

Análise Comparativa entre *Testbed* e Simulador em Redes de Sensores Sem Fio IEEE 802.15.4 com *Unslotted CSMA/CA*

Gustavo N. Martins*, Anderson F. B. F. da Costa[†], Reinaldo C. M. Gomes* e Marcelo S. de Alencar*

*Universidade Federal de Campina Grande [†]Instituto Federal da Paraíba, Campus Campina Grande gustavo-martins@copin.ufcg.edu.br, anderson@ifpb.edu.br, reinaldo@computacao.ufcg.edu.br, malencar@dee.ufcg.edu.br

Abstract—Resumo – Redes de sensores sem fio (RSSF) têm se tornado um pilar importante em diversos cenários de aplicação (e.g. internet das coisas, cidades inteligentes, agricultura de precisão, etc). Muitos estudos acerca das RSSF, que possibilitaram o aperfeiçoamento da tecnologia, tiveram as ferramentas de simulação como um importante recurso para viabilizar a sua condução, devido ao menor custo e tempo necessário quando comparado com *testbeds*. Mesmo diante dos diversos trabalhos científicos que empregaram ferramenta de simulação para viabilizar o estudo, algumas investigações têm apontado para possíveis problemas acerca das ferramentas de simulação em RSSF (e.g. Modelos de simulação não realístico). Este trabalho teve como objetivo avaliar a confiabilidade da ferramenta de simulação em RSSF, Castalia, com base em um *testbed* equivalente. Os resultados demonstraram que a ferramenta de simulação não contempla as nuances previstas no tocante à descarga da bateria e, como consequência, variação do tráfego de dados. Além do mais, também foi possível identificar uma tendência de rendimento invariável dos resultados obtidos por meio da ferramenta de simulação com base na replicação contemplada pelo experimento.

Palavras-chave—Confiabilidade, Protocolo CSMA/CA, RSSF, Simulador, SunSPOT, *Testbed*

I. INTRODUÇÃO

Redes de sensores sem fio (RSSF) têm ganhado notoriedade em diversos contextos de aplicação em meio às novas demandas emergentes, tais como Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT), cidades inteligentes, agricultura de precisão, etc. [1]–[4]. Para que tais aplicações se tornassem exequíveis nesses contextos, os avanços alcançados no âmbito das Tecnologias de Sistemas Eletromecânicos em Escala Micrométrica (*Microscale Electro-Mechanical Systems* – MEMS) e nanométrica (*Nanoscale Electro-Mechanical Systems* – NEMS) foram imprescindíveis [5]–[7]. Mesmo diante dos avanços tecnológicos obtidos, as RSSF ainda apresentam algumas restrições na capacidade de processamento e quantidade reduzida de memória, além do fornecimento de energia limitado devido às restrições de energia impostas pelo uso de baterias como fonte de energia [8]. A partir desse panorama, iniciativas de investigação têm sido tomadas visando melhorar diversos aspectos das RSSF, tais como: problemas relacionados à confiabilidade de comunicação, roteamento, segurança, consumo de energia, etc. No âmbito dessas pesquisas, ferramentas de simulação

têm assumido um papel fundamental na realização de experimentos de forma mais ágil e menos custosa, quando comparadas aos experimentos conduzidos por meio de *testbed* [9]. Para que seja possível simular um RSSF, em síntese, ferramentas englobam um conjunto de modelos que são capazes de representar, com certo grau de aproximação, o comportamento dos elementos contidos na rede e sua interação. No domínio das RSSF, as ferramentas são capazes de simular desde o comportamento do próprio nó sensor (i.e. camadas de abstração e seu funcionamento) até as condições ambientais que interferem no envio e recebimento dos dados transmitidos (i.e. modelo do canal sem fio) [10].

Entretanto, mesmo sendo um recurso extremamente explorado em estudos envolvendo RSSF, algumas autores evidenciam que ferramentas de simulação em RSSF não contemplam fatores importantes, em alguns cenários, que podem influenciar o desempenho das redes, como também questiona a confiabilidade dos resultados oriundos dessas ferramentas [11]–[14]. Com base nessa perspectiva, faz-se necessário avaliar a confiabilidade das ferramentas de simulação aplicadas às RSSF por meio de análise comparativa entre ferramenta de simulação e *testbeds* - utilização de sensores reais. Sendo assim, este artigo visa analisar a confiabilidade da implementação do protocolo CSMA/CA *unslotted* no simulador Castalia, com base em seu *testbed* equivalente implementado na plataforma de sensoriamento SunSPOT.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta os trabalhos relacionados. A Seção III detalha aspectos relacionados com a tecnologia IEEE 802.15.4. Em seguida, a Seção IV apresenta o simulador de RSSF Castalia. Na seção V, a plataforma experimental de sensoriamento SunSPOT é apresentada. Os detalhes sobre o experimento são discutidos na Seção VI. A Seção VII apresenta a análise dos dados obtidos. A ameaça à validade do trabalho é debatida na Seção VIII. As conclusões sobre os achados da pesquisa são discutidas na Seção IX. Por fim, os agradecimentos são destacados na Seção X.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Simulação tem sido um recurso bastante explorado em pesquisas envolvendo RSSF devido ao alto custo e tempo

exigido para realização de *testbeds*. Entretanto, os modelos utilizados pelas ferramentas de simulação apenas reproduzem, de forma aproximada, o *modus operandi* das RSSF, não sendo capazes de reproduzir fidedignamente o seu funcionamento, sobretudo os aspectos relacionados ao meio de comunicação. Todavia, sabido das nuances referentes à aproximação dos achados oriundos da simulação, ferramentas de simulação ainda continua sendo um recurso valioso e viabilizador em vários domínios das RSSF.

