

Performance Evaluation of an IEEE 802.11g Network in an Industrial Environment

D. Valadares, J. de Araújo, A. Perkusich, M. Spohn, E. Melcher, A. Costa, F. Ramos, and N. Albuquerque

Abstract—In the industrial domain, wireless networks are among the most recommended, due to their low deployment cost, great flexibility, and by being less invasive to the environment. In the literature, little emphasis is given to the application of traditional IEEE 802.11a/b/g standards into industrial environments. We have evaluated the communication performance of an 802.11g network infrastructure within a thermoelectric power plant. Three metrics were considered during our analysis: packet loss rate, transfer rate, and response time. Tests were conducted to evaluate the communication between different points inside the engine room and a point located in the administration room. To get a more realistic scenario, the experiments were performed in working days of the thermoelectric power plant. The network performance did not suffer significant degradation, even under electromagnetic interference and other intrinsic characteristics of such harsh environment. We concluded suggesting the addition of a few more access points to the engine room in order to improve the signal quality and thus the communication.

Index Terms—802.11g Networks, Wireless networks, Industrial environment, Performance evaluation.

I. INTRODUÇÃO

ATUALMENTE há uma tendência em se conectar os mais variados tipos de dispositivos tecnológicos à Internet ou a redes privadas. Por questões práticas, incluindo flexibilidade e baixo custo de implantação/manutenção, as redes sem fio são uma opção usual para as mais diversas aplicações. No ambiente industrial não é diferente, ainda mais com o avanço da Indústria 4.0 e da Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT). Graças às características específicas do ambiente industrial, torna-se essencial a análise de critérios relevantes, primordialmente no que concerne ao desempenho da infraestrutura de rede.

Dalton C. G. Valadares, Instituto Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Caruaru, Pernambuco, Brazil. dalton.valadares@caruaru.ifpe.edu.br.

Joseana M. F. R. de Araújo, Departamento de Sistemas e Computação, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, joseana@computacao.ufcg.edu.br.

Angelo Perkusich, Laboratório de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, perkusic@embedded.ufcg.edu.br.

Marcos A. Spohn, Universidade Federal da Fronteira Sul, Santa Catarina, Brasil, marco.spohn@uffs.edu.br.

Elmar U. K. Melcher, Departamento de Sistemas e Computação, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, elmar@computacao.ufcg.edu.br.

Alexandre Costa, Laboratório de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, alexandre.costa@embedded.ufcg.edu.br.

Felipe Ramos, Laboratório de Sistemas Embarcados e Computação Pervasiva, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, felipe.ramos@embedded.ufcg.edu.br.

Natália P. Albuquerque, Borborema Termoeletrica LTDA, Campina Grande, Paraíba, Brasil, natalia.albuquerque@borboremaenergetica.com.br.

Os avanços nas tecnologias de rede sem fio e nos sistemas embarcados viabilizaram a utilização de sistemas de automação inteligentes, geralmente utilizados para melhorar a eficiência de processos produtivos. Um fator que contribui para isto é a possibilidade de se empregar dispositivos sensores instalados juntamente aos equipamentos industriais, com o intuito de monitorar parâmetros críticos como temperatura, vibração, pressão, etc. Os dados coletados por tais sensores são, comumente, enviados a um computador remoto, por meio da rede de comunicação, para posterior análise.

É possível ter uma arquitetura de sistema de monitoramento em um ambiente industrial composta por sensores de diferentes fabricantes, com diferentes finalidades (*e.g.*, medição de temperatura, umidade e luminosidade) e com a comunicação sendo realizada por meio de uma tecnologia de rede sem fio específica ou uma rede híbrida que, neste contexto, incorpora mais de uma tecnologia de comunicação. Torna-se relevante, portanto, uma investigação sobre a qualidade do serviço oferecido pela infraestrutura de comunicação sem fio. Esta deve estar sempre disponível, de modo que, na ocorrência de qualquer problema detectado por algum sensor, o responsável seja notificado por meio de um sistema de alertas, permitindo-se tomar as medidas cabíveis para restaurar o sistema a um estado seguro, evitando-se perda de eficiência no processo produtivo ou mesmo uma falha completa neste.

Mesmo com as vantagens do uso de tecnologias de rede sem fio, deve-se ter uma preocupação quanto ao uso de qualquer uma destas em ambiente industrial, dada a natureza por vezes inóspita do meio, composta geralmente por máquinas pesadas, diversas superfícies metálicas, interferências eletromagnéticas, entre outros aspectos. Tudo isto, de uma forma ou de outra, pode afetar o sinal da rede sem fio [1], tornando relevante a análise do desempenho da rede quando de sua implantação.

O padrão IEEE 802.11g é bastante utilizado em redes domésticas/empresariais e já provou-se apropriado aos mais variados fins de comunicação, incluindo, além da transmissão de dados, a transmissão de voz (*Voice over IP*, VoIP). Para aplicações industriais, normalmente são utilizados protocolos específicos como, por exemplo, *Wireless HART* e *ZigBee* (ambos baseados no padrão IEEE 802.15.4). Embora, pela literatura, tais protocolos específicos mostrem-se preferenciais para os projetos de redes de comunicação em ambientes industriais, decidiu-se realizar uma avaliação experimental de desempenho de uma rede *Wi-Fi* 802.11g em ambiente industrial, especificamente em uma usina termoeletrica, dada a infraestrutura de comunicação legada já disponível. Destaca-se que trabalhos anteriores apontam que motores elétricos não geram interferência na faixa de frequência de operação do 802.11g (*e.g.*, 2,4

GHz) [2], [3].

