

# Proposta de modelo de autorrecuperação de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando sistemas multiagente

Italo R. C. Campos, Filipe Saraiva

Faculdade de Computação – Universidade Federal do Pará (UFPA)

Caixa Postal 479 – 66.075-110 – Belém – PA – Brazil

italo.ramon.campos@gmail.com, saraiva@ufpa.br

**Abstract.** *This paper describes the self-healing problem of a power distribution system and a proposes to approach it, based on multiagente, systems applied in an adapted model from 33-bus system. The work proposal a four steps algorithm to power restoration in a fail environment, considering some variables and constraints of electric system.*

**Resumo.** *Este artigo descreve o problema da autorrecuperação de um sistema de distribuição de energia elétrica e uma proposta para abordá-lo, baseada em sistemas multiagente, aplicada a um modelo adaptado do sistema de 33 barras. O trabalho propõe um algoritmo de quatro passos para a restauração da potência em um ambiente de falha, levando em consideração algumas variáveis e restrições do sistema elétrico.*

## 1. Introdução

Nos anos mais recentes muitos esforços estão sendo direcionados para o desenvolvimento do setor de energia, o que tem trazido enormes avanços nas técnicas para operar, planejar e otimizar a distribuição da energia gerada pelas mais diversas fontes. Para acompanhar esse desenvolvimento o sistema de distribuição também tem ganho novas formas de implementação e, mais do que nunca, técnicas de computação têm se tornado fundamentais para o desenvolvimento desses sistemas. Uma das mais anunciadas tecnologias nesse sentido são os smart grids (ou redes elétricas inteligentes), que, em linhas gerais, são resultado da aplicação de dispositivos com capacidade de comunicação e de softwares inteligentes ao longo da rede de distribuição, com o objetivo de promover automação, conectividade e outras funcionalidades à geração, transmissão, distribuição e consumo da energia elétrica [Souza 2015].

Uma vez que os sistemas inteligentes aplicados à rede elétrica têm capacidade para decidir e configurar o funcionamento dessas redes, são necessários estudos para conceder à rede utilitária dessa tecnologia quesitos relacionados à otimização, segurança, privacidade, velocidade e comunicação. Com relação a isso a abordagem em sistemas multiagente torna-se promissora por garantir, dentro de seus parâmetros intrínsecos, muitas dessas funcionalidades [Saraiva 2015]. Um sistema multiagente – MAS – é um sistema composto por múltiplos agentes, onde estes devem exibir um comportamento autônomo e ao mesmo tempo interagir entre si através de regras de comunicação para atingir um objetivo individual ou compartilhado [Reis 2003]. Nesses termos, o presente trabalho busca apresentar um sistema multiagente distribuído para

lidar com o problema da autorrecuperação de uma rede elétrica de distribuição em um ambiente de falha. O trabalho ainda é resultado de uma pesquisa em andamento, portanto as situações propostas estão em análise e os resultados da aplicação desse modelo serão publicados em trabalhos futuros.

O presente artigo inicia com uma breve revisão, na seção 2, de outros trabalhos que utilizam variadas abordagens ao problema de autorrecuperação de redes elétricas. O trabalho segue a descrição do problema na seção 3, considerando um modelo de rede elétrica específico. Logo após, na seção 4, será discutida a modelagem de um sistema multiagente e os passos que esse sistema deverá seguir em direção à autorrecuperação dado que existe uma falha na rede que deixa nós sem alimentação. Na seção 5 serão levantadas algumas restrições do modelo e os resultados que se esperam para o sistema. A seguir são apresentadas as conclusões do trabalho.

## **2. Abordagens para o problema da autorrecuperação de smart grids**

A autorrecuperação da rede elétrica de distribuição compreende um dos comportamentos mais importantes que uma rede deve exibir para que seja considerada uma rede inteligente [Souza 2015] e, portanto, existem muitos trabalhos da comunidade científica neste viés.

Autorrecuperação da rede elétrica, em linhas gerais, significa a automatização de tarefas que, diante de uma falha no fornecimento de energia elétrica, trabalham para a restauração da potência às cargas afetadas, sem a interação de um ser humano. Lambiasi [2012] define para seu trabalho autorrecuperação – ou *self healing* – como “a capacidade do sistema de identificar, isolar e se recompor automaticamente de faltas”.

