

Avaliação Técnica e Econômica de Cenários *Fronthaul Indoor* Híbridos e Baseados em Cobre Utilizando *G.fast* e Modo Fantasma

André L. P. Fernandes¹, Aline A. Ohashi, Daynara D. Souza, Brenda T. P. de Sousa, Marx M. M. de Freitas, Fabricio S. Farias, João C. W. A. Costa²

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Pará - UFPA
Belém, Brasil

¹andre.lucaspinho@gmail.com, ²jweyl@ufpa.br

Resumo—A crescente demanda de tráfego e novas aplicações em Internet das Coisas (IoT) exigem que a quinta geração de sistemas de telecomunicação sem fio (5G) tenha alta confiabilidade, baixo atraso e altas taxas de transmissão, especialmente para ambientes *indoor*. Para atender a esses requisitos, estruturas híbridas com enlaces de fibra e cobre estão sendo propostas como solução *fronthaul* para comunicação de *small cells indoors*. Uma solução alternativa é o *fronthaul* somente com cobre, utilizando o padrão *G.fast* e o modo fantasma. Este trabalho analisa e compara a viabilidade técnica e econômica da implantação de estruturas *fronthaul* híbridas ou baseadas em cobre.

Palavras-Chave—5G, *Indoor*, *Fronthaul*, *G.fast*, Modo Fantasma, Viabilidade.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda de tráfego e novas aplicações em Internet das Coisas (IoT) exigem que a quinta geração de sistemas de telecomunicações sem fio (5G) tenha alta confiabilidade, baixo atraso e altas taxas de transmissão [1], principalmente para ambientes *indoor*, que correspondem a 70 % do tráfego móvel gerado [2].

Para atender os elevados requisitos do 5G, diversos trabalhos têm apresentado arquiteturas de comunicação ao usuário *indoor* baseadas na implantação massiva de *small cells* [3][4], i.e., células sem fio com pequena área de cobertura e grande vazão de tráfego. Nesse contexto, soluções *fronthaul* híbridas com enlaces de fibra e cobre tem sido propostas [5][6], uma vez que reaproveitam a infraestrutura *indoor* existente.

Como solução alternativa para comunicação *indoor* propõe-se o *fronthaul* baseado somente em cobre, possibilitado pelo padrão linha digital de assinante (DSL) *G.fast* e o modo de transmissão fantasma [7][8], que podem garantir a cabos Cat5e/Cat6 taxas de transmissão por par diferencial na cifra de Gbps para comprimentos de até 100 metros [9]. Dessa forma, respeitando-se as limitações de comprimento de enlace, o *fronthaul* pode ser totalmente composto por cabos Cat5e/Cat6, absorvendo as vantagens operacionais de redes de acesso local (LANs) baseadas nesses cabos, como alta aceitabilidade no mercado de tecnologia da informação (TI) e menores custos de instalação e manutenção [10].

No presente trabalho é apresentada uma análise técnica e econômica de cenários *fronthaul indoor* para arquitetura 5G, baseados em estruturas de enlaces híbridos existentes e num proposto esquema, composto apenas por cabos de cobre (Cat5e) considerando as tecnologias *G.fast* e modo de transmissão fantasma. Para alcançar o objetivo proposto, este trabalho propõe um modelo de custos baseado no conceito de recompensas de Markov, sendo esse capaz de capturar a natureza dinâmica da rede. O tempo de permanência em cada estado da cadeia de Markov associada a operação da rede, e consequentemente o custo, é encontrado por meio de uma simulação de Monte Carlo, técnica conhecida como *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC).

O restante do trabalho é organizado em sete seções. A Seção II apresentará os detalhes da arquitetura *fronthaul 5G indoor* analisada. A Seção III explicará o funcionamento das redes óticas passivas. A Seção IV apresentará os modelos de custo. A Seção V descreverá características dos simuladores utilizados. A Seção VI mostrará o estudo de caso considerado por este trabalho. A Seção VII fará a descrição dos resultados obtidos. Por fim, a Seção VIII apresentará as conclusões.

