

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA – CCET
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO

João Vitor Miranda Roma

Denisson Queiroz Oliveira

**SISTEMAS MULTIAGENTES EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES:
APLICAÇÕES E POTENCIALIDADES**

São Luís
2018

Informações do bolsista

Nome: João Vitor Miranda Roma

Telefone: (98) 98160-4895

E-mail: jvmr2.0@gmail.com

Informações da Instituição/Departamento

Nome: Universidade Federal do Maranhão

Endereço: Av. dos Portugueses, 1966 Bacanga - CEP 65080-805 São Luís - MA

Telefone: (98)3272-8000

E-mail: atendimento@ufma.br

Informações do(a) professor(a) orientador(a)

Nome: Denisson Queiroz Oliveira

Telefone: (98) 3272-9403

E-mail: dq.oliveira@ufma.br

RESUMO

Os sistemas elétricos inteligentes, ou *Smart grids*, são sistemas elétricos com um alto grau de aplicação de tecnologia da informação e telecomunicações, possibilitando atingir um novo patamar de automatização e operabilidade do sistema elétrico e garantindo um serviço de maior qualidade para toda a sociedade. Dentre as inúmeras possibilidades, existe a capacidade de gerenciamento da demanda do sistema elétrico em tempo real de acordo com a disponibilidade de recursos energéticos e a carga. Assim, programas de resposta à demanda celebrados entre consumidores e a concessionária de energia elétrica serão uma realidade neste novo cenário. Neste caso, os clientes que aderirem ao programa podem ser avisados para desconectar alguns aparelhos durante certos períodos de pico de demanda ao longo do dia em troca da redução natural no valor da conta, devido ao consumo em horários de tarifa mais baixas quando a rede está menos congestionada. Como o número de clientes é muito grande, sistemas de controle distribuídos nas centrais de geração, de distribuição e nos pontos de consumo são mais apropriados para essas aplicações. Um exemplo de sistema de controle distribuído são os sistemas multiagentes, onde cada agente do sistema possui objetivos próprios e é capaz de interagir com os agentes próximos. Esse projeto propõe a investigação desses sistemas multiagentes em esquemas de resposta à demanda em sistemas elétricos inteligentes. O objetivo é observar como esses diferentes agentes, cada um com seu objetivo, interagem de forma a atingir o objetivo global de diminuir a carga em determinados momentos do dia e reduzir as contas de energia.

Palavras-chave: Resposta à Demanda. Smart Grids. Sistemas Multiagentes.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Fundamentação Teórica.....	2
1.1.1. Microgrid.....	2
1.1.2. Agente Inteligente e Sistema Multiagentes.....	4
1.1.3. Smart grid.....	5
1.1.4. Resposta à Demanda.....	6
2. JUSTIFICATIVA.....	7
3. OBJETIVOS.....	10
3.1 Objetivo Geral.....	10
3.2 Objetivos Específicos.....	10
4. METODOLOGIA.....	10
4.1 Materiais e Métodos.....	11
5. RESULTADOS.....	16
6. CONCLUSÕES.....	18
REFERÊNCIAS.....	19

1. INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico inteligente, ou *Smart grid*, é uma concepção inovadora de sistema elétrico que vem sendo desenvolvida e que apresenta grandes potencialidades. Embora a definição de *Smart grid* não seja consensual, suas principais características são: a integração de recursos renováveis, geração distribuída, sistemas de sensoriamento e monitoramento de variáveis em tempo real, automatização da operação, esquemas de gerenciamento de demanda, infraestrutura de comunicação, entre outros [1]-[2].

Com todas essas potencialidades e funcionalidades, acredita-se que a implantação dos sistemas elétricos inteligentes trará ganhos consideráveis ao sistema, tanto relacionados à parte técnica, quanto na parte comercial. Esses ganhos incluem otimização da operação, aumento da confiabilidade e impacto nos índices medidos, maior qualidade de energia, maior sustentabilidade, minimização das perdas comerciais, entre outros [3]-[4].

Esses ganhos esperados trazem melhorias que serão sentidas por toda a sociedade, mas que podem ser analisados sob dois pontos de vista diferentes: o da concessionária e o do cliente. A concessionária está interessada em desenvolver aplicações que lhe permitam maximizar seus ganhos, minimizar os custos, e ao mesmo tempo atender as restrições regulatórias impostas por agências reguladoras. Por outro lado, o consumidor está interessado em atender suas próprias necessidades da forma mais eficiente e barata possível, ou seja, maximizar a utilidade da energia elétrica de acordo com suas aplicações e necessidades, e minimizar os custos finais de consumo de energia elétrica.

Em *Smart grids*, o consumidor pode atingir seus objetivos por meio do gerenciamento de demanda, que consiste em ações tomadas para gerenciar a carga de acordo com a disponibilidade de recursos. Geralmente esse aspecto é investigado a partir da ótica da concessionária, buscando soluções que permitam uma flexibilidade no fornecimento de energia elétrica a determinadas cargas nos horários de pico, sempre respeitando os limites regulatórios [5]-[6]. Sob o ponto de vista do consumidor, a investigação do gerenciamento da demanda tem um aspecto muito subjetivo, pois cada indivíduo é diferente e possui interesses distintos que se refletem no uso da energia elétrica. Essas subjetividades são capturadas ou

previamente configuradas em sistemas domésticos de gerenciamento de energia, já disponibilizados comercialmente por vários fabricantes.

Para atingir estes objetivos, um conjunto muito grande de equipamentos de monitoramento está conectado à rede de comunicações e trocando informações em tempo real. Essas informações são reunidas em controladores locais em cada unidade consumidora, que em contato com o sistema da concessionária segue as orientações enviadas pelo centro de comando.

Observando a descrição desse processo, é flagrante a dificuldade que existe em monitorar um grande número de consumidores, visto que cada um gera uma informação que deve ser enviada para o centro de controle da concessionária, onde uma decisão deve ser tomada em tempo hábil e enviada de volta para todas as unidades. Todo esse processo demanda tempo, capacidade computacional e uma infraestrutura de comunicação robusta e cara. Logo, para sistemas de grande porte, a abordagem distribuída é mais apropriada [7].

