UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES SUSTENTÁVEIS: UMA AVALIAÇÃO BASEADA EM REDES *SMALL CELLS* E *BACKHAUL*

ALBERT RICHARD MORAES LOPES

DM 13/2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES SUSTENTÁVEIS: UMA AVALIAÇÃO BASEADA EM REDES *SMALL CELLS* E *BACKHAUL*

ALBERT RICHARD MORAES LOPES

DM 13/2015

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALBERT RICHARD MORAES LOPES

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES SUSTENTÁVEIS: UMA AVALIAÇÃO BASEADA EM REDES *SMALL CELLS* E *BACKHAUL*

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Computação Aplicada.

UFPA/ITEC/PPGEE

Campus Universitário do Guamá

Belém-Pará-Brasil

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Lopes, Albert Richard Moraes, 1987-
Eficiência energética em redes sustentáveis: uma avaliação baseada em redes small cells e backhaul / Albert Richard Moraes Lopes. - 2015.

Orientador: João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2015.

1. sistemas de comunicação sem fio. 2. cabos de telecomunicação. 3. telecomunicação - tráfego - aspectos econômicos. 4. Sistemas de comunicação em banda larga. I. Título.

CDD 22. ed. 621.38456

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM REDES SUSTENTÁVEIS: UMA AVALIAÇÃO BASEADA EM REDES SMALL CELLS E BACKHAUL"

AUTOR: **ALBERT RICHARD MORAES LOPES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 13/03/2015

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
(Orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Heleno Fulber
(Avaliador Externo ao Programa – CAMTUC/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por sempre iluminar o meu caminho, aos meus pais, Rosângela Moraes Baldez e Raimundo Lino Mescouto Baldez, e aos familiares que me deram total suporte educacional e investiram no meu estudo. Gostaria de agradecer também ao meu orientador pela oportunidade que me concedeu para que cursasse esta Pós-graduação. Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro a esta pesquisa. A minha gratidão a todos os colegas do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA), meus amigos e todos que diretamente e indiretamente me acompanharam nessa jornada. Dentre todos os amigos, agradeço em especial Fabrício de Souza Farias, que me incentivou, apoiou e contribruiu significativamente ao longo deste trabalho, sem o qual não teria começado e tão pouco concluído.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **I**

LISTA DE TABELAS ..... **II**

LISTA DE ARTIGOS ..... **III**

LISTA DE SIGLAS ..... **IV**

RESUMO ..... **V**

ABSTRACT ..... **VI**

CAPÍTULO I **1**

INTRODUÇÃO 1
1.1 JUSTIFICATIVA 2
1.2 TRABALHOS CORRELATOS 2
1.2 OBJETIVOS 3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 3

CAPÍTULO II **4**

REDE DE *BACKHAUL* E *SMALL CELL* 4
2.1 REDE *BACKHAUL* 4
2.1.1 Tecnologia de Acesso *5*
2.1.1.1 Fibra Óptica 5
2.1.1.2 Cobre 7
2.1.2 Tipo de Backhaul *8*
2.2 *SMALL CELL* 10
2.2.1 Femtocell Convencional *11*
2.2.2 Femtocell Wireless over Cable *11*

CAPÍTULO III **13**

METODOLOGIA 13
3.1 INTRODUÇÃO 13
3.2 MODELO DE TRÁFEGO MÓVEL 14
3.3 DIMENSIONAMENTO DA CIDADE 17
3.4 DIMENSIONAMENTO DA REDE MÓVEL 17
3.5 INSTALAÇÃO DO *BACKHAUL* 18
3.5.1 Arquitetura 1: FTTC para FemtoC BS *19*
3.5.2 Arquitetura 2: FTTB para FemtoC BS *20*
3.5.3 Arquitetura 3: FTTH para FemtoC BS *22*
3.5.4 Arquitetura 4: FTTB para FemtoWoC BS *23*
3.5.5 Arquitetura 5: FTTC para FemtoWoC BS *24*
3.6 CONSUMO DE ENERGIA 25
3.6.1 Célula local (CS) *26*
3.6.2 Ponto de Convergência Local (HS) *26*
3.6.3 Escritório Central (CO) *27*

CAPÍTULO IV **28**

CASO DE ESTUDO E RESULTADOS 28
4.1 CASO DE ESTUDO 28
4.1.1 Cidade *28*
4.1.2 Demanda De Tráfego *29*
4.1.3 Rede Móvel e Backhaul *30*
4.2 RESULTADOS 31
4.2.1 Rede Móvel Femtocelular Convencional *31*
4.4.2 Rede Móvel Femtocell Wireless Over Cable *34*

CAPÍTULO V **39**
CONCLUSÃO 39
REFERÊNCIAS **41**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Proporção de cobertura indoor em edifícios de vidro metalizado 1
Figura 1.2: Divisão do mercado por tecnologia no mundo. Extraído de: Point Topic, "*World Broadband Statistics – Q1 2013*,Point Topic World Broadband Statistics". 3
Figura 2.1: Arquitetura genérica de rede móvel backhaul..... 4
Figura 2.2: Arquitetura básica da rede óptica passiva (PON) 6
Figura 2.3: Arquitetura de rede *fiber-to-the-x* (FTTx). 9
Figura 2.5: Sistema *Femtocell Wireless over Cable* (FemtoWoC). 11
Figura 2.4: Sistema Femtocell convencional com HeNBs sobre conexões xDSL. 11
Figura 3.1: Esquema para avaliação do consumo energético gerado pela rede móvel. 13
Figura 3.2: Ilustração do perfil médio do tráfego de dados $\alpha(T)$ na Europa. 16
Figura 3.3: Arquitetura *backhaul*. (a) *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* VDSL2/FTTC; (b) *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* VDSL2/FTTB; (c) *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* FTTH; (d) FemtoWoC sobre rede *backhaul* FTTC; (e) FemtoWoC sobre rede *backhaul* FTTB..... 19
Figura 3.4: *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* VDSL2/FTTC. 20
Figura 3.5: *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* VDSL2/FTTB. 21
Figura 3.6: *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* FTTH. 22
Figura 3.7: FemtoWoC sobre rede *backhaul* FTTC. 23
Figura 3.8: FemtoWoC sobre rede *backhaul* FTTB. 25
Figura 4.1: Exemplo da organização da cidade inspirado no modelo Manhattan. 28
Figura 4.2: Comparação entre três arquiteturas de *backhaul* do consumo de energia por área em função do tráfego gerado pelos usuários. 31
Figura 4.3: Quantidade de dispositivos das arquiteturas *backhaul* por segmento: (a) Segmento CS; (b) Segmento HS; (c) Segmento CO. 32
Figura 4.4: Consumo de energia das arquiteturas *backhaul* por segmento: (a) Segmento CS; (b) Segmento HS; (c) Segmento CO. 32
Figura 4.5: Percentual de consumo de energia nos segmentos do *backhaul* em redes *Femtocell* convencional: (A) para arquitetura FTTC; (B) para arquitetura FTTB; (C) para arquitetura FTTH. 34
Figura 4.6: Comparação das soluções *backhaul* para *small cell* FemtoWoC em relação a melhor solução *backhaul* para *small cell Femtocell* convencional e a FemtoWoC em termos de consumo de energia em função do tráfego gerado pelos usuários em dada área..... 35
Figura 4.7: Quantidade de dispositivos das arquiteturas *backhaul* por segmento: (a) Segmento CS; (b) Segmento HS; (c) Segmento CO. 36
Figura 4.8: Consumo de energia das arquiteturas *backhaul* por segmento: (a) Segmento CS; (b) Segmento CO. No HS o consumo de energia é nulo para todas as arquiteturas..... 36
Figura 4.9: Percentual de consumo de energia nos segmentos do *backhaul* em redes FemtoWoC: (A) para arquitetura FTTB; (B) para arquitetura FTTC. 37

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Serviços prioritários por tipo de arquitetura *backhaul*. 10
Tabela 4.1: Características da cidade em função da zona. 29
Tabela 4.2: Dados relevantes para o modelo de previsão de tráfego. 30
Tabela 4.3: Dados dos equipamentos que compõem o *backhaul*. 30

LISTA DE ARTIGOS

Lista de artigos incluídos nesta dissertação:

I. LOPES, A. R. M. ; Farias, F.S. ; J. C. W. A. Costa . Evaluation of the Energy Impact on Indoor Small Cells and Backhaul. In: The 4th International Conference on Network and Computer Science (ICNCS 2015), 2015, Portsmouth. The 4th International Conference on Network and Computer Science (ICNCS 2015), 2015.

II. LOPES, A. R. M. ; Farias, F.S. ; J. C. W. A. Costa . An Energy Efficiency Assessment for Indoor Small Cells using Copper-based Backhaul. In: The 4th International Conference on Network and Computer Science (ICNCS 2015), 2015, Portsmouth. the 4th International Conference on Network and Computer Science (ICNCS 2015), 2015.

LISTA DE SIGLAS

MBH	*Mobile Backhaul*, rede móvel *backhaul*
CO	*Central Office*, escritório central
HS	*Hub Site*, ponto local de convergência.
CS	*Cell Site*, célula local.
POP	*Point of presence*, ponto de presença.
MAN	*Metro Area Network*, rede de acesso metropolitana.
PON	*Passive Optical Network*, rede óptica passiva.
PMP	Ponto multiponto.
OLT	*Optical Line Termination*, terminal de linha óptica.
ONU	*Optical Network Unit*, unidade de rede óptica.
ODN	*Optical Distribution Network*, distribuição de rede óptica.
PDU	*Protocol Data Unit*, unidade de protocolo de dados.
EPON	PON Ethernet
10G-EPON	10 Gigabyte EPON
GPON	Gigabyte PON
XG-PON	10 GPON
DSL	*Digital Subscriber Line*
POTS	*Plain Old Telephone Service*
xDSL	Termo usado para representar um padrão qualquer da família DSL.
VDSL	*Very high bit rate DSL*.
ADSL	*Asymmetric DSL*.
CPE	Customer Premises Equipment, equipamento da instalação do cliente.
DSLAM	*Digital Subscriber Line Access Multiplexes.*
FTTN	*Fiber-To-The-Node.*
FTTx	*Fiber-To-The-x.*
FTTC	*Fiber-To-The-Curb*.
FTTCab	*Fiber-To-The-Cabinet*.
FTTH	*Fiber-To-The-Home*.
FemtoC	*Femtocell* Convencional.
FemtoWoC	*Femtocell Wireless over Cable*
Conversor A/A	Conversor analógico para analógico
McBS	*Multi-Cell Base Station*, estação base multicelular.
SF	Switch de Fiber.
SFP	*Small form-Factor Pluggable.*

RESUMO

A utilização de *small cells* em redes móveis heterogêneas (seja 3G, 4G e futuramente 5G) para tráfego *indoor* tem sido considerada como a melhor solução para suprir o crescimento do tráfego móvel, devido reduzir o consumo de energia da rede e por fornecer alta capacidade. Por outro lado, o aumento da quantidade de *small cells* implantadas implica na ampliação da rede *backhaul*, que aumenta o consumo de energia na rede e ameaça os ganhos das *small cells* nesse tópico. Além disso, dependendo da escolha do tipo *backhaul* o consumo de energia na rede heterogênea pode elevar consideravelmente. Neste contexto, este trabalho visa fornecer uma metodologia para avaliar e identificar possíveis gargalos de consumo de energia na rede móvel, considerando tanto a parte *wireless* quanto a estrutura *backhaul*. A metodologia considera a demanda de tráfego gerado na cidade, cenário para implantação e operação de redes heterogêneas (*small cells*) e dimensionamento do *backhaul* por segmento (*Cell Site*, *Hub Site* e *Central Office*). Adotando esta metodologia, o estudo deste trabalho avalia e compara três tipos de arquitetura *backhaul* para redes internas baseadas em *Femtocell* convencional ou *Femtocell Wireless over Cable* (FemtoWoC): *Fiber-to-the-Building*, *Fiber-to-the-Curb* e *Fiber-to-the-Home*. Constatou-se que o principal gargalo energético do *backhaul* se encontra no segmento responsável por agregar o tráfego das *small cells* (*Cell Site*). Contudo, empregando arquiteturas e equipamentos mais eficientes, como FemtoWoC, no segmento *Cell Site* pode-se reduzir significativamente o consumo total de energia no *backhaul*, principalmente em arquiteturas baseada em cobre na última milha.