II. SOLUÇÃO DE *Fronthaul Indoor 5G* ANALISADA

Espera-se que o 5G tenha como característica a implantação massiva de *small cells indoor* [3][4]. Em vista disso, este trabalho propõe como estrutura de *fronthaul indoor* para o 5G uma arquitetura similar às atuais soluções comerciais para implantação de *small cells indoor* [5][6]. De forma que o processamento das células do ambiente *indoor* é centralizado em um *rack* contendo *baseband units* (BBUs) empilhadas, formando uma rede de rádio acesso centralizado (C-RAN) [11]. Nesta arquitetura, as *small cells* são agrupadas de acordo com seus locais de atendimento e cada grupo se liga por um conjunto de enlaces — denominados de 1º nível — a um ou mais agregadores de *small cells*, os quais realizam função semelhante a de um *gigabit Ethernet switch* e se ligam por um outro conjunto de enlaces — denominados de 2º nível — ao *rack* de BBUs.

A Figura 1 apresenta um exemplo da arquitetura implementada em um edifício, onde as *small cells* são agrupadas por andar. Ressalta-se também que para atender um grupo de células maiores, de dois a quatro agregadores podem ser cascadeados a partir de um único enlace de 2º nível.

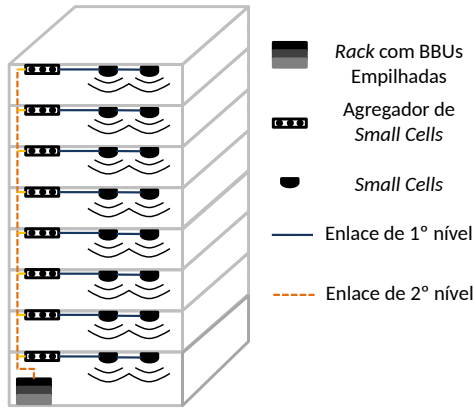


Fig. 1. Arquitetura *fronthaul indoor* baseada em soluções comerciais para *small cells indoor*.

III. TECNOLOGIAS DE TRANSMISSÃO BASEADAS EM ENLACES DE COBRE ADOTADAS NO *Fronthaul*

O padrão da linha de assinante digital (DSL) G.fast [12] é capaz de atingir taxas de dados por canal diferencial da ordem de Gbps [7]. Além disso, estudos [8][9] mostram que o uso do modo de transmissão fantasma aliado ao padrão G.fast pode garantir taxas de transmissão ainda mais elevadas.

A. G.fast

O padrão G.fast [13] foi criado para atender às demandas da quarta geração de banda larga do DSL. Este tem como características principais, algumas mudanças em relação às gerações anteriores. Exemplos disto são maiores larguras de banda, diminuição do comprimento dos enlaces de cobre – entre 30 e 250 m – e o uso de Duplexação Por Divisão de Tempo (TDD). O G.fast usa Modulação de Multitono Discreta (DMT) e na versão padronizada mais atual – de 2,2 MHz a 212 MHz – o espaçamento entre as subportadoras é setado para ser igual a 51,75 KHz. Nestas configurações, taxas de até 2 Gbps são alcançadas. No entanto, devido ao forte *crosstalk* que existe entre os pares, o uso de técnicas de mitigação de interferência faz-se necessário. Dessa forma para uso do padrão G.fast recomenda-se que o chamado *vectoring* seja aplicado [14].

B. Canais Fantasmas

O modo fantasma de transmissão é uma técnica que adiciona canais diferenciais virtuais através de sinalização em modo comum, aumentando o número de canais disponíveis em um cabo sem a necessidade de pares trançados adicionais. Quando aliado ao *vectoring*, o modo fantasma pode aumentar a taxa agregada de transmissão de um sistema [15].

Os canais fantasmas gerados a partir de dois pares são denominados de fantasmas de 1ª camada. Quando apenas a 1ª camada é transmitida simultaneamente com os canais diferenciais, em cabos de quatro pares são obtidos um total de 6 canais – quatro diferenciais e dois fantasmas.

Uma forma de implementar o modo fantasma explorando todo o seu potencial pode ser vista na Figura 2, onde a partir de um sistema que possua dois canais fantasmas de 1ª camada, um canal fantasma adicional de 2ª camada é obtido. Este novo canal se propaga nos *taps* centrais dos transformadores dos canais fantasmas de 1ª camada. Neste caso, gerado um total de sete canais, no qual quatro são diferenciais, dois são fantasmas de 1ª camada e um é fantasma de 2ª camada.