Com intuito de realçar a importância das ferramentas de simulação no contexto das RSSF, pode-se verificar por meio de [12], que a quantidade de trabalhos suportados por simuladores acerca das redes de computadores e comunicação é significativa. Em torno de 11% dos 36103 trabalhos publicados, durante o período de janeiro de 2006 à dezembro de 2010, que tratam de redes de computadores, redes móveis, etc., utilizaram simuladores para efetuar testes e validar seus achados. Esse resultado compreende conferências de notório reconhecimento pela comunidade científica especializada: IEEE ICC, VTC, INFOCOM, GLOBECOM, PIMRC, WiCOM, WCNC e MILCOM. Também vale salientar que parte das ferramentas de simulação citadas nessas pesquisas, tais como OMNET++ e NS, disponibilizam versões específicas para simular RSSF.

Contudo, alguns autores ressaltam a importância da realização de pesquisas que compreendam *testbeds* para validar achados de pesquisa no campo das RSSF. Como exemplo, em [14], preconiza-se a necessidade da adoção de experimentos com sensores reais acerca dos protocolos que tratam de eficiência energética e o consumo de energia por parte dos transceptores, pois simuladores não contemplam alguns fatores do ambiente que impactam diretamente no canal de comunicação sem fio (e.g. ruído impulsivo). Ademais aos aspectos não compreendidos pelas ferramentas de simulação, existem outros tipos de preocupações inerentes ao uso de ferramentas de simulação, como exemplo, diferença de desempenho e/ou resultado entre as ferramentas. Os problemas inerentes ao desempenho das ferramentas não são objeto de avaliação neste trabalho. Exemplos de trabalhos com ênfase nessa linha de pesquisa podem ser visto em [15], [16]. Essas investigações visaram avaliar a acurácia das ferramentas de simulação com o objetivo de verificar a confiabilidade das ferramentas com ênfase em pontos específicos que não contempla o escopo desta pesquisa. Relativo à confiabilidade das ferramentas, em [13], Colesanti *et al.* realizaram uma das pesquisas precursoras sobre avaliação da acurácia da ferramenta OMNET++ e uma das suas extensões, a *MAC Simulator framework*. Para tanto, um *testbed* composto de seis nós *TMoteSky* foi montado e quatro cenários de avaliação experimental definidos. O mesmo *set-up* foi configurado na ferramenta de simulação. A avaliação consistiu em observar um algoritmo de *flooding* (protocolo B-MAC) em ambos os ambientes de implantação, com base em um conjunto de métricas e nos diferentes cenários estabelecidos. Os achados desse trabalho apontaram para uma superestimação das métricas por parte do simulador em todos os cenários. Entretanto, após as modificações realizadas no simulador com o subsídio de informações coletadas durante

o experimento, a acurácia da ferramenta foi superior a 90% em todos os cenários. Com o mesmo objetivo de avaliar a acurácia de ferramentas de simulação em RSSF, Bergamini *et al.* utilizaram como referência, em [11], dados reais obtidos pelo *Motelab testbed* [17]. Para tal, os autores reproduziram o mesmo *set-up* utilizado no *Testbed* em duas ferramentas de simulação, Castalia e NS2. Os achados da pesquisa elicitaram questionamentos relevantes acerca do tema. A acurácia¹ da conectividade e topologia, como também a taxa de entrega de pacotes, foram as métricas usadas na avaliação. Como parte do produto dessa investigação, pode-se constatar que os simuladores podem atingir um nível de acurácia maior se o "ajuste fino", com base na especificação do *hardware* do sensor, for efetuado no simulador, o que é sabido. Entretanto, a maior contribuição dessa pesquisa foi a elicitación de resultados controversos entre as ferramentas de simulação. A ferramenta NS2 teve o pior desempenho nas métricas de similaridade da topologia e conectividade, todavia superou o Castalia na taxa de entrega de pacotes. Como justificativa aos resultados controversos, os autores recomendaram melhorias no modelo de interferência do Castalia, os mesmos também ressaltam que alcançar uma boa taxa de entrega de pacotes em uma topologia distante da real torna-se algo sem valia para o usuário final. Nesse trabalho não foi especificada a versão do Castalia adotada no experimento. Numa outra perspectiva, uma investigação recentemente conduzida por Perez e Kostanic [18] também buscou avaliar a acurácia de simuladores em RSSF, contudo a ferramenta utilizada nesse estudo é proprietária², diferentemente das demais supracitadas que são *open-source*. Nessa pesquisa, os autores coletaram informações de tráfego e características da rede a partir de um pequeno *testbed*, composto de três sensores (*Crossbow Starter Kit*)³, por meio de um *sniffer*⁴, a fim de ajustar os parâmetros de simulação da ferramenta. O *sniffer* foi utilizado para processar todos os dados relativos ao tráfego e a taxa de transmissão por meio de um *script* em MatLab, também utilizado para calcular a média e o desvio padrão das amostras de tráfego. Essas informações estatísticas são usadas na construção do modelo de tráfego da ferramenta, como também na comparação pelo modelo de validação. Resultados demonstraram um comportamento muito semelhante da ferramenta de simulação comparado ao *testbed* montado. Com 1% de significância, não foi possível refutar a hipótese nula do estudo que afirma igualdade de variância entre os dados coletados da plataforma de sensoriamento e da ferramenta de simulação.

