

ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DE REDES DE SENSORES SEM FIO PARA O MONITORAMENTO EM *SMART GRIDS*

PERFORMANCE ANALYSIS OF WIRELESS SENSOR NETWORKS ROUTING PROTOCOLS FOR MONITORING IN SMART GRIDS

Álison de Oliveira Alves, Felipe Denis Mendonça de Oliveira
Departamento de Ciência da Computação
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN), Brazil
alissoncc.oliveira@gmail.com, fdenis_natal@yahoo.com.br

Abstract: Smart Grids allow monitoring of the power utility and consumer electronics devices used by customers, favoring an efficient management of the electrical system, thus improving energy efficiency and minimizing costs. Due the characteristics of low cost, low power consumption and reliable transmission of data in real-time systems, Wireless Sensor Networks (WSN) are recognized as a promising technology for monitoring and control applications in Smart Grids. By monitoring an application with a large number of sensor nodes, the adoption of a routing protocol is required to ensure the WSN Quality of Service (QoS). This work aims to observe the behavior of the AODV, AOMDV, DSDV and HTR routing protocols used in Wireless Sensor Networks (WSN) for monitoring applications in Smart Grids, by simulating a residential condominium. QoS parameters and power consumption will be tested to reach the most effective protocol to be used.

Keywords: Smart Grids; Wireless Sensor Network; Routing Protocols

Resumo: As Redes de Energia Inteligentes (*Smart Grids*) permitem o monitoramento entre a concessionária de energia e os dispositivos eletroeletrônicos utilizados pelos clientes, favorecendo uma gestão eficaz do sistema elétrico melhorando, assim, a eficiência energética e minimizando os custos. Devido às características de baixo custo, baixo consumo de energia e confiabilidade na transmissão de dados em sistemas de tempo real, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) apresentam-se como uma tecnologia promissora no monitoramento e controle das aplicações em *Smart Grids*. Ao monitorar uma aplicação com grande número de nós sensores, a adoção de um protocolo de roteamento é necessária para garantir a Qualidade de Serviço (QoS) da RSSF. Este trabalho tem como objetivo observar o comportamento dos protocolos de roteamento AODV, AOMDV, DSDV e HTR utilizados em RSSF para aplicações de monitoramento em *Smart Grids*, através da simulação de um condomínio residencial. Parâmetros de QoS, e consumo de energia serão testados para apontar o protocolo mais eficiente a ser utilizado.

Palavras-chave: Redes de Energia Inteligentes; Redes de Sensores sem Fio; Protocolos de Roteamento

I. INTRODUÇÃO

A eletricidade, uma das mais importantes formas de energia que impacta a economia e a política humana, é produzida em uma infraestrutura muito complexa conhecida como rede de energia ou simplesmente rede elétrica. A rede elétrica é povoada por um grande número de componentes que estão

interligados, distribuídos geograficamente em extensas áreas [30]. Até recentemente, uma abordagem centralizada foi utilizada para desenvolver a infraestrutura de rede elétrica existente, na qual algumas plantas de corrente alternada de alta potência foram interconectadas com muitas subestações por um grande número de linhas de distribuição que alimentavam (geralmente após uma redução da tensão) unidirecionalmente a rede elétrica das residências. Além disso, recentemente, novas fontes de energia renovável (por exemplo, sistemas fotovoltaicos turbinas eólicas) foram usados para fornecer um caminho alternativo na produção de eletricidade. Estas fontes de energia de pequena escala podem ser localizadas próximas às instalações do cliente e são capazes de aliviar a carga da rede elétrica e, ao mesmo tempo, ajudar a equilibrar a demanda de energia e fornecimento de eletricidade [12].

A interconexão destas fontes renováveis de energia ao sistema de energético existente transformou-a em um sistema de geração altamente distribuída em larga escala que incorpora um grande número de geradores, geralmente caracterizados por diferentes topologias que combinam diferentes tecnologias com vários níveis de corrente, tensão e potência. Com a adição dessas novas soluções, a rede elétrica existente conseguiu suprir parcialmente o aumento global da procura de eletricidade, mas ainda teve de lidar com problemas, tais como: falhas de equipamentos, apagões, falha de comunicação e falta de controle eficaz da infraestrutura. Esses desafios, juntamente com instabilidades na produção causadas por características estruturais ou operacionais, podem facilmente levar a grandes perdas econômicas, ao uso da eletricidade ineficiente, à insatisfação do cliente e à poluição, a partir de uma enorme quantidade de emissões de CO₂ [13].

Devido ao custo de manutenção das infraestruturas existentes, em conjunto com o aumento dos custos para a construção ou modernização das mesmas, aliadas à diminuição do número de pessoal qualificado, a necessidade de operação mais dinâmica e eficiente do sistema tornou-se inevitável [31].

Neste sentido, a eficiência da rede elétrica pode ser melhorada através do seu monitoramento com a utilização de vários sensores. Esta abordagem permite a coleta de dados em tempo real a partir de vários dispositivos sensores acoplados à rede de energia. Desta forma, uma falha na funcionalidade do sistema pode ser diagnosticada via ações corretivas de forma proativa, permitindo ações imediatas a fim de evitar que tais falhas possam afetar o desempenho da rede. Nestes sistemas de monitoramento, os sensores podem ser instalados para monitorar as variáveis essenciais da rede, tais como tensão, corrente e temperatura, verificando possíveis distúrbios que

afetem da energia fornecida. Surge, assim, um sistema inteligente de monitoramento da rede elétrica de última geração, conhecido como *Smart Grid* (SG) [30][32].

Assim, o SG é uma rede moderna de transmissão e distribuição de energia, que utiliza comunicação de dados bidirecional, tecnologias de computação distribuída e sensores inteligentes para melhorar a segurança, confiabilidade e eficiência no fornecimento e utilização da energia ofertada. Através de uma tecnologia sofisticada de infraestrutura de processamento de informação e comunicação, o SG será capaz de utilizar e se beneficiar plenamente de seu sistema de geração de energia distribuída, maximizando a eficiência energética de todo o sistema. Consequentemente, o SG também é considerado uma rede de comunicação de dados que, através do suporte a vários dispositivos de gerenciamento de energia, permite monitorar, de forma confiável e flexível, os diferentes componentes avançados do sistema, levando a um desempenho eficiente [30][33][34].

