

Modelando Sistemas Multiagentes para Simulação Computacional de Redes Elétricas Inteligentes

Filipe de Oliveira Saraiva, Eduardo Nobuhiro Asada

Resumo—As redes elétricas inteligentes - também conhecidas como *smart grids* - são a próxima geração dos sistemas elétricos de potência, objeto de estudo de vários pesquisadores da área. As promessas de novas funcionalidades que estas redes trazem, pressupõe uma mudança conceitual dos sistemas elétricos de potência, alterando profundamente algumas concepções teóricas e práticas da área e requerendo o desenvolvimento de novos métodos e abordagens para estudos sobre o tema. Neste trabalho, focando principalmente nas mudanças que as redes elétricas inteligentes trarão aos sistemas elétricos de distribuição, faz-se uma revisão bibliográfica sobre o que seriam os *smart grids*, e pondera-se sobre de que maneira sua concepção impõe a necessidade da utilização de novas técnicas computacionais para seus estudos. Relaciona-se o conceito apresentado de redes elétricas inteligentes com sistemas computacionais distribuídos e inteligência artificial distribuída, sugerindo ao final o emprego de técnicas de modelagem de sistemas multiagentes para futuras pesquisas sobre o assunto.

Index Terms—*Smart Grids, Sistemas Multiagentes, Inteligência Artificial Distribuída, Sistemas Distribuídos*

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência, em especial os sistemas de distribuição, estão passando por uma mudança radical em seu conceito e projeto. A tentativa de redução do uso de fontes de energia muito poluentes, a busca por uma maior eficiência energética, a necessidade de utilização de geração distribuída e a desregulação do mercado impulsionam grupos de pesquisa para estudos que visam adicionar uma “camada de informação” ao sistema elétrico.

Pesquisadores trabalham para que essa camada de informação possa prover à rede elétrica funcionalidades que auxiliem no gerenciamento do sistema, tornando-o mais confiável e transparente para os operadores, além de permitir que o próprio sistema execute tarefas tais como reconfiguração, restauração do serviço de forma automática, acompanhamento pormenorizado da demanda e do consumo, redução das perdas, entre outras [1]. Seriam estes os *smart grids* - as “redes elétricas inteligentes”.

Este tema tornou-se rotineiro na agenda de governos e organizações com interesse na questão energética. Por exemplo, o painel sobre mudanças climáticas da ONU realizado no ano de 2010 em Copenhague, contou com um evento satélite direcionado a esta tecnologia [2]. A Comissão de Energia da União Europeia (*European Commission Energy*), em seu relatório sobre o planejamento energético para 2020, aponta que investirá maciçamente em uma nova iniciativa onde [3]:

(...)smart grids to link the whole electricity grid system, from the offshore wind farms in the North Sea, solar plants in the South and

existing hydro-electric dams, to individual households, while making power networks more intelligent, efficient and reliable

Apesar de haver esse projeto para médio prazo na União Europeia, já existem iniciativas que utilizam algumas das funcionalidades dos *smart grids* hoje. A cidade portuguesa de Évora tornou-se um laboratório para o projeto de redes inteligentes da EDP - Energias de Portugal¹, empresa do mercado energético daquele país. Os habitantes dessa cidade contam com medidores inteligentes que permitem monitoramento e acompanhamento mais eficiente do consumo (inclusive através da internet), e a empresa consegue detectar e resolver anomalias da rede com maior rapidez. Este acompanhamento permitirá à concessionária personalizar um plano de consumo para aqueles clientes que se encontram em um perfil específico. Além disso, há um plano de incentivo para a microprodução de energia em casas residenciais, através de painéis fotovoltaicos ou pequenas turbinas eólicas ligadas diretamente ao sistema de distribuição. Neste cenário, os outrora consumidores de energia passarão também a serem fornecedores para a concessionária.

A adequação destas funcionalidades pressupõe uma profunda modificação na estrutura atual dos sistemas elétricos. Mas para além dessa questão, outro impacto significativo que esta tecnologia deve causar está na forma como engenheiros e cientistas da área trabalham suas pesquisas em tópicos como operação e expansão dos sistemas de distribuição. Dada as profundas mudanças que os *smart grids* trarão tanto para a topologia quanto para a operação das redes, os atuais métodos computacionais utilizados para pesquisas nessa área deverão ser atualizados para este novo paradigma, outros métodos serão criados e novas tecnologias para simulação desses sistemas serão avaliadas.

