

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MULTIAGENTE PARA RECOMPOSIÇÃO AUTOMÁTICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

FERNANDO AMÉRICO A. R. MARÇAL<sup>1</sup>, LUCAS S. MELO<sup>1</sup>, RAIMUNDO F. SAMPAIO<sup>1</sup>, RUTH P. S. LEÃO<sup>2</sup>, GIOVANNI C. BARROSO<sup>2</sup>

1. *Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará Campus de Sobral  
Praça Senador Figueira, s/n - 62.010-560 Sobral - CE, Brasil*  
*E-mails: fernando.marshall@gmail.com, lucas.silveiramelo@gmail.com,  
rfurtado@dee.ufc.br*

2. *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará  
Caixa Postal 6001 - Campus do PICI, 60.455-760 Fortaleza - CE, Brasil*  
*E-mails: rleao@dee.ufc.br, gcb@fisica.ufc.br*

**Abstract**— This work aims to show the modeling for a multi-agent system of automatic restoration (SMRA) of electric power distribution network. The SMRA proposed involves several switch agents (AC), feeder agents (AL) and agents against feeders (AE). The agents work together in order to restore the highest number of clients after a fault. For the development of the SMRA the software framework JADE was used, fully implemented in JAVA language. As a case study, the proposed SMRA was applied to the distribution network of the Pici Campus of the Federal University of Ceará. For testing and validate the SMRA an automatic restoration simulator based on Java in Java simulator automatic restoration containing a graphical interface with single-line diagram of the distribution network of the Campus do Pici. The simulation results show that the SMRA provides good performance, providing fast and reliable restoration of electric power distribution networks and demonstrates the potential of the technique of multi-agent system solution for automatic restoration applied to electrical networks.

**Keywords**— Automatic restoration system, intelligent agents, multi-agent systems, smart grids.

**Resumo**— Este trabalho tem como objetivo apresentar a modelagem de um sistema multiagente de recomposição automática (SMRA) para redes elétricas de distribuição de energia. O SMRA proposto é composto de vários agentes: agentes chave (AC), agentes alimentador (AL) e agentes de encontro de alimentadores (AE). Os agentes trabalham em conjunto de modo a restabelecer o maior número de clientes após uma falta. Para desenvolvimento do SMRA foi utilizado o JADE, um framework escrito em linguagem JAVA. Como estudo de caso, o SMRA proposto foi aplicado à topologia da rede elétrica de distribuição do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará. Para teste e validação do SMRA foi desenvolvido em Java um simulador de recomposição automática contendo uma interface gráfica com o unifilar da rede de distribuição do Campus do Pici. Os resultados obtidos nas simulações demonstram que o SMRA apresenta bom desempenho, proporcionando rapidez e confiabilidade na recomposição de redes elétricas de distribuição e demonstra o potencial da técnica de sistema multiagente para solução de recomposição automática aplicada à redes elétricas.

**Palavras-chave**— Sistema de recomposição automática, agentes inteligentes, sistemas multiagentes, redes inteligentes.

## 1 Introdução

O fornecimento de energia elétrica é de suma importância em todos os segmentos da sociedade. Na ocorrência de um problema que venha a interromper o seu fornecimento, os efeitos na indústria, comércio, hospitais e até mesmo na vida cotidiana da população são bastante prejudiciais tanto em termos de segurança quanto economicamente (Sudhakar e Srinivas 2010). Diante desse fato, o serviço de fornecimento de energia elétrica deve ser restabelecido rapidamente, o que não acontece normalmente nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Tradicionalmente, para recompor o sistema após uma falta, a concessionária de energia envia uma equipe a campo para localização da área afetada, e em seguida isola a mesma e recompõe o sistema através de uma sequência de manobras de abertura e fechamen-

to de chaves. Este processo de recomposição manual demanda tempo, e, conseqüentemente, custos operacionais expressivos. Atualmente com as exigências dos órgãos reguladores, as concessionárias de energia estão buscando agregar inteligência à rede para que esta automaticamente identifique e trate eventuais faltas no menor tempo possível, além de evitar o risco de acidentes na operação envolvendo profissionais.