PALAVRAS-CHAVES: *Backhaul*, *small cell*, eficiência energética, redes heterogêneas, metodologia.

ABSTRACT

The use of small cells in heterogeneous networks (either 3G, 4G and 5G future) for indoor traffic has been regarded as the best solution to meet the growth of mobile traffic due to reduce network power consumption and to guarantee the high capacities. Moreover, increasing the amount of small cell deployment implies in the expansion of the backhaul network, which causes an increase on the network power consumption, and threatens the small cells gains in terms of energy. Furthermore, the energy consumption in heterogeneous network can increase considerably depending on the choice of the type backhauling. Considering this background, this work aims to provide a methodology to assess and identify possible energy consumption bottlenecks in the mobile network, considering both the wireless part as the backhaul infrastructure. The methodology considers the demand of traffic generated in the city, scenario to implementation and operation of heterogeneous networks (small cells), and dimensioning backhaul by segment (Cell Site, Hub Site e Central Office). Adopting this methodology, the study evaluates and compares three types of backhaul architecture for conventional Femtocell or Femtocell Wireless over Cable (FemtoWoC) network: Fiber-to-the-Building, Fiber-to-the-Curb e Fiber-to-the-Home. It was found that the main bottleneck in the backhaul architecture is the segment that is responsible for aggregating traffic from small cells (Cell Site). However, adopt architectures and equipment with high energy efficiency, as FemtoWoC, in the segment bottleneck reduce significantly the total power consumption in the backhaul, mainly architectures based on copper in the last mile.

KEYWORDS: Backhaul, small cell, energy efficiency, heterogeneous networks, methodology.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda de tráfego de dados em redes móveis bem como a necessidade de conexão com a internet em tempo integral vem contribuindo significativamente para o aumento do consumo de energia mundial. Além disso, esta crescente busca por conexões de alta velocidade está impulsionando a expansão da rede móvel e, consequentemente, motivando o aumento do consumo de energia relativo ao uso dos dispositivos móveis, por exemplo, *smartphones* e *tablets*. As redes móveis já representam 0.5% do consumo de energia global e espera-se que este consumo duplique nos próximos cinco anos [1]. Desta forma, como a densificação da rede celular convencional (baseada em macrocélulas) contribui diretamente para o aumento do consumo energético, a adoção de redes heterogêneas, ou seja, utilização de *small cells* - como microcélulas, picocélulas e femtocélulas - em paralelo a macrocélula é apontada como proposta para solucionar esse problema [2]. Esta solução emprega uso de *small cells* em regiões onde a macrocélula apresenta a dificuldade de oferecer a experiência de uso desejada pelos assinantes. Em [3], é apontado que a macrocélula atende adequadamente usuários externos (*outdoor*), porém, devido às paredes dos prédios e ruídos, tem muita dificuldade em atender aos usuários internos (*indoor*), como ilustrado na Figura 1.1, que pode representar cerca de 80 % do tráfego de dados na rede móvel [4].

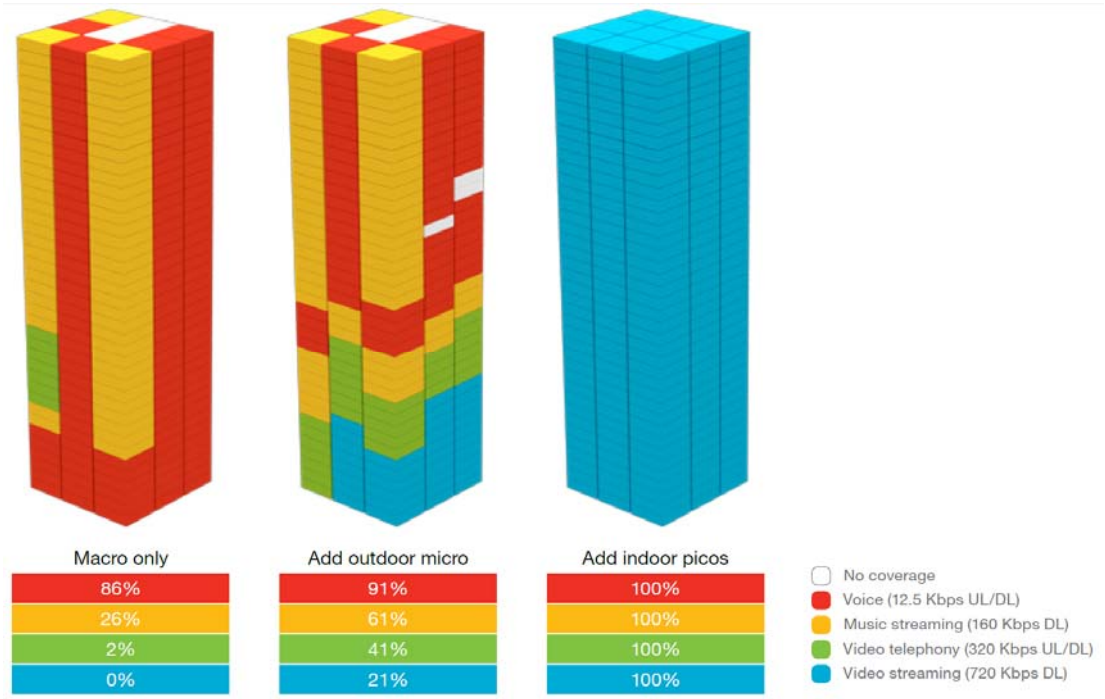


Figura 1.1: Proporção de cobertura *indoor* em edifícios de vidro metalizado
Extraído de: Ericsson, "*Ericsson Mobility Report: on the pulse of the networked society*, November 2013".

Oferecendo maximização da cobertura e de capacidade [5] a utilização em ambiente interno de *small cells* atende de maneira eficiente os usuários desse ambiente [3]. Entretanto, a adoção de *small cells* pode também apresentar desvantagens relacionadas ao aumento do consumo de energia. A densificação de *small cells* implica diretamente na expansão da infraestrutura do *backhaul* para interligar a rede móvel ao nó de agregação metropolitano (*metro node*), que dá acesso ao núcleo da rede. Portanto, as *small cells* de um lado contribuem positivamente para redução do consumo de energia nas redes móveis, mas por outro lado podem negativamente ocasionar o aumento o consumo de energia na estrutura chamada de *backhaul*.

1.1 JUSTIFICATIVA

Por muito tempo o consumo de energia do *backhaul* foi desconsiderado do cálculo de consumo de energia das redes móveis, que apenas considerava o consumo associado às estações bases: potência de transmissão, amplificadores, processamento de sinal, sistema de resfriamento, etc. Entretanto, a crescente demanda de dados, altas taxas de transmissão e necessidade de reduzir o consumo de energia forçou a rede a ser remodeladada, tornando-a heterogênea. Esse novo cenário trouxe consigo uma nova realidade: O *backhaul*, que até então havia sido desconsiderado, passou a consumir uma parcela significativa do consumo de energia podendo ameaçar os benefícios da rede heterogênea. Portanto, na etapa de planejamento de rede se faz necessário uma metodologia para determinar a melhor escolha de *backhaul* para não comprometer as vantagens das redes heterogêneas, principalmente, em termos de consumo de energia.

1.2 TRABALHOS CORRELATOS

Em [6] os autores apresentam que a escolha equivocada da arquitetura *backhaul* pode representar um aumento no consumo de energia de até 50 % na rede, ou seja, podendo ser um verdadeiro gargalo. Em virtude disso, alguns estudos foram realizados a fim de identificar qual tecnologia seria mais eficiente em nível de *backhaul* [2] [6] [7]. Em [6] e [7], foram avaliadas as tecnologias de cobre, microonda e fibra óptica e concluiu-se que a fibra é o candidato natural como tecnologia *backhaul* e a microonda é a pior escolha para atender usuários *indoors* através das *small cells*, considerando largura de banda e energia.

Apesar do cobre apresentar nestes estudos resultados de consumo de energia intermediário em comparação à microonda e a fibra, diversos outros estudos descartam a utilização desta tecnologia para o *backhaul* em favor da fibra. A principal motivação para a recusa da utilização do cobre é devido, principalmente, a sua limitação em prover altas taxas de transmissão de dados [8] [9]. Entretanto, apesar da tecnologia de fibra ser a escolha ideal para o backhaul, o percentual de fibra instaladas no mundo é ainda baixo, enquanto que a tecnologia de cobre é a mais instalada [10] [11], como ilustrado na Figura 1.2. Vale ressaltar que a fibra é a tecnologia que mais cresce em participação de mercado, mas, ainda assim, demorará alguns anos para poder alcançar todos os usuários. Enquanto isso, o que fazer? Uma alternativa para suprir a necessidade atual, enquanto a fibra óptica não é adotada em plena

forma, é se beneficiar da infraestrutura já implantada, isto é, utilizar o legado de cobre para transportar o tráfego das redes heterogêneas gerado por usuários *indoors*.

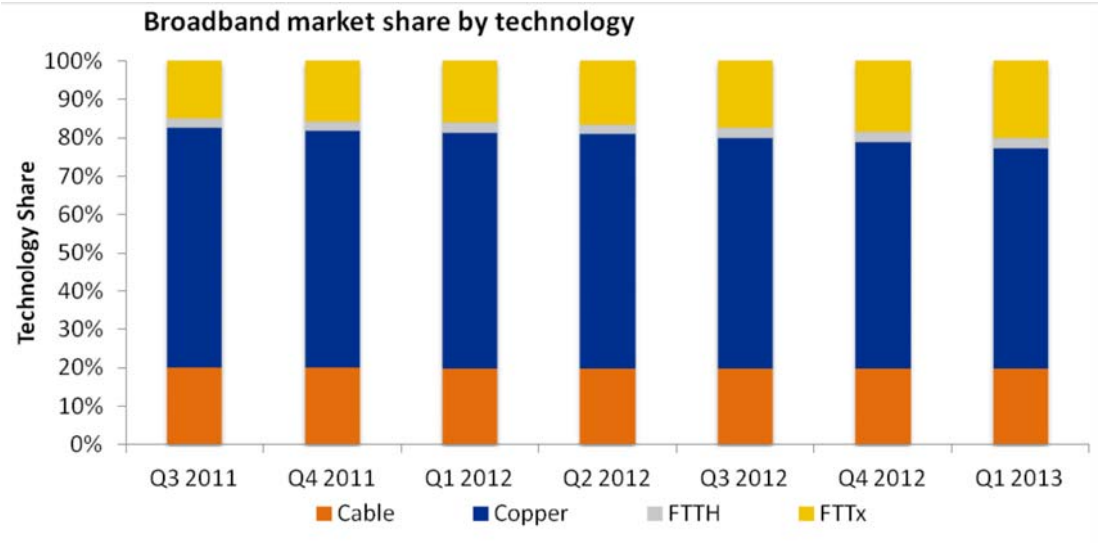


Figura 1.2: Divisão do mercado por tecnologia no mundo.
Extraído de: Point Topic, "*World Broadband Statistics – Q1 2013*,Point Topic World Broadband Statistics".