Neste trabalho, apresenta-se a avaliação de uma rede 802.11g implantada em uma usina termoeletrica. A aplicação que faz uso da rede é responsável pelo monitoramento remoto sem fio, por meio de sistemas embarcados e sensores, do funcionamento dos motores dentro da sala de motores. Os dados de interesse para a usina são enviados a um computador remoto, para auxiliar na tomada de decisões, no caso de medidas observadas fora dos níveis de referência. Esta aplicação utiliza processamento digital de sinais, especificamente reconhecimento de áudio, para identificar possíveis problemas no funcionamento dos motores, na sala de motores.

O estudo fez-se necessário porque o ambiente no qual a rede está implantada é repleto de equipamentos elétricos de grande porte (*e.g.*, motores e transformadores), os quais podem gerar interferências e impactar negativamente na confiabilidade inerente às redes sem fio. Fatores que corroboram estas interferências são as várias superfícies metálicas que, em muitos estudos, são utilizadas para reproduzir o ambiente industrial.

Para avaliar o desempenho da comunicação em uma rede, torna-se necessário definir parâmetros a serem observados, como latência, tolerância a falhas e confiabilidade de entrega [4]. Para este trabalho em particular, foram determinadas as seguintes métricas de qualidade: taxa de transferência, tempo de resposta e taxa de perda de pacotes. Estas métricas foram analisadas a partir dos dados coletados pelo processo experimental de execução dos testes na usina termoeletrica.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: na Seção II são abordados alguns trabalhos relacionados; a metodologia da avaliação e a descrição dos experimentos são apresentadas na Seção III; na Seção IV são expostos os resultados, juntamente com a discussão dos mesmos; por fim, a conclusão do trabalho é apresentada na Seção V.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta Seção, são apresentados alguns trabalhos relacionados ao objetivo deste estudo: avaliação de uma rede 802.11g em uma usina termoeletrica.

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) têm sido bastante aplicadas a ambientes industriais. Um sistema de monitoramento por meio de RSSF para indústrias de tingimento é apresentado por Santhosh et al. [5], de forma que alertas são enviados quando os valores medidos ultrapassam níveis de referência pré-determinados. Gomes et al. [1] apresentam uma análise sobre a ocupação espectral e a taxa de perda de pacotes para implantação de uma RSSF em um ambiente industrial. Comprovou-se que a adição de uma nova fonte de interferência ao ambiente afeta significativamente a distribuição de uso no espectro, afetando o desempenho da comunicação e aumentando a taxa de perda de pacotes. As principais características de RSSF são consideradas em Gilbert et al. [6], levando-se em consideração seu uso aplicado a ambientes industriais, e concluindo que as RSSF vêm se tornando viáveis para uso neste tipo de ambiente.

Alguns trabalhos consideram redes híbridas, com distintas tecnologias de rede, mais apropriadas a ambientes heterogêneos com características específicas. Uma rede híbrida de

Ethernet e IEEE 802.11, com pontos de acesso de diferentes fabricantes, é considerada por Seno et al. [7], sendo medido o tempo de serviço como índice de desempenho. Após avaliação de diferentes velocidades de transmissão, constata-se que baixa taxa de transmissão fixa garante melhores tempos de serviço, para pequenas cargas de pacotes transmitidas em um canal ruidoso. Anand et al. [8] apresentam um estudo de avaliação das redes *Wi-Fi* (802.11a/b/g) e *Bluetooth* (802.15.1), dando ênfase a aspectos de desempenho que são relevantes para redes de controle e automação e discutindo fatores importantes para a migração de redes cabeadas a redes sem fio e pontos importantes para a implantação destas em fábricas.

Silva et al. [9] discutiram sobre os desafios relacionados à aplicação do protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4) em instalações industriais. Os autores discorreram sobre como essa tecnologia pode ser influenciada por outras tecnologias como a *WiFi*, que opera na sua mesma banda de frequência (2,4 GHz). Por meio de simulação, eles mediram o desempenho de perda de pacotes dos nós ZigBee sob uma rede *WiFi* operacional. De acordo com os autores, para reduzir o impacto das interferências, é preciso planejar um esquema de configuração quando os dispositivos tiverem que ser distribuídos pela fábrica.

Jecan et al. [10] avaliaram o desempenho de uma rede de sensores sem fio usando dois padrões, ISA100.11a e WirelessHART, incorporados em uma única unidade de hardware. Os autores verificaram o desempenho da rede de acordo com indicadores como tempo de ingresso na rede, taxa de sucesso de publicação de dados do sensor e tempo de resposta de interações Cliente/Servidor usando clientes externos. Como resultado, eles observaram um aprimoramento substancial no tempo de ingresso na rede, uma boa preservação da taxa de sucesso de publicação de dados e um melhor tempo de resposta na comunicação Cliente/Servidor.

Cheng et al. [11] apresentaram uma introdução detalhada do mecanismo da janela de acesso restrito da IEEE 802.11ah. Além disso, eles investigaram por simulação o desempenho desse mecanismo acionado quando adotado em aplicações industriais. Os resultados obtidos mostram que o número de grupos de estações, o número de *slots* da janela de acesso restrito e a duração dos *slots* influenciam significativamente o desempenho em tempo real da rede.