Em sistemas de controle distribuído, os controladores locais tomam decisões baseados nos dados disponíveis nas medições locais e por meio de sua própria configuração, baseados nos objetivos propostos e interações com agentes próximos, as decisões são tomadas e aplicadas. Os resultados mais visíveis são a necessidade menor de capacidade computacional e de infraestrutura de telecomunicação, embora as soluções obtidas não sejam ótimas globalmente, apenas localmente.

Dentre as abordagens possíveis para desenvolver uma arquitetura de controle distribuído em sistemas elétricos existe a possibilidade de aplicação de sistemas multiagentes. Agentes são entidades computacionais independentes que possuem características como sociabilidade, proatividade, autonomia e reatividade [8], que em emergências seguem um comportamento hierárquico cujo objetivo é determinado pelos agentes de níveis superiores, tendo em vista um bem comum.

Sob o outro ponto de vista, o da concessionária, os agentes devem interagir de forma a seguir as recomendações dadas pelo gerenciamento de demanda a fim de garantir o funcionamento equilibrado do sistema elétrico. Neste aspecto, será investigada a possibilidade de transações de cessão de energia entre agentes, ou seja, um agente abre mão de seu consumo em troca de uma compensação financeira de outro agente, com vistas à que cada agente maximize sua utilidade determinada para cada um dos períodos do dia.

1.1 Fundamentação Teórica

1.1.1. Microgrid

Uma *Microgrid* é especificada como um pequeno sistema de energia que tem três componentes principais: geradores distribuídos, centros de carga autônomos e a capacidade de operar isolados ou conectados a uma rede elétrica maior. *Microgrids* são particularmente atrativas quando vistas como componentes autônomas de sistemas de energia independentes. Os ativos conectados dentro da *Microgrid*, especialmente fontes renováveis intermitentes, podem ser coordenados e controlados de forma descentralizada. Isso permite que os diversos recursos de energia distribuída ofereçam seus benefícios completos, reduzindo a responsabilidade de coordenação e controle na rede elétrica [7].

Microgrids oferecem às redes elétricas um meio de alcançar maior adoção de recursos energéticos distribuídos sem o ônus de seu gerenciamento; microgrids assumem a responsabilidade pelo controle local de ativos, adicionando flexibilidade ao sistema de energia inteiro [7].

Uma *Microgrid* é um possível futuro paradigma do sistema de energia, formado pela interconexão de geração pequena, modular (micro-turbinas, células de combustível, painéis fotovoltaicos, etc.), combinado a dispositivos de armazenamento (volantes de inércia, capacitores de energia e baterias) e cargas controláveis em sistemas de distribuição de baixa voltagem. Tais sistemas podem ser operados interligados à rede elétrica ou ilhados, se desconectados da grade [9].

O uso do controle distribuído em uma *Microgrid* fornece soluções efetivas para uma série de problemas operacionais específicos. Por exemplo, cargas locais e unidades de produção ou armazenamento podem ter diferentes proprietários e várias decisões devem ser tomadas de forma local e independente. As *Microgrids* que operam em um mercado exigem que o controlador de cada unidade que participe no mercado tenha um certo grau de inteligência. Além disso, os recursos de energia distribuídos locais não só vendem energia para a rede, mas também podem ter outras tarefas, como: produção de calor para instalações locais; alimentação de cargas críticas locais e preservação de energia ou combustível o suficiente para fornecê-los por algum tempo; capacidades gerenciamento de carga; restauração de um apagão; garantir uma transição perfeita da rede do modo conectado ao modo ilha e vice-versa; e controle de tensão [9].

As abordagens usadas atualmente para resolver o problema da restauração de uma rede, operam de forma centralizada, de modo que um otimizador de soluções central deve ler todos os dados do sistema e processá-los para obter a solução. A principal vantagem do controle centralizado é que ele pode fornecer a melhor solução, especialmente para sistemas de pequena escala. No entanto, vários desafios podem impedir o uso de controle centralizado em redes de distribuição futuras: o grande número de pequenas unidades de geração distribuída e o aumento do nível de incerteza devido a recursos renováveis, veículos elétricos e demanda variável. Portanto, as redes inteligentes representam uma solução promissora para enfrentar esses desafios por meio do desenvolvimento e aprimoramento da automação de distribuição, da operação distribuída de funções e da redução ou eliminação da intervenção humana por meio da implantação aprimorada de informações, tecnologias de comunicação bidirecionais e gerenciamento de dados [10].

1.1.2. Agente Inteligente e Sistema Multiagentes

Um agente inteligente, possui as seguintes três características.

- Reatividade: um agente inteligente é capaz de reagir às mudanças em seu ambiente em tempo hábil e leva alguma ação com base nessas mudanças e na função que é projetada para alcançar.
- Pró-atividade: os agentes inteligentes exibem um comportamento orientado por objetivos. O comportamento dirigido a objetivos reconhece que um agente mudará dinamicamente seu comportamento para alcançar seus objetivos. Por exemplo, se um agente perde comunicação com outro agente cujos serviços ele requer para cumprir seus objetivos, ele procurará outro agente que forneça os mesmos serviços. Wooldridge [11] descreve essa pró-atividade como a capacidade de um agente de “tomar a iniciativa”.
- Habilidade social: os agentes inteligentes podem interagir com outros agentes inteligentes. A capacidade social conhece mais do que a simples passagem de dados entre diferentes entidades de software e hardware, algo que muitos sistemas tradicionais fazem. Conota a capacidade de negociar e interagir de forma cooperativa. Essa habilidade é normalmente apoiada por uma linguagem de comunicação de agente, que permite aos agentes conversar em vez de simplesmente passar dados [12].

Formalmente, um agente autônomo é um sistema situado um ambiente e faz parte dele. Sente esse ambiente e age sobre ele, ao longo do tempo, em busca de seus próprios objetivos e de modo a afetar o que ele percebe no futuro [8].