Além de oferecer benefícios aos fornecedores de energia, o SG provê maior informação e controle dos clientes sobre o consumo de energia através da infraestrutura avançada de medição, também conhecida como medidores inteligentes. Os medidores inteligentes fornecem a interface de rede inteligente entre a concessionária e seus clientes. Ao contrário dos medidores eletromecânicos tradicionais, que normalmente são lidos manualmente uma vez por mês, e não fornecem informações sobre quando um cliente usou de eletricidade naquele mês, os contadores inteligentes podem fornecer informações sobre o consumo de energia em intervalos muito mais curtos - em dias, horas ou minutos - ao cliente, bem como de outros sistemas do imóvel, tais como equipamentos eletroeletrônicos, iluminação ou sistemas de segurança [32]. Os medidores inteligentes possibilitam informações em tempo real sobre o consumo de energia, tornando mais fácil para o cliente identificar e reduzir o desperdício de energia e gerenciar a demanda de pico [34].

A. A utilização do SG em áreas residenciais

A utilização do SG em áreas residenciais, também denominado de *Smart Home* (Casas Inteligentes) permite equipar tais imóveis com dispositivos e sistemas de comunicação que proporcionem aos seus ocupantes um nível muito maior de controle em relação às residências que não os possui. O uso de SG em áreas residenciais podem incluir [31]:

- Dispositivos com uma gama de capacidades sensoriais, tais como termostatos programáveis, monitoramento da iluminação e estabilizadores de energia inteligentes;
- Sistemas de Comunicação que facilitam o fluxo de informação bidirecional entre os dispositivos monitorados e os ocupantes do imóvel e, possivelmente, entre os dispositivos e os sistemas de monitoramento de terceiros, tais como empresas provedoras de sistemas de segurança e;
- Sistemas de monitoramento que permitam que os ocupantes possam controlar o uso de energia e alterar as operações e funções dos dispositivos dentro do ambiente doméstico.

Os dispositivos incluídos em uma casa suprida por SG podem variar enormemente na sua concepção e função, mas,

em geral, dispositivos inteligentes oferecem aos clientes uma ou ambas das seguintes funções [31][32]:

- Capacidade de monitorar o uso de energia *on-line* ou em tempo real em toda a residência e;
- Capacidade de controlar remotamente os sistemas e equipamentos eletroeletrônicos do imóvel.

Os dispositivos domésticos inteligentes não são normalmente considerados parte do SG, mas eles podem se complementar e trabalhar com o SG e outras tecnologias de redes inteligentes de forma a tornar a casa inteligente uma extensão localizada do SG. Por exemplo, controles computadorizados e aparelhos eletroeletrônicos podem ser configurados para responder aos sinais de um fornecedor de energia elétrica para minimizar o consumo de energia nos momentos em que a rede elétrica esteja sob estresse de alta demanda, ou mesmo para transferir parte do uso dessa energia para momentos em haja disponibilidade a um custo menor [12].

Os sistemas de gerenciamento de energia residenciais e outras tecnologias inteligentes, tais como portais *web* e supervisórios locais fornecem, *on-line* ou em tempo real, o consumo de energia para toda a casa ou pela carga individual, bem como informações de pagamento para os ocupantes da residência. Os dispositivos podem também oferecer aos ocupantes dicas de economia de energia, redução de emissões e comparações com parâmetros semelhantes em residências vizinhas, no caso de um condomínio, por exemplo. O fornecimento dessas informações torna o cliente mais consciente de seu comportamento em relação ao consumo, incentivando-o a poupar mais energia [30][34].

Muitos dispositivos inteligentes possuem controles internos de modo que eles podem ser programados e operados remotamente por meio de um *smartphone* ou via Internet para ajudar os ocupantes de uma casa a gerenciar melhor o uso de energia. Uma gama cada vez maior de sistemas de controle autônomos também tem a capacidade de se comunicar com outros dispositivos em uma residência [12].

Alguns dispositivos também são munidos de sensores que lhes permitem reduzir o consumo de energia com base em mudanças nas condições ambientais. Por exemplo, controladores inteligentes de energia, que são usados para eliminar a carga "fantasma" - a energia que os equipamentos eletroeletrônicos gastam, no modo de espera (*stand-by*) - podendo serem programados para desligarem o fornecimento de energia dos equipamentos após um determinado período de inatividade ou utilizarem dispositivos de detecção de movimento ou sensores de ocupação para desligar as saídas controladas quando nenhum movimento for detectado por um determinado período de tempo [34].

A aspecto chave para a integração do SG com os equipamentos eletroeletrônicos de uma residência é que todos os dispositivos "inteligentes", sensores, sistemas supervisórios, sistemas de segurança e rede de comunicação, estejam interligados de forma que permita que cada componente possa se comunicar e maximizar o seu uso para o proprietário. O que se evidencia é um sistema de comunicação, bidirecional entre a casa e seus ocupantes. Estes sistemas de comunicação podem potencialmente enviar um sinal para um terceiro, por exemplo, uma empresa especializada em programas de eficiência energética, indicando que um sistema de aquecimento ou

aparelho de ar condicionado está operando de forma ineficiente e precisa ser reparado. Muito mais do que apertar um botão ou bloquear uma porta, uma casa que utilize SG pode ajudar os proprietários e os fornecedores de produtos e serviços de energia a identificar a necessidade de melhoramentos na eficiência energética do imóvel [35].

B. As Redes de Sensores sem Fio no Monitoramento de SG

A conexão com o SG geralmente é feita através de protocolos de redes cabeadas que usam a infraestrutura da rede elétrica (uso de cabos elétricos combinados com os cabos de informação), ou com outras redes de informação disponíveis (telefone, TV a cabo, dentre outras) [13]. Os cabos combinados geralmente não estão disponíveis para o cliente, especialmente em condomínios residenciais. Também é importante notar que o uso de redes de informação já existentes gera custos mensais adicionais para o sistema, tornando o tempo de recuperação do investimento do sistema mais longo [12]. Neste contexto, a utilização de redes de sensores sem fio (RSSF) torna-se uma boa alternativa devido à sua característica de baixo custo, baixo consumo de energia, confiabilidade e facilidade de instalação e configuração [10].