Nessa linha, Sharma, Srinivasan e Trivedi [2016] propõem um modelo semelhante ao usado neste trabalho. Os autores utilizam dois modelos de redes elétricas para realizar simulações, onde o processo de restauração da potência da rede se dá através do uso de geradores e baterias distribuídos ao longo desta. No caso de falha em algum ponto, os agentes de carga formam ilhas para que se defina uma demanda total e assim solicitem restauração da potência aos agentes que controlam as fontes de energia distribuídas na rede (geradores, baterias e veículos elétricos). Os resultados do trabalho demonstram que, ao serem levados em conta o aspecto incerto dos geradores de energia distribuídos, um maior número de nós pode ser atendido. Outro resultado interessante a se notar é que cada ilha é capaz de recuperar um número de nós proporcional à energia produzida pelos geradores distribuídos ou armazenada nas baterias. Em ambos, o aspecto distribuído dos geradores e de seus agentes gerenciadores garantem à rede melhor capacidade de processamento de informação e tomada de decisão, já que em cada nó da rede há um agente que reage ao ambiente de falha de maneira independente, porém comunicativa.

O trabalho de Souza [2015] simula dois ambientes básicos de falta, sendo um com o uso de geradores distribuídos e outro sem o uso destes. O autor propõe a técnica de corte de cargas por prioridade e ilhamento. Os resultados salientam que o fator determinante, nesse caso, foi o ilhamento, já que permitiu ao sistema restaurar cargas de maior prioridade, a custo da penalização das cargas de menor prioridade.

Ferreira, et. al. [2013] utilizam outra abordagem para o problema de autorrecuperação. Em seu trabalho, os autores se valem de algoritmo genético para chegar à autorrecuperação através de uma reconfiguração de chaveamento do sistema. Os autores propõem um problema de minimização para então encontrar a configuração ótima de chaves. O modelo proposto foi utilizado em três ambientes diferentes, sendo o primeiro com um ponto de falha, o segundo com dois e o terceiro com três pontos de falha. Em todos os casos a abordagem foi capaz de encontrar soluções, diminuindo gradualmente o número de nós restabelecidos conforme o número de falhas aumenta. Visando diminuir o número de resultados redundantes e melhorar a análise das cargas, os autores consideram a aplicação de um outro modelo em conjunto e a verificação do algoritmo utilizado. Para essa abordagem os autores consideraram um único centro de processamento e controle.

Uma proposta diferente é abordada por Wang et. al. [2015], onde os autores utilizam o conceito de microgrids interconectadas. A principal característica do modelo é a evolução de um antigo modelo centralizado, onde cada rede elétrica passa a ser composta por redes menores e independentes, as microgrids. A ideia é que cada microgrid tem autonomia e maior controle sobre as demandas e restrições de si mesma. A abordagem segue com duas camadas de comunicação, onde a camada mais baixa diz respeito à comunicação interna da microgrid (cargas, geradores e baterias distribuídas) e a mais alta camada gere a comunicação externa entre o sistema elétrico. Os resultados da proposta atribuíram grande confiabilidade ao modelo devido ao caráter autônomo das microgrids. Os autores também concluíram que o modelo distribuído reduz custos em relação ao modelo centralizado.

É interessante notar que os modelos que utilizam a abordagem de distribuição de processamento e tomada de decisão, também utilizam agentes autônomos. Além do mais, o trabalho de Wang et. al. [2015], apesar de não usar diretamente MAS, ressalta o caráter autônomo, comunicativo e descentralizado das microgrids como fatores relevantes nos resultados. Em relação ao modelo centralizado de Ferreira et. al. [2013] a característica mais importante a ser ressaltada é a adaptabilidade do algoritmo genético ao ambiente de falhas. Apesar disso, o número de operações pode aumentar consideravelmente quando comparado aos outros modelos. Com base nesses resultados este trabalho tem por ideal propor um modelo de MAS distribuído e descentralizado, minimizando o número de operações de chaveamento.

### **3. Problema da autorrecuperação da rede elétrica de distribuição**

Nesse ponto do trabalho vale delimitar alguns aspectos da rede que serão levados em consideração para a formulação da proposta de modelo de MAS. O modelo utilizado é baseado no sistema de 33 nós do IEEE, onde algumas adaptações foram realizadas nas linhas de reserva (tie lines). A Figura 1 mostra este modelo.

No modelo em questão, todos os nós estão sendo alimentados através da linha ativa que os ligam. Os nós no modelo são entidades que demandam energia da rede elétrica. As linhas de reserva (ou tie lines) são linhas ligadas estrategicamente de forma a servirem de caminho alternativo para o suprimento em casos de falha, condição primordial para a abordagem aqui proposta. É importante salientar que as mesmas devem permanecer abertas, de modo que não formem ciclos na rede.