Neste cenário, o presente artigo se propõe a analisar a aplicação de sistemas multiagentes [4] como uma alternativa viável à pesquisa de simulação de sistemas elétricos de distribuição do tipo *smart grids*. A escolha do uso de sistemas multiagentes é respaldada pela condição intrinsecamente distribuída dos *smart grids*, onde tanto a medição de dados quanto o tráfego dos mesmos, realizada por equipamentos geograficamente dispersos e alocados ao sistema, é possível.

Este artigo explicará as características dos *smart grids* e os conceitos de sistemas distribuídos e inteligência artificial distribuída, deduzindo que a aplicação de sistemas multiagentes é um caminho interessante a ser considerado para a simulação computacional das redes elétricas inteligentes.

¹Maiores informações em <http://www.inovcity.pt/>

A próxima sessão abordará os conceitos de *smart grids* e as funcionalidades que os pesquisadores pretendem implementar nessa nova geração de sistemas elétricos. A sessão III apresenta os conceitos de sistemas computacionais distribuídos e situa os *smart grids* neste tipo de sistema. Em seguida, a sessão IV conceitua sistemas multiagentes e inteligência artificial distribuída. Na sessão V discutimos e exemplificamos as funcionalidades de um equipamento acoplado a um sistema elétrico inteligente modelado e simulado como um agente. A seguir, a sessão VI expõe nossas conclusões sobre os estudos realizados.

II. Smart Grids - REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Grupos de pesquisa situados em universidades e empresas ao redor do mundo se debruçam no estudo de uma proposta para a nova geração de sistemas elétricos de potência, que integre avanços tecnológicos em áreas como computação, telecomunicações, sistemas distribuídos e inteligência artificial às etapas de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica.

Existem várias denominações para referenciar os projetos com essa finalidade, entretanto a mais comum utilizada hoje chama-se *smart grids* - as “redes inteligentes”. A combinação das tecnologias citadas anteriormente tem potencial para prover uma camada de comunicação às redes elétricas, permitindo a troca de informações sobre o estado da rede entre equipamentos alocados ao sistema.

Estes dados coletados e trocados, além de permitirem um controle mais eficaz sobre o estado do sistema elétrico e uma melhor observação das características da rede para os operadores, também alimentará bancos de dados ou bases de conhecimento que serão utilizados por sistemas especialistas para desempenhar alguma função específica do *smart grid*, notadamente auxiliando o processo de tomada de decisão durante intervenções autônomas da rede.

Esta nova geração de sistemas elétricos de potência transformaria os sistemas elétricos convencionais em um grande “sistema de informação” computacional, onde as características já mencionadas de controle distribuído e conhecimento do estado da rede possibilitariam interessantes funcionalidades. Entre estas, destacam-se [1], [5]:

- Auto-recuperação do sistema;
- Alta qualidade da energia entregue;
- Resistência à ataques cibernéticos;
- Possibilidade de utilização em larga escala de geração distribuída;
- Acomodação de equipamentos para estoque de energia;
- Controle e acompanhamento pormenorizado do consumo por parte do usuário;
- Maior acompanhamento da demanda dos usuários pelas empresas de distribuição;
- Reconfiguração do sistema de distribuição a partir de medições observadas “on-line”;
- Minimização dos custos de operação e manutenção.

A Figura 1 apresenta diversos equipamentos componentes de um *smart grid*, divididos em camadas. Percebe-se que todos eles se utilizam da camada de comunicação para troca de

informações sobre medição do consumo, acompanhamento da geração, controle sobre o fornecimento de energia ao sistema de distribuição, comunicação entre os componentes, etc.

