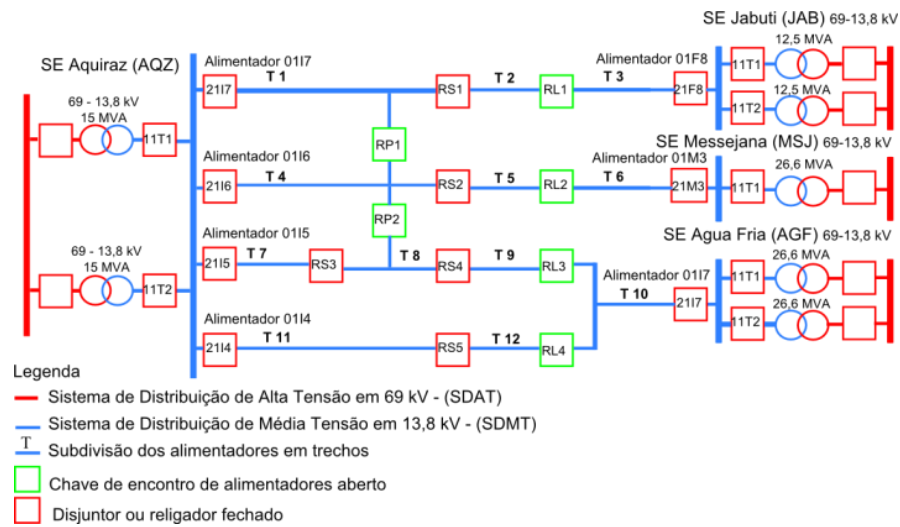


Figura 3. Topologia do SMDT de Aquiraz

A SE AQZ possui quatro saídas de alimentadores em 13,8 kV (01I4, 01I5, 01I6 e 01I7). Na ocorrência de uma falta permanente em algum trecho do SDMT Aquiraz, o SMRA possui a função de localizar o trecho afetado pela falta, isola-lo e recompor os demais trechos a partir de outro alimentador da mesma subestação, em primeira instância, ou através de alimentadores das demais subestações em segunda instância, atendendo às restrições operacionais. Para viabilizar a recomposição automática, o SDMT Aquiraz possui nove religadores (21I4, 21I5, 21I6, 21I7, RS1, RS2, RS3, RS4 e RS5) para proteção e isolamento das regiões afetadas pelas faltas permanentes, e seis chaves de encontro de alimentadores (RP1, RP2, RL1, RL2, RL3 e RL4) utilizadas para transferência de carga entre alimentadores. Os alimentadores foram subdivididos em 12 trechos (T1-T12). Na Tabela 2 são apresentados os dados das correntes em cada trecho do alimentador indicando valores consumidos internamente e valores de corrente passante (valores essenciais para o cálculo das restrições de recomposição), também são mostrados quantidade de consumidores dos alimentadores e limites de corrente dos condutores.

Tabela 2. Dados das Correntes dos Trechos e dos Condutores

Trecho	Corrente Medida	Corrente Total do Trecho	Limite Térmico dos Condutores	Número de Consumidores
T1	12 A	244 A	475 A	300
T2	232 A	232 A	475 A	250
T4	33 A	183 A	438 A	350
T5	150 A	150 A	232 A	400
T7	54 A	331 A	475 A	350
T8	120 A	277 A	475 A	300
T9	157 A	157 A	242 A	250
T3	165 A	165 A	475 A	200
T6	263 A	263 A	438 A	300
T10	343 A	343 A	525 A	350
T11	164 A	203 A	475 A	200
T12	39 A	39 A	438 A	250

Os dados apresentados na Tabela 2, armazenados em arquivo XML, são acessados pelo SMRA durante o processo de recomposição automática da rede elétrica. A corrente medida corresponde à carga consumida em cada trecho. A corrente que circula no trecho corresponde à corrente total medida no início do trecho.

5.2 Desenvolvimento do Simulador e Integração ao SMRA

Para teste e validação do SMRA, foi desenvolvido em JAVA um simulador com a representação do SDMT Aquiraz. A integração do SMRA ao simulador foi implementada via porta de comunicação TCP/IP, através de bibliotecas do JAVA. A função principal do simulador é executada com o lançamento dos agentes no ambiente de execução JADE. Após lançados via simulador, os agentes são ativados, e o SMRA fica em modo de execução no ambiente JADE, pronto para isolar faltas e recompor o sistema. Na **Error! Reference source not found.** é apresentado o SMRA integrado ao simulador via comunicação TCP/IP e ao banco de dados XML por meio de uma biblioteca do JAVA denominada JDOM.