Para solucionar estes e outros problemas surgiu nos últimos anos o conceito de Rede Inteligente (do inglês, *Smart Grid*). As Redes de Energia Inteligentes (REIs) compreendem um sistema avançado, que utiliza tecnologia da computação, automação e telecomunicações para supervisão e controle da rede elétrica de maneira mais eficiente e confiável (Sampaio, 2012). Em termos de sistemas computacionais aplicados a REIs, várias abordagens para soluções em termos de recomposição automática de sistemas de distribuição de energia vêm sendo utilizadas. Como métodos centralizados, têm-se abordagens

heurísticas, sistemas especialistas e algoritmos evolucionários (Li et al., 2012). Os métodos descentralizados são baseados principalmente em sistema multiagentes (SMAs). A principal vantagem dos SMAs em relação às abordagens centralizadas é que não há necessidade de uma poderosa capacidade de processamento central e um sistema de comunicação robusto, visto que os dados são tratados de forma distribuída entre os agentes. O sistema distribuído apresenta maior confiabilidade, porque havendo uma falha no sistema de comunicação ou no servidor central, não afeta o sistema como um todo. Outra vantagem é que se trata de um sistema aberto e expansível, podendo ser facilmente ampliado com a adição de novos agentes, caso seja necessário à ampliação da rede elétrica.

Este artigo propõe um sistema multiagente para recomposição automática (SMRA) aplicado a sistemas de distribuição de energia. De forma a analisar a eficiência do método e validar a abordagem proposta, um simulador foi desenvolvido usando como estudo de caso a rede elétrica do *Campus Pici* da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Este artigo está organizado da seguinte forma: Seção 2 apresenta a configuração de rede de distribuição proposta para o *Campus Pici* da UFC; Seção 3 apresenta os objetivos e restrições de uma recomposição de redes de distribuição; Seção 4 apresenta as características e vantagens de SMAs; Seção 5 apresenta a arquitetura do SMA proposto para recomposição automática de redes de distribuição; Seção 6 apresenta as ferramentas usadas no desenvolvimento; e finalmente Seção 7 apresenta a simulação e resultados.

## 2 Rede elétrica do campus do Pici

Atualmente, a rede de distribuição do *Campus* é suprida em 13,8 kV através de um alimentador de distribuição oriundo do Subestação Pici pertencente à Companhia Energética do Ceará (COELCE). O sistema de proteção de toda a rede elétrica do *Campus* do Pici é realizado através de um relé associado a um disjuntor geral instalado no ponto de entrega da Coelce. Esta configuração possui baixa confiabilidade e por vezes compromete o suprimento de energia do *Campus*. Com isso, estudos para modernização desta rede estão sendo propostos. Na Figura 1 é apresentada a nova topologia da rede elétrica do Campus do Pici proposta em Lopes (2011). Essa nova topologia compreende uma subestação de 69-13,8 kV suprimindo a rede de distribuição do Campus do Pici através de três alimentadores de distribuição, subdividindo a rede em 7 trechos através da instalação de religadores e chaves. Esta alteração possibilita

alternativas para reconfiguração da rede após a ocorrência de uma falta elétrica.

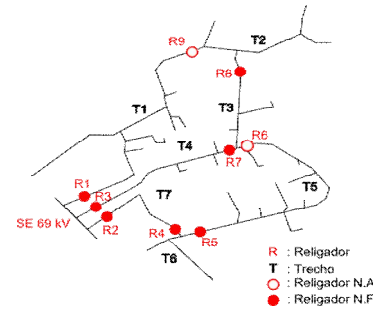


Figura 1. Configuração proposta para a rede elétrica do Campus do Pici.

## 3 Recomposição de sistemas de distribuição

Havendo um distúrbio na rede elétrica, o sistema de recomposição automática deve isolar a área afetada para uma falta do tipo permanente, e, sem seguida, reconfigurar a rede após a falta ser isolada. Esse processo é realizado através da abertura e fechamento de chaves de encontro de alimentadores, sempre mantendo a configuração radial da rede, redistribuindo as cargas entre os alimentadores.