Tendo em vista os trabalhos citados, o presente estudo visa apresentar uma análise comparativa entre ferramenta de simulação e *testbed* com foco no protocolo CSMA/CA seguindo a mesma linha de análise de confiabilidade da ferramenta. Na revisão de literatura realizada, não foram encontrados trabalhos que conduzissem investigação sobre o protocolo

¹A acurácia foi medida utilizando o coeficiente de *Jaccard* na comparação entre as amostras.

²Versão acadêmica disponível por meio do OPNET *University Program*.

³Kit de sensores sem fio.

⁴Ferramenta de análise de tráfego de rede.

CSMA/CA em uma perspectiva de análise comparativa entre o simulador Castalia e seu *testbed* equivalente utilizando sensores SunSPOT, bem como outras ferramentas de simulação, plataforma de sensoriamento e o protocolo em questão.

III. IEEE 802.15.4

A norma 802.15.4 - 2006 especifica a subcamada MAC e a camada física para redes de área pessoal sem fio de baixa taxa (LR-WPAN). As redes que implementam essa norma podem atuar em dois modos distintos de operação: *Beacon* e *Non-Beacon*. No modo *non-beacon*, todos os nós sensores que compreendem a rede, com exceção do nó sorvedouro, assumem um único papel, não havendo diferença de operação entre os sensores na rede. Para que haja comunicação entre os nós, o protocolo CSMA/CA *unslotted* é utilizado. Assim, toda mensagem a ser transmitida, com exceção dos quadros de reconhecimento (ACK), deve ser despachada utilizando o protocolo CSMA/CA [19]. Diferentemente do modo *non-beacon*, o modo *beacon* requer distinção entre papéis assumidos pelos sensores, tais como coordenador e nó ordinário. Nesse modo, alguns dos sensores que compõem a rede atuam como coordenadores dos demais nós, os quais exercem o papel de sincronização dos nós por meio do envio de quadros *beacon*, como também são responsáveis por criar a alocação de fatias de tempo para acesso e transmissão por parte dos nós ordinários [20]. Devido à alocação das fatias de tempo, no modo *beacon* não há contenção no acesso ao canal e a recepção dos quadros é realizada por meio de *pooling*. Além do modo de funcionamento da rede, a norma IEEE 802.15.4 também especifica os diferentes tipos de quadros MAC utilizados na comunicação, que são: *beacon*, *management*, *data* e *acknowledgement*. Acerca deste trabalho, apenas o quadro *data*, que é responsável pelos dados de alto nível, foi considerado. Como verificado em [21], a plataforma de sensoriamento SunSPOT não dá suporte ao modo *beacon*. Sendo assim, o envio de quadros no período de acesso por contenção não é suportado pela plataforma. O quadro do tipo *acknowledgement* não foi considerado, pois a comunicação com o nó sorvedouro se deu por meio de difusão. Relativo aos quadros do tipo *management*, a plataforma também não oferece suporte para esse tipo de quadro. Vale ressaltar que o protocolo CSMA/CA *unslotted* em questão contempla um comportamento não persistente, sendo necessário os ajustes na ferramenta de simulação visando atender tal característica do protocolo.

IV. SIMULADOR CASTALIA

A ferramenta de simulação adotada para o experimento foi o simulador Castalia. Essa ferramenta é capaz de simular RSSF e outras redes de dispositivos embarcados de baixo consumo de energia. Castalia tem ganhado larga aceitação na comunidade de pesquisa em RSSF devido ao modelo de rádio avançado (*i.e.* relação sinal-ruído mais interferência, múltiplos níveis de potência, etc.) e canal realístico (*i.e.* modelos complexos de variação temporal da perdas de percurso) compreendido pelo simulador. O funcionamento do Castalia tem como base a plataforma OMNeT++ e sua estrutura é dada pela composição

de módulos hierárquicos, interligados por meio de interface, o que propicia o desenvolvimento de novos módulos de expansão. Apesar dos modelos de rádio e canal realísticos, o modelo de bateria utilizado pelo Castalia envolve um comportamento de descarga não realístico (*i.e.* descarga ideal). Na intenção de preencher essa e outras lacunas, a extensão *Green Castalia* foi proposta em [22]. No *Green Castalia*, o modelo de bateria implementado concebe um comportamento de descarga não ideal, como também permite a utilização de fontes de energia heterogêneas, tais como super-capacitores, baterias recarregáveis, etc. Além das motivações supracitadas sobre a adoção do Castalia/*Green Castalia* neste trabalho, um outro aspecto relevante foi a quantidade de fatores, da especificação da plataforma, endereçados adequadamente pelo simulador (*e.g.* ajuste do consumo de CPU, tipo de fonte de energia, parâmetros de rádio), quando comparado às demais soluções, tratando-se dos simuladores *open-source*. O transceptor utilizado no sensor SunSPOT é o CC2420, e o Castalia traz o modelo de rádio com as especificações do transceptor. Além do transceptor englobado pelo simulador, o módulo de bateria incorporado oferece um modelo de descarga que se assemelha ao comportamento de descarga das baterias recarregáveis.