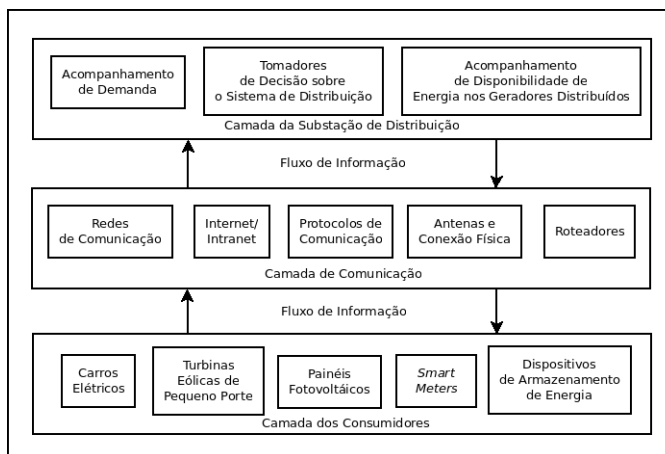


Figura 1. Componentes de um *Smart Grids*

Os protocolos de comunicação e a divisão de operações entre os equipamentos é algo que hoje já se encontra em discussão: por exemplo, o documento IEEE 2030 [6] é uma iniciativa de padronização destas tecnologias, que permitirá que equipamentos diferentes cumpram suas funções e consigam trocar informações entre si.

O esforço empreendido no desenvolvimento desta tecnologia é motivado por dois movimentos que ganharam grande visibilidade na última década, em especial entre os atores do mercado global de energia - a crescente desregulação deste mercado e a busca pela eficiência energética a partir dos preceitos da responsabilidade ambiental [5]. De fato, existem muitos exemplos, de variados países e blocos econômicos, que estudam a implementação de *smart grids* em seus sistemas elétricos. Alguns destes projetos são narrados em [1], [3], [7], [8], [9], [10], [11].

As funcionalidades das redes elétricas inteligentes citadas anteriormente serão possíveis a partir do acompanhamento do sistema elétrico a ser realizado por diferentes equipamentos, com funções diferentes, acoplados ao sistema e que trocarão informações entre si através da rede de comunicação presente no *smart grid*.

Por exemplo, a funcionalidade de auto-recuperação do sistema elétrico exige que o sistema possa verificar onde houve a falta de energia e, a partir de cálculos a serem realizados, identificar se é possível rotear o fluxo de potência para que ele chegue ao trecho defeituoso por outro caminho. Se for possível, o sistema elétrico deverá coordenar uma série de operações afim de assumir a configuração correta para cumprir a funcionalidade.

Tanto para esta funcionalidade quanto para as demais, será necessário que equipamentos distribuídos troquem informações entre si e realizem tomada de decisão para atingir algum objetivo, que seria uma funcionalidade específica em si. Ou seja, em termos de sistemas computacionais, *smart grids* são sistemas tipicamente distribuídos.

Para aprofundar mais essa constatação e fazer uma análise

conceitual comparativa, a próxima seção explica sobre sistemas distribuídos e apresenta as características das redes elétricas inteligentes que nos permitem enxergá-la como um sistema desse tipo.

III. SISTEMAS DISTRIBUÍDOS

Sistemas distribuídos são sistemas compostos por hardware ou software localizados em sistemas computacionais interligados em rede, que se comunicam e coordenam suas ações apenas enviando mensagens entre si [12]. O conceito de sistemas distribuídos é amplamente trabalhado na ciência da computação e telecomunicações, nas linhas de pesquisa de redes, processamento distribuído, etc.

A principal motivação para o desenvolvimento de sistemas distribuídos vem da necessidade do compartilhamento de recursos e escalonamento de processamento para tarefas que demandam muitas requisições, onde técnicas distribuídas poderão levar o sistema a adquirir uma maior eficiência. Exemplos de sistemas desse tipo podem ser encontrados na estrutura de servidores web, onde vários computadores processam e respondem às requisições de algum serviço específico.

Outra área de aplicação de sistemas distribuídos são arquiteturas computacionais onde os componentes de um mesmo sistema estão, obrigatoriamente, dispersos espacialmente. Por exemplo, sistemas onde são necessários sensores espalhados em um dado ambiente com a finalidade de monitorá-lo.

Sistemas elétricos do tipo *smart grid* podem ser encarados como pertencentes a esta segunda grande área de aplicação de sistemas distribuídos, pois existe a necessidade de equipamentos que monitorem o estado do sistema, e também de que estes mesmos equipamentos estejam dispersos na rede.