A recomposição em sistemas elétricos de modo geral tem como objetivo manter a qualidade do serviço de entrega de energia, mesmo após uma falta, proporcionando maior continuidade ao serviço, restaurando o máximo de consumidores, no menor tempo possível e priorizando cargas, quando necessário. No momento da recomposição, restrições operacionais devem ser atendidas, tais como as citadas em Nagata *et al.* (2005):

- Limite da capacidade da fonte (gerador/transformador);
- Limite da capacidade de corrente nos trechos;
- Manutenção da configuração radial;
- Atendimento dos limites de tensão.

## 4 Sistemas Multiagentes

Sistema Multiagente (SMA) é uma tecnologia relativamente nova que vem sendo aplicada em diversas áreas, como desenvolvimento de jogos eletrônicos, *e-commerce*, comunicações móveis e muitas outras. Em sistemas elétricos, a tecnologia SMA está sendo utilizada em processos tais como diagnósticos, simulação de mercado, controle da rede, e recomposição de sistemas elétricos.

### 4.1 Definições

Um sistema multiagente é um sistema composto por um ou mais agentes inteligentes que tem como

propósito satisfazer um objetivo individual ou do sistema como um todo. Um agente por sua vez, segundo Wooldridge *et al.* (1999), é denominado como uma entidade de software ou hardware que se situa em algum ambiente e é capaz de reagir a mudanças nesse ambiente autonomamente. O ambiente é tudo externo ao agente e pode ser físico ou computacional. Diz-se que um agente possui autonomia, pois tem a capacidade de programar e realizar ações com base em observações do ambiente ao qual está inserido.

#### 4.1 Características de um agente inteligente

O agente além de possuir autonomia, segundo McArthur *et al.* (2007) deve ter as seguintes características:

- Reatividade: o agente tem a capacidade de percepção de seu ambiente além de responder às mudanças neste ambiente de acordo com seus objetivos de projeto.
- Pró-Atividade: um agente tem a capacidade de executar ações sem estímulos externos, sendo proativo.
- Sociabilidade: um agente tem a habilidade de interagir com outros agentes.

#### 4.2 Vantagens de SMAs

As características dos agentes trazem vantagens tais como:

- Flexibilidade: um SMA tem a capacidade de lidar com situações dinâmicas, tendo várias soluções em vista e escolhendo a mais adequada no momento, traçando novos planos, se necessário.
- Extensibilidade: um SMA tem a capacidade de ser expandido ou de atualizar qualquer funcionalidade, caso seja necessário.

### 5 Arquitetura do SMRA

O SMRA proposto neste artigo contempla três tipos de agentes, denominados agente chave (AC), agente alimentador (AL) e agente de encontro de alimentadores (AE). Juntos formam um sistema de duas camadas, estando os ALs no nível alto e ACs e AEs no nível baixo.

Estes agentes trabalham em conjunto e de forma autônoma com o objetivo de identificar trechos afetados por faltas, isolar os mesmos e restabelecer o fornecimento de energia nas demais áreas não afetadas no menor tempo possível. A arquitetura do SMRA proposto é apresentada na Figura 2.

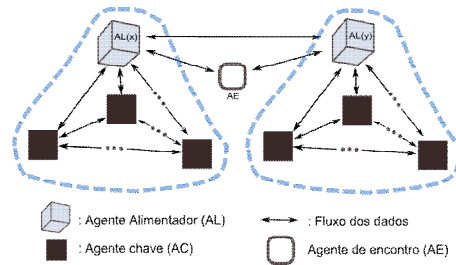


Figura 2. Arquitetura do SMRA proposto.

As redes elétricas de distribuição de energia, de um modo geral possuem topologia radial e são compostas de uma subestação distribuidora suprindo vários alimentadores. Ao longo destes alimentadores têm-se equipamentos de chaveamento, tais como chaves seccionadoras e religadores. Na topologia radial com recurso são instaladas chaves de encontro de alimentadores para recomposição do sistema após uma falta ou em caso de manutenção. Na Figura 3 é apresentado um diagrama unifilar de uma rede de distribuição com topologia radial com recurso.