1.2 OBJETIVOS

Este estudo fornece uma metodologia de planejamento de distribuição de estações base de acordo com a área de cobertura. Além disso, neste trabalho é investigada uma maneira eficiente de fornecer cobertura através de *small cells* aos usuários móveis *indoor* respeitando o crescimento de consumo de potência do *backhaul*.

O objetivo principal deste trabalho é composto por cinco passos de uma metodologia de planeamento de redes heterogêneas. No primeiro passo é considerado um modelo de tráfego móvel genérico, capaz de fornecer a demanda de tráfego *indoor* esperado para cenários silvestres, rural, suburbano, urbano e denso urbano. Em seguida, é apresentado um modelo para dimensionamento de cidades, de acordo com a demanda e a população. No terceiro passo é apresentada a infraestrutura *wireless* necessária para suprir a necessidade dos usuários. Depois, é introduzida uma solução baseada em diferentes alternativas de arquiteturas *backhaul* para transmitir as requisições de tráfego agregadas pelas *smallcells*. Por último, o consumo energético da rede é avaliado de acordo com o tipo de tecnologia e acesso ao meio e *backhaul* utilizado.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho se estende por cinco capítulos. No capítulo I é introduzido o contexto em que o trabalho foi desenvolvido, as principais motivações, trabalhos relacionados e os objetivos esperados ao final. No capítulo II são abordadas as características, tipos e arquiteturas de *backhaul* e *small cells*. No capítulo III é apresentada a metodologia adotada, bem como os modelos matemáticos propostos para esta pesquisa. No capítulo IV é detalhado o cenário de estudo para avaliar o backhaul e small cells em relação ao consumo de energia e os resultados obtidos. Por fim, o capítulo V ressalta os principais obejtivos alcançados por este trabalho, discutindo detalhadamente os resultados e as conclusões.

CAPÍTULO II

REDE DE *BACKHAUL* E *SMALL CELL*

2.1 REDE *BACKHAUL*

As redes *backhaul* móveis (*mobile backhaul*, MBH) provêm às redes móveis conexões entre os elementos das redes localizados em diferentes posições geográficas; portanto nenhuma rede móvel existe sem um MBH associado. A principal tarefa da rede MBH é conectar a estação base (BS) ao núcleo da rede. Geralmente a rede MBH é representada como uma ligação entre estes dois pontos, mas na prática é mais complexo. Devido a essa complexidade, em [12] é proposto uma representação genérica da arquitetura do MBH separada por segmentos, como mostrado na Figura 2.1. Os três elementos (ou segmentos) principais dessa arquitetura são o escritório central (*central office*, CO), ponto de convergência local (*hub site*, HS) e as células locais (*cell site*, CS). Estes elementos são interligados pela rede de transporte que pode ser própria da operadora ou alugada.

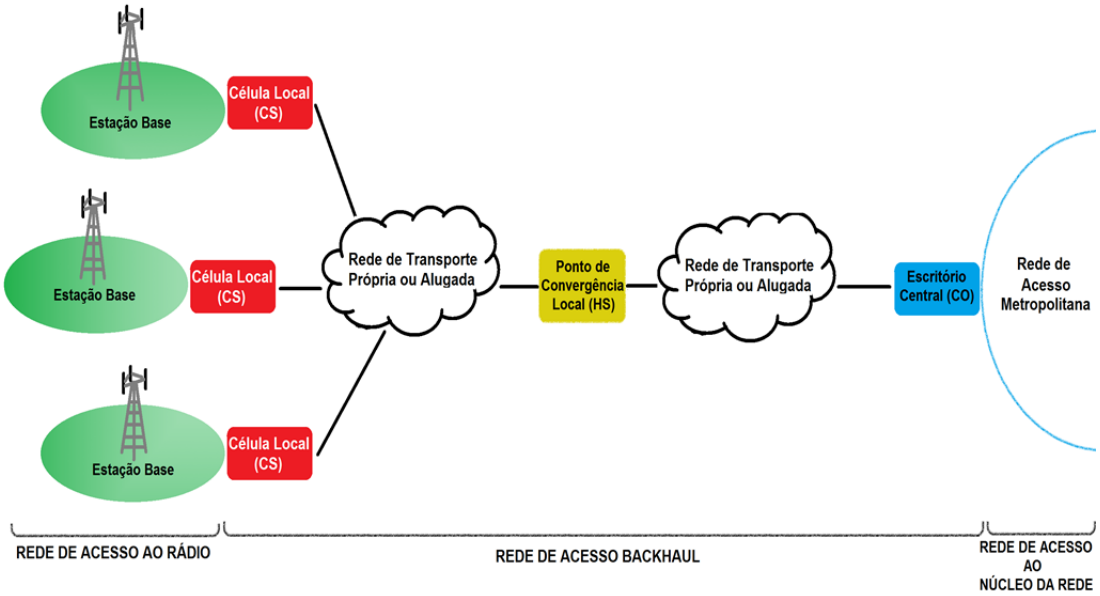


Figura 2.1: Arquitetura genérica de rede móvel *backhaul*.

- **Escritório Central (CO):** CO ou ponto de presença (*point of presence*, POP) é uma instalação de comutação e comunicação na rede pública. O CO pode ser localizado sobre o anel da rede de acesso metropolitana (*Metro Area Network*, MAN), ou seja, um ponto do anel da MAN ou um enlace direto para o núcleo da rede metropolitana. Além disso, sua principal funcionalidade é abrigar uma série de *switches* complexos que estabelecem conexões temporárias durante o tempo de conexão entre um assinante da linha e a Internet [13] e agregar/distribuir o tráfego da rede.

- **Ponto de Convergência Local (HS):** O HS refere-se ao patrimônio de acesso à telecomunicação que são representados por cabines (*cabinets*) localizadas nas vizinhanças ou parques empresariais. Este segmento serve a muitos assinantes e usualmente consiste de cabines – internas (*indoor*) ou externas (*outdoor*) – ou de gabinetes, que englobam dispositivos ópticos e/ou equipamentos eletrônicos. A função dos equipamentos deste segmento é distribuir o tráfego *downstream* do CO em direção aos clientes e/ou agregar o tráfego *upstream* dos clientes para encaminhar ao CO [13].
- **Célula Local (CS):** CS refere-se ao patrimônio de telecomunicação responsável por agregar e distribuir o tráfego de uma ou mais estações base [12]. Os equipamentos do CS podem estar próximos ou afastados das estações. A complexidade da infraestrutura aumenta à medida que a estação base necessita cobrir células maiores e atender uma maior quantidade de assinantes.

Nos segmentos do *backhaul* são desempenhadas as funções de agregação, comutação e/ou roteamento. Para a comunicação entre os segmentos podem ser adotados diversos tipos de tecnologia de acesso. Aliás, a classificação do MBH é dada em função das escolhas das tecnologias de acesso. Inicialmente abordaremos um pouco a cerca dos meios de acesso interessante para esta pesquisa e posteriormente apresentaremos a classificação do MBH em função destas tecnologias.

2.1.1 TECNOLOGIA DE ACESSO

Tradicionalmente, as operadoras de redes móveis escolhem entre micro-ondas, linhas de cobre e/ou fibras como meio de acesso para satisfazer as necessidades do *backhaul*. Contundo, em termos de consumo de energia, apenas fibra e cobre são opções interessantes para transportar o tráfego *backhaul* das *small cells* [6]. A seguir estas tecnologias serão abordadas.

2.1.1.1 Fibra Óptica

A tecnologia de comunicação via fibra óptica é a tecnologia do futuro para o *backhaul* em virtude de oferecer alta capacidade às redes em longo alcance, além de outras vantagens [8]. Contudo, pesa contra esta tecnologia a quantidade de fibra instaladas ao redor do mundo e o alto custo e o tempo necessário de instalação, principalmente, em cidades populosas [11].

Dentre as soluções em fibra óptica, a rede óptica passiva (*passive optical network*, PON) é a solução mais promissora e popular para *backhaul* de redes móveis devido ao baixo consumo de energia e proporcionar alta capacidade por assinante a baixo custo operacional.

A) Rede Óptica Passiva (PON)

A PON é a candidata promissora para o futuro da rede de acesso devido à simplicidade, transparência e baixo consumo de energia. Esta solução é capaz de fornecer alta capacidade para os usuários a um preço operacional relativamente baixo. A PON [14] é um conjuto de tecnologias padronizadas pela ITU-T e IEEE, embora seja originalmente criado pelo grupo de trabalho *Full Service Access Network* (FSAN). PON é uma infraestrutura convergente que pode transportar múltiplos serviços, como *Plain Old Telephony Service* (POTS), voz sobre IP (VoIP), dados, vídeo e/ou telemetria, em que todos estes serviços são convertidos e encapsulados em um único tipo de pacote para transmitir sobre a fibra óptica. Em [15] [16] [17]. A PON consiste de três partes principais, como ilustrado na Figura 2.2: terminação de linha óptica (*optical line termination*, OLT), unidade de rede óptica (*optical network unit*, ONU) e rede de distribuição óptica (*optical distribution network*, ODN).

