

# Estudo e Avaliação Sobre os Efeitos da Comunicação com *Radio-over-Fiber* em Redes IEEE 802.15.4

Ana P. V. Trevisan<sup>1</sup>, Gabriel Lando<sup>1</sup>, Ian F. Schilling<sup>1</sup>,  
Henrique C. C. Resende<sup>1</sup>, Juliano Wickboldt<sup>1</sup>, Matias A. K. Schimuneck<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
– Porto Alegre – RS – Brazil

<sup>2</sup>Departamento de Informática – Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)  
– Santa Cruz do Sul – RS – Brasil

{apvtrevisan, glando, ifschilling, hccresende, jwickboldt}@inf.ufrgs.br  
matiass@unisc.br

**Abstract.** *The growing demand for new network technologies is mainly related to the new Internet of Things products market, which is increasingly present in our daily lives. The application of the Radio over Fiber technology is the great bet for the cellular networks' next generation development, which should undergo massive insertion of Internet of Things devices in the next years. The benefits derived from the use of optical fiber guarantee the fundamental support to the communication of new applications, besides reducing the costs involved in the implementation and maintenance of a traditional network. In this paper, we compare the transmission made through Radio over Fiber structures with a fully wireless transmission, in relation to packet loss using the IEEE 802.15.4 communication protocol for the Internet of Things.*

**Resumo.** *A crescente demanda por novas tecnologias de rede está relacionada principalmente com o novo mercado de produtos da Internet das Coisas, os quais estão cada vez mais presentes no nosso dia-a-dia. A aplicação da tecnologia Rádio sobre Fibra é a grande aposta para o desenvolvimento das próximas gerações de redes celulares, as quais deverão sofrer massiva inserção de dispositivos da Internet das Coisas nos próximos anos. Os benefícios advindos do uso da fibra óptica garantem o suporte fundamental a comunicação de novas aplicações, além de diminuir os gastos envolvidos na implementação e manutenção de uma rede tradicional. Este trabalho compara a transmissão feita através de estruturas de Rádio sobre Fibra com a transmissão totalmente sem fio, em relação a perda de pacotes utilizando o protocolo de comunicação IEEE 802.15.4 para Internet das Coisas.*

## 1. Introdução

RoF (*Radio over Fiber*, ou Rádio sobre Fibra) consiste na transmissão de sinais de radiofrequência em uma fibra óptica por meio da modulação da luz transmitida. Essa tecnologia surge como uma importante candidata para a implantação de novas redes sem fio, como as redes celulares de quinta geração (5G) [Peng et al. 2015]. Ela tem vantagens como a alta capacidade de transmissão e sensibilidade reduzida ao ruído e à interferência eletromagnética, em comparação com a transmissão de sinal totalmente elétrica. Além

disso, permite o processamento de vários sinais de radiofrequência em uma entidade centralizada. Desta forma, pode simplificar o sistema de uma rede tradicional, permitindo a instalação de BSs (*Base Stations*, ou estações base) sem inteligência e mais baratas, que consistem apenas de um conversor óptico-elétrico, amplificadores e antena, sendo o processamento do sinal transferido para uma entidade central através do uso de RoF. Como exemplo de aplicação da tecnologia RoF, existe a proposta da arquitetura C-RAN (*Cloud Radio Access Network*) [Peng et al. 2015], que consiste em uma arquitetura de rede móvel na qual os recursos de processamento de banda base (BBUs – *baseband units*) são centralizados e compartilhados entre múltiplas estações base.