Entre algumas características típicas de sistemas distribuídos, podemos citar [12]:

- Concorrência - tarefas são processadas concorrentemente no ambiente, ou seja, quando uma tarefa tem seus pré-requisitos completos e recursos disponíveis, ela estará sendo executada em uma máquina. Caso outra tarefa também esteja pronta para o processamento, a mesma poderá ser executada em outra máquina pertencente ao sistema.
- Sem horário global - quando programas precisam cooperar para resolver determinada tarefa, eles fazem isso através de trocas de mensagens. Isso é executado dessa forma por conta da dificuldade em sincronizar o tempo nas máquinas interligadas.
- Falhas independentes - pode ocorrer de algumas máquinas alocadas no sistema distribuído falharem em suas tarefas. Isso não impedirá que demais máquinas continuem seus respectivos processamentos. Apesar de, em alguns casos, a falha de uma máquina levar à falha total do sistema, é possível criar metodologias de detecção e tratamento destas incorreções quando detectadas - as chamadas técnicas de tolerância à falhas.
- Heterogeneidade - não é necessário que o sistema computacional distribuído seja construído apenas com equipamentos de um mesmo tipo. Pelo contrário, um sistema distribuído pode ser composto por máquinas para diversas

finalidades, que cooperarão entre si para atingir um objetivo dado.

- Protocolos abertos de comunicação - é necessário que os diversos componentes do sistema consigam comunicar-se entre si. Para tanto, torna-se imprescindível que protocolos abertos de comunicação sejam utilizados, possibilitando o envio, recebimento e entendimento de mensagens entre os componentes.
- Transparência - para o usuário, sistemas distribuídos não aparentam ser formados por várias máquinas interconectadas. Normalmente, aquele que utiliza o sistema trabalha apenas com uma máquina, e o sistema gerencia a divisão das tarefas autonomamente.

Com a conceituação e as características dos sistemas distribuídos exposta, pode-se fazer uma comparação entre as características desejadas de um *smart grid* e as presentes em um sistema distribuído computacional. A Tabela I apresenta alguns desses elementos:

Tabela I
CARACTERÍSTICAS COMUNS ENTRE SISTEMAS DISTRIBUÍDOS E *smart grids*

Sistemas Distribuídos	<i>Smart Grids</i>
1) Concorrência - processos sendo executados simultaneamente em máquinas diferentes.	1) Concorrência - processos diferentes executados em máquinas diferentes do sistema de distribuição.
2) Heterogeneidade - diferença entre máquinas no mesmo sistema distribuído.	2) Heterogeneidade - máquinas com funções distintas estarão alocadas na mesma rede de distribuição.
3) Sem horário global - sistemas coordenam suas atividades a partir da troca de mensagens.	3) Sem horário global - equipamentos do sistema usam a camada de informação para coordenar tarefas.
4) Falhas independentes - uma falha poderá afetar parte de um sistema distribuído, sem necessariamente afetar o sistema inteiro.	4) Falhas independentes - falha de equipamentos específicos de uma tarefa podem não afetar os relacionados à outra tarefa.
5) Protocolos abertos de comunicação - é necessário que os diversos componentes do sistema consigam comunicar-se entre si através de um protocolo comum.	5) Protocolos abertos de comunicação - os diferentes equipamentos alocados ao sistema devem utilizar um protocolo comum para troca de mensagens.

Dada as similaridades de características, podemos aferir que as técnicas de sistemas distribuídos são fortes candidatas para servirem de ferramentas à simulações computacionais mais fiéis dos sistemas de distribuição do tipo *smart grids*.

Entretanto, ainda nos falta avaliar mais uma característica fundamental dos sistemas elétricos de nova geração: a capacidade de resolver problemas de forma autônoma, a partir da observação do estado do mesmo.

IV. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL DISTRIBUÍDA E SISTEMAS MULTIAGENTES

Um *smart grid* tem diversas funcionalidades a serem executadas pelos sistemas nele instalados. Cada funcionalidade dessas pode ser vista como um objetivo a ser atingido, por exemplo, redução das perdas, recuperação do sistema, gerenciamento da demanda, entre outras. Os equipamentos

instalados observarão o estado da rede, comunicar-se-ão entre si e executarão uma ação, ou um conjunto de ações, afim de alcançar seu objetivo.

Esta descrição é muito similar ao conceito de inteligência artificial proposto por alguns autores. Por exemplo, para Russel e Norvig, inteligência artificial é o estudo e implementação de agentes. Agentes são abstrações para softwares ou hardwares que procuram atingir um dado objetivo a partir de tomadas de decisão e execução de ações baseadas no estado do ambiente em que o mesmo se encontra [13].