Um sistema multiagente é simplesmente um sistema que compreende dois ou mais agentes ou agentes inteligentes. É importante reconhecer que não existe um objetivo geral do sistema, simplesmente os objetivos locais de cada agente separado. As intenções do desenvolvedor para o sistema só podem ser realizadas pela inclusão de múltiplos agentes inteligentes, com metas locais correspondentes às subpartes dessa intenção [12].

Um Sistema Multiagente (MAS) é definido como uma coleção de entidades computacionais autônomas (agentes), que podem ser eficazes em amplas aplicações executando tarefas com base em metas em um ambiente. Geralmente, dentro das arquiteturas MAS, os agentes autônomos trabalham com uma perspectiva limitada em todo o sistema e focam na realização de tarefas localizadas. Embora a capacidade de cada agente para afetar o ambiente do sistema seja limitada às capacidades de seu sistema ou componente imediatamente controlável, os agentes podem comunicar informações sobre a realização de suas metas para outros agentes independentes que compreendem o MAS. A cooperação surge à medida que os agentes propõem, aceitam, rejeitam ou contrapõem cursos de ação baseados em consultas com outros agentes, na avaliação de capacidades locais e na avaliação de objetivos nativos [7].

1.1.3. Smart grid

O conceito de *Smart grid* começou com a noção de infraestrutura de medição avançada para melhorar a gestão da demanda, a eficiência energética e uma rede elétrica de autorreparação para melhorar a confiabilidade da oferta e responder a desastres naturais ou sabotagem maliciosa. No entanto, vários desenvolvimentos levaram à expansão do escopo inicialmente percebido da rede inteligente e estão ajudando a moldar o novo rosto do setor elétrico. Estes incluem: a) ênfase na proteção ambiental, incluindo geração renovável (energia eólica, solar, etc.) e resposta à demanda; b) o impulso para uma melhor utilização dos ativos, incluindo o funcionamento mais próximo do “joelho da curva”, mantendo o funcionamento confiável do sistema; e c) a necessidade de uma melhor escolha do cliente [13].

A autorreparação (self-healing) é definida como a capacidade de um sistema detectar e recuperar automaticamente a funcionalidade quando confrontado com um único ou muitos eventos de acidentes. Para um sistema de energia, essa definição é um pouco refinada para incluir a identificação rápida de problemas, ações para minimizar quaisquer impactos adversos de acidentes e a pronta recuperação do sistema para um estado operacional estável, se possível.

Há dois períodos distintos para a autorreparação: primeiro, o estágio de reação de emergência, seguido pelo estágio restaurativo. Durante o primeiro estágio, uma condição de acidente é detectada e o sistema reage para minimizá-lo, normalmente através do isolamento. Uma vez que o sistema tenha passado da emergência inicial, a restauração pode começar. Durante a restauração, uma série de reconfigurações pode ocorrer melhorando a condição geral do sistema, envolvendo manipulações do disjuntor, partida ou parada da geração, rejeição ou seleção de carga, ou outras ações que alterem a postura operacional do sistema. O estágio de restauração pode ser um estágio de autorreparação mais longo e mais complicado, exigindo decisões mais complexas [7].

1.1.4. Resposta à Demanda

Gerenciamento da demanda (*Demand Side Management*, ou DSM) é basicamente percebido como a solução para um problema clássico de dimensionamento, ou seja, o fato de que a atual infraestrutura de geração e distribuição de energia é projetada para acomodar demanda de pico e não de média. Como a demanda flutua substancialmente ao longo de um ciclo diário, um grande pedaço da capacidade do sistema é efetivamente desperdiçado. O objetivo de alto nível do DSM é, portanto, achatando a carga ao longo do tempo “raspando os picos” e “enchendo os vales” ou, em outras palavras: transferindo o máximo possível da demanda flexível do horário de pico para períodos de menor atividade.

A maneira tradicional de implementar o DSM é através de incentivos de preço, ou seja, baixando as tarifas em momentos em que a demanda agregada deve ficar abaixo da média, de modo a incentivar o usuário final a transferir cargas flexíveis para esses períodos [14].

O Departamento de Energia dos Estados Unidos definiu a resposta à demanda como “mudanças no uso elétrico de clientes de uso final de seus padrões de consumo normais em resposta a mudanças no preço da eletricidade ao longo do

tempo ou a incentivos destinados a induzir menor consumo de eletricidade em momentos de altos preços de mercado atacadista ou quando a confiabilidade do sistema é comprometida”. [5]

O fluxo de energia é quase unidirecional a partir de fontes de fornecimento centralizadas (usinas de energia) para a demanda, e o fluxo de informações é de voltagens mais baixas para centros operacionais superiores. Em contraste, no ambiente energético emergente, os fluxos de energia e informação são bidirecionais.

O uso emergente do armazenamento térmico para o pico de mudança, o crescimento antecipado e a redução de custos da geração de energia solar fotovoltaica nos níveis residencial e municipal, a mudança antecipada do transporte convencional (movido a derivados do petróleo) para veículos elétricos, o advento de sensores inteligentes de baixo custo e a viabilidade de uma rede de comunicações seguras de duas vias em todo o alcance do serviço elétrico é antecipada para alterar significativamente a natureza das futuras fontes de energia e as operações do sistema de energia, bem como o comportamento do consumidor.

A resposta à demanda é um ingrediente importante do paradigma da rede inteligente emergente e um elemento importante no design do mercado para manter a oferta do mercado de potência elétrica sob controle. A experiência com os mercados de energia mostrou que a falta de resposta à demanda tem sido um fator importante para as ocorrências do colapso nesse mercado [13].

Os programas de Resposta a Demanda (DR) são geralmente classificados em duas categorias distintas: 1) programas de DR baseados em incentivos, nos quais o operador do sistema fornece incentivos monetários aos consumidores em troca de vários serviços auxiliares, como serviços de regulação de frequência e tensão, controle de carga direta e DR de emergência. e 2) programas de DR baseados em tempo, que são procedimentos baseados em preços, incluindo preços de tempo de uso, preço de pico e preços em tempo real.