Figura 4. Arquitetura do SMRA integrada ao simulador de teste e validação

6. SMRA do SDMT Aquiraz

Nesta seção é apresentado o SMRA implantado, testado e validado em quatro computadores no Laboratório do GREI -UF, juntamente com os as simulações de falta e resultados obtidos.

6.1 Topologia do SMRA

A recomposição automática do SDMT Aquiraz é analisada, processada e controlada por meio de uma arquitetura computacional composta de um conjunto de agentes, distribuídos em quatro computadores conectados em rede. Nesta topologia, cada computador representa uma subestação com container composto de agentes AS, AA, AT e AE, configurando uma única plataforma. O computador que representa a SE Aquiraz, container principal, possui, além dos agentes supracitados, o Agente AMS responsável pelo gerenciamento de todos os agentes do SMRA e o simulador da rede elétrica.

Para realizar a recomposição automática, o SMRA analisa o carregamento dos condutores de cada trecho e da fonte (subestação) para evitar que o fechamento de uma chave de

encontro de alimentadores implique na violação do limite de carregamento dos condutores de trechos e da fonte. Durante o fechamento de chave de encontro de alimentadores, a característica radial da rede deve ser preservada.

6.2 Estudo de Caso

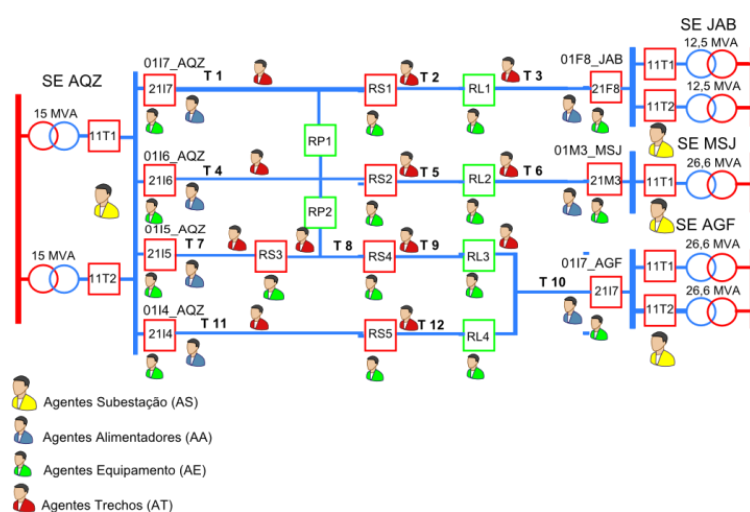
Ao simular uma falta, o simulador envia mensagens com os dados relacionados à falta para o SMRA. O SMRA analisa os dados recebidos e os agentes cooperam entre si com o objetivo de isolar o trecho afetado pela falta, comandando a abertura do religador a jusante à falta para restabelecer o fornecimento dos trechos são desenergizados, a partir do fechamento de equipamentos de encontros de alimentadores. Após análise das restrições operativas e das prioridades estabelecidas, o SMRA envia mensagens de comandos para o simulador abrir e fechar equipamento, visando o isolamento da área afetada pela falta e a transferência de cargas para outro alimentador.

Na Figura 5 é apresentado os agentes distribuídos ao longo das subestações e do SDMT Aquiraz e os dados das correntes dos trechos, armazenados em arquivo XML, que são acessados pelo SMRA durante o processo de recomposição automática da rede elétrica. A corrente consumida por trecho corresponde à diferença das correntes medidas no início e no final do trecho. A corrente que circula no trecho corresponde à corrente total medida no início do trecho.

A metodologia adotada na concepção do SMRA proposto leva em consideração o requisito de extensibilidade, o que implica que este sistema pode ser facilmente expandido e aplicado a outras redes de distribuição de energia.

Para validar o SMRA, foram realizadas simulações de faltas em todos os trechos do SDMT Aquiraz. Nesta seção serão apresentadas as ações do SMRA, a partir da simulação de uma falta no trecho T7 do alimentador (AQZ0115) da SE AQZ, o isolamento dos trechos afetados e a recomposição dos demais trechos.

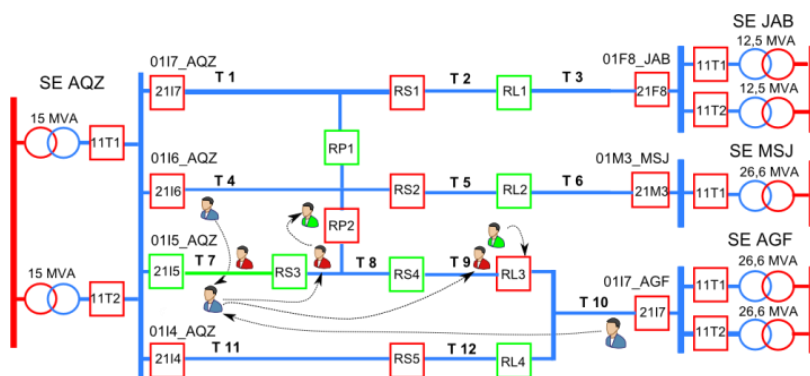
Figura 5 - SDMT Aquiraz no estado normal e agentes distribuídos observando o estado da rede.