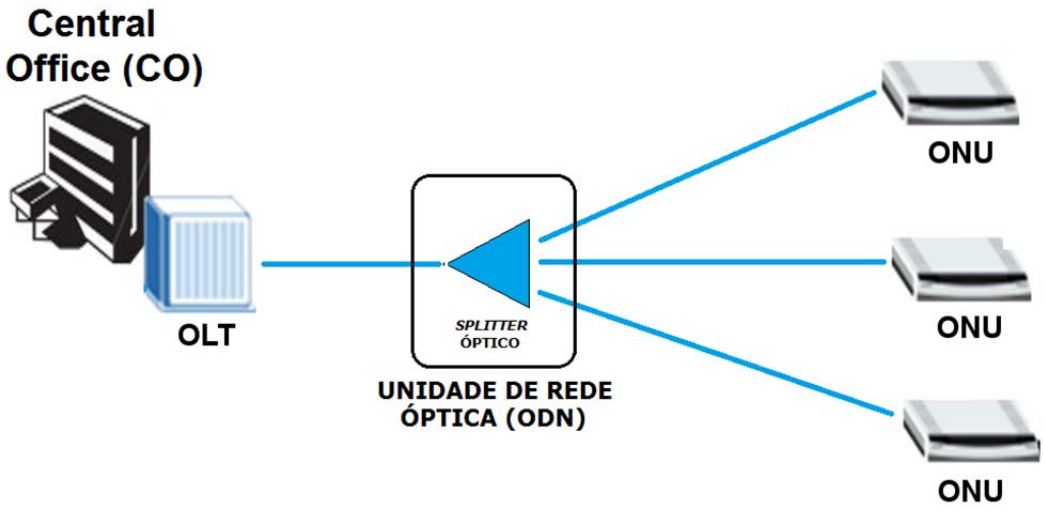


Figura 2.2: Arquitetura básica da rede óptica passiva (PON)

O OLT é localizado no CO; este equipamento serve como ponto de partida (*downstream*) e de chegada (*upstream*) do tráfego PON na rede de acesso. Este equipamento provê a interface entre a PON e o núcleo de rede. ONU é localizado próximo ao usuário, ou seja, no segmento CS. Este equipamento provê a interface de serviço para o usuário final, ou seja, é capaz de converter o protocolo PON nas unidades de dados de protocolo (*protocol data unit*, PDU) utilizado pelo assinante. Já o ODN em PON interliga o OLT às ONUs através de fibras ópticas e *splitters* ópticos passivos. Os *splitters* são dispositivos que atuam dividindo a potência óptica de um caminho de fibra em N caminhos. A quantidade de caminhos é dada pelo fator de divisão do dispositivo *splitter* que pode variar de 2 a 64, mas são tipicamente adotados os fatores 8, 16 e 32. O ODN usualmente forma uma estrutura de árvore com o OLT como raiz da árvore e os ONUS como as folhas da árvore.

Existem dois tipos principais de padrões PONs dependendo do esquema de multiplexação de dados. O padrão popular atual da tecnologia PON é a multiplexição de divisão por tempo (*time division multiplexing*, TDM), onde o tráfego de/para múltiplos ONUs é multiplexado em comprimentos de ondas de *upstream*/*downstream*. O segundo tipo é

multiplexação de divisão por comprimento de onda (*wavelenght division multiplexing*, WDM) PON [18]. WDM PON usa múltiplos comprimentos de ondas para prover largura de banda para os ONUs, enquanto o OFDMA (*orthogonal frequency-division multiple access*) PON emprega múltiplas portadoras orthogonais para transmitir tráfego de/para ONUs.

Os principais sistemas do tipo TDM PON são a Ethernet PON (EPON definida por IEEE 802.3ah), 10G-EPON (definida por IEEE 802.3av) e Gigabit PON (GPON definida por ITU-T G.984). Os padrões EPON e 10G-EPON se aproveitam do padrão consolidado Ethernet, possibilitando fácil comunicação na última milha. EPON e 10G-EPON são capazes de transmitir com taxas simétricas de 1 Gbps e assimétrica de 10 Gbps e 1 Gbps em *downstream* e *upstream*, respectivamente. O padrão GPON tem sido amplamente utilizado pelo mundo; este padrão permite transmitir a taxas máximas de 2.5 Gbps e 1.25 Gbps em *downstream* e *upstream*, respectivamente.

O principal sistema do tipo WDM PON é o 10G-PON (XG-PON), definido em ITU-T G.987. Este padrão é semelhante ao GPON, porém transmite mais comprimentos de ondas sobre uma mesma fibra; nesse padrão as taxas de transmissão máximas são 10 Gbps e 2.5 Gbps em *downstream* e *upstream*, respectivamente [19] [20].

2.1.1.2 Cobre

Com aproximadamente 1,3 bilhões de conexões via linhas telefônicas de cobre em todo mundo [21], o cobre é o meio de acesso mais difundido e com maior penetração residencial. Além do que é o meio de acesso mais maduro. O principal *gap* desse meio de acesso é a capacidade de transmissão limitada e as perdas em função da distância [22]. O cobre tem sido utilizado como *backhaul* nas gerações anteriores dos serviços móveis (por exemplo, 2G e 3G). Apesar de atualmente o cobre ser desconsiderado como opção *backhaul* para redes móveis atuais, este ainda é uma opção atrativa como *backhaul* para cenários *indoor*, enquanto as soluções de *backhaul* de maior capacidade de tráfego ainda avançam em direção às instalações dos assinantes.

Atualmente, o padrão de maior destaque sobre meio físico de cobre é a tecnologia *Digital Subscriber Line* (DSL). O DSL opera sobre linhas de cobre, originalmente para atender POTS, para transmissão de dados. Esta tecnologia é usada para transmissão de acesso para prover serviços IP para usuários domésticos de computador, mas também é muito comum como tecnologia de *backhaul* para redes móveis. O DSL utiliza tipicamente um par trançado de cobre, mas algumas variantes do DSL podem também combinar mais pares, por exemplo, o VDSL2 *bonding* pode utilizar oito pares para alcançar taxas de 114 Mbps em *downstream* em distâncias de até 1,5 Km [23]. O alcance e a capacidade máxima das diferentes tecnologias xDSL varia de acordo *loop rate*, condições de ruído, modulação e codificação. As principais variantes de xDSL que podem atender a demanda *indoor* são: *Very high bit rate Digital Subscriber Lin*e (VDSL) e VDSL2.

O *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL) é a tecnologia mais popular na família xDSL. Existem diferentes padrões na Europa e América do Norte. Utiliza a mesma linha telefônica POTS, porém um filtro DSL permite a mesma linha de cobre ser usada para transmissão de voz e dados. A capacidade oferecida é assimétrica, sendo que o padrão ANSI

T1.413 Issue 2 e ITU G.992.1 Annex A oferecem 8/1 Mbps e 12/1,3 Mbps de *downlink*/*uplink*, respectivamente.

O ADSL evolui para ADSL+, que posteriormente evoluiu para ADSL2+. O ADSL2+ possui capacidade de 24 Mbps e 3,5 Mbps de *downlink* e *uplink*, respectivamente [20].

O VDSL permite transmissão simétrica e assimétrica sobre par trançado de cobre. Em transmissão simétrica, o VDSL alcança taxa de transmissão de 13 a 26 Mbps em função da distância (300m e 1500m) [24]. Enquanto que em transmissão assimétrica são alcançadas 52 Mbps e 16 Mbps de *downlink* e *uplink*, respectivamente [20]. O VDSL é comumente usado como extensão da fibra, compondo uma arquitetura *backhaul* híbrida [20] [25]. A tecnologia VDSL faz uso de largura de banda de até 13 MHz e quanto mais próxima desta largura mais o enlace é suscetível à interferência. Sua aplicação é conveniente tanto para uso residencial quanto corporativo.

O VDSL2 é a tecnologia mais rápida da família xDSL em uso atualmente. Sua elaboração fora pensada para agregar as melhores características da tecnologia ADSL e VDSL. Possui suporte a transmissão simétrica e assimétrica de dados. Em conexões assimétricas, o VDSL2 pode alcançar taxa de transmissão de 100 Mbps em função da distância (300 a 1500 metros) e da quantidade de pares trançados de cobre (de 2 a 8) [27], utilizando largura de banda de 30 MHz [7]. Devido a essa capacidade, o VDSL2 pode ser implantado em residências, dentro dos prédios e/ou cabines próximas ao equipamento do cliente, ou seja, nos segmentos CS e HS do *backhaul*, para atender a demanda das *small cells*.

Outra tecnologia da familia xDSL é o G.fast. O G.fast está sendo projetado para permitir taxas entre 150 Mbps e 1 Gbps – dependendo do comprimento do *loop* – para os assinantes localizados a distâncias inferiores a 250 metros do ponto de distribuição. Este padrão xDSL foi pensado para trabalhar em conjunto com a fibra, ou seja, *fiber-to-the-distriubuition point* (FTTDp). Esta tecnologia foi padronizada em abril (ITU-T 9700) e dezembro (ITU-T 9701) de 2014 e deve chegar ao mercado em 2015. Devido o padrão ser recente e ao pouco acesso aos documentos, esta tecnologia está fora do escopo desta pesquisa [26].

A topologia padrão de redes DSL é a estrela. Os equipamentos nas instalações do cliente (*customer premises equipment*, CPE) são baratos e pequenos enquanto que os equipamentos de agregação do tráfego, chamado de *Digital Subscriber Line Access Multiplexes* (DSLAM), são caros e fornecem de dezenas a centenas linhas de acesso. Geralmente os DSLAMs são armazenados em um gabinete protegido na rua próximo aos assinantes. Em cenários que exigem alta capacidade, o DSLAM se interliga com o equipamento no segmento CO através de enlace de fibra.

2.1.2 TIPO DE *BACKHAUL*

A classificação do *backhaul* depende da escolha da tecnologia de acesso ao meio, por exemplo, micro-onda, cobre e/ou fibra. As tecnologias de acesso escolhidas para compor o *backhaul* determinam quais equipamentos serão utilizados, por exemplo, tecnologias baseadas em PON utilizam OLTs e ONUs. Apesar de podermos combinar esses meios e gerar diversos tipos de *backhaul* híbridos, como FTTN, que é baseado em fibra e cobre na última milha. A

crescente demanda por dados móveis, que coloca pressão sobre a rede, conduz as operadoras a adotarem tecnologias de acesso de maior capacidade e confiabilidade. Portanto, por preencher tais requisitos, a fibra é a solução óbvia às operadoras. Contudo, as dificuldades de implantação e a pouca disponibilidade atual da fibra, principalmente em países em desenvolvimento como Brasil e Índia, forçam a adoção de soluções híbridas/heterogêneas em muitos casos. A tecnologia PON é a solução mais comum em *backhaul* de fibra. Esta solução é chamada comumente de *fiber-to-the-x* (FTTx), onde x denota o quão próximo a fibra está das instalações do assinante [13]. Dentre as possibilidades atuais destacam-se a *fiber-to-the-building* (FTTB), *fiber-to-the-curb* (FTTC), a qual também é conhecida como *fiber-to-the-cabinet* (FTTCab), e *fiber-to-the-home* (FTTH), ilustradas na Figura 2.3.

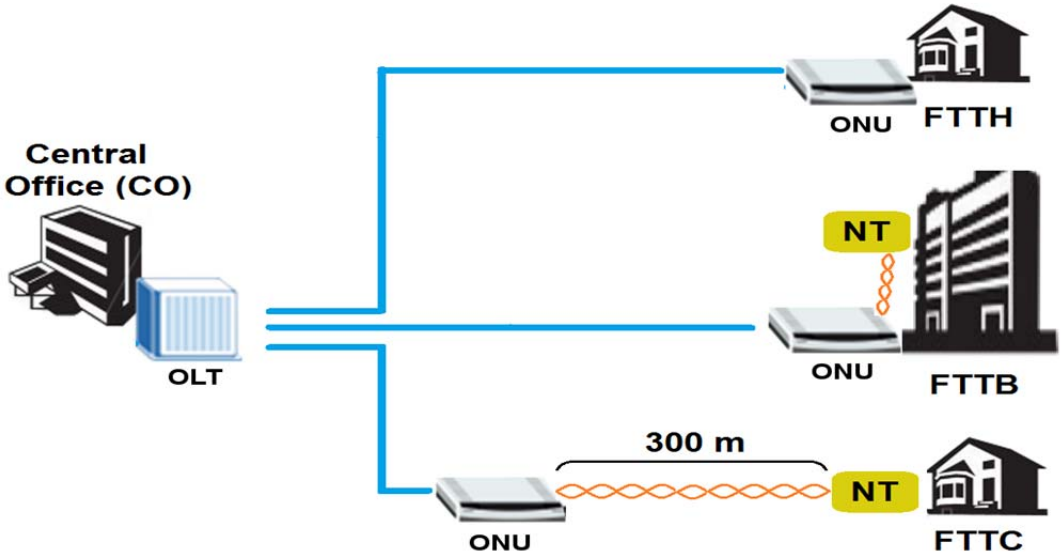


Figura 2.3: Arquitetura de rede *fiber-to-the-x* (FTTx).