O emprego de arquiteturas como a C-RAN está sendo impulsionado principalmente porque além das vantagens descritas, o uso do RoF também reduz os custos de implantação e manutenção da rede. Tradicionalmente, o custo total em uma rede celular inclui o CAPEX (*Capital Expenditure*) e OPEX (*Operating Expenditure*) [Zhang and Hämmäinen 2015]. O CAPEX refere-se a despesas relevantes para a construção da rede, compreende o seu planejamento, a aquisição do local de implantação, compra de hardware, licenças de software, a instalação, o custo civil e local, entre outros. O OPEX refere-se ao custo para operar a rede, ou seja, o aluguel do local, eletricidade, operação e manutenção, atualizações do sistema, entre outros. Os custos de CAPEX e OPEX aumentam significativamente quando mais estações base forem necessárias, portanto, RoF é uma tecnologia que pode contornar esses custos [Bastos and da Silva Júnior 2016].

Na arquitetura tradicional de uma rede celular, os usuários se comunicam com a estação base que cobre uma área geográfica, chamada de célula, e cada estação base possui uma BBU própria. No exemplo da arquitetura C-RAN, que utiliza RoF para centralizar o processamento de diversas antenas em uma única BBU, observamos a redução do CAPEX e do OPEX de diversas formas. Começando pelo fato de que não será necessário gastar com a implantação de BSs com grande poder de processamento em cada célula, o que diminui diretamente os custos de CAPEX. Outra vantagem observada ao aplicar soluções baseadas na centralização do processamento utilizando RoF é a facilidade para a manutenção da rede, pois sempre que houverem falhas de hardware ou forem necessárias atualizações, elas poderão ser feitas na entidade central de processamento, sem a necessidade de realizar operações em cada uma das células. A tecnologia RoF também é transparente em termos de protocolo e taxa de bits, portanto, pode ser empregada nas tecnologias atuais e futuras [Zin et al. 2010].

Uma das tecnologias que poderão usufruir da C-RAN são as aplicações da IoTs (*Internet of Things*, ou internet das coisas), que utilizam dispositivos com tecnologia embarcada para monitoramento e automação em diversas áreas, como saúde, segurança, agricultura, entre outros [Al-Fuqaha et al. 2015]. Atualmente, espera-se que surjam novos serviços IoTs voltados principalmente para o bem-estar da população. Máquinas para automação residencial e hospitalar, controle de tráfego inteligente, monitoramento de vias públicas, entre outros dispositivos, estão em acelerado desenvolvimento. [Ali et al. 2017]. Essa vasta gama de novos serviços será um dos principais impulsionadores para a quinta geração das redes celulares [Orsino et al. 2017]. Segundo estimativas, cerca de 30 bilhões de dispositivos IoT serão implantados até 2025 [Nokia 2015] e a sua interconexão deve revolucionar o sistema da RAN (*Radio Access Network*).

Considerando as tendências de desenvolvimento da 5G de redes celulares, este trabalho dedica-se a avaliar os efeitos do RoF em IoT analisando como a estrutura RoF afeta a transmissão e recepção de dados. Foram realizadas avaliações experimentais comparando a taxa de perda de pacotes na comunicação entre dois dispositivos (Estação e Cliente). Neste trabalho foram avaliados três cenários distintos, dois deles com RoF e um somente usando rede sem fios (*wireless*) para ser usado como parâmetro de comparação. Podemos visualizar o experimento como uma comunicação entre um sensor e uma estação ponto a ponto representando uma aplicação de coleta de dados, como por exemplo, de uma estação meteorológica apanhando dados de temperatura, luminosidade e umidade. Na avaliação experimental produzida para este artigo comparamos a transmissão feita através da estrutura RoF e avaliamos a diferença em relação a perda de pacotes com a transmissão totalmente sem fio. Os resultados obtidos demonstram a eficiência e factibilidade da utilização da RoF na comunicação com dispositivos IoT.

O restante desse artigo está organizado como segue. Os trabalhos relacionados são citados na Seção 2. A proposta de avaliação do experimento, a descrição do cenário e a metodologia usada são apresentados na Seção 3. A discussão dos resultados obtidos está na Seção 4. As conclusões e trabalhos futuros são abordados na Seção 5.

