

ARTIGO ORIGINAL

Redes sem fio no monitoramento de falhas de máquinas: uma comparação de tecnologias sem fio com baixa densidade de nodos

Wireless networks in machine failure monitoring: a comparison between IEEE 802.11 and IEEE 802.15.4 with low node density

Katharine Fertig¹, Odilson Tadeu Valle^{id,2}, Eraldo Silveira e Silva², Tiago Semprebom^{id,2}

¹Instituto Federal de Santa Catarina – Campus São José, ²Instituto Federal de Santa Catarina – Campus São José

*kathfertig@gmail.com; odilson@ifsc.edu.br; eraldo@ifsc.edu.br; tisemp@ifsc.edu.br

Recebido: 05/11/2021. Revisado: 07/11/2022. Aceito: 22/11/2022.

Resumo

A utilização de redes sem fio em ambientes industriais vem se tornando cada vez mais uma realidade. As principais motivações são o baixo custo de implantação e manutenção, em contraposição às redes cabeadas. Dentro da miríade de aplicações na indústria, o **monitoramento de máquinas** é particularmente importante pois permite prever ou detectar a ocorrência de falhas, mitigando custos devido a uma sequência de eventos disruptivos. Principalmente em sistemas legados, os sensores sem fio podem requerer baterias que possibilitem uma longa sobrevivência da rede. O padrão **IEEE802.11** por sua popularidade, vem sendo usado no monitoramento de máquinas, apesar do alto consumo de energia. Uma das alternativas é a **tecnologia unslotted IEEE802.15.4** e a variante determinista **DSME**, que, apesar de baixas taxas de transmissão, possuem um perfil de consumo de energia muito baixo. Este trabalho visa avaliar um cenário em topologia estrela, com um salto e com baixa densidade de sensores, comparando estas tecnologias em termos de taxa de pacotes recebidos e energia residual. A avaliação é por simulação e confirma o alto consumo IEEE802.11, porém mostra que as vantagens do DSME, não são tão evidentes, podendo ser melhorado se explorado nas suas características de multifrequência.

Palavras-Chave: Monitoramento de Máquinas; Redes de Sensor Sem Fio; Redes de Baixa Densidade

Abstract

The use of wireless networks in industrial environments is becoming more and more a reality. The main reasons are the low cost of implementation and maintenance, as opposed to wired networks. Within the myriad of applications in the industry, **machine monitoring** is particularly important as it allows to predict or detect the occurrence of failures, mitigating costs due to a sequence of disruptive events. Especially in legacy systems, wireless sensors may require batteries to enable long network survival. The **IEEE802.11** standard, due to its popularity, has been used in machine monitoring, albeit its high energy consumption. One of the alternatives is the **unslotted IEEE802.15.4 technology** and the deterministic variant **DSME**, which, despite low transmission rates, have a very low energy consumption profile. This work aims to evaluate a one-hop, low-density star topology scenario, comparing these technologies in terms of received packet ratio and residual energy. The evaluation is by simulation and confirms the high IEEE802.11 consumption, however it shows that the advantages of the DSME are not so evident and can be improved if exploited in its multi-frequency characteristics.

Keywords: Machine Monitoring; Wireless Sensor Networks; Low Density Networks

1 Introdução

A utilização de redes sem fio em ambientes industriais vem se tornando cada vez mais uma realidade na Indústria 4.0 (Fertig, 2020). As principais motivações são o baixo custo de implantação e manutenção, em contraposição às redes cabeadas. Uma miríade de aplicações na indústria pode ser vislumbrada, desde àquelas diretamente voltadas ao controle (Park et al., 2018) até ao monitoramento em chão de fábrica.

O monitoramento de máquinas é particularmente importante pois permite prever ou detectar a ocorrência de falhas, minimizando custos devido a uma sequência de eventos disruptivos. Aplicações de monitoramento possuem características específicas de atraso e de perdas de pacotes na rede que podem ser, em sua maioria, supridas por redes sem fio.

A tecnologia IEEE802.11 por sua popularidade, vem sendo amplamente usada em aplicações na indústria (Valadas et al., 2020). Este padrão apresenta bons resultados em termos de cumprir os requisitos de atraso e perdas, mas ainda apresenta um alto consumo de energia nas versões mais comumente encontradas do mercado. Porém, principalmente em sistemas legados, os sensores sem fio podem requerer baterias que possibilitem uma longa sobrevivência da rede. Isto porque a infraestrutura disponível e o acesso e posicionamento em máquinas pode não permitir o acesso a facilidades de uma fonte permanente de energia.

Uma das alternativas mais significativas é a tecnologia **unslotted IEEE802.15.4** que, apesar de baixas taxas de transmissão, possui um perfil de consumo de energia muito baixo. O IEEE802.15.4 na sua forma mais simples apresenta um comportamento não determinístico, similar ao IEEE802.11, usando uma subcamada de acesso ao meio baseada em CSMA-CA. Adotando ao padrão IEEE802.15.4 vem sendo propostas, sendo o DSME especificamente voltado para o contexto industrial. O diferencial desta tecnologia é o uso do particionamento de tempo em fatias (*slots*) e do uso de canais com multifrequências que permitem a alocação dedicada de comunicação entre nós da rede, proporcionando desta forma um determinismo desejável e uma consequente redução de consumo de energia pelo fato de evitar competição pelo meio de comunicação. Tal tecnologia possui também facilidades de implementação de redes multi-salto.

Este trabalho visa avaliar um cenário específico de monitoramento de máquinas em indústria que se utiliza de topologia em estrela, com um salto e com baixa densidade de sensores. A topologia em estrela leva a concentrar o destino de envio de mensagens de monitoramento em uma única estação: o coordenador da rede.

O estudo investigativo compara as tecnologias citadas em termos de taxa de pacotes recebidos, energia residual e atraso de pacotes no nível de camada de aplicação. A ideia é proporcionar uma visão pragmática do desempenho de tais tecnologias de forma a apoiar a tomada de decisão na seleção e uso das mesmas em um projeto.

A avaliação, por simulação, confirma o alto consumo da IEEE802.11, porém mostra que as vantagens do DSME, não são tão evidentes frente a IEEE802.15.4 sem *beacon* (*unslotted CSMA*), podendo no entanto ser melhorado se explorado suas características de multifrequência.

O artigo está organizado da seguinte forma: a **Seção 2** apresenta os trabalhos relacionados. A **Seção 3** conceitua a área de monitoramento de máquinas no contexto industrial. A **Seção 4** apresenta uma síntese das tecnologias de redes sem fio exploradas no trabalho. A **Seção 5** descreve o experimento realizado e a **Seção 6** a análise dos resultados. Finalmente, a **Seção 7** apresenta uma conclusão do trabalho e perspectivas futuras.

2 Trabalhos Relacionados

Em Seferagić (2020) é apresentada uma revisão da literatura sobre a escolha de tecnologias de redes sem fio para Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) em Ambientes Industriais. O artigo resalta os desafios impostos para as *Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks* (IWSAN) no ambiente industrial, e o fato que a indústria 4.0 vem aplicando com sucesso as IWSANs em controle *open loop* não crítico. Segundo os autores, a ISA *International Society of Automation* estabelece seis classes de sistemas nas redes industriais: i) sistemas de segurança; ii) sistemas regulatórios de controle em *loop* fechado; iii) sistemas supervisórios de controle em *loop* fechado; iv) sistemas de controle em *loop* aberto; v) sistemas de alerta; vi) sistemas de coleta de informação. O artigo caracteriza as faixas de distância e de tempo envolvidos para cada aplicação. Em particular, para a faixa de monitoramento, um dos focos do trabalho de (Fertig, 2020), as distâncias envolvidas estão na faixa de 100 a 1000 m e os ciclos de tempo na faixa de segundos a dias. São discutidas métricas de desempenho em relação as diferentes aplicações, sendo que os sistemas de alerta e de coleta de informação apresentam baixos níveis de requisitos em praticamente todas elas: i) distância (até 500 m); ii) taxa de transmissão (até 200 Kbps); iii) confiabilidade (até 98%); iv) escalabilidade (até 50 nós) e vi) latência (1000 ms). É ressaltado que nenhuma tecnologia cobre todos estes requisitos.

