

APLICAÇÃO IoT PARA MONITORAMENTO DE AMBIENTE BASEADO EM INFRAESTRUTURA DE RÁDIO SOBRE FIBRA

Palavras-Chave: Rádio sobre Fibra, Internet das Coisas, Monitoramento Ambiental

Autores(as):

Emily Sayuri Morihira, IC – UNICAMP

Leonid Abimael Huancachoque Mamani, IC – UNICAMP

Tiago Pedroso da Cruz de Andrade, IC – UNICAMP

Carlos Alberto Astudillo Trujillo, IC – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Radio-over-fiber (RoF) é uma das principais tecnologias para as redes de acesso da próxima geração devido a sua alta capacidade de transmissão, baixa atenuação, baixo consumo de energia, imunidade a interferências eletromagnéticas e operações multisserviço [1]. Além disso, uma das vantagens mais atrativas da RoF é a habilitação do processamento de diversos sinais de frequência de rádio (RF) em um local centralizado, reduzindo a complexidade de nós de acesso [1] e consequentemente, permitindo a redução das despesas de capital (CAPEX) e as despesas operacionais (OPEX) das redes de acesso sem fio, ao mesmo tempo que proporciona baixas despesas gerais, bem como escalabilidade e transparência. Dessa forma, uma rede de acesso baseada em RoF é uma solução econômica para atender as demandas cada vez maiores dos usuários.

Considerando o contexto RoF descrito, este projeto visa responder duas questões principais: (i) Como projetar uma infraestrutura de comunicação baseada em RoF para suportar a comunicação entre diversos dispositivos IoT? A maioria dos dispositivos IoT depende principalmente de tecnologias wireless de curto alcance com protocolos multihop para se comunicar em longas distâncias. Isso oferece alta flexibilidade durante a implantação, uma vez que os dispositivos IoT não dependem de nenhuma localização de infraestrutura para serem configurados. Contudo, as comunicações podem não ser confiáveis, uma vez que muitas transmissões num curto período de tempo podem produzir elevadas colisões de pacotes, consequentemente gerando uma sobrecarga indesejada. (ii) Como a introdução da fibra óptica e dos equipamentos RoF impactam a operação da rede? A questão de pesquisa original focava no impacto da latência introduzida pela fibra óptica no funcionamento da IoT. No entanto, esta questão de pesquisa foi reformulada para cobrir uma gama mais ampla de métricas e impactos do RoF no desempenho da rede. Em redes IoT, o uso de protocolos sem fio multihop entre os nós sensores, em conjunto com a tecnologia RoF, pode causar comportamentos diferentes devido a comunicação de curto alcance apresentada nestes dispositivos IoT e a infraestrutura implantada pelo RoF.

Portanto, estes impactos adicionais causados pela comunicação multihop e suas características devem ser avaliadas levando em consideração a infraestrutura óptica através da tecnologia RoF.

Incentivado pelas vantagens da tecnologia rádio sobre fibra (RoF) e pela ubiquidade possibilitada pela Internet das Coisas (IoT), o projeto de iniciação científica intitulado Aplicação IoT para Monitoramento de Ambiente baseado em Infraestrutura de Rádio sobre Fibra foi proposto com base no projeto H2020 FUTEBOL [1], desenvolvido no Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Assim, o atual projeto visa retomar a infraestrutura criada pelo FUTEBOL para propor um sistema de monitoramento ambiental com foco na comunicação entre componentes integrados a ele. Em vista disso, o presente relatório descreve as atividades desenvolvidas no período de setembro de 2024 a junho de 2025.

METODOLOGIA:

Durante o período de vigência, foram realizadas diversas etapas de pesquisa e experimentação, incluindo o estudo dos materiais teóricos relacionados ao projeto, da infraestrutura a ser utilizada no campus e dos componentes e dispositivos de IoT para compor a rede RoF. Tais atividades contemplavam os itens 1 a 3 do plano de trabalho elaborado no cronograma, e foram concluídas com a utilização do conteúdo relacionado ao projeto H2020 FUTEBOL.