## **2. Fundamentação teórica e Trabalhos relacionados**

As companhias de redes celulares sofrem com os custos excessivos da implementação da sua infraestrutura (CAPEX) e de operação (OPEX) para mantê-las funcionando. Isso ocorre pois na arquitetura tradicional de redes celulares cada estação base (BS) é acoplada a um componente de processamento de sinal (BBU). Uma das tecnologias que podem minimizar o custo de implementação e operação da rede, além aprimorar a sua capacidade de cobertura, é o RoF. Por possibilitar a codificação de sinais de radiofrequência em luz para que sejam transmitidos em fibra óptica, o uso do RoF faz com que os sinais analógicos alcancem distâncias significativamente maiores do que as que seriam alcançadas através da transmissão de sinais somente de radio feita na arquitetura tradicional [Novak et al. 2016].

Uma das principais arquiteturas propostas para as futuras redes 5G baseada em RoF é a C-RAN. Os benefícios, os recentes avanços e detalhes da proposta de arquitetura C-RAN são tratados no trabalho de Chih-lin [Chih-Lin et al. 2014], onde ele faz medições de *throughput* e área de cobertura experimentalmente utilizando a rede China Mobile. O princípio central do C-RAN é a separação física entre a BBU e a BS. Neste esquema há uma BBU centralizada que se comunica com todas as BSs, utilizando RoF, afim de processar o sinal de toda a rede. Nesse caso existe a possibilidade de instalar mais BSs em cada célula, devido a redução do seu preço quando separada da BBU. Assim, ocorre o aumento da amplitude de cobertura das células e a redução da degradação de sinal, tendo em vista que os sinais transmitidos em fibra óptica mantém sua potência.

A C-RAN também é adaptável ao tráfego não uniforme do dia-a-dia. Os usuários movem-se entre diferentes áreas, como por exemplo, residencial e comercial. Assim, a utilização da rede nessas áreas varia durante o dia em cada célula, e picos de tráfego ocorrem em diferentes horas. Deste modo, algumas unidades, por exemplo as de uma área comercial, ficam sobrecarregadas durante o dia, enquanto outras, como as das áreas residenciais, ficam ociosas. Como no C-RAN o processamento de múltiplas células será

realizado na BBU centralizada, a taxa de utilização é equilibrada e não são deixados hardwares ociosos. Outro aspecto positivo da arquitetura C-RAN é a economia de energia. Sendo 40% dos gastos OPEX em uma célula relacionados a eletricidade, quando são delegados o processamento de diversas células para uma única BBU central, reduzimos significativamente os gastos com energia [Bastos and da Silva Júnior 2016]. O trabalho de Christian Bluemm [Bluemm et al. 2017] apresenta novas maneiras de se poupar mais energia dinamicamente em redes C-RAN heterogêneas. Ele realiza experimentos utilizando um cenário com grandes e pequenas células (*macro* e *small cells*) trocando as BBUs do modo de espera (*sleep mode*) para o modo operacional (*operation mode*), dependendo das mudanças na demanda de tráfego de dados. Trabalhos como esse revelam que ainda há muito a ser explorado neste modelo de arquitetura afim de otimizar recursos.

Para a próxima geração das redes celulares será necessário prover, além da comunicação tradicional para dispositivos móveis, a comunicação para dispositivos sensores e atuadores da IoT [Orsino et al. 2017]. Atualmente, é muito comum que esses dispositivos utilizem variações do padrão 802.15.4 definido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) para comunicação de dados. No trabalho de Paolo Baronti [Baronti et al. 2007], ele comprova que o uso o padrão IEEE 802.15.4 aplicado à uma rede de microssensores traz vários benefícios na comunicação entre dispositivos IoT, como a sua eficiência energética, recursos de gerenciamento de dados e soluções de segurança, fazendo assim um grande candidato para a implementação em dispositivos IoT. Uma métrica importante a ser avaliada para medir a eficiência da comunicação entre os dispositivos IoT é a taxa de recebimento de pacotes, que é a razão entre a quantidade de pacotes recebidos e de pacotes enviados. O trabalho de Martin Jacobsson [Jacobsson and Rohner 2015] realiza experimentos mostrando que essa razão pode variar também de acordo com o tamanho dos pacotes enviados, tendo os pacotes maiores mais chances de serem corrompidos do que pacotes menores.