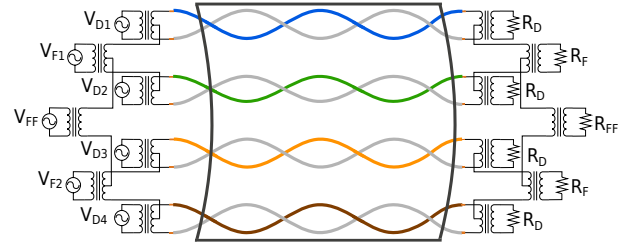


Fig. 2. Configuração sob um cabo Cat5e do modo de transmissão dos canais diferenciais (V_D), fantasma de 1ª camada (V_F) e de 2ª camada (V_{FF}).

IV. MODELO DE CUSTOS

O custo total de propriedade (TCO) da rede é dado pela soma das despesas de instalação (CAPEX) e operação (OPEX).

A. CAPEX

A Equação (1) apresenta o CAPEX da arquitetura considerada:

$$CAPEX = C_{Cab} + C_{Eq,Compra} + C_{Eq,Inst} \quad (1)$$

onde C_{Cab} , $C_{Eq,Compra}$, $C_{Eq,Inst}$ são, respectivamente, o custo de cabeamento, o custo com compra de equipamentos para diferentes tipos enlaces (Fibra ou Cat5e\Cat6) e o custo com instalação de equipamentos.

A Equação (2) representa o custo de cabeamento (C_{Cab}):

$$C_{Cab} = N_{F,cnx} P_{F,cnx} + N_{C56,cnx} P_{C56,cnx} \quad (2)$$

onde $N_{F,cnx}$, $P_{F,cnx}$, $N_{C56,cnx}$ e $P_{C56,cnx}$ são, respectivamente, o número de conexões *indoor* de fibra, o preço por conexão *indoor* de fibra, o número de conexões *indoor* de cabos Cat5e ou Cat6 e o preço por conexão *indoor* de cabos Cat5e ou Cat6.

A Equação (3) fornece o custo com compra de equipamentos ($C_{Eq,Compra}$):

$$C_{Eq,compra} = \sum_i N_{Eq,i} Pr_{Eq,i} \quad (3)$$

onde o índice i representa os diferentes tipos de equipamentos e $N_{Eq,i}$ e $Pr_{Eq,i}$ são, respectivamente, o número de equipamentos do tipo i e o preço de compra do equipamentos do tipo i .

A Equação (4) fornece o custo com instalação de equipamentos ($C_{Inst,Eq}$):

$$C_{Eq,Inst} = \sum_k \left[T_{Eq,k} + \frac{D_{Eq,k}}{v_m} \right] S \quad (4)$$

onde o índice k representa os diferentes equipamentos a se instalar e $T_{Eq,k}$ e S são, respectivamente, o tempo de instalação do equipamento k e o salário das equipes de trabalho.

B. OPEX

O OPEX é obtido a partir de uma análise dinâmica de operação da rede feita a partir da modelagem dos estados de operação como uma cadeia de Markov contínua no tempo (CTMC), com definição de estado baseada no número e tipos de equipamentos falhos, onde para a aplicação dos custos utilizou-se o conceito de recompensas de Markov.

A Equação (5) apresenta o OPEX associado a um estado j :

$$\text{OPEX}_j = C_{rep,j} + C_{pen,j} + C_{ene,j} + C_{alu,j} \quad (5)$$

onde $C_{rep,j}$, $C_{pen,j}$, $C_{ene,j}$ e $C_{alu,j}$ são, respectivamente, em relação ao estado j , custos de reparo, penalidade, energia elétrica e aluguel de espaço.

A Equação (6) representa o custo com reparos ($C_{rep,j}$) de um estado i :

$$C_{rep,j} = \min(1, j) (S + R_k \eta) \quad (6)$$

onde R_k e η são, respectivamente, o preço de compra do equipamento k a ser reparado no estado j e o fator de custo do reparo de equipamentos, variando de 0 a 1. O termo $\min(1, j)$ reflete a inexistência de custo de reparo para o caso de rede totalmente funcional, representada pelo estado $j = 0$.