V. PLATAFORMA SUNSPOT

Oracle SunSPOT é uma plataforma experimental de sensoriamento voltada ao desenvolvimento de aplicações flexíveis para RSSF. A plataforma tem como núcleo a tecnologia Java. Com isso, desenvolvedores podem escrever aplicações em Java, implantá-las nos sensores, executá-las, depurá-las, bem como acessar mecanismos de baixo nível dos sensores em ambientes de desenvolvimento Java padrão (*e.g.* *Eclipse*, *Netbeans*, etc.). Por meio da API (*Application Programming Interface*) suportada pelo SDK (*Software Development Kit*), o controle de recursos do sensor, em nível de *hardware*, pode ser realizado sem a necessidade de programar interrupções, assim deixando o processo de desenvolvimento de aplicações mais amigável. Cada sensor SunSPOT é dotado de um processador ARM com 400 MHz e 32 bits de processamento, transceptor 802.15.4 (*Zigbee*), 1 MB de memória RAM, 8 MB de memória *flash* de armazenamento e uma placa de extensão chamada *EDemoboard*, a qual oferece uma interface de comunicação externa que contempla sensores *on-board*, portas de entrada e saída, analógicas e digitais. [23]. Como fonte de energia, os sensores são equipados com bateria de *li-ion* de 3,7 V e 720/770 mAh, que é capaz de manter o sensor operando em modo de *stand-by* profundo por 909 dias ou aproximadamente 7 horas com rádio e processador ativados. A Figura 1 ilustra as dimensões do mote.

Os sensores SunSPOT utilizam uma versão da JVM (*Java Virtual Machine*) para sistemas embarcados e pequenos dispositivos chamada *Squawk*. Com a *Squawk*, é possível realizar a execução de várias aplicações na plataforma ao mesmo tempo, como também possibilitar a interação entre as aplicações em execução. Isso é possível graças a uma classe especial de isolamento que permite a execução das aplicações sem interferência entre elas, mesmo compartilhando os recursos



Fig. 1. Sensor Oracle SunSPOT

subjacentes do SunSPOT. Outra característica da JVM *Squawk* é a representação compactada dos arquivos *.class* a fim de otimizar a utilização de espaço em memória. Diferentemente da maioria das outras VMs, *Squawk* é praticamente toda implementada em Java. Apenas o interpretador do *byte code* foi escrito na linguagem C. Todas as outras funções, tais como escalonador de *Threads* e *garbage collector* são escritas em Java. Consequentemente, todos os *drivers* do dispositivo também são escritos em Java, o que proporciona fácil modificação para domínios de propósito específico [21].

VI. EXPERIMENTO

Nesta seção, versa-se sobre a condução do experimento acerca da investigação. Inicialmente, é importante ressaltar que este experimento compreende diferentes técnicas de avaliação devido à natureza da questão de pesquisa – envolvimento de duas abordagens de avaliação: simulação e *testbed*. A pesquisa apresentada neste artigo visa responder a seguinte RQ (*Research Question*):

- **RQ:** A implementação do protocolo CSMA/CA para ferramenta de simulação Castalia apresenta resultados equivalentes, estatisticamente, quando comparado ao *testbed* equivalente?

Conforme Jein em [24], tão importante quanto escolher a técnica adequada para avaliar sistemas computacionais discretos é definir o conjunto de métricas que endereçam corretamente os aspectos que devem ser observados. As métricas adotadas para realizar a comparação do protocolo em diferentes ambientes de implantação foram tempo de vida e taxa de tráfego. Como preconizado na literatura, a vazão é uma métrica que atua diretamente no consumo de energia [25]. Para que seja possível comparar o tempo de autonomia entre os diferentes ambientes de implantação, faz-se necessário que ambos os cenários sejam ajustados com a mesma vazão.

A partir da questão de pesquisa, as seguintes hipóteses nulas foram estabelecidas:

- **H0-0 (Hipótese Nula):** A implementação do protocolo CSMA/CA *unslotted* para ferramenta de simulação Castalia apresenta resultados estatisticamente equivalentes, quando comparada ao *testbed* equivalente, no tocante à métrica vazão.
- **H0-1 (Hipótese Nula):** A implementação do protocolo CSMA/CA *unslotted* para ferramenta de simulação Castalia apresenta resultados estatisticamente equivalentes, quando comparada ao *testbed* equivalente, no tocante à métrica tempo de vida.

Para responder a questão de pesquisa por meio das hipóteses mencionadas, a metodologia adotada abrange uma análise comparativa da implementação do protocolo CSMA/CA *unslotted* para a ferramenta de simulação Castalia e para a plataforma real de sensoriamento, SunSPOT. Para viabilizar a análise comparativa entre os diferentes cenários, faz-se necessário o ajuste rigoroso dos parâmetros do *set-up* experimental relativo à topologia, especificações do transceptor, tamanho dos pacotes, taxa de transmissão, etc. O *set-up* do experimento é desenvolvido nas próximas seções.

A. Topologia

A topologia ajustada no *set-up*, em ambos os cenários, é a estrela. Os nós n_1 , n_2 , n_3 e n_4 atuam na rede como nós transmissores e não é admitido múltiplos saltos para que não haja viés nesse sentido, mesmo se tratando de um arranjo que não favoreça comunicação por saltos.