A proposta de autorrecuperação considera, durante todo o seu processo, restrições que serão tratadas de maneira implícita nas próximas seções do trabalho e, portanto, serão explicitadas a seguir:

- I. A rede elétrica deverá ser sempre radial;
- II. O fluxo da corrente nas linhas não deve ultrapassar as capacidades dos fios [Sharma, Srinivasan e Trivedi 2016], isto é

$$i_n \leq i_{max} ,$$

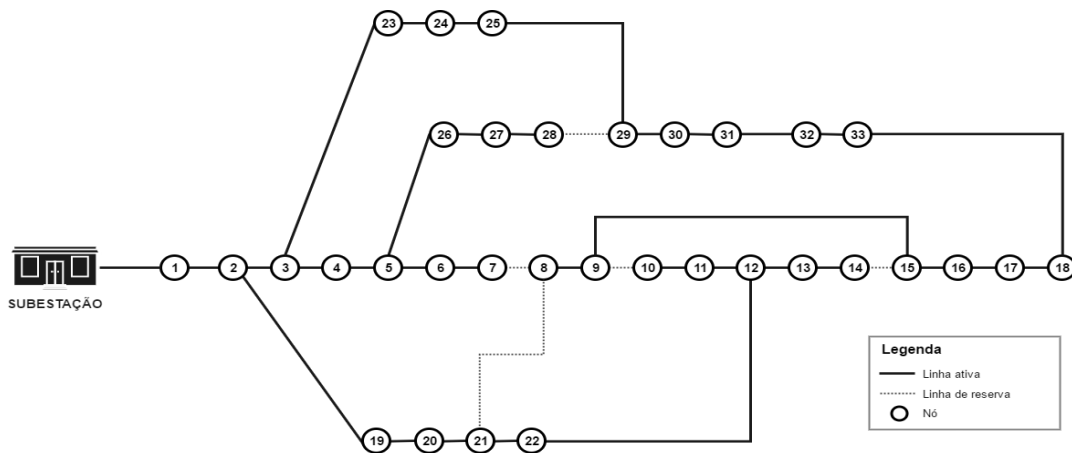
onde  $i_n$  é a corrente da linha em questão e  $i_{max}$  é a capacidade máxima de corrente dessa linha;

- III. A tensão fornecida aos nós deverá sempre estar nos limites de tensão da rede, então

$$T_{min} \leq T_n \leq T_{max} ,$$

onde  $T_n$  é a tensão que chega ao nó e  $T_{min}$  e  $T_{max}$  são as tensões mínimas e máximas da rede;

- IV. A rede elétrica deve possuir linhas de reserva abertas de forma que permitam a restauração do suprimento de energia através de caminhos alternativos.



**Figura 1. Modelo de 33 nós utilizado na proposta de autorrecuperação da rede elétrica (adaptado de 33-bus by IEEE).**

O modelo utilizado considera apenas um alimentador, que é representado pelo primeiro nó do sistema, a saber, a subestação do sistema de distribuição. O problema apresentado aqui consiste em simular uma falha em uma das linhas de distribuição e o objetivo do sistema será a tentativa de autorrecuperação de quantos nós forem possíveis.

#### 4. Modelagem do sistema multiagente proposto

O objetivo da presente abordagem é recuperar o fornecimento de energia nas cargas em ambientes de falta, utilizando o menor número possível de operações de chaveamento e uma solução distribuída. Para a abordagem é utilizado um sistema multiagente que será o responsável por coordenar a tomada de decisão e por gerenciar as operações de chaveamento na rede. O sistema contará com dois tipos de agente: o agente de carga (AC) e o agente de chaveamento (SW). O agente de carga será o responsável por manter unicamente a leitura das informações que chegam ao nó onde ele reside e deve conhecer

o endereço apenas dos agentes de carga adjacentes a ele. O agente de chaveamento é um agente responsável unicamente por manter o controle da chave que liga dois nós. Portanto, para o modelo proposto, serão 34 AC, um para cada um dos 33 nós da topologia e um para representar a subestação, e 38 SW, um para cada linha (ativa e de reserva). Além disso, num primeiro momento, cada AC só terá o conhecimento dos endereços dos AC adjacentes a ele, o que significa que, por exemplo, o AC do nó 8 (simplesmente AC 8) conhece e se comunica apenas com os AC 7, AC 9, e AC 21. É importante observar que para essa estrutura de comunicação as tie lines são levadas em consideração, entretanto, estas permanecem desligadas. Isso nos leva a concluir que a topologia da comunicação entre os agentes é a mesma topologia da rede elétrica.