A Equação (7) fornece o custo com penalidade por indisponibilidade de um estado j ($C_{pen,j}$):

$$C_{pen,j} = (Nf_{cel,j})^\alpha Pr_{pen} \quad (7)$$

onde α , $Nf_{cel,j}$ e Pr_{pen} são, respectivamente, o fator de impacto [16], o número de células falhas e a multa por hora de indisponibilidade das células *indoor*.

A Equação (8) simboliza o custo com energia elétrica por estado j ($C_{ene,j}$):

$$C_{ene,j} = Pr_{kWh} (\text{Tot}_{kWh}^{Eq} - \text{Fal}_{kWh,j}^{Eq}) \quad (8)$$

onde Pr_{kWh} , Tot_{kWh}^{Eq} e $\text{Fal}_{kWh,j}^{Eq}$ representam, respectivamente, o preço do quilowatt hora, a soma da potência de todos os equipamentos da rede e a soma da potência de todos os equipamentos falhos no estado j .

A Equação (9) reflete o custo com aluguel de espaço por estado j ($C_{alu,j}$):

$$C_{alu,j} = \text{Tot}_S Pr_{S,Alu} \quad (9)$$

onde Tot_S e $Pr_{S,Alu}$ são, respectivamente, a área total ocupada por equipamentos *indoor* e o preço do aluguel de espaço *indoor*.

Este trabalho utilizou dois simuladores, um para determinar o TCO e outro determinar as taxas de transmissão associadas aos enlaces Cat5e/Cat6.

A. Simulador de Custos

Com a rede modelada como uma CTMC, o TCO pode ser obtido pela soma do CAPEX e OPEX, onde o último é determinado pela somatório do produto entre o tempo de permanência e o OPEX associado a cada estado.

O simulador de custos tem como objetivo determinar o tempo de permanência em cada estado. A metodologia de funcionamento utiliza as informações das taxas de falha dos equipamentos funcionais e do tempo médio de reparo dos equipamentos falhos (associados a cada estado de operação) para montar uma matriz de taxas de transição, a qual aplicada a uma análise cumulativa de CTMCs com simulação de Monte Carlo fornece o tempo de permanência em cada estado. O simulador foi implementado como em [17].

B. Simulador de Taxas

Para obter as taxas de transmissão associadas aos cabos Cat5e/Cat6 utilizou-se a ferramenta *Cable Studio* do *software Computer Simulation Technology* (CST) como apresentado em [9].

VI. ESTUDO DE CASO

Esta seção apresenta o estudo de caso que propõe as métricas utilizadas para avaliar as estruturas de *fronthaul indoor* propostas para a arquitetura 5G. Como cenário de implantação considerou-se um edifício de 10 andares com 30m de altura, 800 habitantes e 160 apartamentos de 400 m², o qual é baseado nas médias do comportamento populacional dinâmico da ilha Manhattan, nos EUA [18]. Para a arquitetura *fronthaul* considerou-se BBUs e agregadores de *small cells* com 6 e 8 saídas para enlaces, respectivamente. O restante das características de operação e instalação basearam-se em equipamentos disponíveis no mercado e são mostradas pela Tabela I, com os custos normalizados em relação a *small cell indoor*, a qual custa cerca de 300 US\$ [19].

Como ainda não existem BBUs e agregadores adaptadas para o *G.fast* e modo fantasma, considerou-se para esses, com exceção dos custos da BBU, as mesmas características dos equipamentos não adaptados. Para determinar os custos da BBU adaptada utilizou-se a diferença de preços entre os componentes das tecnologias VDSL2 (*Very-High-Bit-Rate Digital Subscriber Line 2*) e ADSL2 (*Asymmetric Digital Subscriber Line 2*), a diferença de preço entre *cards* de *Multi-Dwelling Units* e BBUs, e o preço por porta na tecnologia DSL, uma vez que o fantasma irá apenas adicionar canais ao sistema. O custo de BBU adaptada resultante foi de 2,63 UC para apenas o modo diferencial, 2,89 UC para o caso com fantasma de 1^a camada e 3,2 UC para o caso com 2^a camada.

Para o salário das equipes de trabalho, preço do quilo-watt hora e a penalidade por indisponibilidade de célula, foram considerados os respectivos custos de 0,63 UC/h, $3,33 \times 10^{-5}$ UC

e 0,05 UC/h [20]. Por fim, foi considerado um tempo de operação de 10 anos, uma fatia de mercado com 50 % dos assinantes do edifício e 50 % de usuários ativos no pico de tráfego.