**Tabela 1. Comparação entre os trabalhos relacionados**

Autores	Objetivo	Cenário	Tecnologia	Usa RoF?	Métricas avaliadas	Forma de avaliação
[Chih-Lin et al. 2014]	Benefícios, recentes avanços e detalhes da C-RAN	Rede da China Mobile	C-RAN	Sim	<i>Throughput</i> e cobertura	Experimental
[Bluemm et al. 2017]	Comparação de <i>Macro</i> e <i>Small Cell</i>	1 BS e 1 cliente	C-RAN	Sim	Eficiência energética	Experimental
[Baronti et al. 2007]	Avaliar o uso de IEEE 8122.15.4 em uma rede de microssensores IoT	Vários sensores, diferentes arquiteturas	IEEE 802.15.4 e ZigBee	Não	Eficiência energética, roteamento e segurança	Teórico
[Jacobsson et al. 2015]	Perda de pacotes de tamanhos diversos	1 BS e 1 cliente	IEEE 802.11, IEEE 802.15.4 e DASH7	Não	Taxa de perda de pacotes	Experimental
[Trevisan et al. 2018]	Análise de perda de pacotes em estrutura RoF	1 BS e 1 cliente	IEEE 802.15.4	Sim	Taxa de perda de pacotes	Experimental

As informações sobre os trabalhos relacionados citados nesta seção estão resumidas na Tabela 1, para base de comparação. A proposta de avaliação experimental desse trabalho também está exibida na tabela.

### 3. Avaliação da comunicação IEEE 802.15.4 utilizando RoF

Considerando as tendências de redes celulares 5G e os trabalhos relacionados discutidos na seção anterior, é proposta para este trabalho a avaliação dos efeitos do RoF em uma rede IEEE 802.15.4. A avaliação realizada analisa de forma isolada o efeito da comunicação utilizando RoF e não utilizando RoF entre uma BS e um dispositivo IoT. Para essa avaliação de comunicação ponto-a-ponto, parâmetros como o posicionamento do RoF e o ganho na transmissão do sinal são variados. Maiores detalhes sobre o cenário avaliado, como arquitetura, equipamentos e configurações utilizadas são apresentadas no decorrer desta seção.

Para realizar o experimento, utilizamos equipamentos do *testbed* do projeto FUTEBOL<sup>1</sup>. Para montagem do cenário, foram utilizados Universal Software Radio Peripheral (USRPs) N210, que são dispositivos definidos por software e por isso programáveis e capazes de suportarem diferentes protocolos de comunicação sem fio. Foram necessários 2 USRPs (USRP 1, que agia como um transmissor BS, e USRP 2, que agia como um receptor cliente), 2 antenas de 9dBi, um conversor elétrico-óptico (RoF Rx), um conversor óptico-elétrico (RoF Tx) e um cordão óptico de 1,5 metros. Todas as avaliações foram feitas utilizando o protocolo IEEE 802.15.4 para a comunicação entre os dois USRPs.