Para que seja possível o processo de autorrecuperação, será considerada uma falha na rede de forma que alguns nós fiquem sem o fornecimento de energia. Para este exemplo, será definida uma falha na linha que liga os nós 22 e 12, provocando uma falta para um conjunto N de nós formados pelos nós 10, 11, 12, 13 e 14. Assim

$$N = \{10, 11, 12, 13, 14\}.$$

O algoritmo de autorrecuperação compreende quatro passos que serão descritos abaixo e a seguir discutidos.

**Passo 1.** Isolar a área em falta: uma vez ocorrida a falha, cada AC do conjunto N detecta, isoladamente, a falta de energia. A partir de então, cada AC comunica seus vizinhos sobre a falta e, ao mesmo tempo, recebe os status dos mesmos, permitindo assim que os AC detectem, entre si, quais AC adjacentes possuem fornecimento normal de energia. No exemplo, o AC 10 detectará que ele mesmo não possui abastecimento de energia bem como seu adjacente AC 11, mas que AC 9 está recebendo carga normalmente. A partir daí é possível delimitar (isolar) a área que sofreu falta, no caso, o conjunto N.

**Passo 2.** Definir o agente ativo: definir um agente ativo significa definir qual AC dos que sofreram a falta (no caso, de N) será o agente que tomará as decisões em nome de toda a área em falta (aqui chamada de ilha<sup>1</sup>). Ao se definir um agente ativo (AA), automaticamente todos os demais são agentes do conjunto N serão agentes passivos (AP). A escolha do AA pode se dar de várias formas, mas para este trabalho será utilizado o seguinte critério: o AC mais externo (o que possui pelo menos um adjacente com carga) com maior ID<sup>2</sup> será o AA da ilha. Se essa escolha falhar o algoritmo é terminado e a potência não será restaurada, pois significa que não há *tie lines* para religar a ilha. Quando eleito o AA da ilha, todos os AP da mesma devem enviar os endereços e os status de seus AC adjacentes e informar ainda os endereços dos SW que residem nas linhas que cada nós conhece, informação importante pois é através dela que o AA realiza as operações de chaveamento. No exemplo proposto, o AA escolhido seria o AC 14.

**Passo 3.** Religar a ilha: uma vez eleito, o AA deverá exercer o papel de verificar se é possível religar a ilha à rede elétrica por outra linha e, se sim, escolher qual a melhor

---

<sup>1</sup> A nomenclatura “ilha” não significa que o algoritmo utiliza estratégia de ilhamento. A “ilha” dita aqui é uma consequência da falta na rede.

<sup>2</sup> O ID de um agente pode variar dependendo da plataforma onde ele é implementado. No presente problema, o ID está atrelado ao número da barra onde o agente reside.

forma de religá-la. Essa etapa do algoritmo pode levar em consideração diferentes variáveis da rede elétrica, como a tensão necessária para religar a ilha à rede, se a rede é capaz de suprir a demanda de tensão da ilha, se os limites de corrente da tie line comportam a demanda da ilha, entre outras. É importante ressaltar que essas informações serão pontuais, já que cada AC só possui informações de seu próprio nó e status dos nós adjacentes. No exemplo, o AC 14 decidiria se ligaria a ilha através da chave de si próprio ou do AC 10.

**Passo 4.** Realizar operações de chaveamento: se há possibilidade de religar a ilha e já é escolhida a melhor forma de como fazer isso, o AA comunica, primeiramente o SW que mantém controle da chave onde ocorreu a falta (no exemplo, o SW entre o AC 12 e AC 22) e este a abre, evitando assim que, ao se restaurar o abastecimento por aquela linha, haja ciclos na rede. Após isso o AA comunica o SW que mantém o controle da chave da tie line a ser ligada e este, por sua vez, realiza o fechamento da chave, restaurando assim a potência em todos os nós da ilha.

## **5. Resultados esperados e características**

Há muitas características a serem ressaltadas e discutidas a respeito do algoritmo proposto. A mais proeminente é que todo o agente de carga é um potencial agente de carga ativo. Isso é verdade porque não é possível saber onde haverá falha, e daí todo AC no sistema precisa ter a capacidade de se tornar um AA. De modo análogo, todo o agente de carga também é um potencial agente de carga passivo. Logo, fala-se de somente dois tipos de agente no sistema, o agente de carga, que hora é AA, hora é AP e o agente SW.