A ideia básica na DR baseada em preço é introduzir mecanismos de mercado no nível de varejo, para os quais os agentes de controle de carga automatizados são capazes de responder. Desta forma, um nível de sensibilidade ao preço pode ser alcançado no lado da demanda; ou seja, os consumidores mudam seus padrões de consumo em resposta aos preços variáveis que recebem [15].

2. JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento dos sistemas elétricos inteligentes, ou *Smart Grids*, está mudando os paradigmas no setor elétrico. Obviamente não se pode esperar uma revolução repentina, pois os investimentos esperados são altos e devem ser realizados progressivamente. Ainda assim, em maior ou menor grau, as *Smart grids* vieram para mudar o modo de operação do sistema elétrico.

Dentre essas mudanças e novas possibilidades está o gerenciamento de demanda, que consiste na possibilidade de a concessionária de energia elétrica necessitar fazer cortes de fornecimento de modo seletivo emitindo sinais para os clientes que tiverem aderido ao programa.

Esses cortes visam adequar a demanda do sistema por energia elétrica à oferta, e trazem a discussão sobre a finitude dos recursos energéticos. Discussão essa muito necessária em um mundo onde os recursos estão cada vez mais escassos, sendo mal geridos e utilizados, incluindo a energia elétrica.

Essa mudança de paradigma do sistema de uma abordagem de seguimento da demanda (*load following*) para uma abordagem de suavização de picos (*peak shaving*) é uma tendência cada vez mais real, visto a necessidade de eficiência no uso da energia elétrica e da dependência de eletricidade cada vez maior da sociedade.

Outro aspecto que justifica essa investigação é a adoção próxima da tarifa branca pelas concessionárias. A tarifa branca, basicamente, consiste na possibilidade de utilizar postos tarifários diferentes para consumidores residenciais de acordo com a hora do dia. Isso já acontece na indústria e com outros grandes consumidores com as tarifas verde e azul.

Observa-se, portanto, o movimento do mercado de energia elétrica e da agência reguladora em direção à tarifação dinâmica para todos os consumidores, onde a energia elétrica passa a ter preços diferentes a cada instante do dia determinado de acordo com o horário. Esse processo culmina na adoção de tarifas de energia elétrica em tempo real, típico das *Smart grids*, e que precifica a eletricidade de acordo com diversos fatores incluindo a disponibilidade de oferta, demanda do sistema e outros fatores.

Esses fatores supracitados justificam a proposição do presente projeto, visando contribuir na discussão e aprofundamento do entendimento das novas concepções trazidas pelas redes inteligentes de energia.

Com o surgimento de veículos elétricos, geração distribuída e dispositivos eletrônicos e eletrodomésticos de alta carga, concessionárias de energias vão precisar de uma rede inteligente para tratar dos desafios trazidos por tais aparelhos. A proliferação de veículos elétricos poderia aumentar a demanda em um sistema de forma drástica se muitas pessoas chegarem em suas casas e conectarem seus veículos à tomada ao mesmo tempo [5].

A Câmara de Comércio Internacional e o Conselho Mundial da Energia consideram que o encargo ambiental da mudança para um futuro com baixo teor de carbono proporciona uma tremenda oportunidade de negócios para o desenvolvimento de tecnologia. O Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável afirmou que “a tecnologia geralmente não é o objetivo final, mas uma ferramenta para melhorar a entrega de receitas e atividades lucrativas que contribuem para o desenvolvimento econômico e social”. Este impulso tecnológico certamente inclui tecnologias de redes inteligentes, incluindo a próxima geração de resposta à demanda. “Somente um mercado moldado por regulamentações e incentivos para estimular a inovação maciça em fontes de energia limpas e sem emissões de carbono pode reduzir o aquecimento global” [5].

Combustíveis fósseis reduzem suas quantidades gradualmente, aumentando os custos de energia e piorando as condições ambientais, uma atualização no atual sistema de energia elétrica é indispensável para incorporar unidades de recursos energéticos distribuídos, como unidades de geração distribuída e armazenamento distribuído. As unidades de geração distribuída utilizam fontes de energia renováveis, como painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e sistemas de cogeração (calor e eletricidade).

Como as unidades de recursos energéticos distribuídos normalmente operam em um nível de tensão de distribuição e geograficamente perto de cargas, as *Microgrids* são desenvolvidas para interligar as fontes de energia e as cargas em uma área relativamente pequena, como uma comunidade suburbana, uma universidade, escola, uma área comercial ou um parque industrial. Além do benefício ambiental do uso de mais fontes de energia renováveis, uma *Microgrid* pode ser ligada à grade principal como uma única carga (ou gerador), ou ilhada como um

sistema de energia autossustentado, o que simplifica significativamente o controle da grade principal pelas concessionárias de energia. Do ponto de vista dos clientes, o custo da energia pode ser reduzido ao aumentar o uso de energia sustentável, e as perdas de energia de transmissão e distribuição podem ser diminuídas ao aproveitar a proximidade física entre fontes de energia e cargas [16].

Apesar dos potenciais benefícios das *Microgrids*, conseguir o monitoramento e o controle universal sobre um grande número de unidades e cargas *Plug and Play* distribuídas é muito desafiador. A próxima geração de rede elétrica deverá utilizar a tecnologia de informação e comunicação de ponta para enfrentar esse desafio [16].

Devido à total dependência da sociedade em relação a eletricidade e ao alto custo das quedas do sistema, uma meta importante é aumentar a confiabilidade do sistema de energia, o que significa que uma característica atraente e marcante das redes inteligentes é sua capacidade de autorrestauração. As *Smart grids* desenvolverão e aperfeiçoarão a automação da distribuição operando de maneira distribuída por meio de novas tecnologias digitais, como monitoramento, controle automático, comunicação bidirecional e gerenciamento de dados [10].

A *Smart Grid* traz simultaneamente novas oportunidades e novos desafios para o Gerenciamento da Demanda. Por exemplo, o fato de que uma parcela cada vez maior da oferta virá de fontes renováveis que variam ao longo do dia comprometerá a eficiência de tarifas fixas e estritamente temporais. Em vez disso, serão necessários mecanismos de precificação reativos muito mais dinâmicos para levar em conta a disponibilidade em tempo real de uma oferta parcialmente imprevisível.