Mahasukhon et al. [12] realizam uma análise comparativa da vazão nos padrões 802.11a e 802.11g, baseada em estudo analítico e experimental. A vazão no padrão 802.11g é significativamente inferior à vazão no 802.11a, graças ao tempo adicional para processamento de informações adicionais, para a compatibilidade entre os padrões e por ser mais suscetível a interferências de outros equipamentos atuando na mesma frequência (*i.e.*, 2,4 GHz). Valadares et al. [13], [14] analisaram a degradação do sinal de um ponto de acesso (AP) 802.11g em um ambiente industrial (usina termoeletrica). A potência do sinal foi medida ao longo de 20 pontos, distanciando-se do AP, e foi comparada com a potência de sinal estimada com o modelo LDPL (*Log-Distance Path Loss*). Concluiu-se que, para ambientes industriais com características semelhantes às da usina termoeletrica, o modelo LDPL pode ser utilizado para estimar a perda de potência do sinal em redes 802.11g utilizando o coeficiente de propagação igual a 4.

Ainda relacionado às interferências no espectro de frequência de 2,4 GHz, um estudo sobre as interferências existentes em ambientes com coexistência de redes 802.11 e 802.15.4, realizado por Yang et al. [15], menciona os principais desafios abertos em relação à implantação deste tipo de rede. A análise da coexistência de redes 802.11 e 802.14.5 também foi realizada por Wagh et al. [16], introduzindo um modelo de simulação e propondo um algoritmo que detecta interferências e alterna canais de uso para evitá-las. Resultados de simulação demonstraram que o algoritmo é eficiente ao mitigar o efeito de interferências.

Há, ainda, trabalhos que experimentam o uso do padrão 802.11 em ambientes industriais, propondo soluções para melhoria da comunicação neste tipo de ambiente [17], [18], [19]. Diante do exposto, ratifica-se que há uma preocupação comum na avaliação de tecnologias de rede sem fio, incluindo em ambientes industriais e com a presença de interferências eletromagnéticas, reforçando a importância deste trabalho.

III. METODOLOGIA E EXPERIMENTOS

Nesta Seção, são apresentadas a metodologia e a organização dos experimentos, descrevendo o ambiente, as ferramentas utilizadas para testes e os procedimentos realizados.

Com o objetivo de avaliar o desempenho da rede sem fio no ambiente de uma usina termoeletrica (UTE), foram definidas as métricas de interesse, a saber: taxa de transferência, tempo de resposta e taxa de perda de pacotes. Com a taxa de transferência, pretendeu-se verificar se a rede implantada possui velocidade e banda suficientes para a vazão dos dados (inferior a 500 kbps, requisito desta UTE), de forma adequada ao monitoramento remoto em tempo real. O tempo de resposta teve o intuito de determinar se a rede atende aos requisitos de tempo para o envio de dados importantes e confirmação de recebimento destes (para este trabalho, o tempo de até 3 segundos foi considerado aceitável). Por fim, com a taxa de perda de pacotes pretendeu-se verificar a qualidade da transmissão dos dados entre dois pontos, investigando-se quanto de informação foi perdida durante a comunicação.

O resultado da análise destas três métricas permitiu determinar quão eficiente é a comunicação na sala de motores. A rede implantada na UTE foi composta, basicamente, de quatro enlaces de comunicação sem fio localizados entre a sede administrativa da usina e a sala de motores, conforme Fig. 1. Embora a Fig. 1 apresente dispositivos como servidor, notebook, computador e *beaglebones*, estes não foram considerados para a análise, visto que não estavam em funcionamento durante a execução dos testes.

O enlace UTE_IN_ADM é localizado na sede administrativa da usina e o enlace UTE_IN_CHAMINÉS localizado na sala de motores. O enlace interligando UTE_IN_ADM e UTE_IN_CHAMINÉS é denominado UTE_OUT. Este último, UTE_OUT, possui duas antenas INTELBRAS WOG 212, com linha de visada, que operam na frequência de 2,4 GHz, com taxa de transmissão nominal de até 150 Mbps, compatível com o padrão IEEE 802.11b/g/n, com antena integrada com ganho de 12 dBi e potência nominal de 27 dBm [20]. Para os testes realizados na rede implantada, estas antenas foram

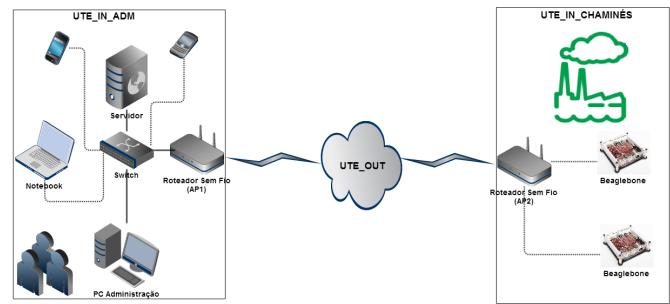


Fig. 1. Arquitetura da rede implantada na usina.

configuradas com o padrão IEEE 802.11g e potência de 23 dBm. O enlace dentro da sala de motores é caracterizado pela existência de um ponto de acesso TP Link, com potência efetiva irradiada de 20 dB, a uma altura de 2 m. Não foram detectadas outras redes no ambiente com capacidade de causar interferências no experimento; ou seja, não havia redes concorrentes com mesmo nível de qualidade de sinal.