São exemplos da utilização de RSSF em conjunto com o SG para aplicações inteligentes de monitoramento residenciais:

- Instrumentação remota: atualmente, para tomar qualquer decisão, o usuário precisa ter acesso físico a um medidor de energia elétrica. Com o uso de RSSF, em um ambiente de SG, e a integração de medidores sem fio inteligentes, juntamente com aplicações adequadas, o acesso a medições em tempo real é possível via aplicações *web*. Dessa forma, decisões como a precificação dinâmica, que fornece diferentes faixas de valores de acordo com o período de utilização, podem ser feitas facilmente e instantaneamente, eliminando a necessidade de leitura presencial dos dados monitorados [31];

- Gerenciamento da energia residencial: muitos aplicativos baseados em RSSF estão sendo desenvolvidos para controlar o consumo de energia em tempo real. Eles contribuem para otimizar o desempenho geral do sistema, proporcionando um equilíbrio dinâmico entre a oferta e a procura [36];

- Automação predial: descreve a criação de uma rede de comunicação entre equipamentos residenciais inteligentes, tais como iluminação, aquecimento, ventilação e ar condicionado, com objetivo principal de controlar melhor o consumo de energia dos mesmos reduzindo, conseqüentemente, o seu desperdício. Verifica-se uma economia de até 30% com a utilização de aparelhos residenciais inteligentes. Para a comunicação entre os aparelhos residenciais as RSSF podem ser utilizadas devido às suas vantagens em termos de custos e complexidade de instalação [37];

- Segurança: a natureza de uma RSSF também torna o sistema vulnerável a ataques externos, ameaças físicas e virtuais. Os SGs lidam com dados sensíveis, confiáveis e confidenciais, que devem ser transmitidos com segurança a partir da instrumentação remota até os centros de coleta de dados para impedir o roubo e prevenir qualquer acesso não autorizado. Assim, mecanismos de segurança devem ser

implementados na aplicação de RSSF em SG. Além destes ataques e ameaças, as RSSF também podem ser afetadas pela estratégia de implantação da infraestrutura de comunicação, pela arquitetura do sistema, e pela natureza da aplicação [38][39];

- Interoperabilidade: os principais seguimentos do SG, (os consumidores de energia, as redes de distribuição e as unidades de geração de energia), tratam seus dados de diferentes formas. Assim, um padrão de comunicação que utilize RSSF que permita interoperabilidade é necessário neste ambiente de diferentes tecnologias [38].

C. O Padrão IEEE 802.15.4/Zigbee em Aplicações de SG

Não restam dúvidas que as aplicações que realizam a coleta de dados sensoriais e de processamento, têm impulsionado o desenvolvimento de RSSF [40] e estão se tornando cada vez mais populares devido às crescentes necessidades de tecnologias emergentes de instrumentação e controle remotos [41]. O padrão IEEE 802.15.4 [42] e o consórcio industrial que o suporta, o *ZigBee Alliance* [28] mostra-se como uma tecnologia ideal para suprir a demanda de mercado para tais aplicações. O baixo custo e a conectividade sem fio são algumas das características que fizeram o padrão particularmente adequado para RSSF [10].

O padrão IEEE 802.15.4 define as duas camadas inferiores: a camada física (PHY) e a subcamada de controle de acesso ao meio (MAC) [42]. A *ZigBee Alliance* parte destas duas camadas, fornecendo a camada de rede (NWK) e o arcabouço para a camada de aplicação. O arcabouço da camada de aplicação consiste na subcamada de suporte à aplicação (APS) e os objetos dos dispositivos ZigBee (ZDO) [28].

O padrão IEEE 802.15.4 opera em duas gamas de frequências separadas: 868/915 MHz e 2,4 GHz, respectivamente. A frequência mais baixa abrange tanto a banda europeia de 868 MHz quanto a de 915 MHz, utilizado em países como os Estados Unidos e Austrália. A camada PHY de frequência mais elevada é usada praticamente em todo o mundo [42].

A subcamada MAC do padrão IEEE 802.15.4 controla o acesso ao canal de rádio utilizando um mecanismo CSMA-CA. Suas funções também podem incluir a transmissão de quadros de sinalização, sincronização, e fornecendo um mecanismo de transmissão confiável sendo, portanto, adequado à utilização em aplicações de RSSF voltadas à SG [42].

Outros motivos que justificam a utilização do padrão IEEE 802.15.4 em conjunto com o protocolo de comunicação ZigBee para aplicações em SG residenciais são os seguintes [10]:

- A comunicação direta entre nós sensores do padrão IEEE 802.15.4 requerem menos largura de banda, demandando menos consumo energético dos nós;

- A instalação de uma RSSF do padrão IEEE 802.15.4 é simples, fornecendo confiabilidade e autoconfiguração da rede;

- O IEEE 802.15.4, em conjunto com o ZigBee oferecem um padrão ao nível da camada de aplicação para a funcionalidade dos dispositivos, permitindo a incorporação de nós sensores de diferentes fabricantes;

- O padrão IEEE 802.15.4 foi concebido após o *Wi-Fi* e o *Bluetooth* e foi projetado especificamente para coexistir com tecnologias na banda ISM (*Industrial Scientific and Medical*);
- As redes do padrão IEEE 802.15.4 escolhem o canal menos utilizado por outras tecnologias sem fio para o seu funcionamento e podem até mesmo mudar de canal;
- Os dispositivos do padrão IEEE 802.15.4 possuem pacotes geralmente pequenos. Tais pacotes normalmente não têm problemas em trafegar no meio físico de comunicação sem fio;
- O padrão IEEE 802.15.4 possui um mecanismo baseado em reconhecimento (*acknowledgment*), reenviando a mensagem, se nenhuma confirmação for recebida;
- O sensoramento de dispositivos em um SG residencial não necessita trafegar grandes quantidades de dados. Sendo assim, o padrão IEEE 802.15.4 é mais indicado em relação ao padrão IEEE 802.11x.

Ao usar uma RSSF em uma SG com grande número de nós sensores, a adoção de um protocolo de roteamento é necessária para garantir a Qualidade de Serviço (QoS) no monitoramento satisfatório da rede, impactando também no tempo de vida dos nós sensores, em regiões onde a disponibilidade de fonte de energia permanente seja inviável ou esteja indisponível [10].

Este artigo tem como objetivo realizar a análise de desempenho dos protocolos de roteamento em uma RSSF, buscando o protocolo que melhor se adapte a grade de Redes de Energia Inteligentes (Smart Grids) aplicadas a um condomínio residencial. Os protocolos a serem utilizados nas simulações deste trabalho são o AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector Routing), o AOMDV (Ad hoc On Demand Modified Distance Vector Routing) [11], o DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector) e o HTR (Heterogeneous Routing Protocol) [11]. Estes protocolos são muito utilizados para diversas aplicações de monitoramento que exigem alta eficiência na comunicação e baixo consumo energético [10]. O protocolo de roteamento ZBR (ZigBee Routing Algorithm) [11] vai ser analisado indiretamente através da comparação do AODV com o HTR, uma vez que o ZBR é um protocolo híbrido baseado nestes dois outros protocolos.

Alguns parâmetros de rede principais, tais como a porcentagem de perda de pacotes, taxa de transferência, atraso fim-a-fim, *jitter* e o consumo de energia serão analisados, baseados no estudo desenvolvido em [11]. A partir dos resultados, será possível determinar qual protocolo de roteamento é o mais indicado para esta aplicação. A avaliação de desempenho das RSSF será realizada no software de simulação NS2 (Network Simulator 2) [21].