O trabalho de Jeong and Lee (2012) é bastante completo. Ele analisa o desempenho do padrão do protocolo *IEEE 802.15.4e DSME* frente ao protocolo *slotted CSMA/CA* em dois cenários: topologia estrela com um salto e em uma topologia multi salto. Os autores analisaram o DSME com e sem a facilidade *CAP reduction*. As métricas analisadas foram a vazão máxima e a o consumo energético para transmissão de um quadro. O fator controlado foi o número de dispositivos variando de 0 a 120. O DSME *CAP reduction* na topologia estrela se mostrou superior em vazão atingida em toda a faixa de dispositivos analisada. O consumo de energia se mostrou constante para todas as configurações do DSME, o que era esperado por haver reserva de canal, enquanto o *slotted CSMA/CA* cresce exponencialmente. O trabalho não visou uma aplicação específica e chama a atenção por ter fixado o intervalo de *Beacon* no máximo (14), o que limitaria testar o envio de mensagens em uma cadência de 100 ms, por exemplo.

O trabalho de G. Alderisi et al. (2015) compara por simulação os adendos ao *IEEE 802.15.4*, DSME com TSCH, em cenários para automação de processos. O foco do trabalho é analisar o retardo fim-fim-fim, escalabilidade e a confiabilidade das tecnologias. Em um primeiro cenário de 50x50 m, 10 nós sensores são dispersos randomica-

mente na área. O período de envio de mensagens é mesclado entre 150 ms e 5 s, para contemplar diferentes tipos de sensores. A métrica avaliada foi o PLR (*Packet Loss Ratio*) e o retardo fim-a-fim. O TSCH se mostrou superior neste último, sendo próximos quanto ao PLR. Em um segundo cenário, são analisadas configurações com 10, 30 e 50 nodos com mensagens periódicas de 500 ms. Ambos protocolos se mostraram robustos com o TSCH sendo superior em retardo fim-a-fim até 30 nodos.

O experimento de Valadares et al. (2020) realizar uma avaliação de desempenho de uma aplicação real (usina termoeletrica) utilizado-se da tecnologia IEEE 802.11g. Três métricas foram avaliadas: taxa de perda de pacotes, taxa de transferência e tempo de resposta. O fato de ser um teste real demonstra com fidelidade o comportamento da tecnologia na presença de motores e outros equipamentos. Segundo os autores, a tecnologia é viável para uso neste contexto, porém foram encontrados pioras nas métricas quando perturbações de abertura/fechamento de portas são realizadas e com o aumento da distância. O artigo de Liang et al. (2021) também avalia o uso de redes IEEE802.11 em um contexto de manufatura discreta.

O trabalho de Kim et al. (2008) avalia o desempenho do IEEE 802.15.4 funcionando em modo sem *beacon*, portanto, com *unslotted CSMA/CA* que é o modo mais comum encontrado no mercado. Os autores desenvolveram um modelo analítico de fila que permite descobrir o número ótimo de dispositivos em termos de retardo médio e probabilidade de perda de pacotes. A análise também envolve a avaliação de vazão e consumo de energia.

Muitos outros artigos vem se dedicando a avaliação de desempenho de tecnologias passíveis de uso no contexto industrial. O presente trabalho se diferencia destes, até onde pode ser verificado, por focar na comparação do DSME com *unslotted CSMA/CA* e com o IEEE 802.11g em um cenário específico de rede industrial de baixa densidade, focado na aplicação.

3 O Ambiente de Monitoramento de Máquinas

3.1 Redes de Sensores sem Fio

Redes de Sensores Sem Fio são formadas por nodos com capacidade reduzida de processamento e de memória, sendo normalmente dotados de sensores específicos para a aplicação para a qual foram desenvolvidos, tais como sensores de temperatura, pressão, vibração, entre outros. Estes nodos possuem módulos de comunicação sem fio que permitem encaminhar mensagens para um ou mais nodos sorvedouros. Os nodos transmissores são normalmente chamados de nodos fonte. Uma das características destes dispositivos é que dada as disposições físicas que se encontram, muitas vezes em locais ermos, possuem restrições de consumo energético (Seferagić, 2020; Islam et al., 2012).

As redes de sensores possuem as mais diversas aplicações, passando por monitoramento de florestas, mares, estruturas de concreto até o domínio da indústria, seja atuando diretamente em *loops* de controle distribuído, seja fazendo o monitoramento e supervisão de máquinas. No primeiro caso, os nodos devem também ser dotados de

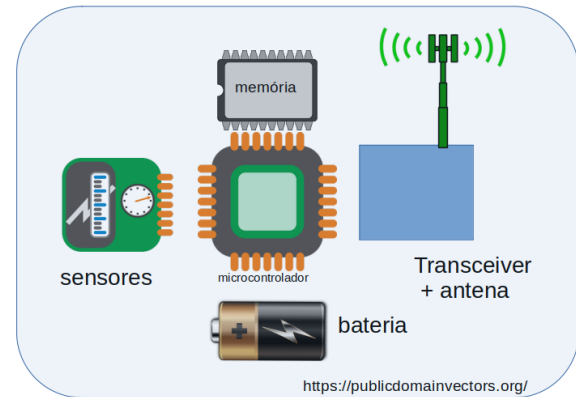


Figura 1: Arquitetura de um nó sensor.

atuadores, ou seja, devem ter capacidade de controlar servomotores, motores de passo, chaves eletrônicas entre outras (Willig, 2008). Dependendo da aplicação, uma rede de sensores pode conter dezenas ou mesmo centenas de nodos.

Um nodo é composto normalmente por circuito sensor, um microcontrolador com memória semicondutora associada, um transceptor sem fio e um suprimento de energia – geralmente uma bateria, como indicado na Fig. 1.

Estas características diferenciam, portanto, as RSSFs de demais redes sem fio de computadores tradicionais – LAN – pois suportam taxas de dados mais baixas, potências de transmissão menores e conferem flexibilidade e modularidade a um grande número de nós distribuídos em uma rede (Loureiro et al., 2003).

3.2 Indústria 4.0

O conceito da Indústria 4.0 surgiu através da incorporação da digitalização à atividade industrial e faz referência ao que seria a 4ª revolução industrial. Como as demais revoluções industriais ao longo da história marcos importantes definiram a evolução nos métodos industriais de produção: i) 1ª Revolução industrial – Máquinas a vapor – 1784; ii) 2ª Revolução industrial – Produção em massa com energia elétrica – 1870; iii) 3ª Revolução industrial – Eletrônica, TI e automação – 1970; iv) 4ª Revolução industrial – Sistemas ciber físicos – hoje. As primeiras três revoluções industriais são o resultado da introdução de máquinas, eletricidade e informação tecnológica, respectivamente. No momento atual, o marco tecnológico está na introdução de IoT (*Internet of Things*) e CPS (*Cyber Physical Systems*) como os principais desencadeadores da 4ª Revolução Industrial. O Brasil encontra-se entre a 2ª e 3ª revoluções industriais (Becker et al., 2018).