Simulando a ocorrência de uma falta permanente no trecho T7, o relé associado ao religador AQZ2115 atua, o religador abre desenergizando os trechos T7, T8 e T9 (cor

verde) (ver Figura 7). Os clientes em T8 e T9 são desenergizados embora não estejam em falta. Após a interrupção da falta, o SMRA inicia o processo de recomposição pelo agente AE (21I5_AQZ) que recebe do relé associado ao religador AQZ21I5 informações referentes à falta e as repassa ao agente AA (01I5_AQZ), conforme ilustrado na Figura 6. O agente AA 01I5_AQZ imediatamente envia mensagens de comando de abertura para todos os agentes AE (RS3_01I5 e RS4_01I5) sob sua responsabilidade, realizando a abertura dos religadores RS3 e RS4 e ao mesmo tempo envia mensagens iniciando a negociação com o agente AA 01I6_AQZ da SE AQZ e com o agente AA 01I7_AGF da SE AGF, capazes de colaborar no processo de recomposição dos trechos são T8 e T9.

Figura 6 – Recomposição do trecho T8 pela SED Aquiraz



Para este processo de recomposição, definiu-se como primeiro critério de prioridade a transferência de carga entre alimentadores da mesma subestação. Tomando como base esse critério, o agente AA AQZ_01I5 analisa as propostas recebidas dos agentes AA AQZ_01I6 e AGF_01I3 e decide que o alimentador 01I6 da SE Aquiraz deve suprir o trecho T8 do SDMT Aquiraz. Em seguida, o agente AA AQZ_01I5 envia mensagens de autorização para o agente AT T8_01I5 iniciar o processo de recomposição. O agente AT T8_01I5 analisa as restrições operativas, e não encontrando qualquer problema, comanda o fechamento da chave de encontro de alimentadores RP2 (vermelho), suprimindo o trecho T8 (azul), conforme ilustrado na Figura 6.

Após a recomposição do trecho T8, o AT T8_01I5 envia uma mensagem ao AA 01I5_AQZ informando que a recomposição foi realizada com sucesso. O agente AA 01I5_AQZ envia mensagem para o AT T9_01I5 autorizando a recomposição do trecho T9. Após análise, este agente constata que o alimentador 01I6_AQZ não possui capacidade para suprir o trecho T9. Conforme indicado na Tabela 2, o trecho T4 possui um fluxo de corrente de 183 A, e ao recompor T9 sua corrente elevar-se-ia para 303 A, elevando o fluxo de corrente no trecho T4 para 460 A, que está acima do limite de capacidade dos condutores do trecho que é de 438 A. Assim, 01I6 envia mensagem de falha na recomposição ao AA 01I5_AQZ. Este agente inicia nova negociação com o AA 01I7_AGF pertencente à subestação de Água Fria (SE AGF). O agente AA 01I7_AGF retorna mensagem para AA 01I5_AQZ informando disponibilidade de carga. O agente AA 01I5_AQZ autoriza o AT T9_01I5 analisar a recomposição do trecho T9, que não identifica restrições operativas e comanda o fechamento da chave de encontro de alimentadores RL3, ficando o trecho T9 suprido pela SE AGF, conforme ilustrado na Figura 6. Após a recomposição do trecho T9, o agente AT T9_01I5 envia uma mensagem para o agente AA informando que a recomposição foi realizada com sucesso e o agente

AA 01I5_AQZ verifica que não há outros trechos a serem reenergizados e finaliza o processo de recomposição.

7. Discussão de Resultados

Os resultados apresentados demonstram que o SMRA proposto foi capaz de localizar e isolar trecho submetido à falta permanente, negociar potência para recompor trechos da rede elétrica de forma segura e eficaz, tomando como base a não violação das restrições operativas e atendendo prioridades pré-definidas, em um tempo máximo de três segundos. O trabalho apresenta as seguintes contribuições:

- Os agentes foram encapsulados em hardware independente da tecnologia do IED;
- Os agentes com inteligência local e distribuída foram capazes de analisar dados sistêmicos necessários à recomposição de sistemas complexos;
- Foi usada comunicação ponto-a-ponto bidirecional com o protocolo TCP/IP adotado pela norma IEC 61.850;
- Foi usado arquivo com estrutura de dados padrão XML, de fácil leitura e utilizado pela norma IEC 61.850 e pelo padrão CIM (Common Information Model);
- Os agentes foram desenvolvidos em uma plataforma aberta, interoperável e multiplataforma, em conformidade com o padrão FIPA;
- Modularidade, escalabilidade, extensibilidade e tolerância à falha, características intrínsecas dos SMA, proporcionam ao SMRA maior facilidade de manutenção e flexibilidade para expansão das funcionalidades dos agentes e criação agentes;
- O SMRA possibilita a redução de custos operacionais com deslocamento de equipe para recomposição da rede elétrica;
- O tempo de recomposição da rede elétrica é reduzido, proporcionando melhoria na qualidade de serviço e melhoria da imagem da empresa.