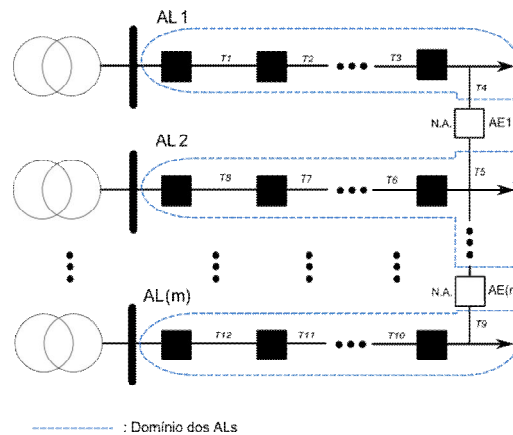


Figura 3. Unifilar de uma rede de distribuição genérica.

No texto a seguir são apresentadas as funcionalidades e a localização dos agentes, tomando como base a topologia da Figura 3. Os ACs propostos neste artigo são distribuídos ao longo dos alimentadores da rede de distribuição, estando associados aos religadores. Os ACs monitoram parâmetros da rede, tais como tensão e corrente, e, caso seja necessário, comandam a abertura ou fechamento dos religadores.

Desse modo, cada alimentador está monitorado por um grupo bem definido de ACs. Em um nível mais alto de cada grupo de ACs, está um único AL responsável por gerenciar o carregamento dos clientes conectados ao seu alimentador.

Os AEs somente entram em ação no momento de uma recomposição, dando suporte ao processo de recomposição. Os AEs não estão fixados em nenhum grupo, pois, dependendo de suas localizações, podem ser solicitados por quaisquer ALs que estejam negociando trocas de carga, no momento de uma recom-

posição. Por exemplo, na Figura 3, se AL2 fosse atender cargas sob responsabilidade de AL1, consultaria seu banco de dados e analisaria que para que isso ocorra, é necessário que AE1 controle o fechamento de sua chave.

## 6 Desenvolvimento do SMRA

### 6.1 JADE

Neste trabalho, os agentes foram desenvolvidos no JADE (*Java Agent Development Framework*), uma plataforma escrita em linguagem JAVA, que facilita a criação dos comportamentos dos agentes fornecendo um conjunto de bibliotecas com métodos de acordo com as especificações FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*). A FIPA é uma organização que promove tecnologias baseadas em agentes e especifica padrões para garantir a interoperabilidade destas tecnologias. Além disso, o JADE permite a execução do SMA desenvolvido e a visualização das trocas de mensagens entre os agentes por meio de uma interface gráfica.

Uma das principais vantagens do JADE é que ele permite adição e remoção de agentes mesmo enquanto o sistema multiagente está em execução, o que torna possível a extensibilidade do sistema, característica essencial para os sistemas elétricos de energia.

### 6.2 Comunicação entre os agentes

A interação entre agentes se dá por meio das Linguagens de Comunicação entre Agentes (ACL). A ACL padrão empregada nas trocas de mensagens mediante plataforma JADE é a FIPA-ACL. A classe *jade.lang.acl.ACLMessage* fornece métodos para tratamento dessas mensagens.

A FIPA padroniza ainda um conjunto de protocolos de comunicação que podem ser usados em SMAs. Esses protocolos possuem atos comunicativos pré-definidos e ditam sequências de mensagens a serem trocadas.

Neste trabalho, optou-se por utilizar três desses protocolos. São eles:

- FIPA *Request*: é um protocolo de solicitação de ação. Permite a um agente requisitar outro para realização de determinada ação.
- FIPA *Subscribe*: é um protocolo de solicitação de informação. É usado quando um agente solicita uma informação a outro.
- FIPA *Contract Net*: é um protocolo de negociação. Um agente solicita propostas a outros e analisa qual a melhor para execução de determinada ação ou ações.