A aplicação de técnicas de inteligência artificial em *smart grids* é interessante na medida em que, para desempenhar suas funções, as redes inteligentes deverão ter certo nível de autonomia para executar ações de reconfiguração sobre alguns de seus parâmetros (chaveamentos, por exemplo), a partir da observação do ambiente.

Entretanto, por já situarmos os *smart grids* como sistemas computacionais distribuídos, seria interessante utilizarmos de metodologias e técnicas que relacionassem sistemas distribuídos com inteligência artificial, trabalhando simultaneamente as características dessas duas áreas.

Existe uma área específica da inteligência artificial que trabalha sistemas inteligentes não-isolados, ou seja, agentes que se relacionam entre si em dadas condições. Esta área chama-se inteligência artificial distribuída [14], e seu foco de pesquisa se dá no estudos de modelos e técnicas onde a característica distribuída dos agentes é inerente à arquitetura do sistema [15].

Se nos sistemas inteligentes clássicos existe apenas um agente interagindo com o ambiente, na inteligência artificial distribuída parte-se para o projeto e implementação de sistemas compostos por vários agentes, que interagem entre si a partir da troca de mensagens e execução de ações que repercutem no ambiente, afetando assim outros agentes. Esse tipo de sistema é conhecido como sistema multiagente [16].

Em sistemas de inteligência artificial distribuída existe uma ênfase maior no “comportamento social” dos agentes. A perspectiva é que técnicas dessa área possam dar subsídios para coordenar um conjunto de agentes, alguns inclusive com funcionalidades diferentes entre si, para simular um determinado comportamento de uma sociedade cujo objetivo é alcançado a partir das interações entre os agentes. Fala-se que, a partir do comportamento dessa sociedade, emerge a ação ou conjunto de ações que o sistema executa para atingir seu objetivo [4].

Neste contexto, onde a interação é uma característica essencial do sistema, o aprendizado em sistemas multiagente a partir de uma visão macro do modelo é deslocado para estas interações. Aqui não há somente agentes que interagem exclusivamente com o ambiente, isolado de potenciais outros agentes que convivem no mesmo ambiente.

Para sistemas multiagentes, a troca de informações entre os agentes componentes do sistema é uma forma de subsidiar o processo de aprendizado. Por exemplo, um sistema de controle gerenciado por vários agentes, quando entra em um estado instável, um agente poderia perceber a perturbação e enviar mensagens aos demais, para que ações fossem tomadas afim de estabilizar o controle novamente.

Interações entre os agentes permite a observação de com-

portamentos que “emergem” da sociedade de agentes. Decisões tomadas coletivamente a partir de análise e obtenção distribuída de dados reforça a característica de “aprendizado social” em sistemas multiagentes, ao contrário do aprendizado isolado sem interação inter-agentes dos sistemas inteligentes convencionais.

Inclusive, para Woodridge, a simulação da inteligência humana sem levar em conta as interações sociais é falha. Como seres humanos que vivem em comunidade, muito de nosso aprendizado e tomada de decisão constituem-se como fenômenos passíveis de influencia ou intervenção externa ao homem que as executa. Em termos de agentes, o aprendizado híbrido da inteligência artificial convencional com a proporcionada pela interação em ambientes multiagentes é mais próxima da observada em seres humanos que a aquisição de conhecimento ou tomada de decisão performada isoladamente [4].

Aplicando estes conceitos ao cenário de *smart grids*, é possível modelar equipamentos das redes elétricas inteligentes como agentes. A troca de mensagens dos equipamentos do sistema elétrico pode ser representada pela troca de mensagens em um sistema multiagente. Estas mensagens fornecem subsídios para a tomada de decisão e realização de ações do sistema elétrico, e esta parte é passível de implementação nos sistemas multiagentes através de técnicas de sistemas inteligentes, como metaheurísticas [13], teoria dos jogos [16], aprendizado por reforço [14], e outras.

Para ilustrar a possibilidade de modelagem de sistemas multiagentes para simulação computacional de *smart grids*, a próxima sessão focará um exemplo dessa aplicação.

V. MODELANDO EQUIPAMENTOS DE *Smart Grids* COMO AGENTES

A principal característica dos *smart grids* que permitirá a implementação das novas funcionalidades no sistema elétrico é a possibilidade de comunicação entre os equipamentos. Por exemplo, os medidores de consumo instalados nas cargas do sistema devem enviar dados sobre o consumo e outras medidas para um sistema alojado na central de distribuição afim de que estas informações possam subsidiar funcionalidades como a reconfiguração do sistema, auto-recuperação, entre outras.