Uma outra característica importante é que a forma como os agentes enxergam o sistema permite que o MAS proposto seja altamente escalável, já que, ao adicionar ou remover novas cargas no sistema elétrico, somente os agentes adjacentes deverão ser adaptados para recebê-las. Por outro lado, cada agente do sistema exige igual poder computacional, o que pode aumentar o custo para sistemas elétricos com muitos nós.

O número de operações de chaveamento durante a autorrecuperação de uma rede elétrica é um fator muito relevante e o modelo proposto tem a capacidade de operar tal feito com um número constante de dois chaveamentos nos casos de sucesso: um para abertura da chave para a linha defeituosa e outro para fechamento da chave para a tie line que fornecerá energia para a ilha.

Outro ponto para observação é a extrema dependência do sucesso da restauração com o número de tie lines e a forma como elas estão alocadas no sistema. Isso significa que quanto maior o número de tie lines, maior serão as chances de sucesso do sistema, ao passo que a recíproca também é verdadeira. Podemos chamar esse fenômeno de granularidade da rede.

Para trabalhos futuros, é interessante pensar na integração do modelo às fontes de energia renováveis e baterias distribuídas ao longo da rede. Esse fato pode aumentar as chances de sucesso da autorrecuperação, além de diminuir a dependência do modelo com o número de tie lines do sistema elétrico. Nesse sentido, o trabalho de Sharma, Srinivasan e Trivedi [2016] evidencia que a taxa de sucesso na recuperação de nós em

falta é aumentada se levadas em consideração fontes de energia distribuídas pela rede. Portanto pode ser possível aliar trabalhos desse tipo ao modelo aqui proposto.

## **6. Conclusão**

O modelo proposto é pertinente à realidade dos smart grids e pode oferecer uma nova maneira de implementar a autorrecuperação nessas redes. O modelo aqui apresentado tem foco na natureza distribuída dos sistemas multiagente e na sua alta escalabilidade, por isso pode se tornar vantajoso no sentido de tornar o processo de autorrecuperação mais simples e rápido. O algoritmo de autorrecuperação possui quatro passos que envolve apenas a parte da rede afetada pela falta e é realizado, nos casos de sucesso, com um número constante de duas operações de chaveamento.

Para implementar o sistema aqui proposto é usada a plataforma JADE, pois esta atende à característica descentralizada dos sistemas multiagente de maneira simples e oferece uma API amigável e de largo suporte por sua comunidade [Bellifemine 2007]. Para trabalhos futuros pretende-se apresentar os resultados da simulação desse sistema proposto além de testá-lo utilizando modelos de redes elétricas com maior número de nós e de alimentadores, verificando assim sua eficácia, escalabilidade, desempenho e outros parâmetros do sistema que permitam averiguar sua viabilidade.

## **Referências**

- Bellifemine, F., Caire, G. and Greenwood, D. (2007) “Developing Multi-Agent Systems with JADE”, Jhon Willey & Sons, Reino Unido.
- Ferreira, L. R., et. al. (2013) “Solução do Problema de Self-Healing para Redes de Distribuição Radiais Através de Otimização via Algoritmo Genético”, Universidade de Curitiba.
- Lambiase, C. B. (2012) “Aplicação de Self Healing em Sistemas Elétricos”, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Reis, L. P. (2003) “Coordenação em Sistemas Multi-Agente: Aplicações na Gestão Universitária e Futebol Robótico”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, UP, Porto, Portugal.
- Saraiva, F. O. (2015) “Aplicações Híbridas entre Sistemas Multiagentes e Técnicas de Inteligência Artificial para Redes Inteligentes de Distribuição de Energia Elétrica”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, USP, Brasil.
- Sharma, A., Srinivasan D. and Trivedi A. (2016) “A Decentralized Multi-Agent Approach for Service Restoration in Uncertain Environment”, IEEE publishing.
- Souza, F. A. (2015) “Modelo Baseado em Sistema Multiagente para Autorrecuperação com Corte Seletivo de Carga e Ilhamento com Geração Distribuída Para Redes Elétricas Inteligentes”, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPR, Brasil.
- Wang, Z., et. al. (2015) “Networked Microgrids for Self-Healing Power Systems”, IEEE publishing.