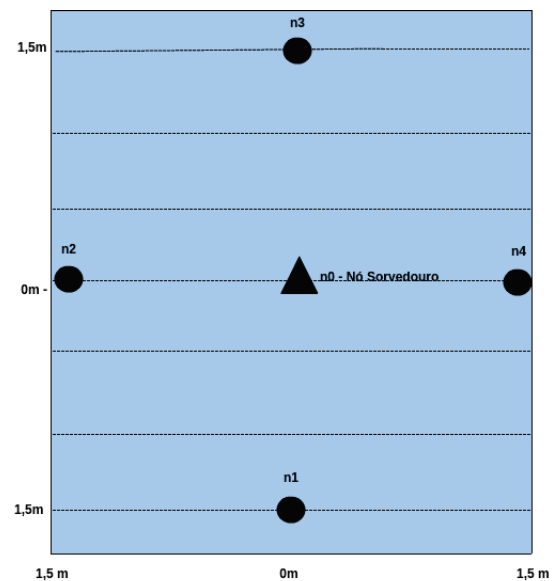


Fig. 2. Topologia do Experimento

A distância entre os nós em relação à estação base, n_0 , é de 1,5 metros, dispostos no plano. A topologia simplificada (*i.e.* poucos nós e curta distância entre os nós) visa mitigar as nuances da comunicação, tais como múltiplo percurso,

desvanecimento do canal, problema do terminal escondido, bem como facilitar a condução do *testbed*. A Figura 2 ilustra a topologia do experimento.

B. Parâmetros

Esta subseção apresenta as informações relativas aos parâmetros ajustados de acordo com as especificações da plataforma e a configuração do *set-up*. Para facilitar o ajuste dos parâmetros do experimento, os parâmetros foram agrupados e endereçando aos modelos conforme o domínio do modelo, como pode ser visto na Figura 3.

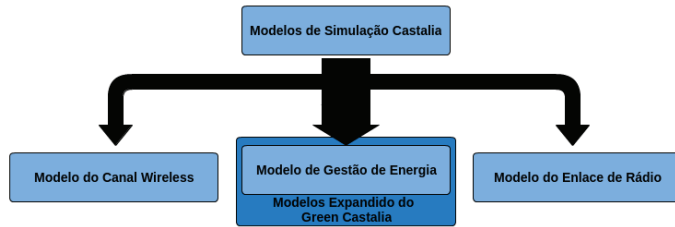


Fig. 3. Organização dos Conjuntos de Parâmetros

A Tabela I explicita os parâmetros ajustados no âmbito do simulador Castalia, que enfoca o modelo realista de comunicação sem fio adotado.

TABELA I
PARÂMETROS DO CANAL SEM FIO - CASTALIA.

| Parâmetros do Canal Sem Fio - Castalia | |
|---|--------------|
| Sigma σ | 0 |
| Sigma Bidirecional σ_b | 0 |
| Expoente de Perda da Propagação do Canal γ | 2,4 |
| Modelo de Perda da Propagação do Canal | Log-Distance |

Os valores de σ e σ_b são parâmetros de qualidade do enlace. No caso em que $\sigma = 0$, assume-se que a qualidade do canal é fixa dado uma distância d_n invariável. Em relação ao valor de $\sigma_b = 0$, implica em equivalência da qualidade do canal entre dois nós. Assim, a qualidade do enlace entre A e B é a mesma entre B e A. O modelo de propagação *Log-Distance* é o modelo adotado no Castalia para prever as perdas de percurso. Em outras palavras, esse modelo de propagação representa as perdas do meio de comunicação, comum em ambientes densamente povoados e estruturas internas de edifícios. Logo, com o valor de $\gamma = 2,4$, referenciado com base nos valores empíricos para propagação interna fornecida por [26], a configuração da propagação prevê um modelo probabilístico de perdas equivalentes a um escritório.

No tocante ao modelo de energia, expandido pelo *Green Castalia*, os parâmetros do simulador foram ajustados com base na especificação da plataforma SunSPOT. As Tabelas II e III mostram os valores estabelecidos relativo à fonte de energia e consumo do nó sensor.

O consumo base ajustado no simulador e o valor da tensão mínima de corte têm como referência as especificações encontradas em [27]. Dessa maneira, o *Green Castalia* assegura

TABELA II
PARÂMETROS DA FONTE DE ENERGIA - NÓ SENSOR.

| Parâmetros | Fonte de Energia | Qtd. de Fontes | Tensão (V) | Capacidade (mAh) |
|------------|----------------------|----------------|------------|------------------|
| Valores | Bateria Recarregável | 1 | 3,7 | 770 |

TABELA III
PARÂMETROS DO CONSUMO ENERGÉTICO - NÓ SENSOR.

| Parâmetros | Consumo Base (mW) | Tensão Mínima de Corte (V) |
|------------|-------------------|----------------------------|
| Valores | 140 | 3,2 |

a taxa de consumo médio por parte dos nós sensores, como também viabiliza que o sensor seja depletado quanto atingir o limiar mínimo de energia da bateria. Como o experimento tem como métrica o tempo de vida na análise comparativa, é de fundamental importância que o comportamento de descarga do simulador se assemelhe ao comportamento da bateria contida no nó sensor.

Em relação ao modelo de rádio, o simulador Castalia traz três transceptores modelados em seu pacote de simulação, o BANRadio, CC2420 e CC1000. Cada um dos transceptores é representado por um arquivo próprio de configuração que compreendem parâmetros como taxa de transmissão, modulação, sensibilidade, consumo de energia, etc. Os parâmetros do transceptor utilizado pelo SunSPOT, CC2420, foram consultados no *datasheet* [28] fornecido pelo fabricante com a finalidade de checar os valores atribuídos ao arquivo de configuração. A Tabela IV exhibe os valores do arquivo de configuração.