- **FTTB** (*fiber-to-the-building* ou *fiber-to-the-business*)**:** Refere-se à implantação de fibra óptica do equipamento no CO até o equipamento localizado no prédio residencial, empresarial ou residencial/empresário.
- **FTTC** (*fiber-to-the-curb*) ou **FTTCab** (*fiber-to-the-cabinet*)**:** Refere-se à implantação da fibra óptica do equipamento no CO até o equipamento localizado no meio-fio/gabinete, que está até 300 m (1000 ft) de distância das instalações do assinante de banda larga fixa. Cabos coaxiais, cabeamento de par trançado de cobre (xDSL, por exemplo) ou outro meio de transmissão podem ser utilizados para comunicação do equipamento situado no meio-fio/gabinete até as instalações do cliente.
- **FTTH** (*fiber-to-the-home*)**:** Refere-se à implantação da fibra óptica do equipamento situado no CO até a casa do assinante. A diferença entre o FTTH e FTTB é que prédios tanto empresarial como residencial demandam mais largura de banda que usuários localizados em vizinhanças formadas por diversas casas distribuídas. Além disso, em caso de prédios, a fibra chegaria a cada apartamento no FTTH enquanto que em FTTB a fibra chegaria a um ponto de distribuição interno. Sob o ponto de

vista econômico, a implantação de rede *backhaul* baseada em FTTB recupera o investimento mais rapidamente do que na FTTH.

Cada arquitetura *backhaul* deve considerar certos serviços prioritários no processo de instalação. Na Tabela 2.1 são listadas as categorias de serviços que cada arquitetura *backhaul* deve priorizar.

Tabela 2.1: Serviços prioritários por tipo de arquitetura *backhaul*.

	FTTB			
Serviços	Residencial	Empresarial	FTTC	FTTH
Assimétrico	SIM	NÃO	SIM	SIM
Simétrico	SIM	SIM	SIM	SIM
POTS	SIM	SIM	SIM	SIM
Backhaul xDSL	NÃO	NÃO	SIM	NÃO
Linha Privada	NÃO	SIM	NÃO	NÃO

2.2 *SMALL CELL*

Small cells, ou pequenas células, é um termo utilizado para denominar estações bases de baixo consumo de energia que operam em espectro de frequência licenciado (como os padronizados pelos fóruns 3GPP, 3GPP2 e WiMAX) ou não licenciado (como Wi-Fi) oferecendo cobertura de banda larga móvel, tanto internamente quanto externamente. Sua cobertura varia de poucos a algumas centenas de metros [7]. As principais caraterísticas e benefícios das pequenas células são a facilidade de instalação, escalabilidade, custo-eficiência, autoconfiguração e auto-otimização. Podemos classificar as pequenas células pelos critérios do raio de cobertura celular e ambiente de instalação em: *Microcell*, *Picocell* e *Femtocell* [27].

As microcélulas (*Microcells*) são estações base instaladas em ambiente *outdoor*, servindo como escoamento (*offloading*) do tráfego móvel, com intuito de melhorar a cobertura celular quando a cobertura da *Macrocell* não é suficiente para atender as necessidades dos usuários [27]. Esta categoria de *small cell* possui raio de cobertura de até 2 km e é instalada no topo de prédios, postes de iluminações, muros e etc [7]. As picocélulas (*Picocells*) são estações base instaladas preferencialmente em ambiente *indoor* para suprir a demanda por banda larga móvel de empresas e áreas públicas, por exemplo, *shoppings* e grandes corporações [27] [7]. Contudo, em certos casos, a *Picocell* também pode ser uma solução *outdoor* para *offloading* do tráfego móvel. Estas estações possuem raio de cobertura de até 200 metros e são instaladas em tetos, paredes laterais, postes de iluminação e etc. [7].

As *Femtocells* são pontos de acesso à rede celular, focadas em atender a demanda de banda larga móvel de usuários internos, como residências e pequenos escritórios. Devido a sua aplicação, as *Femtocell* são conhecidas como "*home base station*", *home* NodeB (HNB para 3G) ou *home* eNodeB (HeNB para 4G). A *Femtocell* se conecta a operadora móvel através de tecnologias de banda larga (como xDSL, *cable modem*, Ethernet, fibra óptica) e opera em baixa potência nas frequências licenciadas utilizadas pela própria operadora móvel, oferecendo cobertura celular 3G ou 4G [7] [27] [28]. Devido a esse nível de potência, a *Femtocell* tem raio de cobertura bastante reduzido, cerca de 10 m. Além disso, esta categoria de estação base possui baixíssimo consumo de energia. As *Femtocells* podem ser categorizadas como modelo de acesso convencional e *wireless over cable*.

2.2.1 *FEMTOCELL* CONVENCIONAL

A *Femtocell* convencional (FemtoC) é um dispositivo *plug-and-play* de ponto de acesso a rede móvel que incorpora funcionalidades de uma típica estação base, como agendamento (*scheduling*), processamento de sinal de banda base e geração de frequência de rádio. Como dispositivo *plug-and-play*, a FemtoC é capaz de realizar autoconfiguração e auto-otimização. Dessa forma, cada FemtoC é considerada como dispositivo independente, como ilustrado na Figura 2.4. Contudo, devido a FemtoC funcionar de maneira independente, este equipamento apresenta diversos desafios em relação a interferência, sincronização, segurança e gerenciamento de mobilidade [28]. Além disso, esses desafios se acentuam à medida que se populariza o uso desta tecnologia, pois quanto maior a rede maior a complexidade de gerenciamento devido a independência de gerenciamento entre os nós (FemtoC).

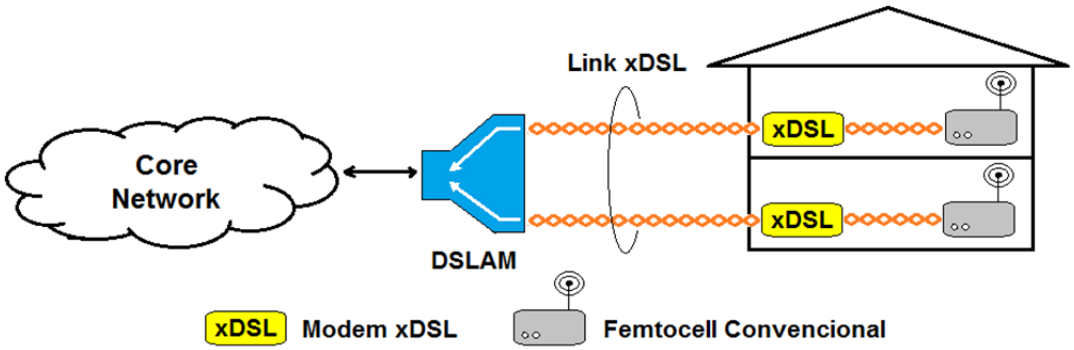


Figura 2.5: Sistema *Femtocell* convencional com HeNBs sobre conexões xDSL.

2.2.2 *FEMTOCELL WIRELESS OVER CABLE*

Em virtude dos problemas existentes na arquitetura FemtoC, Gambine [29] propôs uma nova arquitetura de *Femtocell* chamada de *Femtocell Wireless over Cable* (FemtoWoC). A FemtoWoC adota controle e centralização de múltiplas células visando mitigar os principais problemas de interferência e gerenciamento existentes na arquitetura FemtoC. Como mostra a Figura 2.5, esta nova arquitetura possui duas estruturas básicas que se comunicam por um meio cabeado (como cabo telefônico, coaxial, linhas de energia ou fibra óptica): conversor

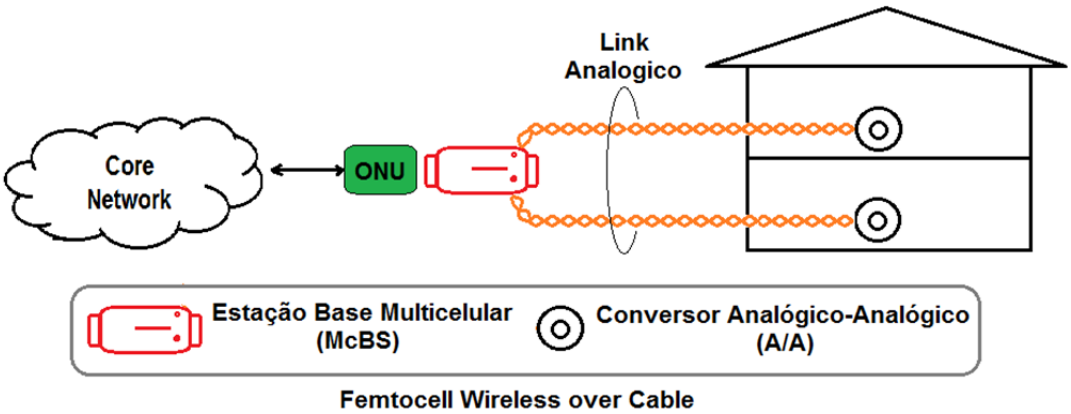


Figura 2.4: Sistema *Femtocell wireless over cable* (FemtoWoC).

analógico-analógico (A/A) e estação base multicelular remota (*remote multi-cell base station*, McBS). Estas estruturas dividem as funcionalidades da estação base.

O adaptador A/A é um dispositivo de duas vias de amplificação-encaminhamento capaz de retransmitir o fluxo analógico bidirecional para fazer a interface entre a antena e a infraestrutura de cabo disponível. Estes dispositivos são instalados nas residências e nos escritórios, ou seja, ocupam o local de instalação das *Femtocells* tradicionais. O McBS é responsável por (re) configurar os conversores A/A e pela execução de processamento de banda base dos sinais *uplink e downlink* de várias *Femtocells*. Além disso, o McBS define a sincronização/temporização de todos os conversores A/A, configurando-os para atuar como sistema distribuído de antenas (*distribution antena system*, DAS) a fim de mitigar os problemas de interferências. O McBS pode ser instalado em prédios, gabinetes nas ruas ou centrais locais.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa avalia quantitativamente o consumo energético da rede móvel, considerando diferentes configurações de *small cells* e *backhaul*. A metodologia consiste do modelo matemático para estimar o consumo de energia na rede móvel. A grande contribuição desse modelo é a possibilidade de calcular o consumo de energia por segmento da rede. Esse modelo é dividido nos seguintes passos: modelo de tráfego móvel, dimensionamento da cidade, dimensionamento da rede móvel, dimensionamento do *backhaul* e cálculo de consumo energético. A Figura 3.1 ilustra a relação entre as etapas do modelo.