Através deste marco tecnológico, o novo conceito de “indústrias inteligentes” surge onde máquinas e insumos “conversam” ao longo das operações industriais, apresentando integração, autonomia e flexibilidade do processo de fabricação. Portanto, integrar e conectar indústrias tradicionais, particularmente a manufatura, é o maior objetivo da Indústria 4.0 para obter, além da flexibilidade e adaptabilidade, um aumento na eficiência fabril e a comunicação

eficaz entre produtores e consumidores (Li et al., 2017). Porém, esta cooperação da cadeia produtiva não ocorre apenas em loco, mas também entre diferentes fábricas que geralmente estão localizadas em locais remotos (Becker et al., 2018). Assim a Indústria 4.0 permite a descentralização da produção e o uso de tecnologias de sensoriamento, interconectividade de máquinas, processos e pessoas, e a análise de dados permite a fusão dos mundos reais e virtuais (sistemas ciber-físicos) na produção e a sua execução em uma comunidade colaborativa (Silva, 2017)(FIRJAN, 2016).

Os principais impactos gerados pela digitalização da indústria estão em permitir às fábricas:

- Alocar eficientemente suas máquinas;
- Aumentar a eficiência no uso de recursos;
- Identificar problemas rapidamente;
- Reduzir gargalos produtivos;
- Otimizar processos produtivos;
- Reduzir defeitos nos produtos;
- Prevenir problemas;
- Reduzir custos.

3.3 Redes industriais sem fio

A comunicação industrial sem fio é usada para sensorar e controlar equipamentos específicos do ambiente industrial, ao passo que a principal função da comunicação comercial é a transferência e o processamento de dados (ETSI, 2018). As redes industriais são empregadas em diversos domínios, como a manufatura, geração e distribuição de energia, petróleo e gás, mineração e processamento químico.

A comunicação industrial apresenta alguns fatores de distinção para outros tipos de comunicação principalmente pela alta disponibilidade e baixa latência e mais alguns requisitos, com destaque a (ETSI, 2018):

- Alta confiabilidade: $\geq 99,9\%$;
- Alta densidade de nodos;
- Baixa latência fim-a-fim;
- Pacotes relativamente pequenos;
- Alta taxa de transferência de dados em toda rede;
- Baixo consumo energético, com duração das fontes de energia (baterias) maior do que 5 anos.

Assim, em aplicações industriais, a confiabilidade é considerada, em geral, como a métrica de desempenho mais importante. Ela se refere à porcentagem dos pacotes de dados gerados pelos nós que atingem seu destino final (Watteyne et al., 2015). De acordo com Chen et al. (2010), outros requisitos e métricas importantes ao tráfego industrial são o determinismo da rede e a requisitos de tempo real, isto é, os dados precisam ser entregues nos prazos estipulados segundo necessidade da aplicação, pois excedendo este tempo os dados não possuem mais utilidade.

Ainda segundo apontado por Dietrich et al. (2017) e levantado pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), o desempenho de uma rede de comunicação industrial, apresenta alguns possíveis indicadores de desempenho:

- Tempo de entrega (medido na camada de aplicação);
- Precisão de sincronização;

- Possível número de nós finais;
- Taxa de transferência de dados em tempo real;
- Largura de banda;
- Topologia básica de rede;
- Número de saltos entre nós finais.

Nos últimos anos, já no âmbito da Indústria 4.0 (Becker et al., 2018), as redes industriais entraram em um novo cenário de integração de processos e dados ao se adicionarem novas tecnologias, padrões, protocolos, processos e pessoas integradas à coleta e transmissão de informação.

3.3.1 Comunicação sem fio em ambientes industriais

Embora as tecnologias sem fio proprietárias tenham sido usadas para aplicativos de automação de maneira limitada desde a década de 80, os usuários relutavam em adotar tecnologias sem fio originalmente determinadas para aplicativos de escritório ou de consumo (Scholl et al., 2013). Porém, a partir da década de 90, estudos têm apontado novas dimensões para as tecnologias e padrões de comunicação sem fio, identificando-os como opções atrativas para a indústria em aplicações de automação de fábricas, monitoramento e sistemas de controle distribuídos (Macedo and Afonso, 2009), ao aliar os seus principais benefícios de mobilidade e redução de custos de cabeamento e instalação. Porém, é preciso levar em conta que a comunicação de dados sem fio precisa satisfazer requisitos de comunicação em ambientes industriais, tais como transmissão em tempo real e sua confiabilidade, pois, caso contrário, pode resultar na perda de tempo, lucro ou resultar em danos físicos (Willig, 2008).

Em geral, segundo de Queiroz (2016) e Lu et al. (2016), no ambiente industrial o meio de transmissão sem fio é afetado pelos efeitos abaixo:

- Desvanecimento em larga escala;
- Atenuação em pequena escala;
- Sombreamento *log-normal* com características de demais distribuições temporais (Rice, Nakagami-m e Rayleigh) de acordo com cenários específicos no próprio ambiente industrial.
- Características não-estacionárias do canal em longos períodos de tempo;
- Interferência devido a outros sistemas de comunicação sem fio operando na mesma banda de frequência (Valle et al., 2012) (Macedo and Afonso, 2009);

3.3.2 Paradas de Máquinas e OEE

Influenciadas pelas recentes transformações no setor industrial ao redor do mundo, diferentes empresas têm buscado novas soluções para reduzir suas principais perdas e melhorar, principalmente, seus vários indicadores de desempenho industriais e financeiros (Silva, 2017). As indústrias se utilizam de diversos indicadores-chave para medir o desempenho dos seus processos fabris.

Um indicador importante na indústria de manufatura é o indicador de OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), muito utilizado para calcular a eficiência de uma planta industrial e da integração dos seus sistemas e mostrar quais aspectos necessitam de intervenção (Lima et al., 2015).

Segundo Da Silva (2009), além do indicador de desempenho OEE dar aos processos produtivos e de gestão de ma-

nutrição uma visão geral do desempenho de uma planta industrial (Almeanazel, 2010), ele apresenta quatro finalidades adicionais:

- Planejamento da capacidade;
- Controle do processo;
- Melhoria do processo;
- Cálculo dos custos das perdas de produção.

Segundo Lima et al. (2015), o OEE é determinado por três fatores: qualidade, desempenho e disponibilidade. Este último, juntamente à produtividade das instalações de produção, é apontado por Muchiri and Pintelon (2008) como o principal fator de competitividade das empresas manufatureiras. Dado o cenário de estudo deste trabalho, abordando a aplicação de tecnologias 4.0 em indústrias de manufatura de pequeno e médio porte, a disponibilidade se torna de crucial análise.

4 Os padrões de comunicação sem fio

Nesta seção será apresentada uma síntese dos padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, nas versões *unslotted CSMA* e *DSME*. Eles operam na banda de licença livre de 2.4 GHz, além de outras opções de frequência que podem ter restrições dependendo do país.

4.1 IEEE 802.11

O IEEE 802.11, conhecido como Wi-Fi, especifica as camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC) das redes locais sem fio. Conforme Bianchi (2000), o mecanismo fundamental de acesso ao meio é *Distributed Control Function* – DCF, que realiza o acesso com contenção através do protocolo CSMA/CA. Duas técnicas básicas para transmissão de pacotes são usados: i) um *handshaking* a duas vias, onde o destino envia uma *ACK* de confirmação, dado que não é possível detectar colisão em uma rede sem fio, e ii) um procedimento de *handshaking* a quatro vias onde, antes da transmissão de um pacote uma estação envia um *Request to Send* (RTS) que deve ser confirmado por um *Clear To Send* (CTS). Na sequência o pacote de dados deve ser enviado e confirmado com *ACK*. Este esquema tenta evitar o problema do terminal escondido. Na fase de troca de RTS/CTS, o tamanho do pacote de dados a ser transmitido é informado, de forma que estações que ouvem a comunicação podem atualizar um vetor de alocação de rede (NAV), podendo então inferir o tempo que o canal ficará ocupado.