Na Fig. 2 é apresentado o cenário físico no qual os testes foram realizados na usina. O ambiente é constituído por sala administrativa, oficina, praça de motores e sala de controle. Os pontos escuros representam os equipamentos constituintes dos enlaces de interesse: duas antenas Intelbras WOG 212 (ponto externo da sala de motores e ponto na sala administrativa), distando, aproximadamente, 150 metros uma da outra, e o *Access Point* da praça de motores. A praça de motores tem aproximadamente 3000 m^2 ($150\text{m} \times 20\text{m}$). A distância entre pontos adjacentes é aproximadamente 5 m, exceto entre os pontos $P10$ e $P11$, que distam cerca de 15 m.

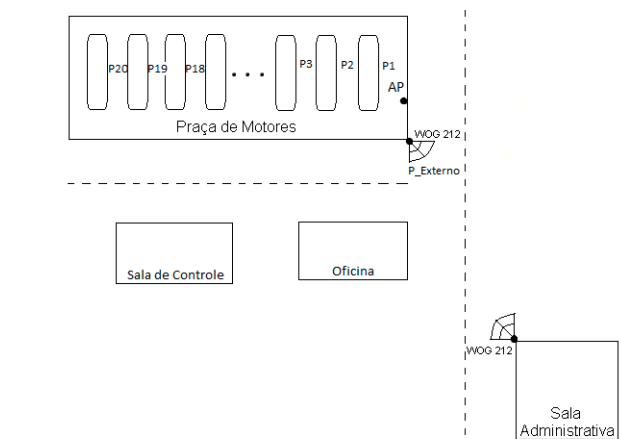


Fig. 2. Representação do ambiente de testes na termoeletrica.

As medições foram realizadas em pontos distintos da praça de motores, de forma a observar o comportamento de cada métrica em cada ponto. Estes foram escolhidos objetivando-se avaliar o impacto dos motores na transmissão de dados, ao ter um sistema embarcado em suas proximidades realizando comunicação com um computador remoto, na sala administrativa. Foram selecionados pontos nas proximidades dos centros dos motores, de forma que, ao avançar com a realização dos

testes, os próximos pontos estavam sujeitos a interferências de mais motores (*i.e.*, ambos os lados) e também mais distantes do ponto de acesso da rede. Estes pontos, $P1..P20$, estão sinalizados na Fig. 2, sendo que, para cada ponto Pn , foram realizadas as seguintes medidas:

- Taxa de transferência – taxa aproximada com a qual a rede transmite os dados entre o ponto de interesse Pn e o computador remoto;
- Taxa de perda de pacotes – percentual de perda ocasional durante a transmissão de dados entre o ponto de interesse Pn e o computador remoto;
- Tempo de resposta – tempo aproximado dispendido durante a transmissão de 100 pacotes de dados entre o ponto de interesse Pn e o computador remoto.

Para a realização dos testes, empregou-se o *software* iPerf [21] que, de maneira simples, disponibiliza informações sobre o desempenho da rede entre dois pontos. O iPerf é uma ferramenta que permite medir a máxima taxa de transferência em redes IP. Suporta a configuração de vários parâmetros e permite realizar testes com os protocolos da camada de transporte UDP e TCP. Para a execução dos testes, o protocolo utilizado foi o TCP, que é o padrão na execução do iPerf. Também se fez necessária a utilização do programa Ping [22], para obter o tempo de resposta e a taxa de perda de pacotes. Foram criados *scripts* para execução do iPerf e do Ping, de forma a automatizar o processo de coleta de dados. Todos os testes foram executados com um *notebook*, com Ubuntu 14 [23], posicionado sobre o piso da praça de motores, em cada ponto. A instanciação e execução do sistema operacional se deu por *pen drive*, tendo em vista que engenheiros da usina relataram que discos rígidos (HDS) estavam travando/queimando devido às interferências do ambiente.

Cada *script* executou o teste 100 vezes, em cada ponto Pn , de forma a se obter uma amostra representativa para análise de cada métrica. Este número de repetição foi adotado após a realização de uma avaliação preliminar, com variação da sua execução entre 50 e 100 vezes. Constatou-se que 100 vezes era suficiente, uma vez que os resultados não apresentavam diferença significativa (pouca variabilidade) para um número maior de amostragens. O fator tempo de execução dos testes também era relevante pois, para cada ciclo único de execução com, por exemplo, 50 e 100 repetições, o tempo para conclusão (obtenção dos dados) variava, respectivamente, de 25 a 40 minutos. Deste modo, uma observação com cerca de 40 minutos foi suficiente para ser considerada confiável. Assim, para cada ponto foram realizados 100 testes para coleta da taxa de transferência, com iPerf, e 100 testes para coleta da taxa de perda de pacotes e do tempo de resposta, com Ping.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse da taxa de transferência, da taxa de perda de pacotes e do tempo de resposta na comunicação cliente/servidor, foi realizada a análise dos resultados obtidos pelos testes.

Foi observado que, durante a realização dos testes, havia uma redução na qualidade do sinal da rede sempre que alguma porta da praça de motores, nas proximidades do local do teste, era aberta. De certo modo, com isto, a blindagem original da

praça de motores era "quebrada", gerando uma interferência perceptível nos valores das métricas medidas.