Podemos modelar agentes em um sistema multiagente para simular alguma destas funcionalidades. Existem várias linguagens e *frameworks* para sistemas multiagente [17] que podem ser utilizados para a implementação, mas como neste trabalho nos interessa tão somente o algoritmo em si, utilizaremos pseudocódigo para exemplificar o modelo.

Todo agente em um sistema multiagente tem um identificador único [18], que serve como uma espécie de endereço [14] para recebimento de mensagens. Isso permite que os agentes troquem as mensagens entre si de forma correta, sempre enviando a mensagem para um agente ou para um conjunto de agentes que se deseja proceder a comunicação. Na modelagem aqui apresentada teremos os agentes que ficam nas cargas de um sistema elétrico de distribuição chamados de *loader Agent' n'*, onde $n = 1, 2, 3, \dots, k$, sendo k o número total de cargas do sistema.

Assim, serão representados os agentes *loaderAgent1*, *loaderAgent2*, *loaderAgent3*, ..., *loaderAgent'k*'. O agente que representará o equipamento na central do sistema de distribuição será chamado de *feederAgent*.

O *feederAgent* deverá conhecer de antemão quantos agentes existem nas cargas da rede elétrica e qual é a atual configuração topológica do sistema de distribuição. Isso permitirá que ele identifique facilmente qual agente está em qual carga, uma informação interessante para algumas funcionalidades.

O *feederAgent* receberá mensagens com as medições feitas pelos agentes *loaderAgents* nas cargas do sistema. Sistemas multiagentes, por herdarem características dos sistemas distribuídos, são sistemas assíncronos [4] por conta da dificuldade em se definir um horário global comum para os componentes. Logo, o tratamento das ações a serem realizadas pelos agentes deve levar esta característica em consideração.

Pode-se programar o *feederAgent* para definir um tempo máximo t em que ele espera os dados enviados de cada agente entre duas mensagens consecutivas. Esse tempo t deve ser um intervalo suficiente para receber as mensagens corretamente. Caso algum agente demore mais tempo que t para enviar uma mensagem, o *feederAgent* poderá enviar um alerta para a equipe de manutenção da empresa, apontando que há algo anômalo no setor onde reside o agente possivelmente defeituoso.

As operações do *feederAgent*, de acordo com as funcionalidades já comentadas nesta seção, são apresentadas no algoritmo 1

Algoritmo 1: Algoritmo do *feederAgent*

```

1: Definir  $t$ 
2: Carrega topologia do sistema
3: Carrega alocação de loaderAgents
4:  $N \leftarrow$  número de loaderAgents
5:  $M \leftarrow 0$ 
6: enquanto  $1 = 1$  faça
7:   enquanto  $((M \neq N)$  ou  $(\neg t))$  faça
8:     se Recebeu mensagem então
9:       Trata mensagem recebida
10:      Identifica autor da mensagem
11:       $M \leftarrow M + 1$ 
12:      Reinicia contagem de  $t$ 
13:     fim se
14:   fim enquanto
15: se  $t$  então
16:   Verifica agente que não enviou mensagem
17:   Emite um alerta sobre a anomalia
18: fim se
19:  $M \leftarrow 0$ 
20: fim enquanto
21: retorne

```

No algoritmo 1, a estrutura “enquanto” da linha 6 significa que o *feederAgent* executará suas operações indefinidamente, pois o mesmo está em um laço infinito. N é o número de *loaderAgents* e M o número de mensagens recebidas. Na

estrutura “enquanto” da linha 7, o critério de parada ocorrerá quando o *feederAgent* receber todas as mensagens de todos os *loaderAgents*, ou quando ele atingir o tempo limite t de espera de mensagens. Caso o *feederAgent* tenha atingido o tempo limite de espera, significa que algum ou alguns *loaderAgents* não enviaram mensagens.

Para as mensagens recebidas, o *feederAgent* faz o tratamento necessário para a funcionalidade ao qual foi implementado, identifica o autor da mensagem, incrementa número de mensagens recebidas M e reinicia a contagem de t .