Foram estudados quatro casos de implementação em relação ao 2º nível de enlaces: fibra (CPRI opção 9) [21], Cat5e (*G.fast*), Cat5e (*G.fast* + fantasma de 1ª camada), e Cat5e (*G.fast* + fantasma de 1ª e 2ª camada). Em relação ao 1º nível de enlaces utilizou-se em todos os casos Cat5e (Gigabit Ethernet). Em todos os casos de implementação foi suposto uma *small cell* por apartamento e consequentemente 2 agregadores por andar, os quais foram considerados cascadeados, resultando em 2 BBU no edifício. A *small cell* mais distante ficou a 115 m da BBU, com enlace de 1º nível possuindo 30 m.

TABELA I
PARÂMETROS DE EQUIPAMENTOS.

Equip.	Custo (UC)	Tempo de Instalação (min)	Taxa de Falha (FIT)	Tempo Médio de Reparo (h)	Consumo de Potência (W)
<i>Small Cell</i>	1	4	777	1	30
Agreg. de <i>Small Cell</i>	1	20	3333	1	150
BBU	2,33	48	6451	1	165
Ligação Cat5e/6 indoor	0,33	-	10,6/m	1	0
Ligação Fibra indoor	0,66	-	10,6/m	7	0

Para o simulador de custos (baseado em MCMC) usou-se as taxas de falha e tempo de reparo dos equipamentos da Tabela I, simulando-se 10000 tentativas, com cada tentativa representado 10 anos de operação. Para o simulador de taxas usou-se o CST da mesma forma e com os mesmo parâmetros de [9].

VII. RESULTADOS

As taxas de transmissão por usuário durante o pico de uso da rede para cada cenário de estudo considerado são apresentados na Tabela II. Observa-se que utilizar o *G.fast* associado a transmissão em modo fantasma resulta numa taxa maior que a do cenário com fibra, principalmente fantasma de 2ª camada.

O CAPEX anual por Gbps fornecido a cada assinante é apresentado na Tabela III para todos os cenários estudados. Observa-se que as despesas de instalação são dominantes sob as de aquisições. Além disso, nota-se o que *G.fast* sem

TABELA II
TAXA DE TRANSMISSÃO POR USUÁRIO (NO PICO) - TODAS AS ARQUITETURAS .

Categoria de Dados	Arquitetura			
	Fibra	<i>G.fast</i>	<i>G.fast+Fantasma</i>	
			1ª Camada	2ª Camada
Taxa (Gbps)	0,760313	0,490406	0,770313	0,908156

TABELA III
COMPOSIÇÃO DO CAPEX DAS ARQUITETURAS DO ESTUDO DE CASO.

Custo ¹	Arquitetura			
	Fibra	<i>G.fast</i>	<i>G.fast+Fantasma</i>	
Instalação	0,155638	0,242826	1ª Camada	2ª Camada
				0,155435
Compra	0,060012	0,088793	0,056528	0,047948
Total	0,21565	0,331619	0,211963	0,180634

¹Custo em UC/(Gbps/Ass.)/Ano

TABELA IV
COMPOSIÇÃO DO OPEX DAS ARQUITETURAS DO ESTUDO DE CASO.

Custo ¹	Arquitetura			
	Fibra	<i>G.fast</i>	<i>G.fast+Fantasma</i>	
Eletricidade	0,101534	0,157415	1ª Camada	2ª Camada
				0,100216
Aluguel	0,014632	0,022685	0,014442	0,01225
Reparos	0,006732	0,010369	0,006602	0,0056
Indisponibilidade	0,005196	0,00728	0,004634	0,003931
Total	0,128094	0,197749	0,125894	0,106786

¹Custo em UC/(Gbps/Ass.)/Ano

modo fantasma e com fantasma de 2ª camada atingiram, respectivamente, as maiores e menores despesas. Tal fato, ocorre devido as taxas superiores obtidas com o uso do canal fantasma, portanto, o suposto aumento de preços dos equipamentos *G.fast* com fantasma é compensado no CAPEX pela maior taxa fornecida.