Os resultados dos experimentos foram sumarizados estatisticamente, de acordo com cada métrica em cada ponto, e, na Tabela I, são exibidos valores da média para cada métrica. Percebe-se que não foram apresentados resultados para os pontos 18, 19 e 20, uma vez que a comunicação se tornou impraticável nos mesmos, pela baixa qualidade do sinal (variando entre 22 % e 24 %), dada a baixa potência deste (variando entre -86 dB e -89 dB).

TABELA I
MEDIDAS ESTATÍSTICAS SUMARIZADORAS

| Pontos | Distância (m) | Taxa de Transferência (Mbps) | Tempo de Resposta (ms) | Taxa de Perda (%) |
|--------|---------------|------------------------------|------------------------|-------------------|
| P1 | 7 | 1,9 | 68,19 | 0 |
| P2 | 13 | 1,59 | 39,44 | 0 |
| P3 | 19 | 2,15 | 34,24 | 0 |
| P4 | 25 | 2,48 | 36,29 | 0 |
| P5 | 31 | 1,1 | 36,65 | 0 |
| P6 | 42 | 1,98 | 46,63 | 1,42 |
| P7 | 48 | 0,47 | 47,03 | 1 |
| P8 | 54 | 1,1 | 28,16 | 0,27 |
| P9 | 60 | 1,41 | 40,09 | 0,77 |
| P10 | 66 | 1,32 | 54,01 | 1,33 |
| P11 | 78 | 0,88 | 53,14 | 0 |
| P12 | 84 | 0,72 | 55,54 | 0 |
| P13 | 90 | 0,81 | 65,53 | 0 |
| P14 | 96 | 0,82 | 68,58 | 0 |
| P15 | 102 | 0,5 | 88,87 | 20 |
| P16 | 113 | 0,43 | 99,54 | 30 |
| P17 | 119 | 0,37 | 104,77 | 33 |
| P18 | 125 | - | - | - |
| P19 | 131 | - | - | - |
| P20 | 137 | - | - | - |

Os testes resultaram em uma taxa de transferência variando entre, aproximadamente, 375 kbps e 2,48 Mbps, dependendo da localização do ponto e momento do teste. Como os valores, em sua maioria, variaram entre 500 kbps e 2 Mbps, tem-se que os valores baixos, observados nos pontos mais próximos ao ponto de acesso, ocorreram em momentos em que houve, como explicado, movimentação de entrada e saída de funcionários na praça de motores, o que ocasionava perda no sinal/atenuação. Este comportamento não foi evitado, visto que os testes foram realizados durante expedientes normais de trabalho, tornando os resultados mais realistas.

Em relação ao tempo de resposta, observa-se que os resultados permaneceram entre, aproximadamente, 24 ms e 105 ms. Os casos de maior duração e medidos nos pontos mais próximos do ponto de acesso, possuem a mesma explicação: foi perceptível que, em momentos com entrada e saída de funcionários na praça de motores, houve um aumento do tempo de resposta. Para o ambiente em questão, todos os pontos apresentaram tempo de resposta abaixo de 100 ms, com exceção do último ponto, P17, no qual foi observado um valor superior (104,77 ms). A justificativa é a explicação já mencionada, bem como a distância do ponto 17 ao ponto de acesso da rede, já que este foi o ponto mais distante a obter sucesso na comunicação com o computador remoto, localizando-se próximo ao final da praça de motores. De toda

forma, estes são valores que são considerados aceitáveis, dado o requisito de tempo definido por funcionários da UTE (3 s).

A taxa de perda de pacotes teve variação entre 0 % e 33 %, na maioria dos pontos. Uma altíssima taxa de perda de pacotes de 33 % foi observada, apenas, no ponto 17. Esta métrica, no ponto 17, teve um comportamento similar ao observado para o tempo de resposta, justificados também pelas mesmas causas: ponto mais distante do ponto de acesso com comunicação e movimentação de entrada e saída de funcionários na praça de motores. No mais, uma taxa de perda de pacotes inferior a 2 % pode ser considerada bem aceitável, considerando-se os requisitos do projeto.

pacotes, o aumento no tempo de resposta e a diminuição da taxa de transferência são satisfatórios, de acordo com os requisitos pré-estabelecidos (3 segundos para tempo de resposta e 500 kbps para taxa de transferência), para a comunicação a ser realizada pelo sistema de monitoramento remoto a ser instalado na praça de motores, na maioria dos pontos testados (mais da metade).

Observou-se que as paredes do ambiente atuam como uma blindagem para o sinal interno da rede, e que, em momentos nos quais esta blindagem é “quebrada” temporariamente (entrada e saída de funcionários, por exemplo), há possibilidade da não efetivação na comunicação entre origem e destino. Entretanto, a comprovação de tal observação dependerá de estudos mais aprofundados.

Verificou-se que, mesmo a praça de motores sendo um ambiente com muitos equipamentos metálicos e eletromecânicos, a rede em estudo conseguiu realizar bem a comunicação com o computador remoto/servidor, não sofrendo grandes interferências do meio em estudo.