Caso a estrutura “enquanto” seja finalizada por conta do tempo limite t ter sido atingido, a estrutura “se” da linha 15 faz o tratamento necessário, emitindo alertas sobre quais *loaderAgents* estão com problemas. Se a finalização for motivada pelo número de mensagens ter completado um ciclo (todos os *loaderAgents* enviaram mensagens), a variável M recebe o valor 0 novamente (linha 19) e o laço de operações do *feederAgent* se repete.

Agora, sobre os agentes nas cargas, eles devem fazer as medições que são responsáveis e enviá-las para o agente na central de distribuição.

Os *loaderAgents* são inicializados sabendo qual o nome do agente na central de distribuição responsável por receber as informações. Já em execução, cada *loaderAgent* faz a medição pela qual é responsável a cada intervalo de tempo e , e envia para a central. A leitura recorrente dentro de um intervalo é interessante pois possibilita o acompanhamento do estado do sistema. O algoritmo 2 apresenta os passos a serem executados pelos agentes nas cargas.

Algoritmo 2: Algoritmo dos *loaderAgents*

```

1: Definir  $e$ 
2: Carrega nome do agente na central
3:  $i \leftarrow$  Medição do tempo
4:  $u \leftarrow 0$ 
5: enquanto  $1 = 1$  faça
6:    $u \leftarrow$  Medição do tempo
7:   se  $u - i \geq e$  então
8:     Faz medições elétricas
9:     Envia mensagem com medições para central
10:     $i \leftarrow u$ 
11:   fim se
12: fim enquanto
13: retorne

```

No algoritmo 2, linha 3, a variável i recebe o valor da medição do tempo no momento em que o agente é inicializado. Na estrutura “enquanto” da linha 5, existe um *loop* infinito que significa que o *loaderAgent* sempre executará as instruções nesta estrutura, de forma cíclica, indefinidamente.

Na estrutura “enquanto”, na linha 6 do algoritmo 2, a variável u recebe a medição do tempo naquele momento, que em seguida será subtraído por i e comparado ao intervalo de ações do agente e na linha 7. Se a diferença entre u e i for maior ou igual a e , o agente executa as ações de realizar as medições elétricas correspondentes a sua função e enviá-las ao agente na central de distribuição. Em seguida, a variável

i recebe o valor de u , o que zera a contagem de tempo do intervalo para executar novamente as funções de medição elétrica e envio de mensagens.

Os algoritmos apresentados nesta seção, quando implementados utilizando ferramentas próprias para o desenvolvimento de sistemas multiagentes [17], conseguem simular a troca de informações entre sistemas computacionais distribuídos, algo que se espera de trabalhos de simulação de redes elétricas inteligentes.

O que fazer com os dados compartilhados entre os agentes é algo que o projetista deverá ponderar, a partir da funcionalidade de *smart grid* que pretende-se simular. Dependendo da funcionalidade, métodos de inteligência artificial podem ser aplicados e, a partir dos resultados obtidos, novos algoritmos de comunicação no sistema deverão ser implementados para proceder a reconfiguração do mesmo. No exemplo aqui apresentado, o *feederAgent* avisa uma equipe técnica de manutenção quando algum *loaderAgent* não envia mensagens no tempo adequado.

VI. CONCLUSÕES

Os sistemas elétricos da nova geração, chamados de redes elétricas inteligentes ou *smart grids*, exigem uma nova abordagem na concepção de funcionalidades para os sistemas elétricos, onde a existência de comunicação entre os equipamentos alocados ao sistema está presente e, por isso, abre novas possibilidades para funções de controle, monitoramento e configuração.

Por conta desta condição, o uso de métodos distribuídos para implementação de simulações computacionais com a finalidade de estudar as diferentes funcionalidades a serem implementadas nas redes elétricas inteligentes, são métodos bastante interessantes para este tipo de aplicação.

Além da própria natureza distribuída do objeto de estudo, a necessidade por automação exigida pelas funcionalidades imaginadas exige que métodos de inteligência computacional sejam empregados.

Este artigo conceituou os *smart grids* sob a ótica da teoria de sistemas computacionais distribuídos e da inteligência artificial distribuída. Como resultado, indicamos que o uso de sistemas multiagentes enquanto ferramenta computacional para desenvolvimento de simulações é algo que deve ser fortemente cogitado durante a etapa de decisão sobre qual técnica será utilizada para implementação. Isso é motivado pelos sistemas multiagentes, conceitualmente, ao herdarem resultados de desenvolvimento da área de inteligência artificial e sistemas distribuídos, ficam muito próximos da arquitetura buscada para as redes elétricas inteligentes.