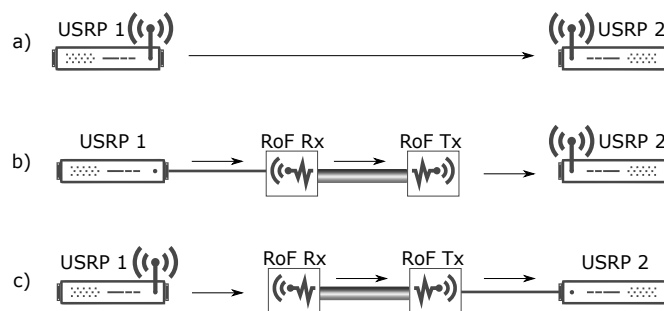
Dentro das instalações do *testbed* do FUTEBOL, os equipamentos os quais foram acessados através da plataforma de acesso aos recursos JFed<sup>2</sup>, estavam fisicamente localizados em duas salas diferentes a uma distância de 6 metros e com uma parede de alvenaria entre eles. Pode-se visualizar esses cenários como a representação da comunicação entre um dispositivo IoT e uma estação. Esses cenários são muito comuns para aplicações IoT, como por exemplo uma aplicação de coleta de dados de temperatura, luminosidade e umidade para monitoramento de dados utilizados na previsão do tempo. Nesta avaliação, comparamos a diferença em relação a perda de pacotes, ou seja, a perda de informações coletadas, da transmissão feita através da estrutura com RoF e da transmissão exclusivamente sem fio, ou seja, sem RoF. Para um melhor entendimento dos efeitos da comunicação com RoF e sem RoF, avaliamos três cenários distintos, dois deles com RoF e um somente usando rede sem fio, para ser usado como base de comparação. Os cenários testados estão ilustrados na Figura 1.

O primeiro cenário (sem RoF) é representado na Figura 1(a). Este cenário não utiliza RoF e a comunicação entre os 2 USRPs ocorre inteiramente via transmissão sem fio. O segundo cenário utiliza a estrutura RoF no transmissor (RoF Tx) e corresponde à Figura 1(b). O terceiro cenário também utiliza a estrutura RoF, mas no receptor (RoF Rx) e corresponde à Figura 1(c). Para o caso do cenário sem RoF, os pacotes enviados pelo USRP1 viajam pelo meio sem fio de uma sala até outra até chegar ao USRP 2. Para o caso do cenário com RoF Tx, os pacotes enviados pelo USRP1 passam por um cabo coaxial até o conversor elétrico-óptico, em que o sinal é convertido para óptico, então passam por

---

<sup>1</sup><http://www.ict-futebol.org.br>

<sup>2</sup><https://jfed.ilabt.imec.be>



**Figura 1. Cenários avaliados**

um cabo óptico até chegar no conversor óptico-elétrico, onde o sinal é convertido de volta para elétrico e viaja pelo meio sem fio até o USRP2. No caso do RoF Rx, os pacotes são enviados pelo meio sem fio até o conversor elétrico-óptico, passam pela fibra óptica até o conversor óptico-elétrico, e então passam por um cabo coaxial até chegar ao USRP2. Para todos os cenários o USRP 1 transmite 1.000 pacotes pelo padrão IEEE 802.15.4.

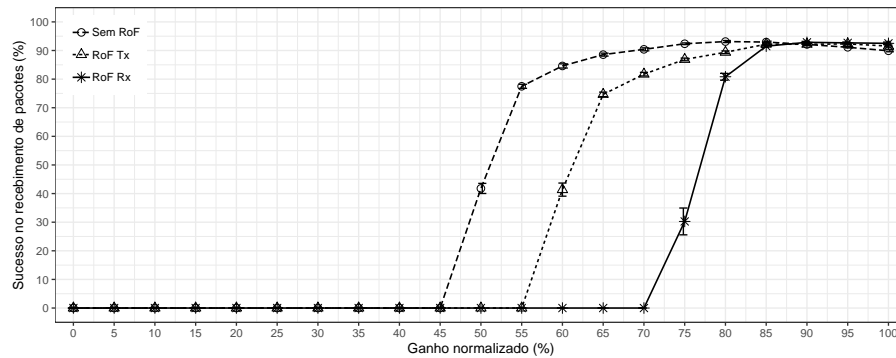
O objetivo sobre essa proposta de avaliação dos cenários descritos na Figura 1 é colocar em discussão a relação da taxa de perda de pacotes na comunicação entre os dois dispositivos. Para esses dispositivos, o ganho da propagação do sinal é um fator muito importante para o sucesso da comunicação e pode variar dependendo do local e dos dispositivos utilizadas na avaliação. Também para uma maior compreensão dos efeitos do RoF em relação ao não uso do RoF, nesta avaliação é proposta a comparação da comunicação, nos 3 cenários descritos, variando a taxa de ganho do sinal (potência do sinal recebido na antena dos dispositivos), que vai de 0% a 100%.