O Wi-Fi é tipicamente considerado como uma solução de comunicação sem fio com alto consumo energético, alta taxa de transmissão e grande alcance. O padrão também favorece uma capacidade mais em conta de acesso sem fio – com *chipsets* de baixo custo no mercado – e flexível para diversas aplicações de redes locais e por isso é a tecnologia mais difundida e se tornou uma solução universal para comunicação sem fio em locais como campi, aeroportos, ambientes comerciais, escritórios, hospitais dentre outros (Ni, 2005).

A comunicação industrial também demanda dos padrões de comunicação sem fio alguns requisitos de QoS (*Quality of Service*) como confiabilidade, determinismo e

largura de banda garantida além de atrasos limitados. Através de uma alteração na camada MAC inserida no padrão IEEE 802.11e que busca a priorização de transmissão de pacotes segundo requisitos diferenciados de QoS (Ni, 2005).

4.2 IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 define as camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC) para comunicações em redes sem fio que requerem baixo consumo de energia e baixa taxa de transferência de dados (Chen et al., 2010). O padrão se tornou popular através do *ZigBee*, muito encontrado em módulos comerciais, que se utiliza destas camadas, acrescentando camadas superiores de roteamento e de aplicação, dentre outras.

A camada física se utiliza de modulação *Phase-Shift Keying* (PSK) e pode trabalhar nas frequências de 800, 900 e 2400 MHz. Nesta última é usado o O-QPSK (*Offset Quadrature PSK*). A modulação PSK, aliada ao uso de *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) mitiga os efeitos de *fading* e traz robustez em relação a interferência. O padrão permite velocidade de até 250 kbps e pode operar dentro de 27 canais de rádio. Dois tipos de dispositivos físico são previstos: *Full Function Device* (FFD) e *Reduced Function Device* (RFD). Estes últimos seriam simplesmente sensores, enquanto os FFDs podem atuar como sensores, mas também como roteadores e coordenadores de rede. Um RFD deve se associar com um único FFD por vez. Em termos lógicos, são previstos as funções de Coordenador de PAN, de Roteador e de Dispositivo Final. Em uma topologia em estrela, tal como a investigada no presente trabalho, o Coordenador centraliza a comunicação e realiza operações de roteamento para os dispositivos sensores. Em topologias *peer-to-peer*, pode existir comunicação direta entre dispositivos e no topo da mesma pode ser construída uma rede *mesh* (Adams, 2006).

A camada de enlace do IEEE 802.15.4 possui dois modos de funcionamento: i) sem *beacon* com *unslotted CSMA* e ii) com *beacon* onde parte do canal é usado com *slotted CSMA* e parte da forma *TDMA*. O modo i) sem *beacon* com *unslotted CSMA* é o CSMA-CA clássico similar ao usado no IEEE 802.11. O procedimento de *backoff* e transmissão de pacote não possui alinhamento com *slots* de tempo. Segundo Kim et al. (2008), cada momento que um dispositivo gera um pacote para transmissão, ele espera um tempo randômico dado por um contador de *backoff* iniciado com valor entre 0 e 2^{BE} , onde *BE* é iniciado com um valor *macMinBE*. O contador é decrementado independentemente do estado do canal e quando atinge o valor zero, o dispositivo realiza uma única vez um *Clear Channel Assessment* (CCA). Caso o canal esteja inativo durante o período T_{CCA} , o dispositivo transmite o pacote. No caso o canal esteja ocupado, o *BE* é incrementado em 1 e o procedimento de *backoff* é repetido. Um pacote de dados deve ser reconhecido com um *ACK*.

No modo com *beacon* o tempo é dividido em intervalos separados por *beacons*: os *superframes*. Este por sua vez é dividido em um intervalo útil e um intervalo de inatividade. O início do *superframe* é sinalizado através de um *beacon* enviado pelo coordenador da rede. A parte útil do *superframe* é dividido em 16 *slots* de tempo sendo o primeiro o próprio *beacon*. Em um primeiro grupo de *slots* – o *Contention Access Period* (CAP) – é aplicada a técnica

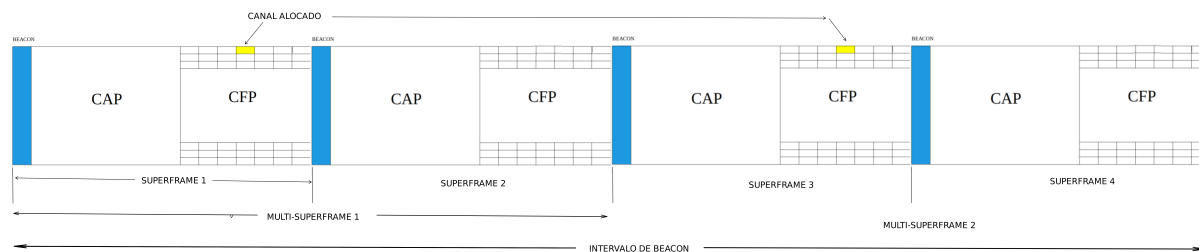


Figura 2: Estrutura de Multiframes com BO=5, MO=4, SO=3 – Baseado em Jeong and Lee (2012)

slotted CSMA, uma variante do CSMA-CA. Opcionalmente, em um segundo grupo de slots (7) é aplicada uma técnica tipo TDMA. Esta última é usada para prover os GTSS (*slots* reservados) que permitem reserva do canal para uma comunicação específica, proporcionando determinismo na comunicação. Este período de tempo é chamado de *Contention Free Period* – CFP.

Deve ser observado que o momento de inatividade proporciona economia de energia, pois o coordenador e demais dispositivos podem se manter em estado de baixo consumo energético esperando um novo ciclo. Como será visto, a variante DSME amplia o modo de funcionamento com *beacon*, sendo esta tecnologia explorada neste trabalho.

4.3 IEEE 802.15.4e e o DSME

O padrão IEEE 802.15.4e é um aperfeiçoamento do protocolo IEEE 802.15.4 proposto em 2012 e incorporados a ele em 2015 (Kurunathan et al., 2018). Foram adicionados elementos na camada MAC que proporcionam determinismo e qualidade de transmissão através de *multihop* de frequências. Foram propostas extensões tais como o *Deterministic and Synchronous Multichannel Extension* (DSME), o *Time Slotted Channel Hopping* (TSCH), o *Low Latency* (LL) e o *RFID Blink*.

Nesta seção será explorado o DSME por ser objeto de estudo deste trabalho e por visar aplicações com requisitos firmes de QoS tais como aplicações industriais e sistemas de monitoramento de saúde. Entre outras características proporciona **determinismo na latência**, **alta confiabilidade** e **escalabilidade**, através de uma abordagem de multiplexação em frequência e no tempo.

Conforme Battaglia et al. (n.d.) e (Kurunathan et al., 2018), o DSME usa uma topologia em árvore tendo um coordenador PAN na raiz, um ou mais coordenadores e múltiplos nós finais. O PAN DSME se utiliza de *beacons* para delimitar *multi-superframes* sem períodos inativos. Como o nome sugere, um *multi-superframe* é constituído de múltiplos *superframes* (Fig. 2).

4.3.1 Períodos de CAP e CFP no superframe

Pode-se observar que um *superframe* possui um período com contenção (CAP) e um período livre de contenção (CPF). No CAP existe competição baseada em CSMA/CA. Ele pode ter até 8 *timeslots* e dados não periódicos ou não urgentes podem ser transmitidos neste período. A associação

e desassociação a uma rede também é realizada neste período (Köstler et al., n.d.). A existência de CAP pode ser restringida (configurada) ao primeiro *superframe* do *multi-superframe*.

O CFP é constituído por um grupo de *timeslots* chamados *Guaranteed Time Slots*. A comunicação garantida entre dois nós é realizada pela alocação de um par destes GTS que podem estar separados no tempo e por canal (frequência). A negociação de alocação de GTS é realizada usando o período de CAP.