A principal contribuição deste trabalho é mostrar um conjunto mais detalhado de testes de QoS no uso de RSSF em Smart Grids em cenário de simulação baseado em um ambiente residencial de condomínio de casas. Os trabalhos anteriores nesta área utilizaram apenas ambientes pequenos e simétricos [13] ou não levaram em consideração o consumo de energia em RSSF com muitos nós [10].

Esse trabalho está dividido como se segue: na seção II é apresentada uma visão geral dos protocolos de roteamento mais utilizados em RSSF do padrão IEEE 802.15.4. O ambiente de

simulação utilizado para a comparação do desempenho dos protocolos de roteamento alvos deste trabalho é discutido e exposto na seção III. Os parâmetros de QoS utilizados para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento deste trabalho são vistos na seção IV. Os resultados das simulações que comparam os parâmetros de QoS alvos deste estudo encontram-se na seção V. A seção VI apresenta as considerações finais deste trabalho.

II. VISÃO GERAL DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO

O roteamento em RSSF pode demandar mais recursos do que em outras redes sem fio, tais como redes *ad-hoc* móveis ou redes celulares, pelas seguintes razões [1]:

- Os nós de uma RSSF normalmente permanecem estacionários após a sua instalação, o que resulta em alterações topológicas previsíveis e pouco frequentes;
- Os nós sensores exigem um gerenciamento cuidadoso dos recursos por causa de suas severas restrições de energia, processamento e armazenamento;
- Os requisitos do projeto de uma RSSF dependem da aplicação porque tais redes são designadas a um tipo específico de aplicação;
- Quase todas as aplicações de RSSF requerem fluxo de dados de sensoramento de várias fontes para uma estação base particular;
- A coleta de dados é, muitas vezes, baseada em localização, portanto a posição correta dos nós sensores é importante. A posição é detectada utilizando métodos baseados em triangulação, através da potência do transceptor e por alguns pontos conhecidos. Também é possível utilizar nós equipados com GPS para esta finalidade. Porém, é desejável dispor de soluções independentes de GPS porque a utilização do GPS gera um consumo de energia adicional.

Devido a estes fatores, novos mecanismos foram propostos para resolver o problema do roteamento em redes de sensores. Esses mecanismos levam em consideração características inerentes das RSSF em conjunto com os requisitos das aplicações e arquitetura. Um esquema de roteamento eficiente irá proporcionar reduções significativas de custos de energia e melhorar a longevidade da rede. Encontrar e manter rotas em RSSF são questões importantes a se levar em consideração porque as restrições em matéria de energia e alterações inesperadas sobre o status do nó (ineficiência ou falha, por exemplo) pode dar origem a alterações topológicas frequentes e inesperadas. As Técnicas de roteamento propostas na literatura para RSSF utilizam algumas táticas de roteamento que são conhecidas e apropriadas para essas redes, tendo como objetivo minimizar o consumo de energia [17].

Ao utilizar uma RSSF com um grande número de nós sensores distribuídos em um SG instalado em um condomínio residencial, o uso de um protocolo de roteamento é necessário para garantir QoS no monitoramento satisfatório da rede. Os Protocolos de RSSF podem ser classificados como planos (reativo e proativo), hierárquicos, baseados em localização, e híbridos [24].

Nos protocolos de roteamento planos reativos, como o DSR (*Dynamic Source Routing*) [7], o AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector Routing*) [18], o R3E (*Reliable Reactive*

Routing Enhancement) [14] e o HEER (*Hybrid Energy Efficient Reactive Protocol*) [15], a rota de processamento só acontece quando há informação a ser transmitida. Isso cria rotas adaptáveis que se encaixam ao ambiente e podem sofrer constantes mudanças em uma RSSF, tais como a inserção e remoção de nós. É importante notar que, uma vez que cada nó atualiza sua tabela de rota individual, a topologia da rede é alterada e novas rotas são criadas. Isto implica no processamento constante durante a transmissão de dados, aumentando o consumo de energia e a latência [11].

Os protocolos de roteamento planos proativos, tais como o OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) [23], o DSDV (*Destination-Sequenced Distance-Vector*) [4] e o CCE-LCH (*Distributed Energy Efficient Clustering with Linear Cluster Handling*) [19] atualizam constantemente as informações de roteamento de cada nó para todos os outros nós da rede. Isso cria uma sobrecarga na transmissão desta informação através da rede, consumindo parte da largura de banda da mesma, a fim de manter a tabela de roteamento atualizada [5].

Os protocolos planos normalmente aumentam a quantidade de roteamento e processamento de informações, quando o tamanho da rede cresce. Os protocolos de roteamento hierárquicos, como o HTR (*Heterogeneous Routing Protocol*) [3], o CGRS (*Clusterhead Gateway Switching Routing*) [6], o LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [25], o HRTS (*Hierarchical Reactive Time Synchronization Protocol*) [22], o LEACH2 (*Low-energy Adaptive Clustering Hierarchy 2*) [16] e o FTE-LEACH (*Fault-Tolerant and Energy-Efficient LEACH*) [11] procuram resolver este problema através da criação de *clusters*, que são grupos de nós que funcionam como subredes, limitando o tamanho da tabela de roteamento e o tamanho dos pacotes de atualização dentro do grupo. Os *clusters* são tipicamente agrupados de acordo com a proximidade geográfica dos nós.

Cada *cluster* tem um líder, chamado de *cluster head* que se comunica com os outros nós do *cluster* e com outros *cluster heads* da rede [24].

Os protocolos de roteamento baseados em localização geográfica, tais como o GEAR (*Geographical and Energy Aware Routing*) [26], o GPSR - TPC (*Greedy Perimeter Stateless Routing in Wireless Networks*) [8] e o LDDP (*A Location-based Directed Diffusion Routing Protocol for Smart Home Sensor Network*) [9], usam o GPS para determinar a posição dos nós e a melhor rota possível. Estes protocolos podem organizar a rede em topologias simples ou hierárquicas, dependendo da disponibilidade dos dispositivos de geolocalização. O uso desses protocolos aumenta o custo do equipamento e o consumo de energia adicional [24], devido a adoção do GPS. Assim sendo, estes protocolos não serão testados nas simulações do presente trabalho.