De fato, será viável comunicar atualizações frequentes de preços para acompanhar a evolução do equilíbrio entre oferta e demanda em tempo quase real. Além disso, essa transição tecnológica tem a possibilidade de automatizar parcialmente o processo de transferência de carga, com aparelhos inteligentes ligando-se ou desligando-os na tentativa de reconciliar as preferências e metas do usuário com os preços anunciados da eletricidade [14].

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

- Investigar o processo de decisão e interação entre os diferentes agentes computacionais encarregados de gerenciar o consumo de energia no interior das unidades consumidoras em cenários de operação normal e operação contingenciada do sistema elétrico.

3.2 Objetivos Específicos

- Compreender o funcionamento e desenvolvimento dos sistemas multiagentes e as interações entre os diferentes agentes envolvidos;
- Descrever a estrutura de bonificação de consumidores que aderem aos contratos de gerenciamento de demanda propostos pela concessionária;
- Investigar diversas situações de interações entre os diferentes agentes em cenários de operação normal e operação insegura do sistema elétrico.

4. METODOLOGIA

A condução da investigação sobre a aplicação de controle distribuído em sistemas elétricos foi baseada na construção do conhecimento de forma segmentada e progressiva. O primeiro passo consistiu no levantamento bibliográfico sobre o que já existe e já foi proposto sobre o tema de gerenciamento de demanda em sistemas elétricos usando diversas abordagens, inclusive a proposta aqui. Este passo serviu para delinear claramente contribuições que poderiam ser dadas durante o desenvolvimento do projeto.

Também é importante conhecer os sistemas multiagentes, seu funcionamento e formas de modelagem dos agentes. Neste passo foi utilizado um programa *open source* disponibilizado e que pode ser usado sem custo, o JADE (*Java Agent DEvelopment Framework*). Exemplos simples e mais elaborados foram feitos nessa etapa de forma a construir o conhecimento sobre esses tipos de sistema e sobre as ferramentas usadas.

Concomitantemente, compreender os processos de gerenciamento de demanda foi importante para o desenvolvimento deste projeto. A investigação do estado da arte sobre gerenciamento de demanda em sistemas elétricos também foi feita de forma a sedimentar conhecimentos sobre como esses sistemas funcionam,

como precificam a participação dos consumidores, e como os participantes são acionados.

Após conhecer os aspectos básicos do problema abordado e as ferramentas aplicadas, o próximo passo foi desenvolver a parte principal da proposta. Esta etapa consistiu em desenvolver uma arquitetura de controle distribuído baseada em agentes que visava demonstrar o funcionamento de um sistema de gerenciamento da demanda em um sistema elétrico inteligente.

Cada agente foi desenvolvido de forma a buscar maximizar o seu objetivo, que é garantir o bem-estar do cliente ao qual representa dentro desta arquitetura. No entanto, em determinadas horas do dia não é possível consumir energia elétrica livremente, dado o aumento na demanda e a necessidade de aliviar a carga do sistema. Nesse momento entra em ação o gerenciamento de demanda, enviando sinais para os consumidores sob contrato para que diminuam seus respectivos consumos, atingindo um novo ponto de equilíbrio neste sistema. Agora cada agente deve buscar maximizar a utilidade da energia elétrica para o cliente, ou seja, determinar quais os circuitos da unidade consumidora devem ser alimentados de acordo com as necessidades mais importantes do cliente.

4.1 Materiais e Métodos

O JADE é um *framework* de software totalmente implementado na linguagem Java. Ele simplifica a implementação de sistemas multiagentes através de um *middleware* que atende às especificações da FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) e através de um conjunto de ferramentas gráficas que suportam as fases de depuração e implantação. Um sistema baseado em JADE pode ser distribuído entre máquinas (que não precisam compartilhar o mesmo sistema operacional) e a configuração pode ser controlada por meio de uma GUI (*Graphic User Interface*) remota. A configuração pode ser alterada até mesmo em tempo de execução, movendo agentes de uma máquina para outra, como e quando necessário. [17]

O principal objetivo do Jade é simplificar e facilitar o desenvolvimento de sistemas multiagentes garantindo um padrão de interoperabilidade entre sistemas multiagentes através de um abrangente conjunto de agentes de serviços de sistema, os quais tanto facilitam como possibilitam a comunicação entre agentes, de acordo com as especificações da FIPA: serviço de nomes (*naming service*) e páginas

amarelas (*yellow-page service*), transporte de mensagens, serviços de codificação e decodificação de mensagens e uma biblioteca de protocolos de interação (padrão FIPA) pronta para ser usada. Toda sua comunicação entre agentes é feita via troca de mensagens. Além disso, lida com todos os aspectos que não fazem parte do agente em si e que são independentes das aplicações tais como transporte de mensagens, codificação e interpretação de mensagens e ciclo de vida dos agentes. Ele pode ser considerado como um “*middleware*” de agentes que implementa um *framework* de desenvolvimento e uma plataforma de agentes. Em outras palavras, uma plataforma de agentes em complacência com a FIPA e um pacote, leia-se bibliotecas, para desenvolvimento de agentes em Java. [53]

Trabalharemos em um cenário onde a energia tem três patamares de preços durante dia, de acordo com a demanda. É mantido um registro das demandas mínima e máxima, e o intervalo entre elas é dividido em três partes iguais, a tarifa é selecionada de acordo com qual terço deste intervalo a demanda atual se encontra, os valores utilizados se encontram na Tabela 1. Geralmente o patamar mais barato ocorre durante a madrugada, o mediano durante o dia e o mais caro durante a noite. Inicialmente testaremos sem o gerenciamento de demanda, para avaliarmos os preços normais, e depois testaremos um ambiente com gerenciamento de demanda, e então compararemos os preços de ambos os cenários e avaliaremos os impactos nos preços das contas mensais.