Para todos os cenários avaliados o ganho começa em 100% e é decrescido em 5% para cada conjunto de avaliações, até chegar em 0%. Ou seja, as avaliações são realizadas em 21 faixas de ganho. Cada conjunto de avaliações consiste de 20 execuções em que o USRP 1 envia 1.000 pacotes de mensagens com o intervalo de 10 milissegundos para o USRP 2. O valor de 20 execuções para cada cenário se mostrou suficiente para uma análise do desvio padrão dos resultados para um intervalo de confiança de 95%. Depois das 1.000 transmissões, para cada execução foi verificado se as mensagens recebidas pelo USRP 2 estavam corretas, aplicando-se um algoritmo de soma de verificação (FCS – *Frame Check Sequence*). Assim, foram realizadas 20 rodadas enviando 1000 mensagens do USRP 1 em cada uma das 20 faixas de ganho para os 3 cenários avaliados, totalizando um total de 1200 execuções e mais de 1 milhão de mensagens transmitidas.

#### 4. Análise e Resultados Obtidos

O gráfico das avaliações realizadas nos 3 cenários está representado na Figura 2. A linha contínua marcada com asteriscos representa o cenário da Figura 1 (a), sem RoF (Sem RoF). A linha pontilhada marcada com círculos representa o cenário Figura 1 (b), que utiliza RoF no transmissor (RoF Tx). A linha pontilhada marcada com triângulos representa o cenário da Figura 1 (c), que utiliza RoF no receptor (RoF Rx).

O gráfico apresenta a relação entre taxa normalizada do ganho, utilizado na antena transmissora com o percentual (%) de pacotes recebidos com sucesso no receptor. Os resultados obtidos através da execução dos experimentos mostram que para um taxa de



**Figura 2. Resultados obtidos nos cenários (a) Sem RoF, (b) Tx RoF e (c) Rx RoF**

ganho abaixo de 45% a transmissão é inviável, tendo 0% de sucesso na transmissão dos pacotes para os 3 cenários. Com 50%, 55% e 70% de ganho normalizado, respectivamente para os cenários Sem RoF, RoF Tx e RoF Rx, observamos que esses alcançam uma taxa de sucesso na transmissão entre 30% e 40%. Para um taxa de ganho normalizada acima de 80%, observamos também que a taxa de sucesso na transmissão, para os 3 cenários avaliados é equivalente e estabilizada em 90% de mensagens recebidas com sucesso.

Analisando este gráfico visualiza-se que a porcentagem de pacotes recebidos aumenta conforme aumentamos o ganho do transmissor para todos os casos, até estabilizar com cerca de 90% de mensagens recebidas. Percebe-se que quando o ganho está acima de 85% a diferença entre usar RoF ou não é mínima, mas abaixo de 85% a diferença aumenta por causa das perdas devido às conversões ópticas-elétricas. Além disso, os cenários que utilizam RoF (Figura 1 (b) e (c)) produzem uma variância maior, particularmente, para níveis baixos de potência de transmissão. Contudo, a diferença para o cenário sem RoF e o cenário com RoF no transmissor, a diferença do ganho normalizado é de apenas 10% para obtenção dos mesmos resultados. Consideramos que, dada as diversas vantagens obtidas pelos cenários de aplicação de C-RANs, essa diferença na compensação do ganho para obtenção dos mesmo resultados que sem RoF é mínima e indiscutivelmente viável. Sendo assim, apesar de na avaliação realizada ser possível identificar perdas oriundas da arquitetura de C-RANs para os dispositivos IoT, visualizamos que a perda de desempenho é facilmente recuperada através da compensação no ganho da antena.