Os protocolos de roteamento híbridos, tais como o DDR (*Distributed Dynamic Routing Algorithm for Mobile ad hoc Networks*) [20], o ZBR (*ZigBee Routing Algorithm*) [28] e o ZRP (*Zone Routing Protocol*) [2] possuem características de protocolos planos e hierárquicos e podem ou não usar técnicas de geolocalização. Estes protocolos criam grupos de nós que fazem roteamentos próximos um dos outros, reduzindo assim a sobrecarga da rede. Normalmente, uma abordagem proativa é realizada dentro dos grupos. Quando dois nós distantes estão

envolvidos, o percurso é calculado por meio de técnicas de descoberta de rota [24].

O ZBR é um dos protocolos mais utilizados na indústria, e adapta-se ao tamanho da rede. Em redes muito pequenas a conexão ponto a ponto é utilizada, e em redes maiores, com a topologia em malha, o AODV é usado. Já em topologias hierárquicas, o HTR é utilizado [28].

Como as redes SG são geralmente compostas de vários nós, é importante encontrar o protocolo de roteamento que seja mais adequado para esta aplicação, garantindo melhor desempenho e QoS. Os protocolos utilizados nas simulações para esse trabalho são os seguintes: AODV, AOMDV, DSDV e HTR. Estes protocolos são muito utilizados para diversas aplicações, tais como o uso em MANETs [18] e RSSF utilizadas em parques eólicos [10], ou seja, em RSSF que trabalham com grande quantidade de nós sensores. O ZBR vai ser analisado indiretamente através da comparação do AODV com o HTR, uma vez que o ZBR é um protocolo híbrido baseado nestes dois outros protocolos.

III. O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Esta seção apresenta o cenário de simulação utilizado neste trabalho. Usando o software *Google Earth* [29], uma imagem de um condomínio na cidade de Natal/RN, no Brasil foi capturada e os nós sensores foram distribuídos, um em cada habitação (Fig. 1).

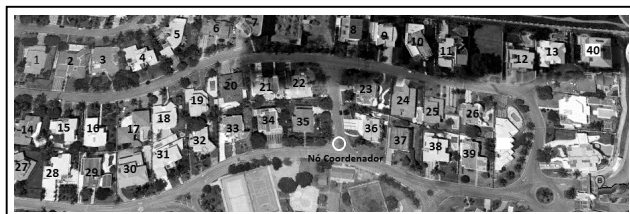


Fig. 1. Cenário de simulação com a distribuição dos nós sensores

Todas as simulações desse trabalho foram feitas na versão 2.35 do NS-2. O NS-2 é uma ferramenta de código aberto para simulação de eventos discretos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do projeto VINT na Universidade da Califórnia em Berkeley [21].

Na simulação, os protocolos de roteamento foram testados inicialmente com 40 nós sensores. Posteriormente, foram acrescentados 78 e, por fim 90 nós sensores, para atestar a eficiência dos protocolos em densidades maiores de nós. O tempo de simulação foi de 3.600 segundos, o protocolo de transporte utilizado foi o UDP e a fonte geradora de tráfego, CBR, já que as RSSF do padrão IEEE 802.15.4 operam apenas em UDP. A área de simulação foi de 170 x 100 metros; o modelo de propagação utilizado foi o *two-ray ground*. O tamanho da mensagem de cada pacote foi setado com 70 bytes. A tabela I resume os parâmetros utilizados na simulação.

TABELA I - PARÂMETROS USADOS NA SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
Padrão de Comunicação	IEEE 802.15.4
Antena	Omni direcional
Tempo de Simulação	3.600s
Área de Simulação	170m x 100m
Modelo de Propagação	Two Ray Ground
Protocolos de Roteamento	AODV, AOMDV, DSDV, HTR
Número de Nós	40, 70 e 90
Taxa de Transmissão	5 pacotes/s
Tamanho do Pacote	70 bytes
Protocolo de Transporte	UDP
Tipo de Tráfego	CBR

É importante determinar se a comunicação ocorre no modo “sempre ligado” (sem hibernação dos transceptores de cada nó) ou no modo de transmissão periódica dos dados, intercaladas com a hibernação de transceptores dos nós sensores, exceto o coordenador, que fica permanentemente ligado. Este artigo avaliou ambos os casos.

A transmissão começa nos primeiros 40s e, no modo de hibernação, o tempo em que os transceptores hibernam é de 5s. A fim de melhorar a precisão dos testes, foram realizadas 10 rodadas de 1 hora cada.

Os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento deste artigo foram: pacotes perdidos (avalia a quantidade de dados perdida entre os nós e o coordenador da rede), vazão (mede a quantidade de dados enviada), atraso fim-a-fim (indica o *delay* entre os nós e o coordenador da RSSF), *jitter* (diferença de tempo entre o *delay* anterior e o atual) e energia residual (mensura a eficiência energética do protocolo de roteamento) [11].

IV. MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Os parâmetros de QoS a serem utilizados para avaliar o desempenho dos protocolos de roteamento deste trabalho são:

A. Pacotes Perdidos

A perda de pacotes ocorre quando um ou mais pacotes de dados trafegam através de uma rede e não conseguem chegar ao seu destino. Ele é medido como uma porcentagem de perda de pacotes no que diz respeito aos pacotes enviados [27].

B. Taxa de Transferência

É medida em termos da entrega bem-sucedida do pacote de dados dentro do tempo limite de transmissão, utilizando o número de bits do pacote recebido por unidade de tempo [27].

C. Atraso fim-a-fim

O atraso fim-a-fim é um parâmetro usado para medir o desempenho em relação ao tempo necessário para um pacote percorrer a rede a partir de um nó de origem até um nó de destino. Ele avalia a latência entre os dados enviados pelos nós

sensores e recebidos pelo nó de destino. O atraso fim-a-fim inclui todos os possíveis atrasos causados durante a descoberta de rota, atraso de retransmissão, atraso de fila e tempo de retransmissão [27].

D. Jitter

O *jitter* é uma medida de desempenho utilizada para mensurar o desvio real da periodicidade, em eventos de inatividade nos pacotes através da rede [27].

E. Energia Residual

A energia residual é a energia restante na rede após a simulação [27].

V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os gráficos abaixo apresentam os resultados das simulações, onde serão analisados e comparados cada protocolo de roteamento utilizado em relação às suas métricas de desempenho.

A. Pacotes Perdidos

A Fig. 2 e a Fig. 3 mostram a perda média de pacotes nos esquemas de comunicação “sempre ligado” e em modo de hibernação, respectivamente. No modo “sempre ligado”, todos os protocolos de roteamento testados apresentaram um elevado número de perdas de pacotes. A grande quantidade dessas perdas pode ser justificada pela disputa de comunicação e da concessão da permissão para se comunicar com o coordenador. No modo de hibernação, a média de pacotes perdidos diminuiu quando comparado ao modo “sempre ligado”. Em todos os casos, a perda média de pacotes aumenta com a adição de nós.