### 6.3 Banco de dados

Como banco de dados dos agentes foram desenvolvidos arquivos escritos em XML (*Extensible Markup Language*). Desse modo, foi desenvolvido um tipo de arquivo modelo XML para os três tipos de agentes. Os arquivos XML contêm informações pré-configuradas e parâmetros da rede, tais como estado dos religadores (aberto ou fechado) e valores de carga, que em determinados momentos são atualizados ou consultados pelos agentes para tomada de decisões, dependendo da dinâmica da rede. Na Figura 4 é apresentado o arquivo XML dos ACs.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<agenteAC nome = "AC 1">
  <agenteAL> AL1 </agenteAL>
  <estado> fechada </estado>
  <atuacao> normal </atuacao>
  <carga valor = "1" />
  <sentido sinal = "+">
    <sentido1>
      <trecho nome = "T1"/>
      <outrasChaves>
        <nome>AC_2</nome>
        <nome>AC_3</nome>
      </outrasChaves>
    </sentido1>
    <sentido2>
      <trecho nome = "nenhum"/>
      <outrasChaves>
        <nome> nenhum </nome>
      </outrasChaves>
    </sentido2>
  </sentido>
</agenteAC>
```

Figura 4. Modelo de arquivo XML dos ACs.

## 7 Simulação e Resultados

### 7.1 Condições de simulação

De modo a tornar a análise do processo de recomposição mais dinâmica e didática, foi desenvolvido em JAVA um Simulador de Faltas e Recomposição Automática (SFRA).

O computador usado nas simulações continha um processador Intel *Core 2 Duo*, 2.00 GHz.

### 7.2 Resultados

Várias simulações foram realizadas para a rede elétrica usada como caso teste, com diferentes condições de falta. Por motivos de espaço, somente uma condição será mostrada.

Na Tabela 1 são apresentadas as nomenclaturas utilizadas nos agentes alimentadores e chaves da rede elétrica do Campus do Pici.

Tabela 1. Grupos de agentes para rede Pici.

Grupo	Agente Alim-entador	Agentes Chave
1	AL1	AL1_R1,AL1_R2,AL1_R3
2	AL2	AL2_R1,AL2_R2,AL2_R3
3	AL3	AL3_R1

Os religadores aos quais os ACs estão associados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Religadores associados aos a cada AC.

AC	Religador	AC	Religador
AL1_R1	R2	AL2_R1	R3
AL1_R2	R4	AL2_R2	R7
AL1_R3	R5	AL2_R3	R8
AL3_R1	R1		

Na Figura 5 é apresentada a tela principal do SFRA e a simulação de uma falta no trecho T7, com o religador AL1\_R1 aberto após a falta.

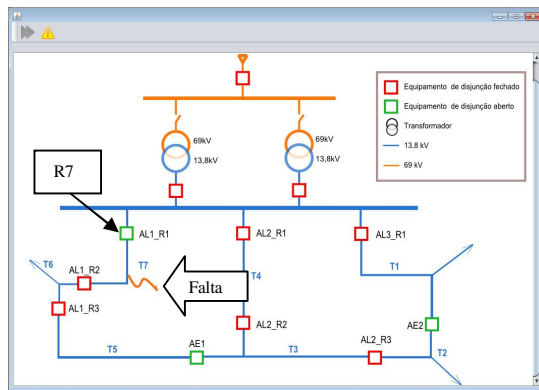


Figura 5. Falta no trecho T7 e atuação de R7.

O agente AL1\_R1 sente que no ambiente ocorreu uma falta através de uma mensagem *INFORM* e seta no seu banco de dados (arquivo XML) a tag “estado” para aberta, referente ao estado do religador atuante, ao qual está associado.