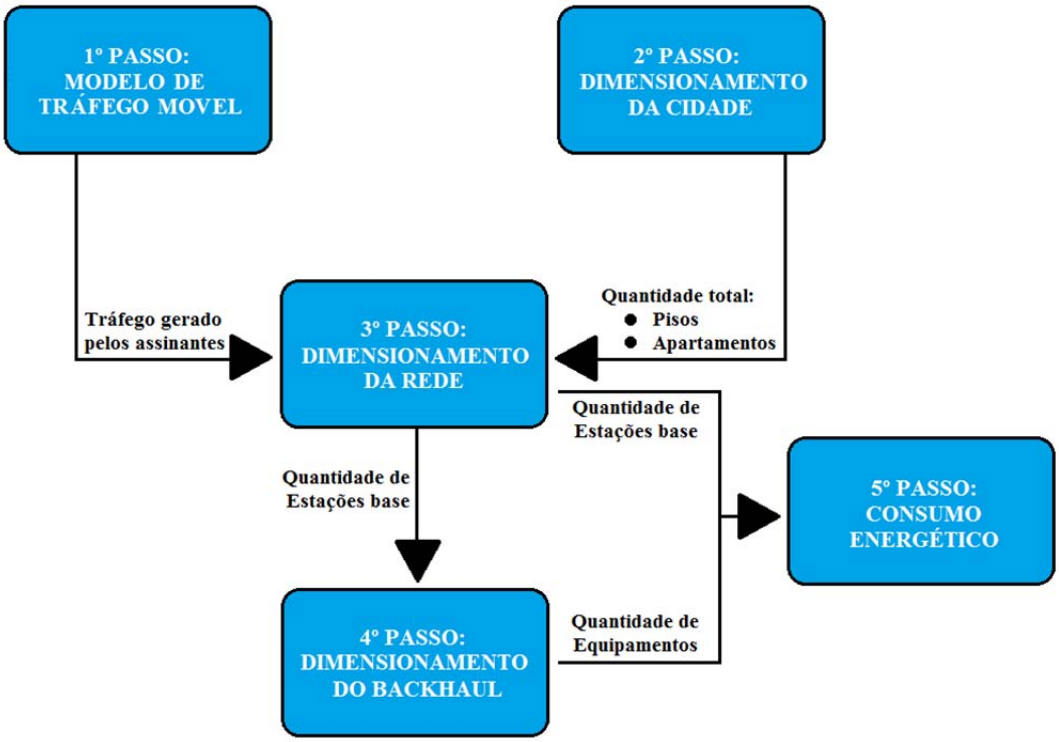


Figura 3.1: Esquema para avaliação do consumo energético gerado pela rede móvel.

O primeiro passo é o modelo de tráfego móvel. Nesse passo é estimada a média do tráfego gerado pelos assinantes da rede móvel durante o horário de pico. Essa estimativa é obtida a partir do cenário, perfil e distribuição de usuários e equipamentos. A previsão da demanda de tráfego é abordada com mais detalhes na seção 3.2.

O segundo passo é o dimensionamento da cidade. Esse passo estabelece a disposição da cidade a fim de determinar a quantidade máxima de possíveis locais para instalação das *small cells*. Para isto, este bloco do modelo utiliza informações das dimensões da cidade, configuração dos quarteirões e prédios. O dimensionamento da cidade é detalhado na seção 3.3.

O terceiro passo é o dimensionamento da rede móvel. Essa etapa consiste em estimar a quantidade de estações bases que serão necessárias para atender a demanda dos assinantes.

Essa estimativa depende da demanda de tráfego exigido pelos assinantes e as quantidades de apartamentos e pisos, que são possíveis locais de instalação de *small cells*. Esses dados são obtidos na etapa um e dois, respectivamente, do modelo. Além disso, essa etapa considera o parâmetro capacidade máxima em *downlink* oferecida pela estação base. O dimensionamento da rede móvel *wireless* é abordado na seção 3.4.

O quarto passo é o dimensionamento do *backhaul*. Nesse passo é estimada a quantidade de equipamentos necessária para atender a rede móvel em dada arquitetura *backhaul*. Portanto, essa etapa é dada em função do dimensionamento da rede móvel, estimada no passo anterior, e do tipo de tecnologia de acesso adotado no segmento *backhaul*. O dimensionamento do *backhaul* é detalhado na seção 3.5.

E, por fim, o quinto passo é a estimativa do consumo de energia da rede. Nessa etapa é apresentado o modelo de consumo energético da rede considerando tanto as estações bases quanto à arquitetura *backhaul*. Essa etapa é abordada na seção 3.6.

3.2 MODELO DE TRÁFEGO MÓVEL

O modelo de tráfego móvel fornece a estimativa da média da demanda de tráfego exigida pelos assinantes em longo prazo e larga escala. Essa estimativa determina se a infraestrutura da rede móvel atende ou não os assinantes em dada região. O modelo utilizado nesta pesquisa é uma modificação do modelo de tráfego em larga escala e de longo prazo definido em [31]. Diferente do modelo proposto em [31] que só considera o tempo e o tipo de dispositivo, essa adaptação propõem analisar o tráfego em relação ao tempo de estudo, zonas da cidade, ambiente em que o assinante faz uso da rede e o tipo de dispositivo que o assinante utiliza para acessar a rede. O tempo pode ser dado em qualquer unidade. A cidade pode ser classificada em zona silvestre, rural, suburbana, urbana e urbana densa dependendo da densidade populacional. O ambiente pode ser classificado em *indoor* e *outdoor*. Por fim, o dispositivo pode ser qualquer dispositivo que seja capaz de acessar a rede móvel, por exemplo, *smartphones*, *tablets* e etc. A demanda média de tráfego gerado pelos assinantes em dada área é representado por $R(t,z,a,d)$, dado em $Mbps\ /\ km^2$, e é obtida pela equação (1).

$$R(t,z,a,d) = r(t,d)s(t,z,a,d) \tag{1}$$

Na qual *"t"*, *"z"*, *"a"* e *"d"* são variáveis discretas que representam o tempo, zona, ambiente e dispositivo de acesso à rede, respectivamente. O modelo utiliza as seguintes variáveis de estudo: $r(t,d)$ e $s(t,z,a,d)$. Sendo que $r(t,d)$ representa a média da taxa de dados por assinante, dado em *Mbps/assinaturas*. Por outro lado $s(t,z,a,d)$ representa a densidade de assinantes, dado em *assinaturas/km²*. Apesar da demanda de tráfego depender dessas variáveis, podemos obter os perfis da demanda média de tráfego em horário de pico (cenários) ao longo do tempo pelo somatório em relação à "z", "a" e "d" na equação (1). Dessa maneira, a expressão obtida seria a seguinte: $R(t) = \sum_z \sum_a \sum_d r(t,d)s(t,z,a,d)$

Neste estudo, são considerados três tipos de dispositivos de acesso à rede: *Mobile PC*, *tablet* e *smartphone*. Assim como em [31], inicialmente é considerado que o *mobile PC* gera duas e oito vezes mais tráfego que o *tablet* e *smartphone*, respectivamente. Ademais, os

assinantes são agrupados em dois grupos em função da demanda exigida pelo usuário: usuários comuns (ordinários) ou frequentes. Assume-se em [31] que a demanda exigida pelos usuários ordinários é equivalente a 1/8 da demanda exigida pelos usuários frequentes. A média ponderada da taxa de dados por assinante para dado dispositivo em certo tempo é definido como:

$$r(t,d) = \frac{h(t)r(t,d)^{heavy} + [100 - h(t)]r(t,d)^{ordinary}}{100} \tag{2}$$

Sendo que *h(t)* é o percentual de assinantes que são do grupo de usuários frequentes para dado tempo t. Em [31], *h(t)* varia de 10% a 30% entre os anos de 2015 e 2030. Considerando que *h(t)* cresce linearmente entre os anos de 2015 e 2030 e os dados fornecidos em [31] pode-se extrair a seguinte expressão para *h(t)*.

$$h(t) = \frac{t}{75} - 26.767 \tag{3}$$

Na qual $r(t,d)^{heavy}$ e $r(t,d)^{ordinary}$, dados em *Mbps*, na equação (2) representam a média de taxa de dados exigida pelo assinante frequente e ordinário, respectivamente, utilizando o dispositivo *"d"*. $r(t,d)^{heavy}$ é calculado pela equação (4). Já $r(t,d)^{ordinary}$ foi mencionado previamente que é igual a 1/8 de $r(t,d)^{heavy}$, conforme informado em [31].

$$r(t,d)^{heavy} = r(t_0,d)^{heavy}(1 + r_{tx}(d))^{(t-t_0)} \tag{4}$$

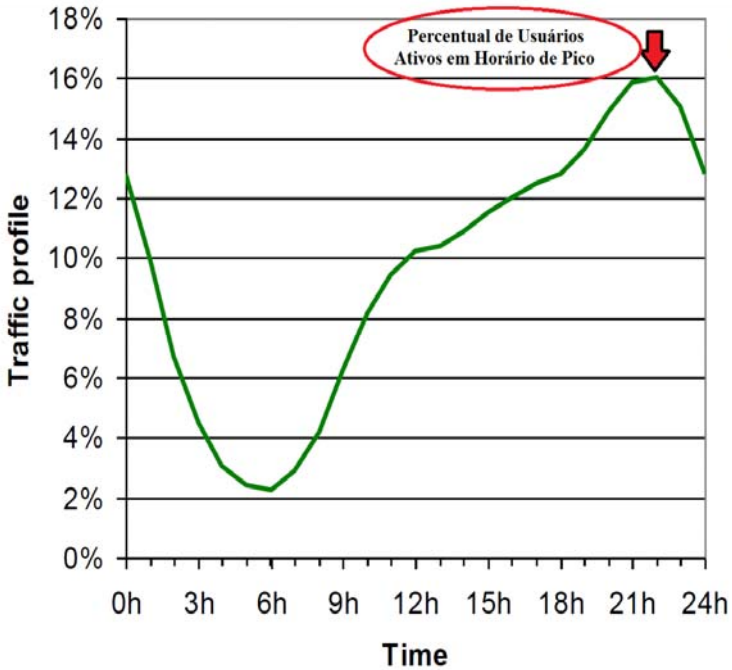
Sendo t_0 o tempo inicial do estudo e $r(t_0,d)^{heavy}$ a taxa de dados exigida pelo assinante frequente inicialmente. E $r_{tx}(d)$ é a taxa de crescimento da demanda de dados do grupo de usuários frequente que utilizam o dispositivo *"d"*. A demanda exigida pelos usuários frequentes, consequentemente os ordinários também, é modelada exponencialmente devido o crescimento real de tráfego de dados no mundo também ser exponencial, como indica [3] [4] [5]. Para obter esse comportamento, $r_{tx}(d)$ deve ser um valor positivo. Além disso, esta modelagem foi projetada para permitir testar diferentes perfis de crescimentos de demanda de tráfego para usuários frequentes, desde as mais conservadoras às mais extrapoladoras. Depois de calcular o $r(t,d)$, resta calcular a densidade de assinantes para obter a demanda média de tráfego gerado pelos assinantes na rede. $s(t,k,z,e)$, em *assinaturas/km²*, que é expressa pela equação (5).