Ao detectar um *beacon*, um nó final pode transmitir tanto pelo CAP como pelo CFP. A transmissão/recepção poderá ser diretamente para o coordenador PAN (que normalmente é o sorvedouro da rede) se este estiver ao seu alcance, caso contrário, transmite para um coordenador. O coordenador atua como um comutador neste caso. Para transmitir pelo CFP o nó deve requisitar um GTS (Al-Yami et al., 2016).

O número de CFP depende do número de canais disponíveis. Os parâmetros BO, MO e SO determinam respectivamente o a ordem de Beacon (BO), a ordem de *multi-superframe* (MO) e a ordem de *superframe* (SO). As durações de cada um é assim determinada (I. Juc et al., 2016):

- a duração base de um *superframe*, em símbolos, é dada por:

$$aBaseSuperFrameDuration = 960 \text{ símbolos}$$

O tempo de um símbolo numa taxa de 250 Kbps e 4 bits/símbolo é $16\mu s$, portanto, 960 símbolos perfaz 15,36ms. Notar que o tamanho base de um *slot* é 60 símbolos e o *superframe* possui 16 *slots*.

- a duração SD de um *superframe*

$$SD = aBaseSuperFrameDuration * 2^{SO}$$

- a duração MD de um *multi-superframe*

$$MD = aBaseSuperFrameDuration * 2^{MO}$$

- a duração BI de um Intervalo de Beacon

$$BI = aBaseSuperFrameDuration * 2^{BO}$$

Com estas relações tem-se que o número de *superframe* em um *multi-superframe* é 2^{MO-SO} , o número de *multi-*

superframe em um intervalo de beacon é 2^{BO-MO} e o número de *superframes* no intervalo de beacon é 2^{BO-SO} .

Durante um período de CAP qualquer nodo pode requisitar alocação de GTS com outro nodo dentro do seu alcance (Köstler et al., n.d.). A requisição é realizada por um **DSME GTS Request** direcionado ao nodo alvo da comunicação. A aceitação é realizada por um **DSME GTS Response**. Sendo na fase de CAP, toda vizinhança pode observar e armazenar a reserva. Um comando de **DSME GTS Notify** por parte do requisitante, garante que toda a vizinhança de ambos os nodos estejam cientes. Cada dispositivo mantém uma estrutura *bitmap* de alocação da vizinhança e dos seus próprios GTSs alocados.

5 Simulação de Cenários Voltados a um Ambiente Industrial

A avaliação de desempenho de um sistema computacional, incluindo redes de computadores, pode ser realizada através de três técnicas (Jain, 1991) que podem ser combinadas ou não:

- Modelagem Analítica;
- Simulação;
- Medição.

Neste trabalho optou-se por usar simulação, eventualmente apoiada por resultados analíticos providos de outros trabalhos. A simulação permite escalabilidade e diversidade na avaliação e comparação de tecnologias e cenários. A primeira vista a medição parece ser mais evidente, porém comparar dois ou três nodos reais de comunicação pode exigir um pequeno esforço e investimento, mas comparar cenários com dezenas ou centenas de nodos exige um esforço grande em termos de tempo e investimento financeiro.

Por outro lado, a simulação exige também um grande esforço em termos de aprendizagem de plataforma de simulação, verificação e validação de modelos simulados, coleta e filtragem de dados (a quantidade de dados gerados pode ser imensa), análise de dados e apresentação para tomada de decisão (Jain, 1991).

5.1 Ferramentas de Simulação e de Análise de Dados Resultantes

Para a avaliação de desempenho foi utilizado o simulador Omnet (Varga and Hornig, 2008). Trata-se um simulador a eventos discretos (DES – *Discrete Event Simulator*) de código aberto já consolidado na academia. O Omnet proporciona ferramentas próprias para facilitar a análise dos resultados de simulação e possui uma linguagem própria de construção/configuração de modelos de simulação. A sua estrutura básica pode ser usado para simular qualquer sistema a eventos discretos, incluindo modelos genéticos, químicos, econômicos, entre outros. Porém, quando usado com a biblioteca INET que o acompanha, se torna um poderoso simulador de redes de computadores. Esta biblioteca, permite construir nodos usando modelos parametrizáveis das várias camadas de protocolos de uma rede, desde a camada física até a aplicação. O meio físico,

bem como modelos de propagação e de ambientes também são fornecidos. Adicionalmente, modelos de mobilidade enriquecem a construção de cenários experimentais.

Os modelos de simulação de redes IEEE 802.11g e IEEE 802.15.4 em modo CSMA foram extraídos da biblioteca INET supracitada. Para a simulação do DSME foram utilizados os modelos do Omnet implementados no Projeto OpenDSME (Köstler et al., n.d.). Trata-se de um projeto aberto de implementação do padrão DSME destinado a implementação em dispositivos reais. Todavia, o código também foi usado para implementação de modelos de simulação no contexto do INET/Omnet.

A análise e apresentação de dados se utilizou das ferramentas NumPY, Matplotlib, Pandas e Jupyter, juntamente com o Python.

5.2 Caracterização do Experimento: objetivos, métricas e fatores

5.2.1 Objetivos

Ter claro o objetivo de um experimento é essencial para o desenvolvimento bem sucedido de um projeto de avaliação de desempenho. O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho de três tecnologias de rede sem fio com baixa densidade de nodos, em um contexto de monitoramento de falhas de máquinas na indústria 4.0. A ideia é proporcionar subsídios para a tomada de decisão na seleção e uso de tecnologias sem fio para este domínio específico.

Neste caso o *playground* identificado por Fertig (2020) é uma área retangular de 20m X 80m onde estariam dispostas as máquinas a serem monitoradas.

As tecnologias de rede sem selecionadas para este trabalho são: IEEE802.11g (6 Mbps), IEEE802.15.4 (CSMA) e DSME (IEEE802.15.4 com *slots* de tempo)

5.2.2 Parâmetros Fixados e Fatores

Ao realizar um experimento de avaliação de desempenho de sistemas é necessário ter claro o que será fixado em termos de parâmetros do sistema e o que será variado para investigar os efeitos sobre as métricas de interesse no sistema. Os parâmetros que serão variados segundo determinados níveis são os **fatores**. A escolha de um projeto de n fatores, cada um com diferentes níveis, impacta diretamente o número de simulações a serem realizadas. Torna-se necessário muitas vezes realizar prévias de simulações para melhor selecionar fatores e níveis.

Neste experimento, os fatores e níveis selecionados são mostrados na Tabela 1.

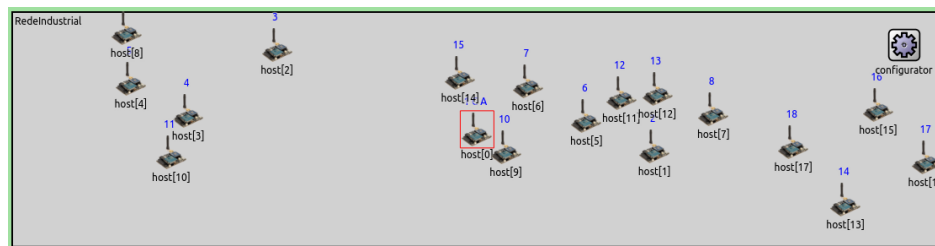
Considera-se que a Tecnologia selecionada também é um fator e impacta na geração de *rodadas* de simulação. Para uma única repetição, combinando-se 3 fatores tem-se $10 \times 3 \times 3$ *rodadas*, ou um total de 90.

As mensagens geradas pelos nodos são periódicas, com os intervalos definidos acima. A escolha dos níveis associados a estes fatores, bem como o número de nodos seguem os requisitos do tipo de aplicação (monitoramento de falhas) identificados por Fertig (2020). O passo 2 para o número de nodos foi escolhido para reduzir o número de dados de simulação mas ao mesmo tempo permitir identificar possíveis pontos de rupturas no sistema.