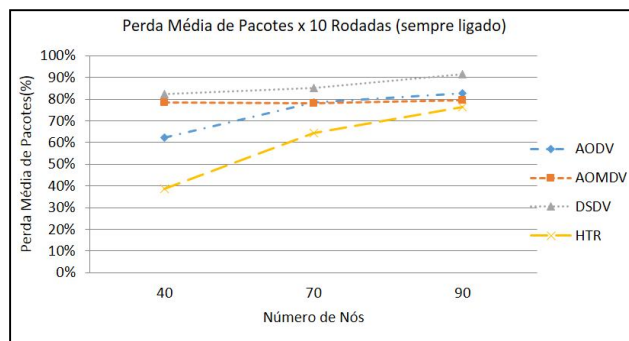


Fig. 2. Perda média de pacotes. Modo “sempre ligado”

Tanto no modo de hibernação quanto no modo “sempre ligado”, a média de perda de pacotes do protocolo DSDV é muito alto, porque é um protocolo proativo e precisa manter suas tabelas de roteamento sempre atualizadas, demandando um tempo adicional para atualizá-las. Se algum nó quer enviar pacotes durante este intervalo, esses pacotes são colocados na fila e quando a fila está cheia, os pacotes serão descartados.

No modo de hibernação, apenas o HTR manteve um percentual aceitável de perda, que é inferior à margem de 5% desejável para esta aplicação.

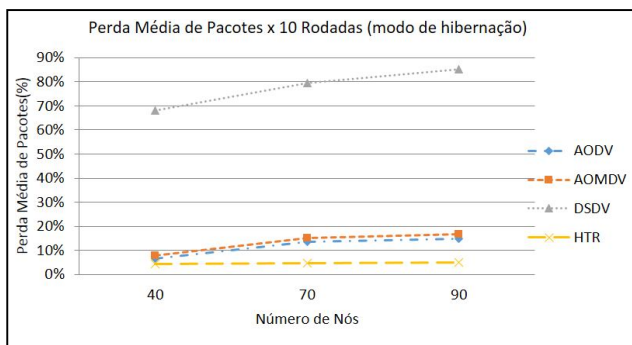


Fig. 3. Perda média de pacotes. Modo hibernação

B. Vazão

A vazão média mostrada nas Fig. 4 e Fig. 5 demonstram que todos os protocolos tiveram uma maior vazão no modo “sempre ligado”.

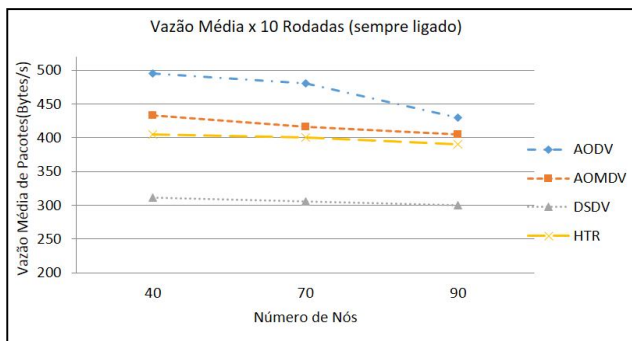


Fig. 4. Vazão média de pacotes. Modo “sempre ligado”

No modo de hibernação, o protocolo de roteamento HTR apresentou os melhores resultados, bem próximos do AODV. O DSDV teve o pior rendimento em ambos os modos. Em geral, o desempenho manteve-se estável com o aumento da densidade de nós para todos os protocolos de roteamento.

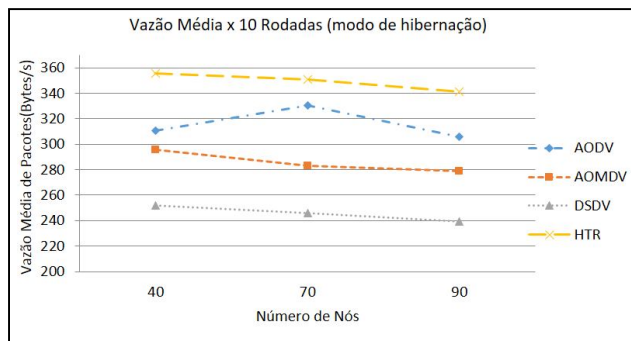


Fig. 5. Vazão média de pacotes. Modo hibernação

C. Atraso fim-a-fim

As Fig. 6 e Fig. 7 mostram uma comparação entre o atraso médio fim-a-fim dos protocolos de roteamento nos modos “sempre ligado” e de hibernação, respectivamente. No DSDV verifica-se uma imediata perda de pacotes devido a uma falha de enlace. O DSDV não é adequado para grandes redes, já que o seu desempenho não é satisfatório em aplicações como as aqui simuladas.

Todos os outros protocolos de roteamento testados apresentaram valores de atraso médio aceitáveis. O protocolo de roteamento hierárquico HTR obteve os melhores resultados neste quesito.

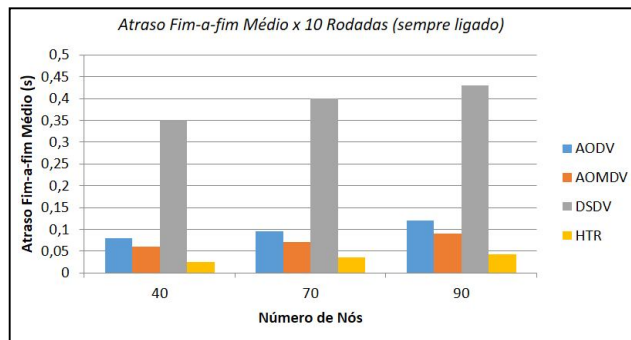


Fig. 6. Atraso fim-a-fim médio. Modo “sempre ligado”

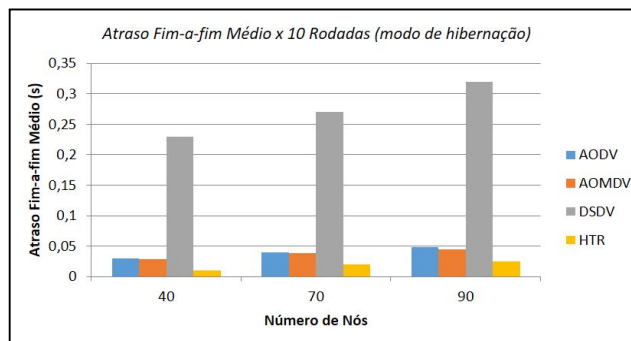


Fig. 7. Atraso fim-a-fim médio. Modo hibernação

D. Jitter

O jitter médio mostrado nas Fig. 8 e Fig. 9 demonstrou que o protocolo DSDV teve o pior resultado, devido à alta densidade de nós da rede que comprometeu o seu desempenho.