$$s(t,z,a,d) = \frac{\eta(t,z,a,d)}{A(z,a)} \tag{5}$$

Nesta, $A(z,a)$ é o tamanho da área da cidade correspondente ao ambiente *"a"* na zona *"z"*e $\eta(t,z,a,d)$ é a quantidade de assinaturas de dispositivo *"d"* situado no ambiente *"a"* localizado na zona *"z"*. E $\eta(t,z,a,d)$ é dado pela equação (6).

$$\eta(t,z,a,d) = \alpha(T)\gamma(d)\varphi(z)\beta(a)p(t)s_p(t) \tag{6}$$

Sendo que $\alpha(T)$ representa a variação diária europeia do percentual de usuários ativos ao longo do tempo T, dado em hora. Em [31] é apresentado o comportamento de $\alpha(T)$ ao longo do dia e também provê o valor de referência para o tráfego em horário de pico. Adotando o tráfego de pico como referência, o $\alpha(T)$ é considerado igual a constante $\alpha_{\max}$, que é em média igual a 16% de usuários ativos, como ilustrado na Figura 3.2. Na equação $\gamma(d)$, $\varphi(z)$ e $\beta(a)$ representam o percentual de assinaturas para dispositivo *"d"*, zona *"z"* e ambiente *"a"*, respectivamente. Sendo que $\gamma(d)$ é igual a 25%, 5% e 50% para *mobile PC*, *tablet* e *smartphone*, respectivamente, de acordo com [31]. E $p(t)$ e $s_p(t)$ representam a população e a quantidade de assinaturas por pessoas para dado tempo. Eles são obtidos pela equação (7) e (8).



t	α(t)
0h	13%
1h	10%
2h	7%
3h	4%
4h	3%
5h	2%
6h	2%
7h	3%
8h	4%
9h	6%
10h	8%
11h	9%
12h	10%

t	α(t)
13h	10%
14h	11%
15h	12%
16h	12%
17h	12%
18h	13%
19h	14%
20h	15%
21h	16%
22h	16%
23h	15%
24h	13%

Figura 3.2: Ilustração do perfil médio do tráfego de dados $\alpha(T)$ na Europa. Extraído de [3].

$$p(t) = p(t_0)(1+tx_p)^{(t-t_0)} \tag{7}$$

$$s_p(t) = s_p(t_0) + g_{s_p}(t-t_0) \tag{8}$$

Considerando que tx_p e g_{s_p} são as taxas de crescimento populacional e da quantidade de assinaturas por pessoa, respectivamente. Assim como $r(t,d)^{heavy}$, a quantidade populacional

foi modelada de forma semelhante. Contudo, a população admite taxa de decrescimento populacional, ou seja, tx_p entre menos um e zero. Além disso, a equação pode crescer exponencialmente para tx_p positivo. E $p(t_0)$ é a população inicial dada pela equação (9).

$$p(t_0) = \sum_z \rho(z) A(z) \tag{9}$$

Sendo $\rho(z)$ a densidade populacional em dada área e $A(z)$ a área total para zona *"z"*. Em [31], $\rho(z)$ para zonas "silvestres", "rural", "suburbana", "urbana" e "urbana densa" na Europa são iguais a 25, 100, 500, 1000 e 3000 pessoas por km², respectivamente.

3.3 DIMENSIONAMENTO DA CIDADE

A cidade com área *A*, em *km²*, é dividida em *"z"* zonas, sendo, por sua vez, dividida em *"a"* ambientes. Para este estudo, a análise do ambiente *outdoor* é desconsiderada. Para simplificar, consideramos que a cidade é composta por N_b quarteirões, sendo que as dimensões do quarteirão são as mesmas, independente da zona. Por isso, a área do quarteirão é A_{block}, *em km²*, para qualquer zona. Dessa forma, a quantidade de quarteirões por zona, representada por $N_b(z)$, é dada pela equação (10).

$$N_b(z) = \frac{A(z)}{A_{block}} \tag{10}$$

Apesar dos quarteirões serem idênticos em dimensões para qualquer zona, a composição interna do quarteirão é diferente em relação à zona. Portanto, a quantidade de prédio por quarteirão é diferente. Da mesma forma, as caraterísticas dos prédios, tais como quantidade de piso e apartamentos, são diferentes para cada zona. Dessa forma, a quantidade de quarteirões, prédios por quarteirão, pisos por prédio e apartamentos por piso são representada por $N_b(z)$, $N_{bpb}(z)$, $N_{fpb}(z)$ e $N_{apf}(z)$. Após estas considerações, as quantidades de pisos e apartamentos para zona *"z"* são expressas pelas equações (11) e (12), respectivamente. Essas quantidades representam os possíveis locais de instalação de estação base *indoor*.

$$N_{pisos}(z) = N_b(z) * N_{bpb}(z) * N_{fpb}(z). \tag{11}$$

$$N_{apartamentos}(z) = N_{pisos}(z) * N_{apf}(z). \tag{12}$$

3.4 DIMENSIONAMENTO DA REDE MÓVEL

Para a instalação da rede móvel *indoor*, foi considerado a instalação de estações base *Femtocell* convencional (FemtoC) ou *Femtocell Wireless over Cable* (FemtoWoC). Cada FemtoC é um dispositivo autônomo que representa uma estação base e que são instalados por apartamento. Já a FemtoWoC é composto pela estação base multicelular remota (McBS) e conversor analógico-analógico (A/A) que são instalados no segmento agregador de tráfego dos conversores A/A (ou seja, *Cell Site*, CS) do *backhaul* e por piso de prédio, respectivamente. O conversor A/A é meramente um ponto de acesso, portanto compõem a parte *wireless* da rede, e não o *backhaul*. Apesar do conversor A/A não ser propriamente a estação base como a FemtoC, consideramos como tal para efeito de comparação.

A quantidade de estações base necessária em dada zona é determinada pelo mínimo entre a razão entre a capacidade requerida pelos usuários e da capacidade fornecida da rede e a quantidade máxima de estações na zona, como mostra a equação (13).

$$BS(t,b) = \sum_{z} \left\lceil \min\left(\frac{R(t,z)}{C_{dl}(b)}, N_{\max}(z,b) \right) \right\rceil \tag{13}$$

A variável independente *"b"* é o tipo de estação base utilizado na rede. E $R(t,z)$ e $C_{dl}(b)$ são a demanda de tráfego gerada na zona *"z"*, que pode ser obtida pela equação (1), e a capacidade máxima em *downlink* da estação base *"b"*. Caso $\frac{R}{C_{dl}} > N_{\max}$, a quantidade máxima requerida de estações base será abaixo da capacidade de instalação, assim respeitando a lógica de implantação. Contudo, se $\frac{R}{C_{dl}} < N_{\max}$, a zona teria instalado a quantidade máxima de estação base. Porém não seria o suficiente para atender a demanda por capacidade dos usuários. Portanto, a rede precisaria ser densificada, ou seja, seria necessário aumentar a capacidade de agregação das *small cells* ou propor nova solução.

3.5 INSTALAÇÃO DO *BACKHAUL*

Considerando a arquitetura genérica de *backhaul* apresentada no item 2.2, a quantidade de equipamentos necessários depende dos segmentos do *backhaul* e do tipo de tecnologia de acesso utilizada nesses segmentos. Nesta pesquisa são estudados cinco cenários, considerando a combinação de três tipos de *backhaul* e dois tipos de *small cells*. Os cincos cenários são (vide Figura 3.3):

- FemtoC: FTTC, FTTB e FTTH
- FemtoWoC: FTTC e FTTB

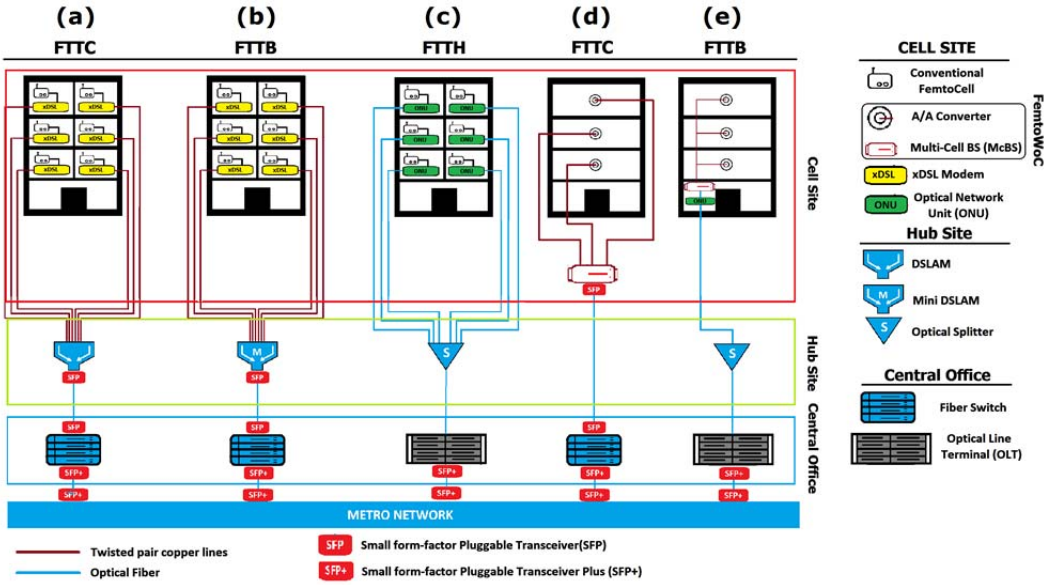


Figura 3.3: Arquitetura *backhaul*. (a) *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* VDSL2/FTTC; (b) *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* VDSL2/FTTB; (c) *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* FTTH; (d) FemtoWoC sobre rede *backhaul* FTTC; (e) FemtoWoC sobre rede *backhaul* FTTB.

3.5.1 ARQUITETURA 1: FTTC PARA FEMTOC BS

A solução *backhaul* FTTC para rede móvel baseada em FemtoC $(FTTC_{FemtoC})$, apresentada na Figura 3.4, é uma arquitetura híbrida que emprega a utilização de tecnologia de fibra e cobre. A fibra parte do núcleo da rede até o *hub site*, enquanto que o cobre parte desse segmento até em direção as femtocélulas convencionais. Cada FemtoC está conectada ponto a ponto com um modem xDSL via cabo de cobre, portanto esse modem é responsável por agregar o tráfego da estação base. Logo o modem xDSL é o equipamento atrelado ao segmento *Cell Site*. Assumi-se que esse par de equipamentos está localizado por apartamento. Dadas essas considerações, a quantidade de modens xDSL (N_{Modem}) é igual a quantidade de FemtoC, como denota a equação 14.

$$N_{\text{modem}}(t, FTTC_{FemtoC}) = BS(t, FemtoC) \tag{14}$$

Cada modem xDSL se comunicacom o DSLAM por meio de cabo de cobre. O tráfego agregado pelo modem xDSL é encaminhado a uma porta do DSLAM, localizado no HS, através de um enlace ponto a ponto de cobre. Para esta arquitetura os modens xDSL e DSLAM operam usando VDSL2 devido esta tecnologia oferecer taxas de transmissão de até 100 Mbps às FemtoC. Dessa forma, a quantidade de DSLAM é dada em função da relação entre a quantidade de portas que possui pela quantidade de modens xDSL, como mostra a equação (15).