Foram feitos dois tipos de agente, um que representa cada consumidor (casas, empresas, etc) e outro que representa a concessionária de energia¹. Os agentes consumidores têm como parâmetros de entrada dois vetores que informam o consumo ao longo do dia, hora a hora em kWh, informados pelo próprio cliente: um para as cargas fixas, equipamentos aos quais ele dá alta prioridade e que não devem ser desligados pois isso reduzirá o seu bem-estar; e outro que informa o consumo das cargas móveis, equipamentos que precisam ser utilizados em alguma hora do dia, mas que não têm horário específico para serem ligados.

A entrada dos dados desses vetores pode ser feita informando diretamente o consumo hora a hora de ambas as categorias de carga, ou pode ser feita através de duas matrizes com 24 linhas e n colunas, onde cada linha equivale a uma hora do dia e o número de colunas equivale ao número de eletrodomésticos que se pretende cadastrar no programa, o valor numérico na matriz equivale a quantidade de cada

1 Códigos disponíveis em: <<https://github.com/jvmr1/Multiagentes>>.

aparelho, por exemplo, se há o número 2 na linha 19, coluna 5, isso indica que às 19 h haverão 2 aparelhos do tipo 5 ligados, a relação entre cada aparelho e seu número deve ser listada previamente. Também é utilizado um vetor que indica o consumo de cada dispositivo, informado na mesma ordem das colunas da matriz de consumo. Dessa forma, é simples calcular o vetor de consumo hora a hora daquele consumidor, multiplicando-se as matrizes e somando cada linha, os vetores resultantes são a entrada de dados do agente consumidor.

O agente da concessionária verifica a demanda total da rede, enviando mensagens aos agentes consumidores, em intervalos de tempo predeterminados, perguntando quais os consumos esperados para aquele horário e para a hora seguinte. Os agentes consumidores respondem a esta requisição com a soma dos seus consumos esperados das cargas fixas e móveis do horário atual e da próxima hora, assim, a concessionária registra o consumo atual de cada cliente para cálculo da demanda total, com base nela encontrar a tarifa do momento e com esta última, tarifar o consumo dos clientes. Também calcula a demanda total esperada para a ser consumida na próxima hora, a demanda futura. Esta é comparada com o histórico das demandas passadas e se for superior dois terços do intervalo entre a demanda mínima e máxima registradas, o agente da concessionária requisita que a demanda total da rede seja diminuída.

A concessionária envia então uma mensagem para os consumidores que decidiram participar do programa para que eles reduzam os seus consumos de energia a partir da próxima hora, ou seja, que mantenham apenas as cargas fixas ligadas (as mais importantes), deixando desligadas as cargas móveis até segunda ordem. Deste modo, com vários agentes consumidores fazendo isso, a demanda total da rede diminui. O vetor das cargas móveis de cada agente consumidor é então deslocado para a frente enquanto não é utilizado, para que quando seja possível utilizá-lo novamente, quando a demanda estiver a menos de um terço do intervalo entre as demandas mínima e máxima registradas, continue sendo consumido de onde parou.

Foram utilizados dez agentes consumidores com perfis de consumo variados, simulando a variedade real de uma cidade. Cada par de agentes representa clientes consumidores nas seguintes categorias: classe baixa, classe média baixa, classe média alta, classe alta e pequena empresa. Em cada par, um dos agentes possui cargas móveis cadastradas, que podem ser utilizadas no gerenciamento da

demanda, e o outro não, para termos como base de comparação ao analisarmos os benefícios de participar do programa. Quais eletrodomésticos foram selecionados para a simulação e seus consumos estimados são mostrados nas Tabelas 2 a 6.

Tabela 1 - Tarifas de Baixa Tensão

Classe	Horário Ponta	Horário Intermediário	Horário Fora Ponta
Residencial e Comercial	1,23864 R\$/kWh	0,77734 R\$/kWh	0,44360 R\$/kWh

Fonte: [18]

Tabela 2 - Agente de classe baixa

Aparelho	Consumo
Televisão 20"	80 W*
Geladeira 216 l	80 W
Lâmpadas fluorescentes	15 W
Carregador celular	10 W*
Consumo mensal	99 kWh
Proporção de cargas fixas/móveis	77,88% / 22,12%

Fonte: O autor

Tabela 3 - Agente de classe média baixa

Aparelho	Consumo
Televisão 32"	180 W*
Geladeira 310 l	120 W
Lâmpadas fluorescentes	20 W
Notebook	100 W*
Carregador celular	10 W*
Consumo mensal:	191.7 kWh
Proporção de cargas fixas/móveis	66,67% / 33,33%

Fonte: O autor

* Utilizados total ou parcialmente como carga móvel nos agentes que participaram do programa

Tabela 4 - Agente de classe média alta

Aparelho	Consumo
Televisão 40"	220 W*
Geladeira 2 portas 414 l	200 W
Lâmpadas fluorescentes	25 W
Computador	200 W*
Carregador celular	10 W*
Ar-condicionado 10000 BTUs	1400 W
Maquina de lavar roupa 8 kg	990 W*
Chuveiro elétrico	3000 W
Micro-ondas 28 l	800 W
Cafeteira	550 W
Consumo mensal:	684.6 kWh
Proporção de cargas fixas/móveis	78,18% / 21,82%

Fonte: O autor

Tabela 5 - Agente de classe alta

Aparelho	Consumo
Televisão 52"	330 W*
Geladeira duplex e triplex 430 l	200 W
Lâmpadas fluorescentes	30 W
Computador	400 W*
Carregador celular	10 W*
Ar-condicionado 18000 BTUs	2650 W
Maquina de lavar roupa 10 kg	1060 W*
Chuveiro elétrico	4500 W
Micro-ondas 40 l	1400 W
Cafeteira	550 W
Consumo mensal:	1098.9 kWh
Proporção de cargas fixas/móveis	78,05% / 21,95%

Fonte: O autor

Tabela 6 - Agente pequena empresa

Aparelho	Consumo
Geladeira 2 portas 414 l	200 W
Lâmpadas fluorescentes	30 W
7 Computadores	200 W
Carregador celular	10 W*
Ar-condicionado 26000 BTUs	3800 W*
Cafeteira	550 W*
Consumo mensal:	1418.1 kWh
Proporção de cargas fixas/móveis	66,68% / 33,32%

Fonte: O autor

5. RESULTADOS

Os dados a serem analisados foram obtidos após simular 30 dias de consumo dos dez agentes em um ambiente com os patamares de tarifas. Os dados obtidos e as reduções percentuais no preço da conta de cada agente estão descritos na Tabela 7. Na Tabela 8 são apresentadas as médias no percentual de redução de acordo com o perfil de participação no programa, separados em agentes sem cargas móveis cadastradas (agentes de número ímpar) e agentes com cargas móveis cadastradas (agentes de número par).