Os únicos pontos a apresentar resultados mais prejudicados (maior dificuldade para a comunicação com o servidor ou a não realização desta) foram os pontos mais distantes, o que já era esperado, uma vez que, como sabido, a potência média do sinal decai com a distância (por exemplo, no espaço livre, a potência decai de acordo com o quadrado da distância [24]): distâncias maiores implicam maior perda do sinal, que implicam pior qualidade da comunicação.

De acordo com os resultados expostos, é sugerido que um novo ponto de acesso sem fio seja adicionado nas proximidades entre o motor número 10 e o motor número 11 (ponto central da praça de motores), de tal forma que haja uma melhoria na infraestrutura da rede interna à praça de motores, possibilitando que haja boa comunicação com o servidor a partir de praticamente qualquer ponto interno. Tal sugestão se dá porque até o ponto 10 houve comunicação bem sucedida com qualidade de sinal e parâmetros aceitáveis (por exemplo, taxas de transferência de aproximadamente 500 kbps ou mais e tempos de resposta abaixo de 100 ms). Com isto, dado que a sala é simétrica em relação à disposição dos motores (20 motores iguais e equidistantes ao longo do prédio), temos indícios de que, com outro AP de mesma especificação e configuração, haverá comunicação bem sucedida do ponto 11 ao 20, possivelmente com valores de métricas semelhantes.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada uma análise de desempenho de uma rede sem fio 802.11g em um ambiente industrial, com o intuito de verificar se este tipo de rede, em ambientes caracterizados pela presença de motores de grande porte (*e.g.*, usina termoeletrônica), sofre com interferência eletromagnética.

Foram estabelecidas três métricas para avaliação do desempenho da rede: taxa de transferência, tempo de resposta e taxa de perda de pacotes. Para medição destes valores, foram utilizados dois aplicativos muito utilizados para medição de desempenho de redes: o Ping e o iPerf. Com o Ping, foram obtidos o tempo de resposta e a taxa de perda de pacotes; com o iPerf, obteve-se a taxa de transferência.

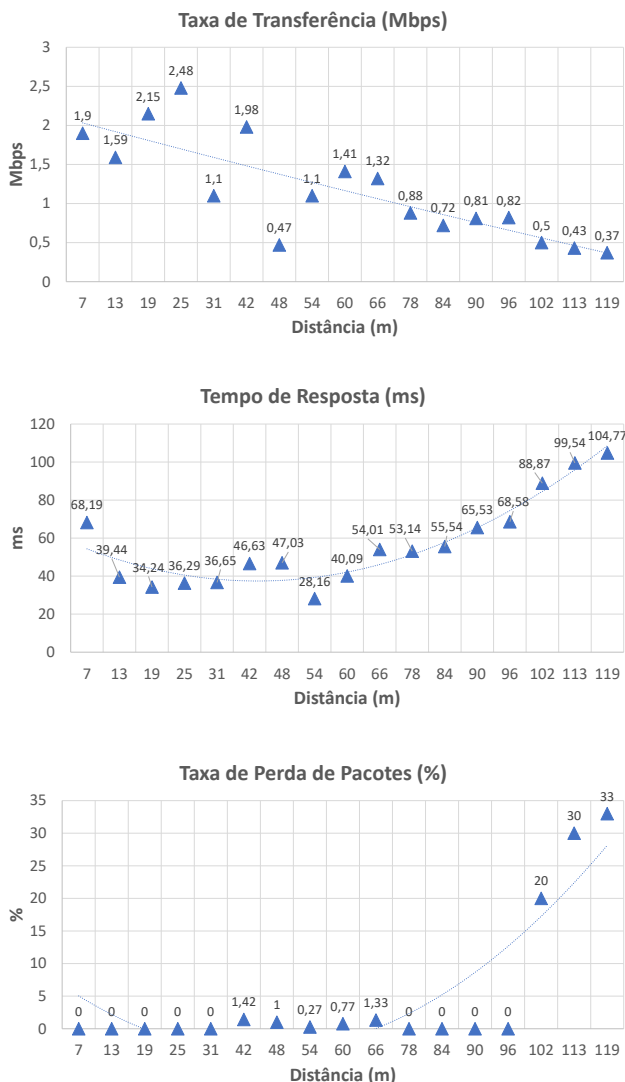


Fig. 3. Métricas em todos os pontos: Taxa de Transferência, Tempo de Resposta e Taxa de Perda de Pacotes.

Na Fig. 3, são apresentados gráficos (pontos x média para cada métrica) com as medições de taxa de transferência, tempo de resposta e taxa de perda de pacotes em todos os pontos nos quais foi possível realizar a comunicação com o computador remoto (servidor).

Conforme testes realizados, constatou-se que a perda de

Após a análise das amostras obtidas em cada ponto, para cada métrica, constatou-se que há variações de acordo com o local, porém, foi percebido que os piores valores, para todas as métricas, foram provenientes da provável dispersão/atenuação do sinal da rede, principalmente, quando da entrada e saída de funcionários na praça de motores (abertura e fechamento de portas, interferindo na “blindagem” do ambiente), bem como devido ao aumento da distância.

Mesmo com a variação entre os pontos, os valores obtidos são suficientes para julgar viável a adoção de redes 802.11g em ambientes industriais com características de uma usina termelétrica. Diante dos resultados obtidos, sugere-se acrescentar um ponto de acesso nas proximidades do centro da praça de motores, proporcionando, com isto, uma melhoria significativa na qualidade da comunicação interna e permitindo que tal comunicação esteja presente em, praticamente, qualquer ponto dentro da praça de motores (com apenas um ponto de acesso, a comunicação não foi possível a partir do ponto 18, ou seja, nos 3 últimos motores).