Em seguida, foi efetuada a configuração dos protocolos de comunicação dos XBees, módulos escolhidos para a transmissão de sinais de rádio na rede, contemplando o item 5 do cronograma. Através da utilização do software XCTU, nessa etapa, foi possível compreender como é realizado o processo de configuração dos dispositivos, identificando os requisitos para as diferentes atuações possíveis, como nós sink (nó destino para onde dados são enviados e posteriormente retransmitidos) ou nó sensor (nó responsável pelo envio de dados coletados pelos sensores). Com isso, foram realizados os testes de conectividade via rádio entre os módulos, a fim de verificar o seu funcionamento.

Com a verificação do funcionamento dos dispositivos XBee, foi feita a definição de cenários para validação das implementações do sistema, sendo o item 8 do cronograma. Tal tarefa foi adiantada pois o planejamento da construção da rede foi necessário para a execução de testes funcionais na infraestrutura desejada. Em diferentes cenários, foram definidos XBees atuando como sink para o comando da transmissão de dados, além de grupos contendo outros XBees atuando como nós sensores, além da possibilidade de utilização de um ou mais canais de comunicação e, por fim, a disposição dos componentes estando no mesmo prédio ou em diferentes prédios do Instituto de Computação da UNICAMP, utilizando fibras ópticas de 400 metros e 4.000 metros.

A construção do sistema foi baseada no diagrama presente na Figura 2, no qual em cada extremidade da fibra seriam utilizados um transceiver (RoF1 e RoF2) responsável pela transmissão e recebimento dos dados através de uma rede de fibra óptica, um circulador (C1 e C2) para o encaminhamento do sinal óptico para o canal desejado, os módulos XBee para a transmissão via rádio e um minicomputador para o acompanhamento do teste através do software XCTU.



Figura 1 - Módulo XBee utilizado no projeto.

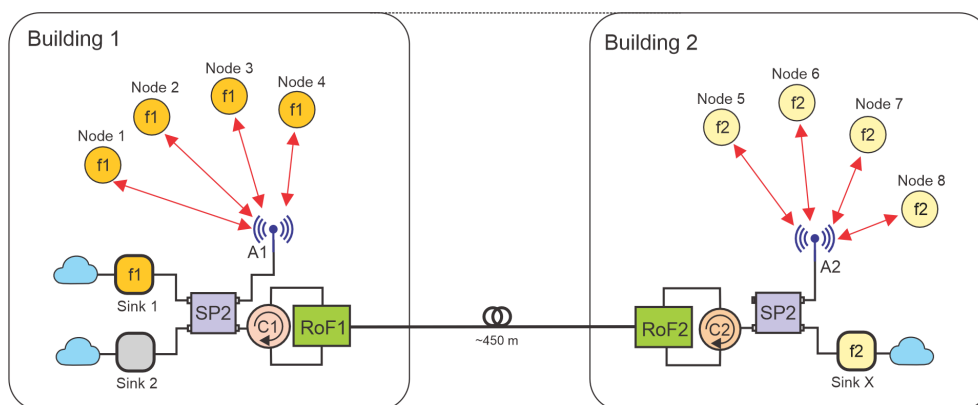


Figura 2 – Diagrama de rede que baseou a construção do sistema utilizado no teste funcional.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Seguindo com a execução de testes funcionais, foi elaborada uma nova disposição dos componentes a fim de avaliar a arquitetura baseada em uma topologia centralizada, utilizando um meio de transmissão híbrido combinando RF e RoF. Nela, foram usados dois módulos transceiver RoF OZ810 conectados por um link de fibra ótica de aproximadamente 450 metros, além de circuladores RF usados para rotear sinais para as portas correspondentes aos splitters. Nessa configuração, os splitters conectam os sinks a antenas no sistema, enquanto oito nós sensores são responsáveis pela transmissão de dados coletados por sensores e três módulos são utilizados como Sink no sistema, sendo estes controlados via integração com dispositivos Raspberry Pi 3.