Com base nos resultados, é possível notar que em todos os protocolos, exceto no DSDV, o jitter médio manteve-se em níveis aceitáveis. O HTR obteve o melhor desempenho.

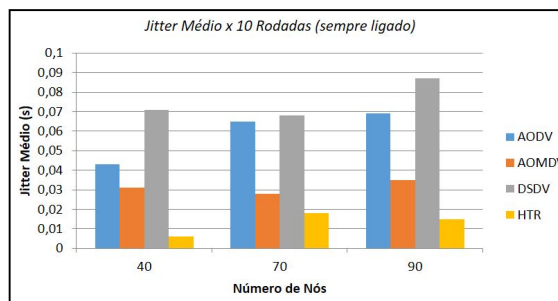


Fig. 8. Jitter médio. Modo "sempre ligado"

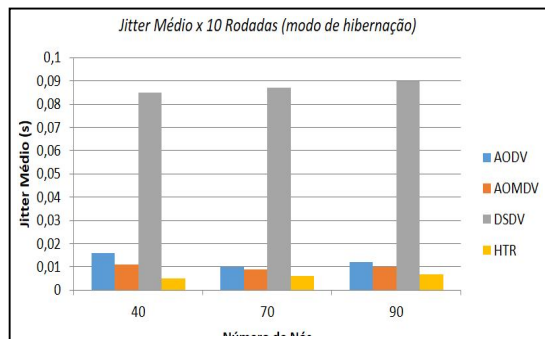


Fig. 9. Jitter médio. Modo hibernação

E. Energia residual

As Fig. 10 e Fig. 11 mostram uma comparação entre a energia residual média dos protocolos de roteamento nos modos de comunicação "sempre ligado" e em hibernação, respectivamente.

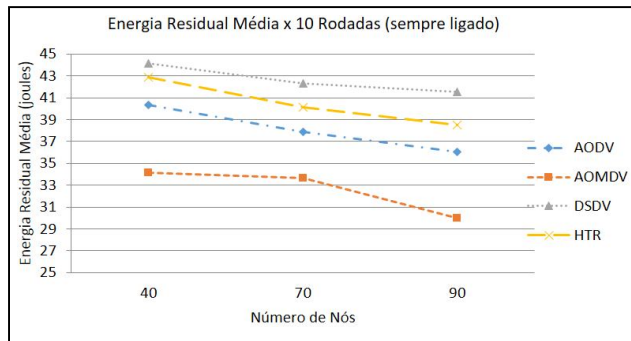


Fig. 10. Energia residual média. Modo "sempre ligado"

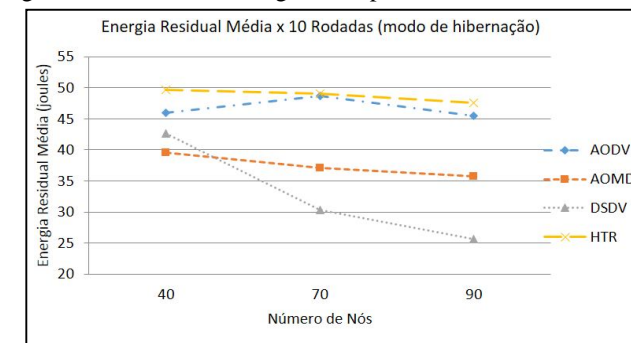


Fig. 11. Energia residual média. Modo hibernação

VI. CONCLUSÃO

As tecnologias de redes inteligentes (*smart grids*) provavelmente vão acelerar a velocidade e o escopo de mudanças dos fornecedores de energia, clientes e programas de eficiência energética. A futura residência inteligente de alto desempenho não só terá dutos, conexões e sistemas eficientes de energia, mas também será equipada com as tecnologias que se comunicam com os clientes e equipamentos que fazem uso desta tecnologia. Os governos devem incentivar os prestadores de serviço e provedores de energia na adoção de SG, modificando regras associadas com uso eficiente da energia e da emissão de carbono, permitindo também o acesso dos clientes aos dados de serviços públicos e políticas que promovam a utilização da eficiência energética, levando a inovações que incluam dispositivos digitais de monitoramento da energia nas residências.

Este artigo apresentou uma análise sobre a avaliação de desempenho dos quatro protocolos de roteamento mais utilizados em RSSF (AODV, AOMDV, DSDV e HTR), com base no padrão IEEE 802.15.4 aplicado em smart grids para uso em condomínios residenciais. A simulação foi baseada em uma área real extraída do Google Earth [29]. Os parâmetros de desempenho, tais como perdas de pacotes, vazão, atraso fim-a-fim, jitter e energia residual foram testados.

Os resultados apresentados mostraram que o protocolo de roteamento HTR obteve o melhor desempenho quando comparado aos demais protocolos, no esquema de comunicação em hibernação. Devido às características de organização hierárquica do HTR, onde os nós sensores são agrupados em *clusters*, esse protocolo é o mais eficiente em aplicações semelhantes à avaliada neste trabalho.