```
<estado> aberta </estado>
```

Então, o AL1\_R1 analisa o sentido do fluxo de potência na condição pré-falta por meio de sensores (TCs e TPs) e, consulta seu banco de dados (arquivo XML) para saber que outros agentes chaves a jusante, pertencentes ao seu mesmo domínio, precisam receber uma mensagem Request para que estes comandem a abertura de seus religadores para que no momento da recomposição as cargas não sejam energizadas todas de uma vez. No caso, os ACs requisitados foram AL1\_R2 e AL1\_R3. Este processo pode ser visto na Figura 6.

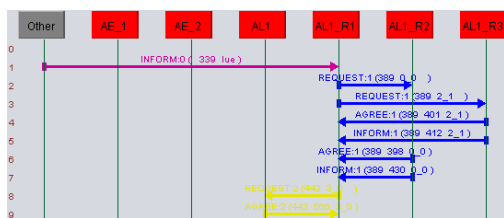


Figura 6. AL1\_R1 sente a falta e desencadeia a conversação com o seu grupo.

Os agentes AL1\_R2 e AL1\_R3 retornaram mensagens *AGREE* para AL1\_R1 aceitando a requisição, e em seguida enviaram uma mensagem *INFORM* confirmando a abertura dos religadores R4 e R5. Na Figura 7 é ilustrada a abertura dos religadores R4 e R5.

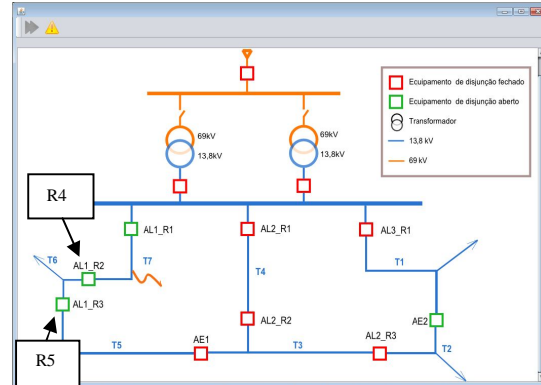


Figura 7. AL1\_R2 e AL1\_R3 comandam a abertura de seus religadores R4 e R5 respectivamente.

Após receber as mensagens de confirmação *AGREE* e *INFORM*, o agente AL1\_R1 envia uma mensagem *REQUEST* para o agente alimentador AL1 alertando da falta no trecho 7 e o valor de carga perdida. Essa mensagem é caracterizada pela cor amarela na Figura 6.

O AL1 envia uma mensagem *SUBSCRIBE* para cada agente chave de seu domínio que não tenha seu trecho afetado pela falta (AL1\_R2 e AL1\_R3), solicitando que informem o valor de carga perdida em seus trechos como mostrado na Figura 8.

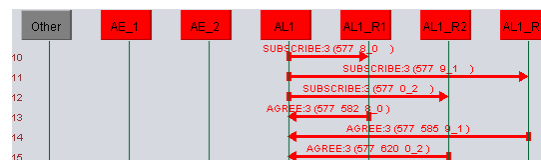


Figura 8. Protocolo FIPA Subscribe iniciado por AL1.

Os agentes AL1\_R2 e AL2\_R3 retornam uma mensagem *AGREE* informando o valor das cargas perdidas nos trechos T6 e T5 respectivamente.

Tendo os valores de cargas perdidas e a localização da falta, o AL1 envia uma mensagem via o protocolo de negociação *Contract Net* para os demais agentes alimentadores da rede (AL2 e AL3), solicitando ajuda para suprimento de energia dos trechos, sob sua responsabilidade, não afetados pela falta (T5 e T6). Na Figura 9, é possível ver a negociação entre os ALs.



Figura 9. Protocolo FIPA Contract Net iniciado por AL1.

Os agentes AL2 e AL3 propuseram ajuda, mas, a proposta de AL2 foi respondida por AL1 com uma mensagem *ACCEPT-PROPOSAL*, sendo escolhida por se encontrar mais próximo de AL1.

AL2 como escolhido para ajudar na recomposição, consulta em seu banco de dados para saber qual agente AE precisa ser requisitado para que comande o fechamento de seu religador para que AL1 seja atendido. No caso, AE\_1 foi requisitado por AL2 por meio de uma mensagem *REQUEST* para que comandasse a abertura de seu religador.

Depois de AE\_1 aceitar a requisição de AL2 e comandar a abertura de seu religador, AL2 avisa a AL1 que pode iniciar a recomposição de seus trechos, um a um.

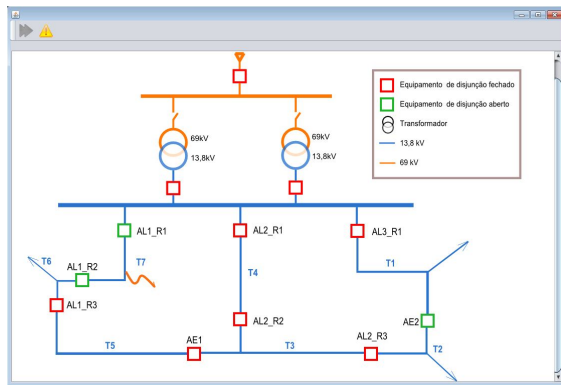


Figura 10. Rede após recomposição.