TABELA IV
PARÂMETROS DO TRANSCCEPTOR CC2420 NO SIMULADOR.

| Parâmetros | Vazão (Kbps) | Potência TX (dBm) | Sensibilidade (dBm) |
|------------|--------------|-------------------|---------------------|
| Valores | 250 | 0 | -95 |

C. Execução do Experimento

Na condução do experimento, algumas medidas foram tomadas para mitigar a interferência do ambiente sob o experimento. Antes de realizar a execução do *testbed*, um *site survey* foi conduzido a fim de analisar canais saturados no espectro operacional dos sensores (Banda ISM - *Industry, Scientific and Medical*). A frequência da portadora utilizada pelos transceptores, como especificado pelo IEEE 802.15.4 é de 2,4 GHz, com 16 canais de 3 MHz de largura de banda. Para efetuar o *Site Survey*, o analisador de espectro *AirView* da Ubiquiti foi empregado. Como resultado, os canais 24, 25 e 26, nas frequências 2470 MHz, 2475 MHz e 2480 MHz, respectivamente, não apresentaram saturação na utilização do canal. Como a norma FCC (*Federal Communication Commission*) estabelece potência máxima de transmissão no canal 26 de -3 dBm, o canal 25 foi ajustado na transmissão com 0 dBm com objetivo de minimizar os problemas argumentados na subseção topologia.

D. Configuração CSMA/CA no Simulador

A plataforma de simulação Castalia foi configurada baseada na implementação do CSMA/CA *unslotted* no SunSPOT - *broadcast non-beacon*. O CSMA/CA *unslotted* tem como

correspondente a implementação do protocolo TunableMAC já existente no Castalia. A Tabela V apresenta os parâmetros de configuração do protocolo ajustados na ferramenta de simulação:

TABELA V
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.

| Parâmetros | Protocolo MAC | Vazão (pkt/sec) | Data Payload |
|------------|---------------|-----------------|--------------|
| Valores | TunableMAC | 1 | 100 |

Segundo [29], o modo de difusão não é recomendado para datagramas maiores que 200 *bytes*. Como a lista de destinatários na comunicação por difusão é desconhecida, o modo de transmissão é intrinsecamente não confiável. O tamanho máximo de *payload* em pacotes enviados por difusão é de 1260 *bytes* [29]. Quadros 802.15.4 são limitados em cerca de 100 *bytes*, embora a quantidade varie, ligeiramente, dependendo se o pacote tem um cabeçalho *mesh* ou se o fragmento não é o primeiro no datagrama. Dessa forma, os datagramas enviados por difusão, que resultam em dois fragmentos, ainda são tidos como confiáveis. Entretanto, os datagramas enviados por difusão, com mais de três fragmentos podem apresentar perda. Esse problema está relacionado com a capacidade de esvaziamento de *buffer* do lado receptor, que também pode ser agravado caso o receptor esteja lidando com várias *threads* ou atuação frequente do *garbage collector*. Para evitar esses problemas no experimento, o tamanho de *payload* ajustado foi de 100 *bytes*.

VII. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, os resultados obtidos do experimento são analisados. A análise inicia acerca da vazão obtida no ambiente simulado e *testbed*. A razão para isso está relacionada ao consumo de energia em detrimento do tráfego de dados, como pode ser verificado em [25]. Em outras palavras, quanto maior a quantidade de dados trafegados, maior é o consumo de energia. Assim, como se espera analisar a métrica tempo de vida, faz-se necessário averiguar o tráfego de dados. Para tanto, três replicações do experimento de cada cenário (*i.e.* *testbed* e simulador) foram conduzidas. A Tabela VI apresenta os resultados coletados. A fim de realizar os cálculos de intervalo de confiança, ambas as amostras foram submetidas ao teste *Shapiro Wilk*. Os resultados do teste apontaram que as amostras tendem a uma distribuição normal, satisfazendo os requisitos do teste para comparação de médias, o *t-student*. Na comparação das médias, com 5% de significância, o teste retornou um *valor-p* de $1,908 \cdot 10^{-6}$). Assim, foi possível refutar a hipótese nula de que há igualdade entre as médias ou equivalência de tráfego de rede.

Em uma perspectiva de análise gráfica descritiva, pode-se verificar por meio da Figura 4 que a variação entre os limites dos resultados obtidos pela ferramenta de simulação é igual a 0, sinalizando um comportamento permanente da ferramenta relativo ao rendimento do nó simulado, o que difere do *testbed* (*i.e.* capacidade de processamento do sensor, rendimento do enlace e canal de comunicação invariável). É importante ressaltar que a variação do tempo de vida,