Para futuras pesquisas, podem ser consideradas outras tecnologias de rede implantadas no ambiente de uma UTE, como: ZigBee, WiMax, 6LoWPAN, etc., ou mesmo considerar um padrão mais atual das redes 802.11, como o 802.11n.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Termelétrica Borborema Energética S.A. e Maracanaú Geradora de Energia S.A. financiadoras do projeto P&D ANEEL GASIS, no qual a pesquisa foi realizada, bem como ao CNPq, por ter financiado parte da pesquisa de mestrado da qual este trabalho é componente.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Delgado Gomes, M. Aurelio Spohn, A. Cavalcante Lima, E. Gomes dos Anjos, and F. Antonio Belo, “Correlation between spectral occupancy and packet error rate in ieeee 802.15.4-based industrial wireless sensor networks,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 10, no. 1, pp. 1312–1318, Jan 2012.
- [2] J. Ferrer-Coll, P. Angskog, J. Chilo, and P. Stenumgaard, “Characterisation of highly absorbent and highly reflective radio wave propagation environments in industrial applications,” *IET Comm.*, vol. 6, 2012.
- [3] P. Stenumgaard, J. Chilo, J. Ferrer-Coll, and P. Angskog, “Challenges and conditions for wireless machine-to-machine communications in industrial environments,” *IEEE Comm. Magazine*, vol. 51, no. 6, 2013.
- [4] R. B. Araújo, L. A. Villas, and A. Boukerche, “Uma solução de QoS com processamento centrado para redes de atuadores e sensores sem fio,” *Simp. Brasileiro de Redes de Comp. e Sistemas Distribuídos*, 2007.
- [5] K. V. Santhosh, S. C. Shanmuga, K. P. Vasantha, K. Silambarasan, and K. Sivasubramanian, “Sensor network based dyeing industry monitoring and control system,” *Int. Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, vol. 2, 2013.
- [6] E. P. K. Gilbert, B. Kaliaperumal, and E. B. Rajsingh, “Research issues in wireless sensor network applications: A survey,” *Int. J. of Information and Electronics Engineering*, vol. 2, no. 05, 2012.
- [7] L. Seno, F. Tamarin, and S. Vitturi, “Experimental evaluation of the service time for industrial hybrid (wired/wireless) networks under non-ideal environmental conditions,” in *Proceedings of the 16th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2011.
- [8] D. Anand, J. R. Moyne, and D. M. Tilbury, “Performance evaluation of wireless networks for factory automation applications,” *IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering*, 2009.
- [9] C. A. G. d. Silva, E. L. d. Santos, and C. Osinski, “Wireless industrial networks under interference conditions based on ieeee 802.15.4,” in *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Nov 2018, pp. 169–173.

- [10] E. Jecan, C. Pop, Z. Padrah, O. Ratiu, and E. Puschita, “A dual-standard solution for industrial wireless sensor network deployment: Experimental testbed and performance evaluation,” in *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, June 2018, pp. 1–9.
- [11] Y. Cheng, H. Zhou, and D. Yang, “Performance evaluation of ieeee 802.11ah triggered restricted access window mode in industrial real-time applications,” in *2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Aug 2018, pp. 325–329.
- [12] P. Mahasukhon, M. Hempel, S. Ci, and H. Sharif, “Comparison of throughput performance for the IEEE 802.11a and 802.11g networks,” in *Proceedings of the 21st Int. Conf. on Advanced Networking and Applications*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2007.
- [13] D. C. G. Valadares, J. M. F. R. de Araújo, Á. Perkusich, M. A. Spohn, E. U. K. Melcher, and N. P. Albuquerque, “Towards 802.11g signal strength estimation in an industrial environment: A practical study,” in *Advanced Information Networking and Applications*, L. Barolli, M. Takizawa, F. Xhafa, and T. Enokido, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 559–570.
- [14] D. C. G. Valadares, J. M. F. R. de Araújo, M. A. Spohn, A. Perkusich, K. C. Gorgônio, and E. U. K. Melcher, “802.11g signal strength evaluation in an industrial environment,” *Internet of Things*, p. 100163, 2020. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660520300068>
- [15] D. Yang, Y. Xu, and M. Gidlund, “Wireless coexistence between IEEE 802.11- and IEEE 802.15.4-based networks: A survey,” *Int. Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 7, 2011.
- [16] S. S. Wagh, A. More, and P. R. Kharote, “Performance evaluation of ieeee 802.15.4 protocol under coexistence of wifi 802.11b,” *Procedia Computer Science*, vol. 57, pp. 745 – 751, 2015, 3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015 (ICRTC-2015). [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915019961>
- [17] G. Cena, S. Scanzio, and A. Valenzano, “Experimental evaluation of seamless redundancy applied to industrial wi-fi networks,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, April 2017.
- [18] L. Seno, G. Cena, S. Scanzio, A. Valenzano, and C. Zunino, “Enhancing communication determinism in wi-fi networks for soft real-time industrial applications,” *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, April 2017.
- [19] F. Tamarin, S. Vitturi, and M. Luvisotto, “A dynamic rate selection algorithm for ieeee 802.11 industrial wireless lan,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 846–855, April 2017.
- [20] Intelbras. (2017) Wog 212 cpe 2,4 ghz 12 dbi. [Online]. Available: <http://www.intelbras.com.br/empresarial/radios-outdoor/cpe/wog-212>
- [21] iPerf. (2017) iPerf - the ultimate speed test tool for tcp, udp and sctp. [Online]. Available: <https://iperf.fr/>
- [22] C. Pelsser, L. Cittadini, S. VISSICCHIO, and R. BUSH, “From Paris to Tokyo: on the suitability of ping to measure latency,” *Proceedings of the 2013 conference on Internet measurement conference*, 2013.
- [23] Ubuntu. (2019) Ubuntu 14.04. [Online]. Available: <http://releases.ubuntu.com/14.04/>
- [24] M. Najnudel, “Estudo de propagação em ambientes fechados para o planejamento de w lans,” Master’s thesis, PUCRJ, 2004.