O OPEX anual por Gbps fornecido a cada assinante é apresentado pela Tabela IV para todos os casos estudados. Observa-se que a eletricidade é o custo dominante no OPEX e novamente percebe-se o *G.fast* isolado e *G.fast* com fantasma de 2ª atingem, respectivamente, os maiores e menores custos. Dessa forma, mesmo supondo preços de equipamentos mais elevados para o uso *G.fast* com modo fantasma, o que tem influência sobre os gastos com reparo, obtém-se um menor OPEX.

Objetivando avaliar profundamente o TCO, uma análise de sensibilidade variando os preços supostos para as BBU adaptadas ao *G.fast* e transmissão fantasma é apresentada pela Figura 3, ressaltando-se que o custo arquitetura de fibra com CPRI opção 9 se mantém constante, servindo apenas de parâmetro de comparação para a variação de custos das outras arquiteturas. Nota-se que as arquiteturas baseadas apenas em enlaces de cobre poderão resultar em menores custos em relação a fibra apenas para os casos com uso do modo fantasma. Se o aumento de preços for até 50 % em cima valor considerado neste trabalho, utilizar o canal fantasma de 1ª camada resulta em pequena economia, já para o fantasma de 2ª camada até mesmo um aumento de 650 % em cima dos preços, mantém essa solução como a mais econômica.

Outra análise de sensibilidade interessante é ilustrada na Figura 4 e mostra a taxa em Gbps alcançada pelo usuário durante o horário de pico de tráfego para cada cenário de estudo considerando o cascadeamento de agregadores, implementado como descrito na Seção II. Foram considerados

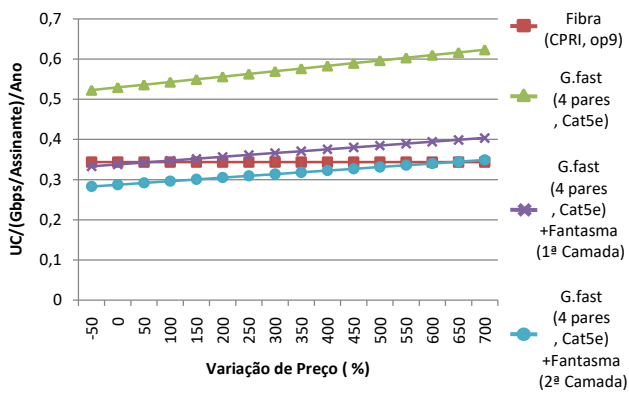


Fig. 3. Análises de sensibilidade em relação aos valores de custos.

até 4 agregadores em cascata e observa-se que as taxas diminuem de forma exponencial com o aumento do número de agregadores em cascata, com a alternativa do fantasma de 2ª camada decaindo mais rapidamente, mas ainda mantendo-se com taxa levemente superior a das outras alternativas.

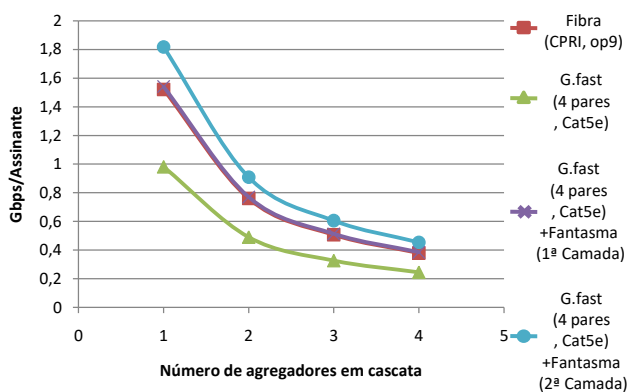


Fig. 4. Análises de sensibilidade em relação às taxas quando considerando o número de agregadores em cascata na rede.

VIII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise técnico-econômica de opções *fronthaul* para arquitetura 5G em cenários *indoors*, considerando tanto estruturas híbridas de fibra e cobre quanto as apenas de cobre, usando o padrão *G.fast* e modo de transmissão fantasma. Apoiando-se num modelo de custos baseado no conceito de recompensas de Markov.

Os resultados encontrados indicam que a utilização do padrão *G.fast* associado ao modo fantasma pode aumentar a viabilidade econômica das soluções de comunicação *indoor* de *small cells*, principalmente para o caso com 2ª camada da transmissão fantasma, o qual atinge o menor TCO dentre as arquiteturas analisadas por este trabalho e que mesmo com o cascadeamento de agregadores de células pode fornecer para os usuários taxas de quase 1 Gbps no horário de pico, melhor atendendo os requisitos de tráfego do 5G.