Tabela 7 - Valor da conta de cada agente ao fim de 30 dias de consumo

Agente	Sem DSM	Com DSM	Percentual de redução
Agente 1	R\$ 69,03	R\$ 64,15	7,08%
Agente 2	R\$ 69,03	R\$ 57,57	16,60%
Agente 3	R\$ 134,10	R\$ 125,46	6,45%
Agente 4	R\$ 134,10	R\$ 106,02	20,94%
Agente 5	R\$ 612,95	R\$ 575,60	6,09%
Agente 6	R\$ 612,95	R\$ 527,11	14,00%
Agente 7	R\$ 948,28	R\$ 902,85	4,79%
Agente 8	R\$ 948,28	R\$ 828,67	12,61%
Agente 9	R\$ 1.172,17	R\$ 1.004,97	14,26%
Agente 10	R\$ 1.172,17	R\$ 875,02	25,35%
Média	-	-	13,31%

Fonte: O autor

Tabela 8 – Média no percentual de redução por tipo de participação

Tipo de participação	Média no percentual de redução
Agentes sem cargas móveis	6,45%
Agentes com cargas móveis	16,60%

Fonte: O autor

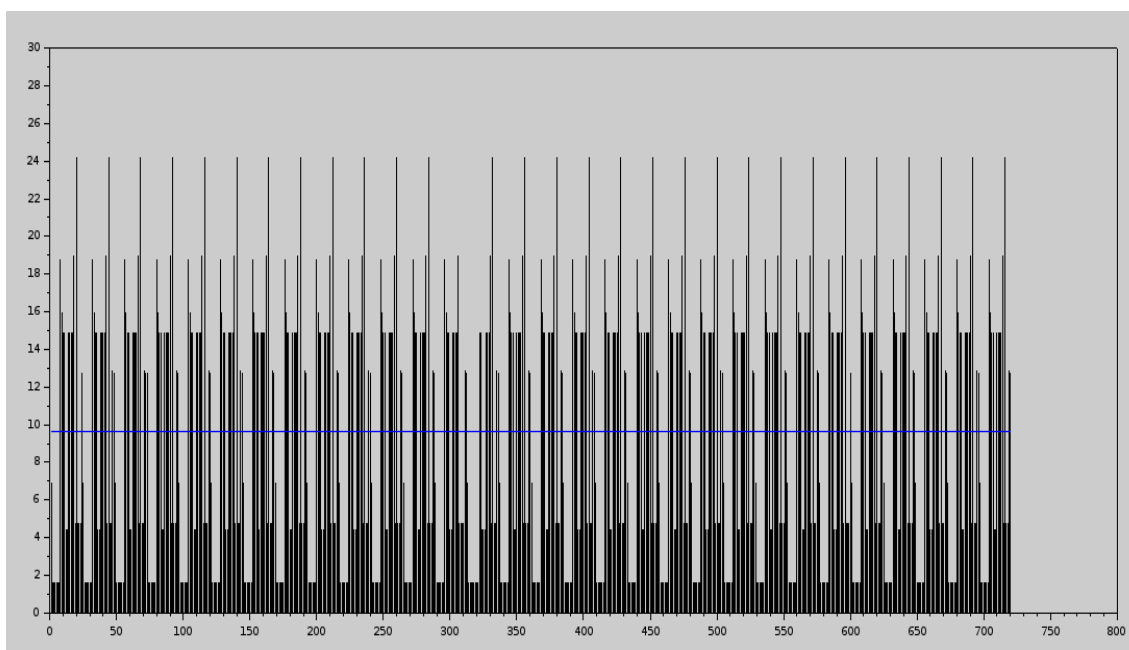
Tabela 9 – Demandas médias e percentual de redução

Demanda média sem DSM	Demanda média com DSM	Percentual de redução
9,615544 kWh	9,204672 kWh	4,27%

Fonte: O autor

Os valores da demanda total da rede a cada hora simulada em cada caso também foram coletados e exibidos em função do tempo nas Figura 1 e Figura 2. Os gráficos foram gerados utilizando o software Scilab². A linha azul em cada figura representa a demanda média, encontrada via média aritmética de todos os valores de demandas horárias em cada gráfico. Na Tabela 9 seus valores e percentual de redução são exibidos.

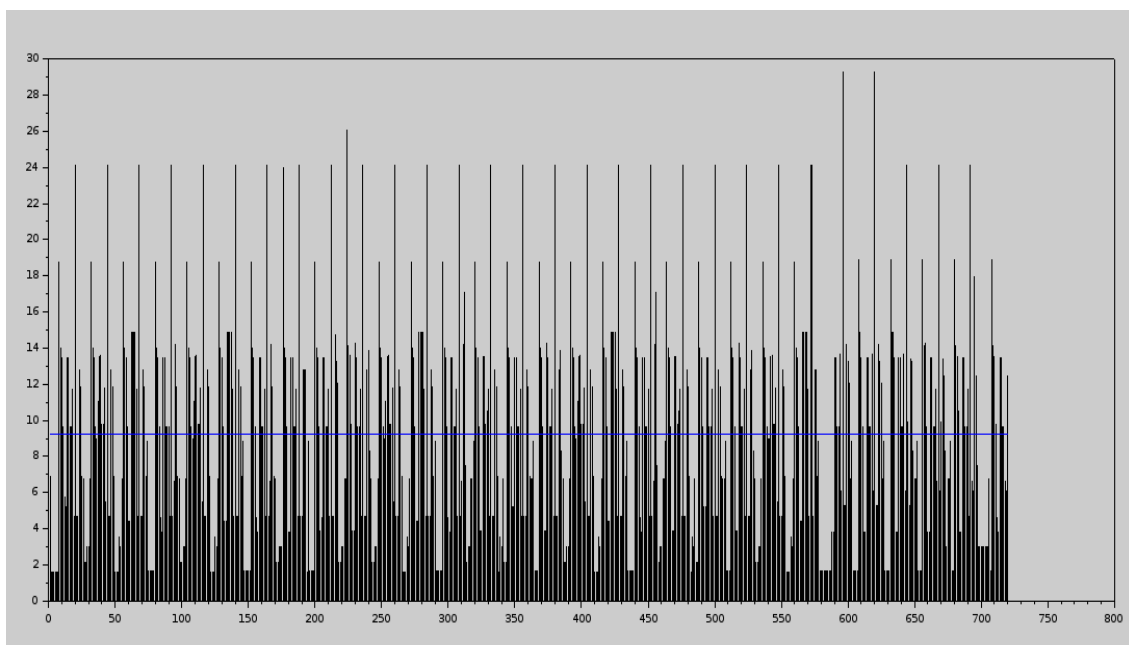
Figura 1 - Demanda total em função do tempo sem gerenciamento da demanda