Dalton C. G. Valadares é bacharel, especialista, mestre e doutorando em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Campina Grande. Atualmente é professor no Instituto Federal de Pernambuco. Tem experiência nas áreas de Internet das Coisas, Sistemas Embarcados, Redes de Computadores (Redes de Sensores Sem Fio e Redes Sem Fio), Engenharia de Software, Desenvolvimento de Sistemas e Práticas/Métodos para Gerenciamento de Projetos.



Joseana M. F. R. de Araújo é bacharel (1991), mestre (1994) e doutora (2000) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba. É professora Associado do Curso de Ciência da Computação da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), tutora egressa do Grupo PET Computação (2004-2012) e membro do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (COPIN) da UFCG, com orientações de mestrado e de doutorado. É coordenadora do LInCE (Laboratório de Inteligência Computacional em Bio Energia) e do LIA (Laboratório de Inteligência Artificial)/UFCG e membro do LAD (Laboratório de Arquiteturas Dedicadas)/UFCG. Tem experiência nas áreas de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação, com ênfase em Processamento Digital de Sinais de Voz, atuando principalmente nos seguintes temas: reconhecimento automático da identidade vocal e análise de patologias da voz.



Alexandre Costa possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Campina Grande (2011), mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Campina Grande (2014) e doutorado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Campina Grande (2019). Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Engenharia de Software, atuando principalmente nos seguintes temas: projetos ágeis, formação de equipes, inteligência artificial e algoritmos genéticos.



Angelo Perkusich possui graduação em Engenharia Elétrica pela Fundação Educacional de Barretos (1982), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1987) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1994). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Engenharia de Software e Computação Pervasiva, atuando principalmente nos seguintes temas: redes de petri, engenharia de software, redes

de petri coloridas, métodos formais e orientação a objetos. O foco atual das atividades de pesquisa é no contexto de Smart Engineering e Intelligent Software Engineering.



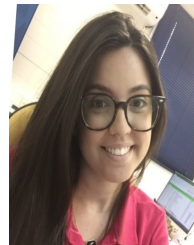
Felipe Ramos possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Campina Grande (2011), mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Campina Grande (2014) e doutorado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Campina Grande (2019). Atualmente é pesquisador do grupo de pesquisa ISE no VIRTUS, voltado para a área de Engenharia de Software Inteligente, seu foco de pesquisa atualmente. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Engenharia de Software e

Sistemas de Recomendação.



Marco A. Spohn possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1995), mestrado em Ciência da Computação pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1997) e doutorado (PhD) em Computer Science pela University of California at Santa Cruz (2005). Foi bolsista de Produtividade em Pesquisa (PQ) do CNPq de 2009 a 2018. Atualmente é Professor Associado III da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) em Chapecó-SC, atuando no curso de Ciência da Computação. Anteriormente

esteve associado à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) onde atuou no Departamento de Sistemas e Computação (DSC). Tem experiência na área de Ciência da Computação, atuando principalmente nos seguintes temas: redes de computadores, internet das coisas, redes ad hoc sem fio (Mobile Ad Hoc Networks) e redes de sensores sem fio (wireless sensor networks).



Natália P. Albuquerque Graduada em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em 2017. Cursando Especialização em Engenharia Ambiental, Universidade Estácio de Sá. Analista Química da Usina Termoeletrica Borborema Energética S. A. (BESA), Coordenadora do P&D da empresa (Projeto: GASIS - Gases Intelligent Sensing, Fase 3). Principais áreas de atuação: Engenharia Química, com ênfase em Meio Ambiente, Sistemas de Lubrificação e Óleo Combustível, Tratamento de Água e Efluentes Industriais.



Elmar U. K. Melcher possui doutorado pela Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications (1993) em Eletrônica e Comunicações e graduação em Elektrotechnik pela Technische Universität Stuttgart (1988). No Brasil desde 1993, atualmente desenvolve pesquisas no Laboratório de Arquitetura Dedicadas - LAD da UFCG, tendo coordenado o projeto do decodificador de vídeo MPEG-4, no âmbito da Rede Brazil IP, vencedor, em 2006, do prêmio Best Design IP/SoC, em conferência internacional realizada na França. É professor associado

da Universidade Federal de Campina Grande. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Hardware, atuando principalmente nos seguintes temas: ASIC, FPGA, processamento de imagens, vídeo, áudio.