Como trabalhos futuros planeja-se aplicar as arquiteturas de distribuição células *indoor* baseadas em cobre a um cenário urbano geométrico, analisando rede técnica e economicamente tanto no *backhaul* quanto no *fronthaul*.

REFERÊNCIAS

- [1] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, "What will 5g be?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, pp. 1065–1082, Junho 2014.
- [2] Ericsson, "Small cell services," white paper, Ericsson, Sweden, 2015.
- [3] S. Tombaz, P. Monti, F. Farias, M. Fiorani, L. Wosinska, and J. Zander, "Is backhaul becoming a bottleneck for green wireless access networks?," in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 4029–4035, June 2014.
- [4] M. Fiorani, P. Monti, B. Skubic, J. Martensson, L. Valcarengi, P. Castoldi, and L. Wosinska, "Challenges for 5g transport networks," in *2014 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pp. 1–6, Dec 2014.
- [5] Ericsson, "Ericsson radio dot system redefining in-building small cells," white paper, Ericsson, Sweden, 2017.
- [6] Huawei, "Atomcell9.0 lamppost solution," white paper, HUAWEI TECHNOLOGIES CO., LTD., Republic of China, 2015.
- [7] R. Strobel, M. Joham, and W. Utschick, "Achievable rates with implementation limitations for g.fast-based hybrid copper/fiber networks," in *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 958–963, June 2015.
- [8] W. Foubert, C. Neus, L. V. Biesen, and Y. Rolain, "Exploiting the phantom-mode signal in dsl applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, pp. 896–902, April 2012.
- [9] M. M. M. Freitas, D. D. Souza, B. P. T. Sousa, D. A. Gomes, C. S. Sales, R. M. Rodrigues, and J. C. W. A. Costa, "Utilizando a segunda camada do modo fantasma para aprimoramento de aplicações g.fast," in *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, pp. 788–792, Setembro 2017.
- [10] C. Lu, E. M. Berg, Trojer, P. E. Eriksson, K. Laraqui, O. V. Tidbl, and H. Almeida, "Connecting the dots: small cells shape up for high-performance indoor radio," *Ericson Review*, vol. 91, pp. 2–9, Dezembro 2014.
- [11] G. Macknofsky, "Understanding the basics of cpri fronthaul technology," application note 310, EXFO, Canada, 2015.
- [12] *Recommendation G.9701: Fast Access to Subscriber Terminals (FAST) Physical layer specification*, December 2014.
- [13] *Recommendation ITU-T G.9700: Fast access to subscriber terminals (FAST) - Power spectral density specification*, December 2014.
- [14] G. Ginis and J. M. Cioffi, "Vectored transmission for digital subscriber line systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, pp. 1085–1104, Jun 2002.
- [15] P. Lafata, "Estimations of g.fast transmission performance over phantom modes," in *2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pp. 1–5, July 2015.
- [16] A. Dixit, M. Mahloo, B. Lannoo, J. Chen, L. Wosinska, D. Colle, and M. Pickavet, "Protection strategies for next generation passive optical networks -2," in *2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling*, pp. 13–18, May 2014.
- [17] G. J. Anders and A. M. L. da Silva, "Cost related reliability measures for power system equipment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, pp. 654–660, May 2000.
- [18] M. L. Moss and C. Qing, "The dynamic population of manhattan," tech. rep., New York University, USA, 2012.
- [19] F. Yaghoubi, M. Mahloo, L. Wosinska, P. Monti, F. de S. Farias, and J. C. W. A. Costa, "A techno-economic framework for 5g transport networks," *IEEE Wireless Communications Magazine*, 2018, in press.
- [20] A. Fernandez and N. Stol, "Capex and opex simulation study of cost-efficient protection mechanisms in passive optical networks," *Opt. Switch. Netw.*, vol. 17, pp. 14–24, July 2015.
- [21] A. de la Oliva, J. A. Hernandez, D. Larrabeiti, and A. Azcorra, "An overview of the cpri specification and its application to c-ran-based lte scenarios," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, pp. 152–159, February 2016.