Fonte: O autor

2 Home – Scilab: <<https://www.scilab.org/>>.

Figura 2 - Demanda total em função do tempo com gerenciamento da demanda



Fonte: O autor

6. CONCLUSÕES

Em um ambiente com tarifação da energia elétrica por meio de patamares variados para diferentes níveis de demandas total na rede, foi possível aplicar o gerenciamento da demanda, ou seja, o corte seletivo no fornecimento de energia a consumidores que voluntariamente decidiram participar do programa, e assim foi possível reduzir a demanda total da rede em horários de pico de demanda, movendo parte dela para horários fora de pico, logo, o custo da tarifa pôde ser reduzido, e consequentemente as contas de energia elétrica para todos os agentes consumidores na rede foram reduzidas, tanto os que participaram do programa, desativando seus aparelhos menos importantes em horários de pico de demanda, quanto para aqueles que não participaram, pois a rede ficou menos congestionada e as tarifas se mantiveram em um patamar mais barato para todos.

Observa-se, no entanto, que a redução foi naturalmente maior para aqueles que participaram ativamente do programa, pois além de terem proporcionado uma redução no período de tempo que a demanda total ficasse nos patamares mais caros da tarifa, também consumiram menos kWh em horários de tarifa mais caras, pois moveram suas cargas menos prioritárias para horários fora de pico, onde a energia é mais barata. A redução da demanda nos horários de pico também é boa para a concessionária, que reduz a quantidade de energia que precisa prover. Do

ponto de vista da concessionária a gestão da demanda é importante para gerenciar melhor os ativos e para evitar problemas operacionais, como baixas tensões, que podem gerar multas aplicadas por agências de regulamentação. Então, ao gerenciar a carga, melhora seus índices de qualidade de serviço.

REFERÊNCIAS

- [1] Mark McGranaghan, Doug Houseman, Laurent Schmitt, Frances Cleveland, Eric Lambert. Enabling the Integrated Grid. IEEE Power & Energy Magazine, pp. 83-93, January/February 2016.
- [2] Redes Eléctricas Inteligentes. Diálogos Setoriais Brasil-União Européia. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2014.
- [3] Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid. Electric Power Research Institute. Technical Report, 2011.
- [4] Smart Grids Laboratories Inventory 2015. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport. European Commission, 2015.
- [5] Katherine Hamilton, Neel Gulhar. Taking Demand Response to the Next Level. IEEE Power & Energy Magazine, pp. 60-65, May/June 2010.
- [6] A. H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, A. Leon-Garcia. Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 3, pp. 320-331, 2010.
- [7] C. M. Colson, M. H. Nehrir, R. W. Gunderson. Distributed Multi-Agent Microgrids: A Decentralized Approach to Resilient Power System Self-healing. In: 4th International Symposium on Resilient Control Systems, pp. 83-88, 2011.
- [8] S. Franklin, A. Graesser. Is it an Agent, or just a Program? A Taxonomy for Autonomous Agents. In: 3rd International Workshop on Agent Theories, pp. 1-10, 1996.
- [9] A. Dimeas, N. D. Hatziaargyriou. Operation of a Multiagent System for Microgrid Control. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, pp. 1447-1455.
- [10] A. Zidan, E. F. El-Saadany. A Cooperative Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms in Distribution Systems. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 3, pp. 1525-1539, 2012.
- [11] WOOLDRIDGE, Michael. An introduction to multiagent systems. John Wiley & Sons, 2009.
- [12] MCARTHUR, Stephen DJ et al. Multi-agent systems for power engineering applications—Part I: Concepts, approaches, and technical challenges. IEEE Transactions on Power systems, v. 22, n. 4, p. 1743-1752, 2007.
- [13] Farrokh Rahimi, Ali Ipakchi. Demand Response as a Market Resource Under the Smart Grid Paradigm. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 1, pp. 82-88, 2010.
- [14] SAFFRE, Fabrice; GEDGE, Richard. Demand-side management for the smart grid. In: Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp), 2010 IEEE/IFIP. IEEE, 2010. p. 300-303.
- [15] DEGHANPOUR, Kaveh et al. Agent-based modeling of retail electrical energy markets with demand response. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016.
- [16] H. Liang, B. J. Choi, W. Zhuang, X. Shen, A. S. A. Awad, A. Abdrabou. Multiagent Coordination in Microgrids via Wireless Networks. IEEE Wireless Communications Magazine, pp. 14-22, June 2016.
- [17] Jade Site | Java Agent DEvelopment Framework. Jade.tilab.com. Disponível em: <<http://jade.tilab.com/>>. Acesso em: 21 ago. 2018.
- [18] Cobrança de Tarifas | CEMAR - Agência WEB. Disponível em: Cemar116.com.br. www.cemar116.com.br/residencial/informacoes/cobranca-de-tarifas>. Acesso em: 21 ago. 2018.