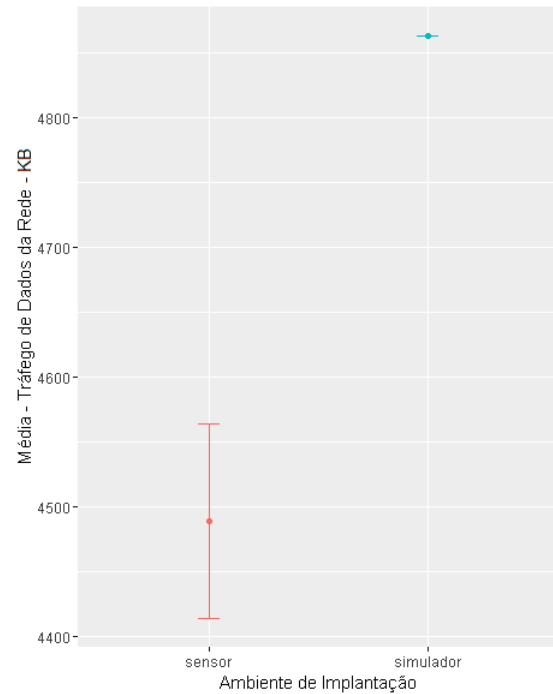


Fig. 4. Intervalo de Confiança do Tráfego de Dados

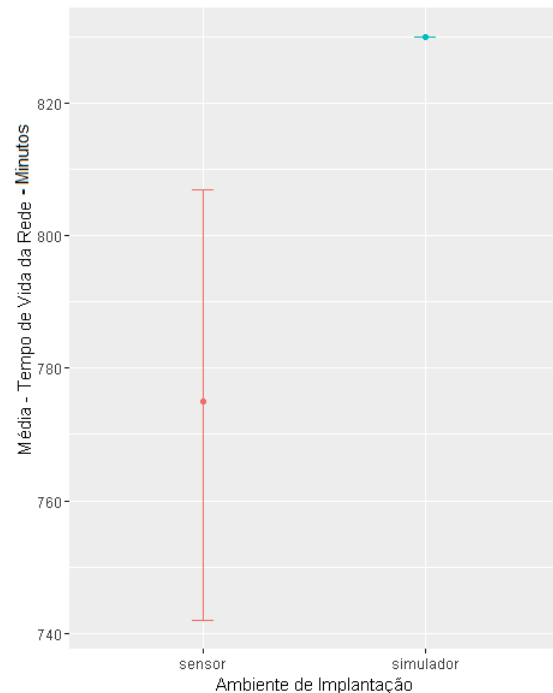


Fig. 5. Intervalo de Confiança do Tempo de Vida

encontrado no cenário do *testbed*, também pode estar ligado às diferentes autonomias alcançadas pelas baterias dos sensores, implicando em uma quantidade de tráfego menor. A Figura 5 demonstra a variação de tempo de vida alcançado pelos sensores oriundo do *testbed*, e o mesmo comportamento por parte da ferramenta de simulação – rendimento invariável.

Mesmo com o tempo de carga da bateria homogêneo, não

há garantia que as baterias do nós sensores tenham conseguido alcançar um mesmo nível de carregamento devido à diversos fatores, como exemplo: quantidade de ciclos de carregamento. Além do mais, pode-se verificar que não há variação no tempo de vida dos nós no cenário de simulação, apontando também para a mesma tendência determinística como visto no tráfego de dados.

VIII. AMEAÇAS À VALIDADE

Todos os resultados obtidos nesta pesquisa se limitam aos cenários experimentais especificados, como também aos protocolos e plataforma adotada no experimento. Para realizar maiores inferências sobre os achados, faz-se necessário aumentar a quantidade de replicações do experimento, bem como utilizar outras ferramentas de simulação e plataformas de sensoriamento. É importante ressaltar que a variação do tempo de vida, encontrado no cenário do *testbed*, também pode estar ligado às diferentes autonomias alcançadas pelas baterias dos sensores, implicando uma intensidade de tráfego menor. Entretanto, os resultados obtidos podem apontar para o desenvolvimento de modelos mais refinados a fim de buscar uma maior acurácia nos resultados.

IX. CONCLUSÕES

Com base no achados desta pesquisa, as hipóteses *H0-0* – a implementação do protocolo CSMA/CA *unslotted* para ferramenta de simulação Castalia apresenta resultados estatisticamente equivalentes, quando comparada ao *testbed* de *set-up* correspondente, no tocante à métrica vazão – e *H0-1* – a implementação do protocolo CSMA/CA *unslotted* para ferramenta de simulação Castalia apresenta resultados estatisticamente equivalentes, quando comparada ao *testbed* equivalente, no tocante à métrica tempo de vida – puderam ser refutadas com 5% de significância no teste *t-student*. Sendo assim, é possível afirmar que, para a montagem experimental ajustada, o simulador Castalia com sua extensão *Green Castalia* não alcançou resultados estatisticamente similares ao *testbed* equivalente. Entretanto, faz-se necessário realizar outras investigações com tamanho de amostra mais significativo. Aumentar o tamanho da amostra deve reduzir o erro relativo às diferenças de estado entre as baterias.

X. AGRADECIMENTO

A realização desta pesquisa foi possível em razão do subsídio provido pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), campus Campina Grande, por meio do edital nº 04/2016. Os autores agradecem o apoio do Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom).

TABELA VI
VALORES ESTATÍSTICOS DO PROTOCOLO.

| Variáveis | Tempo de Vida - Min | | Tráfego de Dados - KB | |
|----------------------------------|---------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | Testbed | Simulador | Testbed | Simulador |
| Média: | 775,45 | 830 | 4448,06 | 4862,55 |
| SD: | 20,90 | 0 | 126,16 | 0,13 |
| Valor Tabela Z: | 1,96 | 0 | 1,96 | 1,96 |
| Lím. Inferior: | 742,09 | 830 | 4414,33 | 4862,47 |
| Lím. Superior: | 808,81 | 830 | 4563,45 | 4862,63 |
| Coefficiente de Variação: | 0,03 | 0 | 0,02 | 0 |