Como parâmetros fixos relevantes tem-se o tamanho

Tabela 1: Fatores e Níveis

Fator	Nível	Comentário
Número de Nodos	2 a 26 Nodos com passo 1	Um nodo coordenador e demais sensores
Intervalo entre msgs:	100, 500 e 1000 ms	Mensagens tamanho fixo
Tecnologia	Wi-Fi, CSMA e DSME	Abreviaturas para IEEE802.11g (6 Mbps), IEEE8015.4-CSMA e DSME

**Figura 3:** Exemplo dos Sensores e Coordenador (host[0]) no Playground

da mensagem, fixado em 44 bytes. Na realidade, estão incluídos neste tamanho um byte da camada de aplicação e 43 bytes da camada de rede (não foi usado a camada IP, mas uma camada genérica disponível no INET).

Também é fixado em 100 o número de pacotes a ser enviados por cada sensor.

Os *headers* das camadas de enlace dependerão das tecnologias usadas. Não houve interferência na configuração dos mesmos. Todas as tecnologias serão habilitadas a reconhecimento em nível de camada de enlace.

A Fig. 3 mostra um exemplo de distribuição de sensores no playground. A distribuição é realizado de forma uniforme.

5.2.3 Métricas de Interesse

No sensoriamento de máquinas em chão de fábrica, ainda que exista uma instalação elétrica projetada, nem sempre existe a possibilidade ou facilidade de alimentar os sensores que serão colocados normalmente sobre um sistema legado. Neste sentido, analisar o consumo de energia, principalmente dos sensores é de grande relevância. A ideia é analisar a energia residual nos nodos após o envio de uma certa quantia de pacotes.

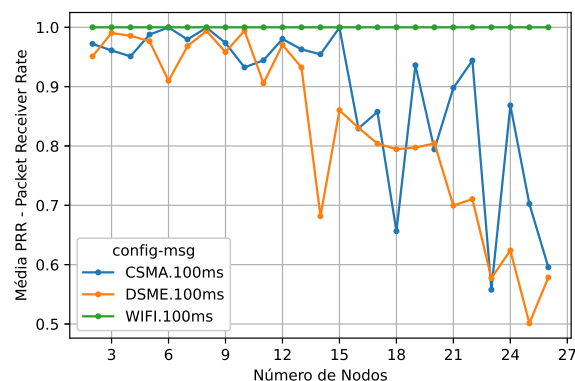
A confiabilidade na transmissão também é de extrema importância. A métrica usada neste caso será o percentual agregado de pacotes recebidos pelo nodo coordenador (PRR). Um resumo das métricas é mostrado na Tabela 2.

5.3 Configurações da Camada Física

Dois aspectos importantes serão discutidos a parte: os modelos de rádio com suas configurações e o modelo de consumo de energia.

Os modelos de rádios utilizados para o IEEE802.15.4 (CSMA e DSME) foram *ieee802154NarrowBandScalarTransmitter* e *ieee802154NarrowBandScalarReceiver*, disponibilizados no INET. Deve ser observado que os mesmos modelos de camada física são usados, uma vez que a variação é sobre a camada de enlace. O modelo de rádio usado para Wi-Fi foi o *IEEE80211ScalarRadio*.

As configurações usadas para cada tecnologia avaliada

**Figura 4:** Razão de Pacotes Recebidos - Período de 100ms

são mostradas nas Tabelas 3 e 4.

5.4 Configurações da Camada de Aplicação

O modelo de aplicação utilizado foi o PRRTrafGen fornecido pela biblioteca do openDSME/omnet (Köstler et al., n.d.). Trata-se de uma extensão do módulo IpvxTrafGen da biblioteca Inet. O módulo gera e absorve pacotes, atuando portanto como gerador e sorvedouro e trabalhando sobre a camada de rede.

É possível configurar a aplicação para iniciar a transmissão em tempo específico.

A aplicação foi configurada para geração de pacotes em intervalos constantes com períodos de 100ms e 1000ms.

6 Análise dos Resultados

6.1 Razão de Pacotes Recebidos (PRR)

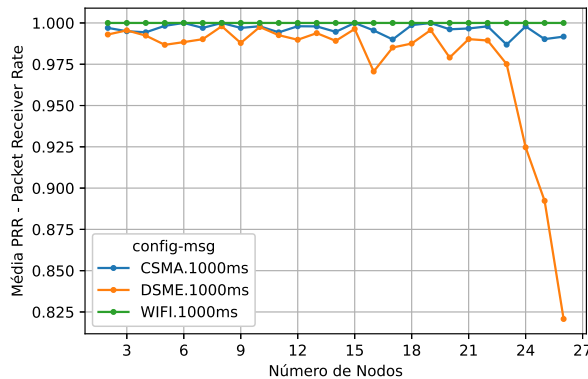
As Figs. 4 e 5 mostram o PRR do ponto de vista da aplicação, para as duas periodicidades de envio de mensagens estudadas: 100ms e 1000ms. É importante lembrar as camadas MACs possuem ACK, portanto em condições normais o

Tabela 2: Métricas de Interesse

Métrica	Unidade	Comentário
Energia Residual Final	Joules	Média dos Sensores e Valor no Coordenador
Pacotes Recebidos Corretamente	Percentual	Pacotes recebidos pelo coordenador

Tabela 3: Parâmetros de Rádio - Transmissor

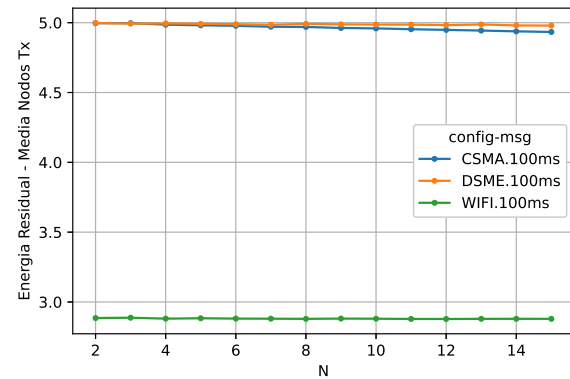
Parâmetro	Wi-Fi	CSMA/DSME
Duração de Preâmbulo	não usado	0.000128 s
Tamanho de Cabeçalho	192 b	16 b
bitrate	6 Mbps	250 kbps
Potência Tx	2 mW	2.24 mW
Frequência Central	2.412 Ghz	2.45 Ghz
Bandwidth		2.8 Mhz
Modulação	BPSK	DSSS-OQPSK-16
Número do Canal	0	Não

**Figura 5: Razão de Pacotes Recebidos - Período de 1s**

PRR deveria se mostrar próximo a 1 (100% de mensagens que foram transmitidas foram recebidas).

O IEEE802.15.4 CSMA apresenta degradação do PRR a partir de 15 dispositivos quando o período é 100 ms. Condição perfeitamente explicável pelo fato do forte aumento da contenção na rede e a consequente retransmissão de mensagens que volta a impactar o sistema. Este resultado confirma o fato que esta tecnologia apresenta melhores resultados para aplicações com períodos maiores, tal como apresentado na Fig. 4.