Com essa disposição, o objetivo foi analisar o desempenho do RoF em um cenário no qual um nó coletor centralizado se comunica com nós sensores distribuídos, sendo possível obter maior diversidade de experimentos a serem executados através da definição de dois canais, com IDs 2020 e 2030 cada um, respectivamente. Na rede ilustrada pela figura 4, os aparelhos estão dispostos em dois edifícios, Building 1 sendo o prédio III do Instituto de Computação, especificamente no local indicado como *datacenter*, e Building 2 o prédio II do Instituto, no local indicado como *sala 25*.

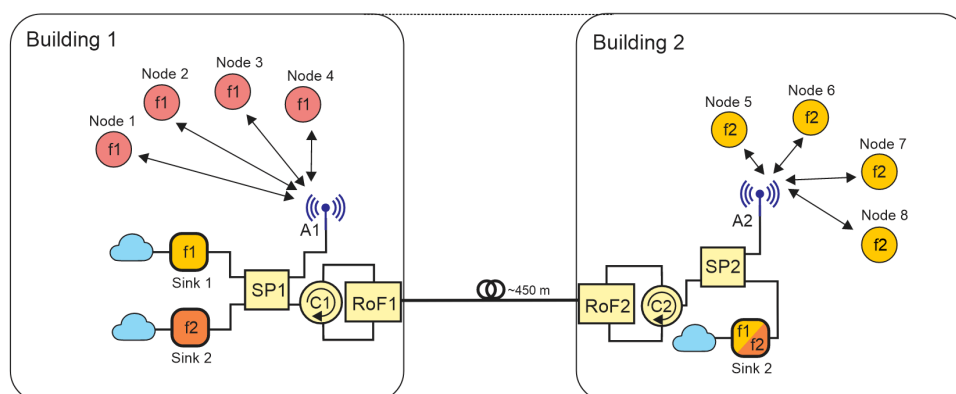


Figura 4 – Diagrama de rede para o segundo teste executado.

Desse modo, foram definidos dois cenários para a execução de testes: o primeiro utiliza arquitetura distribuída baseada em RF, com quatro nós sensores operando no canal de ID 2020 e quatro outros no canal 2030, com o propósito de servir como referência para a comparação ao segundo cenário, onde seria então aplicada a comunicação baseada em ambas tecnologias RF e RoF. Vale notar que, em ambos, o controle de envio de

pacotes foi feito utilizando a distribuição de Poisson para a definição de intervalos de tempo, incluindo também o conceito de PDR, que mede a proporção de pacotes entregues com sucesso em relação a quantidade de pacotes enviados, assim eliminando as distorções associadas a abordagem baseada em tempo. Em adição, a configuração do sistema foi baseada em protocolos IEEE 802.15.4, que nativamente suporta comunicação ponto-a-ponto e ponto-a-multiponto, permitindo assim a implementação de arquiteturas centralizadas como desejado para o experimento.

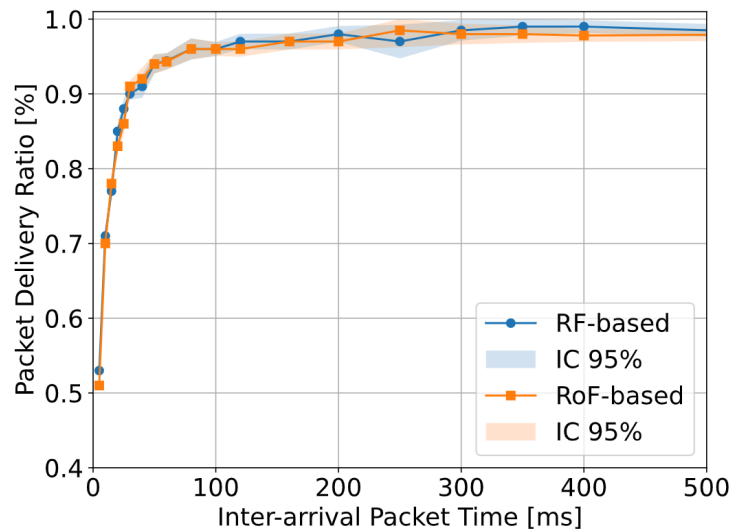


Figura 5 – Valores de PDR obtidos para os cenários explorados.