REFERÊNCIA

- [1] “MIT Smart Cities”. <http://cities.media.mit.edu/>. Acessado em 2015-07-17.
- [2] “Construindo Cidades Inteligentes da Instrumentação dos Ambientes ao Desenvolvimento das Aplicações - (CIA²)”. <http://www.nr2.ufpr.br/cia2/>. Acessado em 2015-07-17.
- [3] “IBM Smart Cities”. http://www.ibm.com/smarterplanet/br/pt/smarter_cities/. Acessado em 2015-07-17.
- [4] X. Li, Y. Deng and L. Ding. “Study on precision agriculture monitoring framework based on WSN”. In *Anti-counterfeiting, Security and Identification, 2008. ASID 2008. 2nd International Conference on*, pp. 182–185. IEEE, 2008.
- [5] A. Chandrakasan, R. Amirtharajah, S. Cho, J. Goodman, G. Konduri, J. Kulik, W. Rabiner and A. Wang. “Design considerations for distributed microsensor systems”. In *Custom Integrated Circuits, 1999. Proceedings of the IEEE 1999*, pp. 279–286. IEEE, 1999.
- [6] M. Dong, K. Yung and W. Kaiser. “Low power signal processing architectures for network microsensors”. In *Low Power Electronics and Design, 1997. Proceedings., 1997 International Symposium on*, pp. 173–177, Aug 1997.
- [7] J. Yick, B. Mukherjee and D. Ghosal. “Wireless sensor network survey”. *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292 – 2330, 2008.
- [8] M. Portela. “Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio”. Master’s thesis, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2009.
- [9] H. N. Pham, D. Pediaditakis and A. Boulis. “From simulation to real deployments in WSN and back”. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2007. WoWMoM 2007. IEEE International Symposium on a*, pp. 1–6, IEEE, 2007.
- [10] A. Boulis. “Castalia User Manual”. *Online: <http://castalia.npc.nicta.com.au/pdfs/Castalia-User-Manual.pdf>*, 2009.
- [11] L. Bergamini, C. Crociani, A. Vitaletti and M. Nati. “Validation of WSN simulators through a comparison with a real testbed”. In *Proceedings of the 7th ACM workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pp. 103–104. ACM, 2010.
- [12] S. Khan, B. Aziz, S. Najeeb, A. Ahmed, M. Usman and S. Ullah. “Reliability of network simulators and simulation based research.” In *PIMRC*, pp. 180–185, 2013.
- [13] U. M. Colesanti, C. Crociani and A. Vitaletti. “On the accuracy of omnet++ in the wireless sensor networks domain: simulation vs. testbed”. In *Proceedings of the 4th ACM workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pp. 25–31. ACM, 2007.
- [14] M. J. Grobler, H.-J. Marais and J. G. J. Krige. “A Wireless Sensor Network Testbed for the Evaluation of Energy-Aware Routing Schemes”. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 2014.
- [15] X. Xian, W. Shi and H. Huang. “Comparison of OMNET++ and other simulator for WSN simulation”. In *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*, pp. 1439–1443. IEEE, 2008.
- [16] E. Weingärtner, H. Vom Lehn and K. Wehrle. “A performance comparison of recent network simulators”. In *Communications, 2009. ICC’09. IEEE International Conference on*, pp. 1–5. IEEE, 2009.
- [17] G. Werner-Allen, P. Swieskowski and M. Welsh. “Motelab: A wireless sensor network testbed”. In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, p. 68. IEEE Press, 2005.
- [18] G. E. PEREZ and I. KOSTANIC. “Comparing a Real-Life WSN Platform Small Network and its OPNET Modeler model using Hypothesis Testing”. *SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS*, vol. 12, 2014.
- [19] B. Lauwens, B. Scheers and A. Van de Capelle. “Performance analysis of unslotted CSMA/CA in wireless networks”. *Telecommunication Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 109–123, 2010.
- [20] L. Wang, J. Mao, L. Fu, H. Zhu and N. Guo. “An improvement of IEEE 802.15. 4 MAC protocol in high-density wireless sensor networks”. In *Information and Automation, 2015 IEEE International Conference on*, pp. 1704–1707. IEEE, 2015.
- [21] D. Van Den Akker, K. Smolderen, P. De Cleyn, B. Braem and C. Blondia. “TinySPOTComm: Facilitating communication over IEEE 802.15. 4 between Sun SPOTs and TinyOS-based motes”. In *International Conference on Sensor Applications, Experimentation and Logistics*, pp. 177–194. Springer, 2009.
- [22] D. Benedetti, C. Petrioli and D. Spenza. “GreenCastalia: an energy-harvesting-enabled framework for the castalia simulator”. In *Proceed-*

ings of the 1st International Workshop on Energy Neutral Sensing Systems, p. 7. ACM, 2013.

- [23] “Art Center - SunSPOT Systems”. <http://people.artcenter.edu/~berk/alavs/SunSPOTSJune30.pdf>. Acessado em 2017-01-24.
- [24] R. Jain. *The art of computer systems performance analysis - techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling.*. Wiley professional computing. Wiley, 1991.
- [25] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis and D. D. Vergados. “Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 551–591, 2013.
- [26] T. S. Rappaport. *princípios e práticas de comunicação sem fio*. Prentice Hall, 2002.
- [27] “Oracle SunSPOT Theory of Operation”. <http://www.sunspotdev.org/docs/Yellow/SunSPOT-TheoryOfOperation.pdf>. Acessado em 2015-08-12.
- [28] “Texas Instrument - CC2420 Transceptor Datasheet”. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>. Acessado em 2017-01-10.
- [29] “Oracle SunSPOT Programmer Manual”. <http://www.sunspotdev.org/docs/Yellow/SunSPOT-Programmers-Manual.pdf>. Acessado em 2015-08-12.