AL1 então enviou uma mensagem *REQUEST* para AL1\_R3, visto que é o único que pode fechar seu religador, sendo concluída a recomposição como mostra a Figura 10. Conforme ilustrado na Figura 10, os trechos não atingidos pela falta foram recompostos e a falta foi isolada por meio dos religadores R4 e R7, conforme esperado. O tempo de simulação da recomposição usando o SMRA durou cinco segundos, um resultado expressivo se comparado com o tempo atual para recomposição de energia no *Campus* do Pici que dura em média cerca de duas horas.

## 5 Conclusão

Neste artigo foi apresentado a modelagem de um sistema multiagente para recomposição automática de redes elétricas de distribuição. O SMRA obedece a restrições operativas como ampacidade dos cabos e capacidade disponível da fonte.

A plataforma JADE foi usada para criação e execução dos agentes e um simulador escrito em JAVA foi desenvolvido para visualização da dinâmica da recomposição da rede elétrica. Como estudo de caso foi utilizada a topologia da rede elétrica do Campus do Pici da UFC. Os resultados obtidos nas simulações demonstram que o SMRA apresenta bom desempenho, proporcionando rapidez

e confiabilidade na recomposição da rede elétrica do Campus do Pici.

Embora apresente bons resultados, os SMRA precisa ser aperfeiçoado para inclusão de novas funcionalidades. Os trabalhos futuros incluem: desenvolvimento de novos agentes para redes com geração distribuída, atendimento da prioridade de cargas, análise os níveis de tensão.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento desse projeto de processo 554597/2010-1, e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (PPGEE).

## Referências Bibliográficas

- González, A., Echavarren F. M., Rouco, L. and Gómez, T. (2012). A Sensitivities Computation Method for Reconfiguration of Radial Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 3, Vol. 27, No. 3, pp. 1294 – 1301.
- Lopes, R. F. M. (2011). Estudos elétricos para expansão e melhoria da rede elétrica do campus do PICI da UFC. Monografia (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Li, H., Sun, H., Wen, J., Cheng, S., and He, H. (2012). A fully decentralized multi-agent system for intelligent restoration of power distribution network incorporating distributed generations, *IEEE Computational intelligence magazine*, pp. 66 – 76.
- McArthur, S. D. J., Davidson E. M., Catterson V. M., Dimeas, A. L., Hatziargyriou, N. D., Ponci, F., and Funabashi, T. (2007), *Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent Systems*, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 4; pp. 1753 – 1759.
- Nagata, T., Tao, Y., Sasaki, H., and Fujita H. (2005). An Agent Approach to Bulk Power System Restoration, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 152, No. 3, pp. 1 – 5.
- Sudhakar, T. D. and Srinivas, K. N. (2010). Restoration of power network – A bibliographic survey, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 152, No. 3, pp. 635 – 655.
- Usmana, A., Shami, S. H. (2013), Evolution of communication technologies for smart grid applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.19, No. 2; pp. 191 – 199.
- Wooldridge, M., Weiss, G., Ed. (1999). *IntelligentAgents,* in *Multi-agent Systems*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 3–51.