Os valores mostrados são a média de todos os transmissores. Fica claro uma disruptura deste valor para o DSME a partir de 15 nós na rede em 1000ms e a partir de 6 nodos quando submetido a uma condição de estresse de 100ms. Situação perfeitamente explicável pois como o nodo coordenador opera em uma dó frequência, não está sendo explorado a dimensão multi-frequencial dos canais. A reserva é realizada somente no tempo sendo os canais esgotados pelos fluxos transmissores alocados. O intervalo de Beacon reduzido é necessário para

**Figura 6: Energia residual ao final da simulação - período de 100 ms**

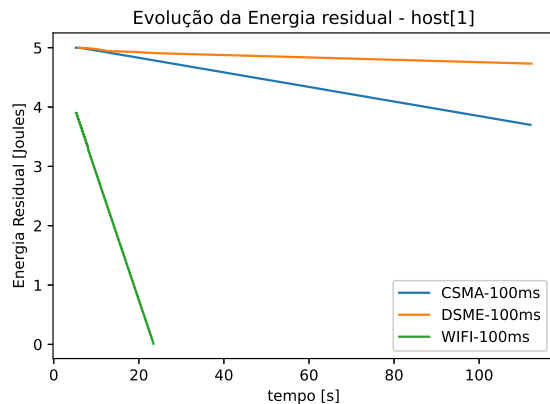
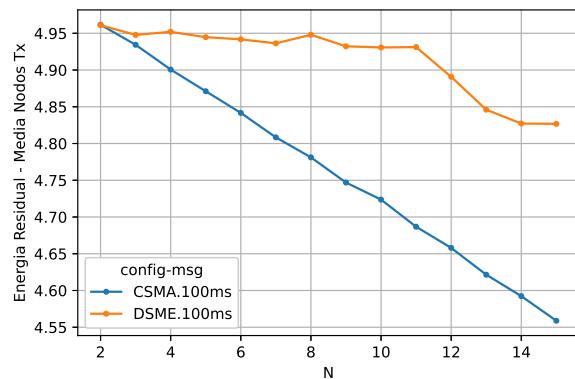
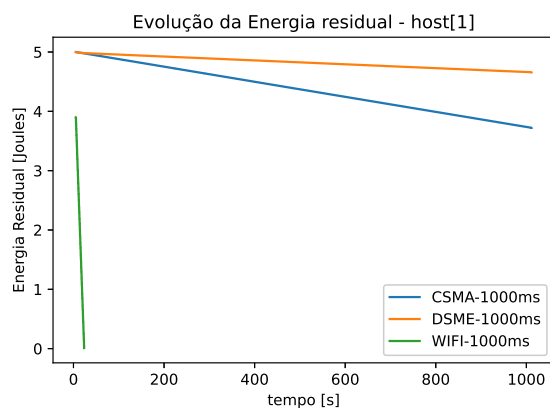
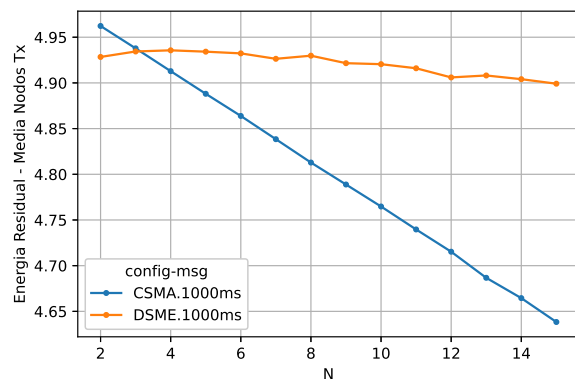
6.2 Energia Residual

A Fig. 6 mostra uma visão da energia residual após o término da simulação. No eixo das abscissas tem-se o número de nodos no cenário (todos transmitindo para o *host 0*). O período de envio é 100ms. O consumo é a média dos nodos transmissores. Fica evidente que para a configuração de rádio usada, o Wi-Fi tem um consumo extremamente elevado, terminando a simulação sempre com a bateria exaurida.

As Figs. 7 e 8 mostram o consumo no tempo em uma visão específica do *host 1* (considerado típico) dentro de um cenário com 10 nodos. Este cenário é considerado limite para o DSME. Pode-se observar aqui claramente que o DSME se mostra vantajoso, com uma derivada negativa pequena, permitindo uma longa sobrevivência da rede. Uma visão de consumo ao final da simulação, com detalhes para todos os números de nodos simulados é mostrado nas Figs. 9 e 10, reforçando a vantagem do DSME nestas condições.

Tabela 4: Parâmetros de Rádio – Receptor

Parâmetro	Wi-Fi	CSMA/DSME
snirThreshold	4dB	-3.3dBm
snirThresholdMode	min	min
energy detection	-85dBm	-90dBm
sensibilidade	-85dBm	-103.74dBm
minInterferencePower		-103.74 dBm
Modelo de Erro	ieee80211NistErrorModel	ApskErrorModel o Modo Packet Corrupt snir Mode Min

**Figura 7:** Evolução da Energia Residual – 10 nodos no cenário – Período 100ms**Figura 9:** Detalhe da Energia residual ao final da simulação – período de 100 ms – CSMA X DSME**Figura 8:** Evolução da Energia Residual – 10 nodos no cenário – Período 1000ms**Figura 10:** Detalhe da Energia residual ao final da simulação – período de 1000 ms – CSMA X DSME

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

De forma geral, observa-se que em termos da métrica PRR, o Wi-Fi se mostrou superior em relação as tecnologias as quais foi comparado. Entretanto, para a natureza de aplicação analisada – monitoramento de máquinas em chão de fábrica – onde pode ser necessário instalar sensores com bateria própria devido ao acesso e infraestrutura, o *unslotted IEEE802.15.4* e o *DSME* se mostram muito superiores em termos de consumo, com vantagem para o último. Deve-se além disto considerar que o *DSME* traz

um determinismo inerente a reserva de recursos.

Uma característica do *DSME* é possibilidade de permitir a implementação de redes *multi-hopping*. Caso um nodo final não tenha contato direto com o coordenador PAN, ele poderá enviar dados para um coordenador que poderá encaminhá-los para o coordenador PAN. Esta característica pode ser explorada para construir redes de maior abrangência.

Na topologia em estrela, analisada neste artigo, não se considerou a possibilidade de uso de um coordenador com

capacidade multi-frequência, ou mesmo com múltiplos sensores recebendo dados e superpostos ao coordenador da rede. Este é um ponto a ser investigado e tem-se dados para mostrar que pode-se ampliar muito a capacidade do DSME.

Agradecimentos

Este artigo foi resultado de um projeto interno de pesquisa do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus São José Edital 2019 com número PISJE2062–2019 intitulado: "Avaliação de desempenho de redes sem fio em ambientes industriais: melhorias sobre um trabalho de graduação". Os docentes autores tiveram carga horária alocada para o seu desenvolvimento. O projeto foi uma continuidade do trabalho de TCC de Fertig (2020). A autora do TCC não participou do projeto mas lançou as bases para o mesmo.