Nesse contexto, a aplicação e estudo de sistemas de inteligência artificial distribuída tornam-se um arcabouço teórico de grande importância para a área.

Os trabalhos futuros miram no desenvolvimento da simulação de algumas funcionalidades dos *smart grids*, como auto-recuperação do sistema, reconfiguração de chaves afim de se atingir algum objetivo (redução das perdas elétricas, por exemplo), ajuste ótimo de banco de capacitores, entre outros, que expandam o modelo de comunicação e tomada de decisão implementado por multiagentes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e pela FAPESP, através da disponibilização de bolsa de pesquisa para o aluno. Os autores registram seus agradecimentos às agências.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Brown, "Impact of Smart Grid on distribution system design," in *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. IEEE, 2008, pp. 1–4.
- [2] R. Duan and G. Deconinck, "Multi-agent model and interoperability of a market mechanism of the Smart Grids," in *Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp), 2010 IEEE/IFIP*. IEEE, 2010, pp. 312–315.
- [3] E. C. Energy, *Energy 2020: A Strategy for Competitive, Sustainable and Secure Energy*. Belgium: Publications Office of the European Union, 2011.
- [4] M. Wooldridge, *An introduction to multiagent systems*. England: Wiley, 2009.
- [5] X. Wei, Z. Yu-hui, and Z. Jie-lin, "Energy-efficient distribution in smart grid," in *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 1–6.
- [6] IEEE, *IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads*. IEEE, 2011.
- [7] E. Commission, *European SmartGrids Technology Platform: Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future*. Belgium: European Communities, 2006.
- [8] Z. Jiang, F. Li, W. Qiao, H. Sun, H. Wan, J. Wang, Y. Xia, Z. Xu, and P. Zhang, "A vision of smart transmission grids," in *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE*. IEEE, 2009, pp. 1–10.
- [9] T. Bi, S. Liu, Z. Huang, and N. Hadjsaid, "The implication and implementation of smart grid in China," in *Power and Energy Society General Meeting*. IEEE, 2010, pp. 1–5.
- [10] J. Lu and Q. Ai, "Research on smart grid in China," in *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009*. IEEE, 2009, pp. 1–4.
- [11] S. Kwon, J. Kim, I. Song, and Y. Park, "Current development and future plan for smart distribution grid in Korea," in *SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar*. IET, 2008, pp. 1–4.
- [12] G. Coulouris, J. Dollimore, and T. Kindberg, *Distributed systems: concepts and design*. Addison-Wesley Longman, 2005.
- [13] S. Russel and P. Norvig, *Inteligência Artificial*. Brasil: Ed. Campus, 2004.
- [14] G. Weiss, *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. The MIT press, 1999.
- [15] A. C. B. Garcia and J. S. Sichman, "Agentes e Sistemas Multiagentes," in *Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações*, Rezende, S.O. São Paulo: Editora Manole Ltda, 2003.
- [16] Y. Shoham and K. Leyton-Brown, *Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge Univ Pr, 2009.
- [17] R. Bordini, L. Braubach, M. Dastani, A. Seghrouchni, J. Gomez-Sanz, J. Leite, G. O. Hare, A. Pokahr, and A. Ricci, "A survey of programming languages and platforms for multi-agent systems," *Special Issue: Hot Topics in European Agent Research II Guest Editors: Andrea Omicini*, vol. 30, pp. 33–44, 2006.
- [18] F. L. Bellifemine, G. Caire, and D. Greenwood, *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. Wiley, 2007.

Filipe de Oliveira Saraiva bacharelou-se em ciência da computação pela Universidade Federal do Piauí, Brasil, no ano de 2009. Atualmente é pesquisador do Laboratório de Análise de Sistemas de Energia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil. Desenvolve estudos na área de simulação computacional de *smart grids* utilizando sistemas multiagentes.

Eduardo Nobuhiro Asada recebeu título de bacharel em engenharia elétrica em 1997, tornou-se mestre em 2000 e doutorou-se em 2004, todos pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil. Atualmente é Professor Assistente da Universidade de São Paulo, em São Carlos, Brasil (EESC-USP). Pesquisa métodos de otimização, planejamento de sistemas de potência e aplicações de inteligência artificial em sistemas de potência.