8. Conclusão

Neste artigo foi apresentado um sistema multiagente para recomposição automática (SMRA) para redes elétricas de distribuição de energia, que usa uma abordagem de sistemas distribuídos. Os resultados dos testes em laboratório demonstraram a eficácia da comunicação entre o JADE e o simulador, e capacidade de interação, cooperação, negociação e análise de prioridades e restrições operativas dos agentes durante o processo de recomposição. Estes resultados comprovam o potencial dos SMA para desenvolvimento de sistemas com inteligência distribuída aplicados às redes elétricas inteligentes. Além disso, a pesquisa e desenvolvimento destaca a capacidade do JADE para aplicações de sistema para operação em tempo real.

Está em fase de pesquisa e desenvolvimento no GREI-UFC o desenvolvimento de novas funcionalidades para os agentes e a implementação de agentes inteligentes em hardware embarcados para integração do SMRA aos relés de proteção de sistemas elétricos.

Referências

Ansari, J., Gholami, A., & Kazemi, A. (2015). Holonic structure: a state-of-the-art control

- architecture based on multi-agent systems for optimal reactive power dispatch in smart grids. *Iet Generation Transmission & Distribution*, 9(14), 1922–1934.
- Bellifemine, F., Caire, G., & Greenwood, D. (2007). *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Davidson, E. M., McArthur, S. D. J., McDonald, J. R., Cumming, T., & Watt, I. (2006). Applying multi-agent system technology in practice: Automated management and analysis of SCADA and digital fault recorder data. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 559–567.
- Do Nascimento, L. L., & Rolim, J. G. (2013). Multi-Agent system for adaptive protection in microgrids. *2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT LA 2013*.
- Dominguez, J. S., Cerqueira, A. J., Dominguez, D. S., Frias, D., & Iglesias, S. M. (2015). Using a multi-agent system for monitoring indicators of quality of service in power distribution networks. *IEEE Latin America Transactions*, 13(4), 1048–1054.
- Elkhatib, M. E., El-Shatshat, R., & Salama, M. M. a. (2011). Novel coordinated voltage control for smart distribution networks with DG. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(4), 598–605.
- FIPA. (2015). The Foundation for Intelligent Physical Agents standards. Retrieved January 1, 2015, from <http://www.fipa.org>
- Jayasinghe, S. L., & Hemapala, K. T. M. U. (2015). Multi Agent Based Power Distribution System Restoration—A Literature Survey. *Energy and Power Engineering*, 7(12), 557–569.
- Khamphanchai, W., Pipattanasomporn, M., Kuzlu, M., Zhang, J., & Rahman, S. (2015). An Approach for Distribution Transformer Management With a Multiagent System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(3), 1208–1218.
- Ma, R., Chen, H. H., Huang, Y. R., & Meng, W. (2013). Smart grid communication: Its challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(1), 36–46.
- Momoh, J. (2012). *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*. Wiley-IEEE Press.
- Ruta, M., Scioscia, F., Loseto, G., & Di Sciascio, E. (2014). Semantic-based resource discovery and orchestration in Home and Building Automation: a multi-agent approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1), 730–741.
- Sampaio, R. F., Barros, J. V. C., Leão, R. P. S., Barroso, G. C., Araújo, R. M., Leão, R. P. S., ... Sá, M. B. (2012). Metodologia para Desenvolvimento de um Sistema de Reposição Automática para um Projeto Piloto de Redes Inteligentes. In *XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, XX SENDI, Rio de Janeiro, Brasil*.
- Sudhakar, T. D., & Srinivas, K. N. (2011). Restoration of power network - a bibliographic survey. *European Transactions on Electrical Power*, 21(1), 635–655.
- Wooldridge, M. J. (2009). *An Introduction to MultiAgent Systems* (2nd Editio). Jonh Wiley & Sons Ltd.
- Zidan, A., El-Saadany, E. F., & El Chaar, L. (2011). A cooperative agent-based architecture for self-healing distributed power systems. *2011 International Conference on Innovations in Information Technology, IIT 2011*, 100–105.