Referências

- Adams, J. (2006). An introduction to ieees 802.15.4, 2006 IEEE Aerospace Conference, pp. 8 pp.–. <https://doi.org/10.1109/AERO.2006.1655947>.
- Al-Yami, A., Abu-Al-Saud, W. and Shahzad, F. (2016). Simulation of industrial wireless sensor network (iwsn) protocols, *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2016 IEEE Conference on*, IEEE, pp. 527–533. <https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2016.7562133>.
- Almeanazel, O. T. R. (2010). Total productive maintenance review and overall equipment effectiveness measurement, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering* 4(4). Disponível em <https://www.semanticscholar.org/paper/Total-Productive-Maintenance-Review-and-Overall-Taisir/2c112a6d1b4bfbd10b205d1c0ed1414c0875667>.
- Battaglia, F., Collotta, M., Leonardi, L., Lo Bello, L. and Patti, G. (n.d.). Novel Extensions to Enhance Scalability and Reliability of the IEEE 802.15.4–DSME Protocol, *Electronics* 9(1). <https://doi.org/10.3390/electronics9010126>.
- Becker, A., Schneider, A., Ercico, J. and Werlang, R. (2018). Os conceitos da indústria 4.0 associados a abordagem da capacidade dinamicamente, *Anais da Engenharia de Produção / ISSN 2594-4657* 2(1): 123–136. Disponível em <https://uceff.edu.br/anais/index.php/engprod/article/view/203>.
- Bianchi, G. (2000). Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function, *IEEE Journal on selected areas in communications* 18(3): 535–547. <https://doi.org/10.1109/49.840210>.
- Chen, F., Wang, N., German, R. and Dressler, F. (2010). Simulation study of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for industrial applications, *Wireless Communications and Mobile Computing* 10(5): 609–621. <https://doi.org/10.1002/wcm.736>.
- Da Silva, J. P. (2009). Oee – a forma de medir a eficácia dos equipamentos. Disponível em https://www.academia.edu/8768137/OEE_A_FORMA_DE_MEDIR_A_EFICACIA_DOS_EQUIPAMENTOS_OEE_THE_WAY_TO_MEASURE_EQUIPMENT_EFFECTIVENESS.
- de Queiroz, D. V. (2016). *Simulação realista de redes de sensores sem fio industriais*, Master's thesis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil. Disponível em <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/9248>.
- Dietrich, S., May, G., Wetter, O., Heeren, H. and Fohler, G. (2017). Performance indicators and use case analysis for wireless networks in factory automation, *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2017 22nd IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247605>.
- ETSI (2018). Reconfigurable radio systems (rrs); feasibility study on temporary spectrum access for local high-quality wireless networks, *Technical report*, ETSI. Disponível em https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103600_103699/10365201/01.01.01_60/ts_10365201v010101p.pdf.
- Fertig, K. S. (2020). Redes Industriais: IEEE 802.11 X IEEE 802.15.4; Uma análise comparativa no monitoramento de paradas de máquinas, *Monografia de TCC, IFSC – Campus São José*. Disponível em https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/d/dc/TCC290_Katharine_Schaeffer_Fertig.pdf.
- FIRJAN, S. S. (2016). Panorama da inovação: Indústria 4.0, Rio de Janeiro. Disponível em <https://docplayer.com.br/32324784-Publicacoes-firjan-cadernos-senai-de-inovacao-industria-4-0-abril-2016.html>.
- G. Alderisi, G. Patti, O. Mirabella and L. L. Bello (2015). Simulative assessments of the IEEE 802.15.4e DSME and TSCH in realistic process automation scenarios, *2015 IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2015.7281863>.
- I. Juc, O. Alphand, R. Guizzetti, M. Favre and A. Duda (2016). Energy consumption and performance of IEEE 802.15.4e TSCH and DSME, *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7565006>.
- Islam, K., Shen, W. and Wang, X. (2012). Wireless sensor network reliability and security in factory automation: A survey, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 42(6): 1243–1256. Disponível em <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2012.2205680>.
- Jain, R. (1991). *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*, Wiley New York.
- Jeong, W.-C. and Lee, J. (2012). Performance evaluation of IEEE 802.15.4e DSME MAC protocol for wireless sensor networks, *2012 The First IEEE Workshop on Enabling Technologies for Smartphone and Internet of Things (ETSIoT)*. <https://doi.org/10.1109/ETSIoT.2012.6311258>.

- Kim, T. O., Park, J. S., Chong, H. J., Kim, K. J. and Choi, B. D. (2008). Performance analysis of iee 802.15.4 non-beacon mode with the unslotted csma/ca, *IEEE Communications Letters* 12(4): 238–240. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2008.071870>.
- Köstler, M., Kauer, F., Lübkert, T. and Turau, V. (n.d.). Towards an open source implementation of the iee 802.15.4 dsme link layer. Disponível em <http://open-dsme.org/dsme.pdf>.
- Kurunathan, H., Severino, R., Koubaa, A. and Tovar, E. (2018). Iee 802.15.4e in a nutshell: Survey and performance evaluation, *IEEE Communications Surveys Tutorials* 20(3): 1989–2010. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2800898>.
- Li, X., Li, D., Wan, J., Vasilakos, A. V., Lai, C.-F. and Wang, S. (2017). A review of industrial wireless networks in the context of industry 4.0, *Wireless networks* 23(1): 23–41. <https://doi.org/10.1007/s11276-015-1133-7>.
- Liang, W., Zhang, J., Shi, H., Wang, K., Wang, Q., Zheng, M. and Yu, H. (2021). An experimental evaluation of wia-fa and iee 802.11 networks for discrete manufacturing, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17(9): 6260–6271. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3051269>.
- Lima, J., Moreira, J. and Sousa, R. M. (2015). Remote supervision of production processes in the food industry, *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2015 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 1123–1127. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385823>.
- Loureiro, A. A., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A. d. F., Nakamura, E. F. and Figueiredo, C. M. S. (2003). Redes de sensores sem fio, *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, sn, pp. 179–226. Disponível em <https://homepages.dcc.ufmg.br/~loureiro/cm/doc/s/sbrc03.pdf>.
- Lu, C., Saifullah, A., Li, B., Sha, M., Gonzalez, H., Gunatilaka, D., Wu, C., Nie, L. and Chen, Y. (2016). Real-time wireless sensor-actuator networks for industrial cyber-physical systems, *Proceedings of the IEEE* 104(5): 1013–1024. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2497161>.
- Macedo, P. and Afonso, J. A. (2009). Simulation analysis of iee 802.15.4 for wireless networked control systems, *Industrial Electronics, 2009. IECON'09. 35th Annual Conference of IEEE, IEEE*, pp. 2482–2487. Disponível em <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/17409/1/IECON2009-p.pdf>.
- Muchiri, P. and Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (oe): Literature review and practical application discussion, *International Journal of Production Research - INTJ PROD RES* 46: 3517–3535. <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>.
- Ni, Q. (2005). Performance analysis and enhancements for iee 802.11 e wireless networks, *IEEE network* 19(4): 21–27. <https://doi.org/10.1109/MNET.2005.1470679>.
- Park, P., Coleri Ergen, S., Fischione, C., Lu, C. and Johansson, K. H. (2018). Wireless network design for control systems: A survey, *IEEE Communications Surveys Tutorials* 20(2): 978–1013. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2780114>.
- Scholl, G., Heynicke, R., D.Krüger and Hornung, R. (2013). Wireless automation. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/236902313_Wireless_Automation.
- Seferagić, A.; Famaey, J. D. P. E. H. J. (2020). Survey on wireless technology trade-offs for the industrial internet of things, *Sensors* 20(3): 488. <https://doi.org/10.3390/s20020488>.
- Silva, D. G. d. (2017). *Indústria 4.0: conceito, tendências e desafios*, B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16889/1/PG_COAUT_2017_2_02.pdf.
- Valadares, D., Joseana, A., Angelo, P., Marco, S., Elmar, M., Alexandre, C., Felipe, R. and Natália, A. (2020). Performance evaluation of an iee 802.11g network in an industrial environment, *IEEE Latin America Transactions* 18(05): 947–953. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082924>.
- Valle, O. T., Montez, C., Portugal, P., Vasques, F. and Costa, D. G. (2012). Expansion of the available use classes in iee 802.15.4 networks for usage in the industrial environment, *Wireless Communication Systems (ISWCS), 2012 International Symposium on*, IEEE, pp. 131–135. <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2012.6328344>.
- Varga, A. and Hornig, R. (2008). An overview of the omnet++ simulation environment, *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), Brussels, BEL. Disponível em https://www.researchgate.net/publication/220955489_An_overview_of_the_OMNeT_simulation_environment.
- Watteyne, T., Weiss, J., Doherty, L. and Simon, J. (2015). Industrial iee 802.15.4e networks: Performance and trade-offs, *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, IEEE, pp. 604–609. <https://doi.org/10.1109/ICC.2015.7248388>.
- Willig, A. (2008). Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection, *IEEE Transactions on industrial informatics* 4(2): 102–124. <https://doi.org/10.1109/TII.2008.923194>.