As curvas de PDR obtidas para os dois cenários — comunicação RF direta e comunicação remota via RoF — apresentaram comportamento quase idêntico, com as linhas se sobrepondo amplamente em toda a faixa de carga da rede. Esse resultado indica que o uso de enlaces ópticos via RoF nas condições experimentais assumidas não resulta em perdas significativas na entrega de pacotes e, portanto, é funcionalmente equivalente à comunicação baseada exclusivamente em RF.

CONCLUSÕES:

Devido a distribuição dos componentes do sistema em diferentes ambientes e prédios do instituto, a configuração remota foi um mecanismo necessário para facilitar o ajuste de parâmetros dos módulos Xbee durante a execução de testes. Uma vez que havia pelo menos um dispositivo Raspberry Pi em cada extremidade na infraestrutura, além de um minicomputador disposto em cada extremidade do RoF, a conexão com cada um deles foi efetuada via SSH, com a finalidade de realizar configurações nos scripts relacionados ao processo de envio e recebimento de pacotes. Em adição, a ferramenta AnyDesk foi utilizada para o gerenciamento de conexões Desktop remotas, permitindo a utilização destes mini PCs para a configuração de nós sensores através do software XCTU.

Com a execução, os resultados obtidos para a segunda etapa de testes indicam que, para o cenário 1, os sinais de rádio recebidos pelo nó sink tinham alto valor, porém para o segundo caso, uma maior atenuação dos sinais pode ser percebida. Por outro lado, ao avaliar o aumento no valor de intervalo da transmissão, a carga na rede diminui, o que leva a uma melhoria gradual do valor de PDR. Além disso, essa sessão de testes permitiu

verificar que é possível adquirir rápida expansão da capacidade da rede através do aumento do uso de canais de comunicação, sem se fazer necessária a modificação na infraestrutura física existente. Assim, ao contrário das redes sem fio tradicionais, a expansão da capacidade proporcionada pelo uso do RoF não implica em custos adicionais para a transmissão de dados, aumentando portanto a sua relação de custo-benefício. Por fim, é possível assumir que a integração da tecnologia RoF em arquiteturas centralizadas baseadas no padrão IEEE 802.15.4 é uma alternativa viável e eficiente para sistemas que trabalham com grande volume de dados sendo transmitidos, assim como no caso abordado neste projeto.

BIBLIOGRAFIA

[1] Madeira, E., Villas, L., Bittencourt, L., Fonseca, N., Astudillo, C., Gama, E., Andrade, T. (2018). **Federated Union of Telecommunications Research - FUTEBOL H2020: Initial experiment description and results.** 2018.

[2] Madeira, E., Villas, L., Bittencourt, L., Fonseca, N., Astudillo, C., Gama, E., Andrade, T. (2018). **Federated Union of Telecommunications Research - FUTEBOL H2020: Additional experiment description and results.** 2018.

[3] **Digi XBee ecosystem.** (n.d.). Digi.com. Retrieved December 04, 2024, from <https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee>

[4] **Digi XCTU.** (n.d.). Digi.com. Retrieved December 05, 2024, from <https://www.digi.com/products/embedded-systems/digi-xbee/digi-xbee-tools/xctu>

[5] **XBee-PRO S2C 802.15.4, 2.4GHz TH.** (n.d.). Xbee Store. Retrieved March 10, 2025, from <https://www.xbeestore.com.br/listaprodutos.asp?idproduto=6384556>

[6] Digi International Inc. (2024). **XBee Python Library.** Readthedocs.io. Retrieved June 28, 2025, from <https://xbplib.readthedocs.io/en/latest>