## 5. Conclusões e trabalhos futuros

As conversões ópticas-elétricas feitas pelo RoF implicam em perdas no sistema que podem acarretar na deformação do sinal e na perda de pacotes. De acordo com os resultados obtidos no experimento, as perdas de pacotes que ocorrem devido ao uso do RoF podem ser desprezíveis dependendo da potência de transmissão utilizada, ou compensadas com o aumento da potência de transmissão, dependendo das condições do canal de comunicação. Observa-se que, apesar de a taxa de recebimento de pacotes poder diminuir em cenários usando RoF, a distância final entre os dois dispositivos (cliente e centro de processamento, por exemplo) pode ser muito maior por causa da baixa perda da fibra óptica, permitindo assim o uso de menos centrais de processamento para uma determinada área. Além disso, o sistema RoF pode ser compartilhado entre diferentes tecnologias, assim como é feito no meio sem fio, bastando ter um conversor que suporte as frequências usadas. Estes resultados demonstram a adequação e a viabilidade da tecnologia RoF para transmissão de

dados da IoT, um dos principais objetivos deste artigo. Futuramente poderão ser testados diferentes casos e cenários de RoF, para adequar-se a diferentes aplicações. Avaliações com diferentes tamanhos de pacotes podem ser feitos para fazer-se uma análise similar ao trabalho de Martin Jacobsson [Jacobsson and Rohner 2015].

## Referências

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., and Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2347–2376.
- Ali, A., Shah, G. A., Farooq, M. O., and Ghani, U. (2017). Technologies and challenges in developing machine-to-machine applications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 83:124–139.
- Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W., Chessa, S., Gotta, A., and Hu, Y. F. (2007). Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards. *Computer communications*, 30(7):1655–1695.
- Bastos, A. V. and da Silva Júnior, D. C. (2016). Cloud radio access network (cran): Tecnologia emergente para arquiteturas de redes celulares de 5g.
- Bluemm, C., Zhang, Y., Alvarez, P., Ruffini, M., and DaSilva, L. A. (2017). Dynamic energy savings in cloud-ran: An experimental assessment and implementation. In *Communications Workshops (ICC Workshops), 2017 IEEE International Conference on*, pages 791–796. IEEE.
- Chih-Lin, I., Huang, J., Duan, R., Cui, C., Jiang, J. X., and Li, L. (2014). Recent progress on c-ran centralization and cloudification. *IEEE Access*, 2:1030–1039.
- Jacobsson, M. and Rohner, C. (2015). Estimating packet delivery ratio for arbitrary packet sizes over wireless links. *IEEE Communications Letters*, 19(4):609–612.
- Nokia, L. (2015). Lte-m - optimizing lte for the internet of things.
- Novak, D., Waterhouse, R. B., Nirmalathas, A., Lim, C., Gamage, P. A., Clark, T. R., Dennis, M. L., and Nanzer, J. A. (2016). Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 52(1):1–11.
- Orsino, A., Ometov, A., Fodor, G., Moltchanov, D., Militano, L., Andreev, S., Yilmaz, O. N., Tirronen, T., Torsner, J., Araniti, G., et al. (2017). Effects of heterogeneous mobility on d2d-and drone-assisted mission-critical mtc in 5g. *IEEE Communications Magazine*, 55(2):79–87.
- Peng, M., Zhang, K., Jiang, J., Wang, J., and Wang, W. (2015). Energy-efficient resource assignment and power allocation in heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(11):5275–5287.
- Zhang, N. and Hämmäinen, H. (2015). Cost efficiency of sdn in lte-based mobile networks: Case finland. In *Networked Systems (NetSys), 2015 International Conference and Workshops on*, pages 1–5. IEEE.
- Zin, A., Bongsu, M., Idrus, S., and Zulkifli, N. (2010). An overview of radio-over-fiber network technology. In *Photonics (ICP), 2010 International Conference on*, pages 1–3. IEEE.