Como trabalho futuro, pretende-se estudar outras métricas de desempenho em grandes áreas residenciais e também implementar algumas técnicas para melhorar o consumo de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Savvides, C. Han, M. Srivastava, "Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors," In Proc. 7th ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Italy, 2001, pp. 166-179.
- [2] A. Chaudhari; P. Jaini, "Stealthier Attack on Zone routing Protocol in Wireless Sensor Network", 2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies pp. 734-738.
- [3] B. Nefzi, Ye-Qiong Song Performance Analysis and improvement of ZigBee routing protocol. HAL archives-ouvertes. 15-11-2007.K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [4] C. E. Perkins; T.J. Watson; P. Bhagwat, "Highly dynamic destination sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers," SIGCOMM '94 Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications, 1994, pp. 234-244.
- [5] C. Cordeiro; D. Agrawal, "Mobile ad hoc networking," XX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2002, pp.125-186.
- [6] C.-C. Chiang, "Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel," IEEE SICON'97, 1997, pp.197-211.
- [7] D. B. Johnson; D. A. Maltz; J. Broch, "DSR: the dynamic source routing protocol for multihop wireless ad hoc networks," Ad hoc networking, 2001, pp. 139-172.
- [8] D. F. Macedo; P. F. Macedo; L. H. A. Correia; A. L. Santos; A. A. F. Loureiro; J. M. S. Nogueira, "Um protocolo de roteamento para redes ad hoc com QoS baseado no controle da potência de transmissão," 24 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2006, pp. 605-620.
- [9] D. Cheng; Y. Song; Y. Mao; X. Wang, "LDDP: A Location-based Directed Diffusion Routing Protocol For Smart Home Sensor Network" 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2014), pp. 510-514.
- [10] Felipe D. M. Oliveira, Rodrigo S. Semente, Tálison A. C. Melo, Andrés O. Salazar. QoS Analysis of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks in the Monitoring of Wind Farms. I2MTC 2014.
- [11] F. D. M. de Oliveira, "FTE-LEACH: Um Protocolo Energeticamente Eficiente e Tolerante a Falhas Aplicado às Redes Industriais de Sensores sem Fio", Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação. pp. 144. 2015.
- [12] Khan. Fahad. et al. "A survey of communication technologies for smart grid connectivity." 2016 International Conference on Computing. Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube). IEEE, 2016.
- [13] Hamid Gharavi and Bin Hu Multigate. Communication Network for Smart Grid. Proceedings of the IEEE - Issue Date: 2011 On page(s): 1028 – 1045 ISSN: 0018-9219 Print ISBN: Digital Object Identifier: 10.1109/JPROC.2011.2123851
- [14] J. Niu; L. Cheng; Y. Gu; L. Shu; S. K. Das, "R3E: Reliable Reactive Routing Enhancement for Wireless Sensor Networks" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, VOL. 10, NO. 1, FEBRUARY 2014 pp. 784-794
- [15] Javaid; Nadeem; S. N. Mohammad; K. Latif; U. Qasim, Z. A. Khan; M. A. Khan. "HEER: hybrid energy efficient reactive protocol for wireless sensor networks." In Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECP), 2013 Saudi International, pp. 1-4. IEEE, 2013.
- [16] K. Khan. M. Saiid. S. Mahmood. Z.A. Khan. U. Oasim. N. Javaid. "(LEACH)2: Combining LEACH with Linearly Enhanced Approach for Cluster Handling in WSNs". AINA. 2015. 2015 IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). pp. 394-399, doi:10.1109/AINA.2015.212.
- [17] L. Junhai, X. Liu, Y. Danxia, "Research on Multicast Routing Protocols for Mobile ad-hoc Networks," Computer Networks, 2008, Vol. 52, Issue 5, pp. 988-997.
- [18] Manveen Singh Chadha, Rambir Joon, Sandeep Simulation and Comparison of AODV, DSR and AOMDV Routing Protocols in MANETs. International Journal of Soft Computing and Engineering July 2012.
- [19] M. Sajid; K. Khan; U. Quasim; Z. A. Khan; S. Tariq; N. Javaid. "A new linear cluster handling (LCH) technique toward's energy efficiency in linear WSNs" 2015 IEEE 29th International Conference on advanced information networking and application, pp. 389-393.
- [20] N. Nikaein; H. Labiod; C. Bonnet "DDR – Distributed dynamic routing algorithm for mobile ad hoc networks," Mobile and Ad Hoc IEEE Networking and Computing, MobiHOC 2000 First Annual Workshop, 2000, pp. 19-27.
- [21] Fall, Kevin, and Kannan Varadhan. "The network simulator (ns-2)." URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns> (2007).
- [22] S. P. Ardakani; J. Padget; M. de Vos, "HRTS: A hierarchical reactive time synchronization protocol for wireless sensor networks", Social informatics and telecommunications engineering 2014 pp. 47-62.
- [23] T. Clausen; P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)," Project Hipercom, INRIA, 2003, pp. 1 -56.
- [24] Xiaoyan Hong; Kaixin Xu; Gerla, M., "Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks," IEEE, Volume 1 6, Issue 4, 2002, pp. 11 -21.
- [25] W. Heinzelman; A. Chandrakasan; H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," Proceedings of the 33rd International Conference on System Sciences (HICSS '00), 2000, pp. 1 -10.
- [26] Yan Yu, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, "Geographical and Energy Aware Routing:a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks," UCLA, 2001, pp. 2-11.
- [27] Yi Zhang; A.A. Chowdhury; D.O. Koval, "Probabilistic wind energy modeling in electric generation system reliability assessment," Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2010, pp. 1 -8.
- [28] ZigBee Alliance, "ZigBee specification standard," Dec. 2014.
- [29] Qi, Feng, John Z. Zhai, and Gaihong Dang. "Building height estimation using Google Earth." Energy and Buildings 118 (2016): 123-132.
- [30] Yang, Qiang, Javier A. Barria, and Tim C. Green. "Communication infrastructures for distributed control of power distribution networks." IEEE Transactions on Industrial Informatics 7.2 (2011): 316-327.

- [31] Premarathne, Uthpala Subodhani, Ibrahim Khalil, and Mohammed Atiquzzaman. "Trust based reliable transmissions strategies for smart home energy consumption management in cognitive radio based smart grid." *Ad Hoc Networks* 41 (2016): 15-29.
- [32] Elkhorchani, Habib, and Khaled Grayaa. "Novel home energy management system using wireless communication technologies for carbon emission reduction within a smart grid." *Journal of Cleaner Production* (2016).
- [33] Gungor, Vehbi C., et al. "Smart grid and smart homes: key players and pilot projects." *IEEE Industrial Electronics Magazine* 6.4 (2012): 18-34.
- [34] Kilbourne, Brett, and Klaus Bender. "Spectrum for Smart Grid." (2010).
- [35] Spence, Alexa, et al. "Public perceptions of demand-side management and a smarter energy future." *Nature Climate Change* 5.6 (2015): 550-554.
- [36] Weber, Verena. "Smart sensor networks: Technologies and applications for green growth." *The Organization for Economic Cooperation and Development* (2009).
- [37] Guan, Xiaohong, Zhanbo Xu, and Qing-Shan Jia. "Energy-efficient buildings facilitated by microgrid." *IEEE Transactions on Smart Grid* 1.3 (2010): 243-252.
- [38] Fan, Zhong, et al. "The new frontier of communications research: smart grid and smart metering." *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking*. ACM, 2010.
- [39] Gungor, Vehbi C., and Frank C. Lambert. "A survey on communication networks for electric system automation." *Computer Networks* 50.7 (2006): 877-897.
- [40] Gungor, Vehbi C., Bin Lu, and Gerhard P. Hancke. "Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid." *IEEE transactions on industrial electronics* 57.10 (2010): 3557-3564.
- [41] Livgard, Eva Fosby. "Electricity customers' attitudes towards Smart metering." *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2010.
- [42] IEEE Standards Association. "IEEE 802.15.4 Standard". 2011. URL: <https://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2011.pdf>.