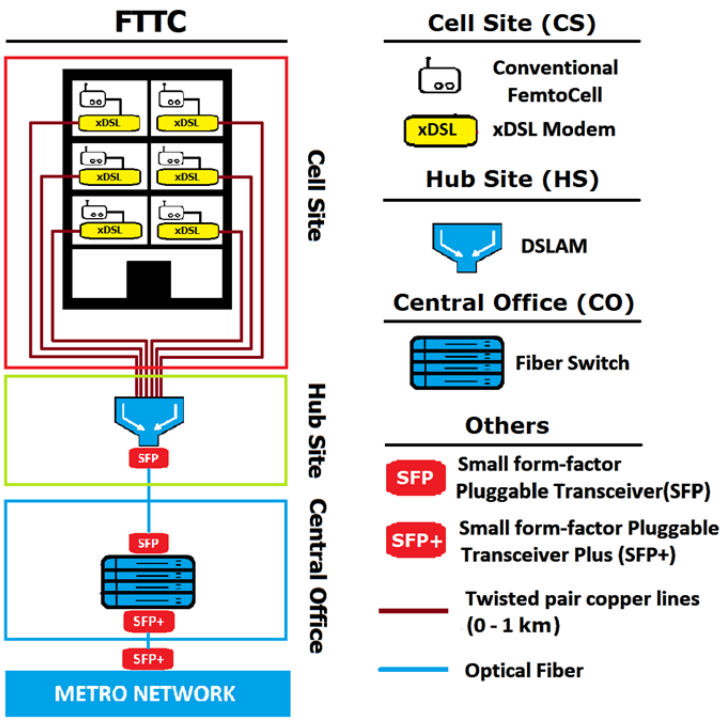


Figura 3.4: *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* VDSL2/FTTC.

$$N_{DSLAM}(t, FTTC_{FemtoC}) = \left\lceil \frac{N_{modem}(t, FTTC_{FemtoC})}{N_{DSLAM_{ports}}} \right\rceil \tag{15}$$

Sendo $N_{DSLAM_{ports}}$ a quantidade de portas do DSLAM. O tráfego agregado pelo DSLAM é encaminhado para uma porta do *switch* de fibra (SF) por um enlace ponto a ponto de fibra de 1 Gbps [6]. Este enlace utiliza também um par de transceptores ópticos, chamado *small form-factor pluggable* (SFP), para transmitir e receber o sinal. A quantidade de SFs é dada pela relação entre a quantidade de DSLAM e quantidade de portas do SF, como mostra a equação (16).

$$N_{SF}(t, FTTC_{FemtoC}) = \left\lceil \frac{N_{DSLAM}(t, FTTC_{FemtoC})}{N_{SF_{ports}}} \right\rceil \tag{16}$$

Sendo $N_{SF_{ports}}$ a quantidade de portas que o SF possui para atender os DSLAMs. No CO, o tráfego agregado pelo SF é encaminhado para rede metro (*metro network*, MN) através do enlace de fibra que utilizam um par de SFP+. O SFP+ é uma versão melhorada do SFP que permite taxas de transmissão de até 10 Gbps [6] [34].

3.5.2 Arquitetura 2: FTTB para FemtoC BS

A solução FTTB para FemtoC ($FTTB_{FemtoC}$), representada na Figura 3.5, é também uma arquitetura híbrida que emprega o uso de tecnologia de fibra e cobre. A arquitetura é

semelhante a $FTTC_{FemtoC}$. A diferença fundamental é a substituição do DSLAM por miniDSLAM no HS. Aliás, a localização do HS muda também, pois cada miniDSLAM é instalado dentro de cada prédio, logo somente atenderá aos apartamentos de determinado prédio. Dessa forma, temos os modens xDSL nos apartamentos conectados por enlace de cobre ponto a ponto aos miniDSLAM do prédio. E os miniDSLAMs se conectam com o SF no CO por enlace de fibra ponto a ponto com par de SFPs. E por fim os SFs se conectam ao MN por enlaces de fibra com par de SFP+. A quantidade de modens, miniDSLAMs e SFs são dadas pela equação (17), (18) e (19), respectivamente. Sendo que $N_{\min iDSLAM_{ports}}$ é a quantidade de portas que o miniDSLAM possui.

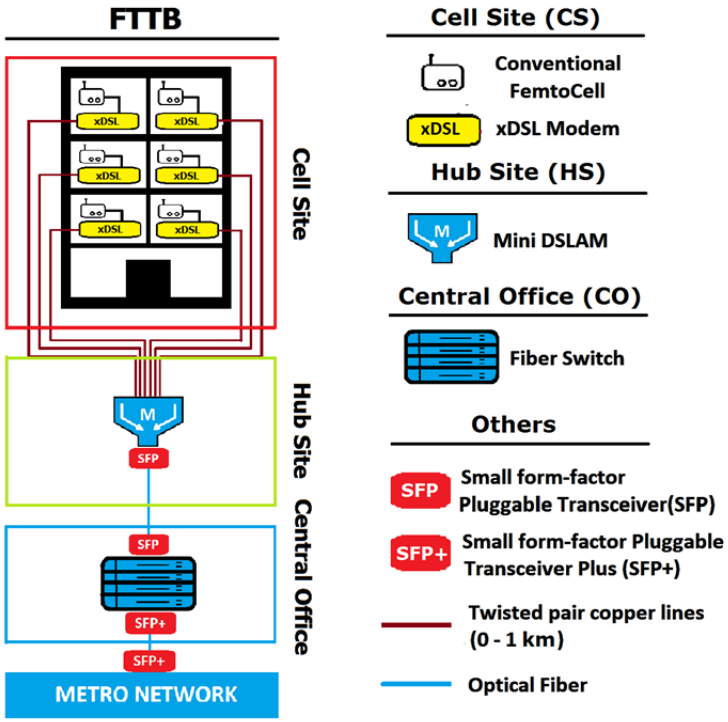


Figura 3.5: *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* VDSL2/FTTB.

$$N_{modem}(t, FTTB_{FemtoC}) = BS(t, FemtoC) \tag{17}$$

$$N_{\min iDSLAM}(t, FTTB_{FemtoC}) = \left\lceil \frac{N_{modem}(t, FTTB_{FemtoC})}{N_{\min iDSLAM_{ports}}} \right\rceil \tag{18}$$

$$N_{SF}(t, FTTB_{FemtoC}) = \left\lceil \frac{N_{\min iDSLAM}(t, FTTB_{FemtoC})}{N_{SF_{ports}}} \right\rceil \tag{19}$$

3.5.3 ARQUITETURA 3: FTTH PARA FEMTOC BS

A solução FTTH para FemtoC ($FTTH_{FemtoC}$), apresentada na Figura 3.6, é uma arquitetura *backhaul* puramente de fibra, ou seja, todos os enlaces entre os dispositivos em nível de *backhaul* são via fibra óptica. Nesta arquitetura, o tráfego de cada FemtoC é agregado por um ONU, no CS, localizado no próprio apartamento do usuário. Logo a quantidade de ONU é igual à quantidade de FemtoC, como mostra a equação (20).

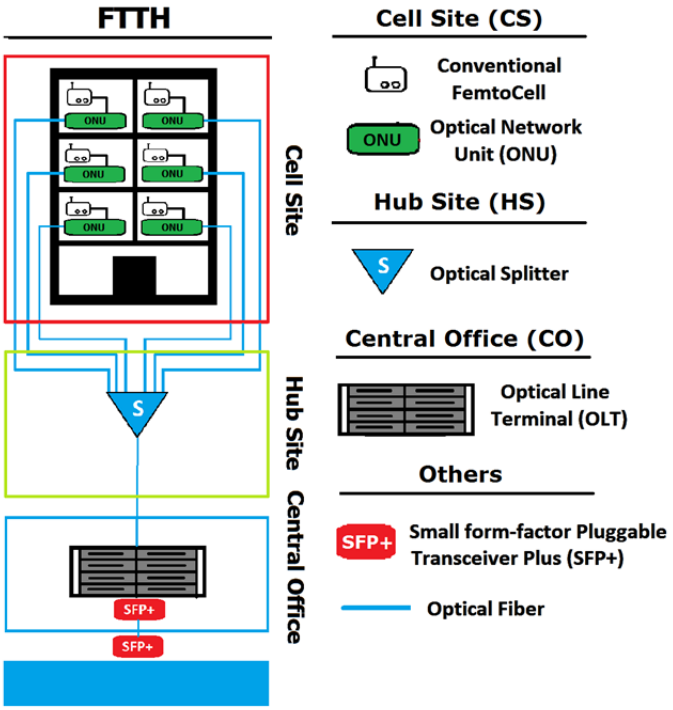


Figura 3.6: *Femtocell* convencional sobre rede *backhaul* FTTH.

$$N_{ONU}(t, FTTH_{FemtoC}) = BS(t, FemtoC) \tag{20}$$

O tráfego agregado no ONU é encaminhado para um *splitter* óptico, o qual é passivo. No HS, o *splitter* agrega o tráfego de N ONU, onde N é o fator de divisão, e encaminha esse tráfego para uma porta do OLT. A quantidade de *splitters* é dada pela equação (21).

$$N_{Splitter}(t, FTTH_{FemtoC}) = \left\lceil \frac{N_{ONU}(t, FTTH_{FemtoC})}{N_{Splitter_{ports}}} \right\rceil \tag{21}$$

Sendo $N_{Splitter_{ports}}$ o fator de divisão do *splitter*. O tráfego agregado pelo *splitter* é encaminhado via fibra para uma porta do OLT, localizado no CO. Portanto, a quantidade de OLT é dada pela quantidade de portas destinadas para *splitters* e a quantidade de *splitters* na rede, como mostra a equação (22).

$$N_{OLT}(t, FTTH_{FemtoC}) = \left\lceil \frac{N_{Splitter}(t, FTTH_{FemtoC})}{N_{OLT_{ports}}} \right\rceil \tag{22}$$

No CO, o OLT agrega o tráfego dos *splitters* igual à quantidade de portas que possui. Então, este tráfego agregado é encaminhado para o MN através de links de fibra de 10 Gbps, que utilizam um par de SFP+. Dessa forma, temos que a quantidade de OLT é dada pela equação (22). Na qual $N_{OLT_{ports}}$ é a quantidade de portas presentes no OLT.

3.5.4 Arquitetura 4: FTTB para FemtoWoC BS

A solução FTTB para FemtoWoC ($FTTB_{FemtoWoC}$), apresentada na Figura 3.7, é uma arquitetura híbrida composta por cobre e fibra. Nesta arquitetura, cada conversor analógico-analógico (A/A) é instalado por piso, logo cada A/A atenderá a demanda dos apartamentos deste piso. O tráfego de cada conversor A/A é encaminhado e agregado na estação base multicelular remota (McBS) via enlace cabeado ponto a ponto, o qual é cabo de cobre. Neste cenário, os McBS são instalados no próprio prédio, representando o CS. Nesta arquitetura, cada McBS necessita de um ONU para acessar a rede PON. Portanto, a quantidade de McBS e ONU são dadas pela equação (23) e (24).

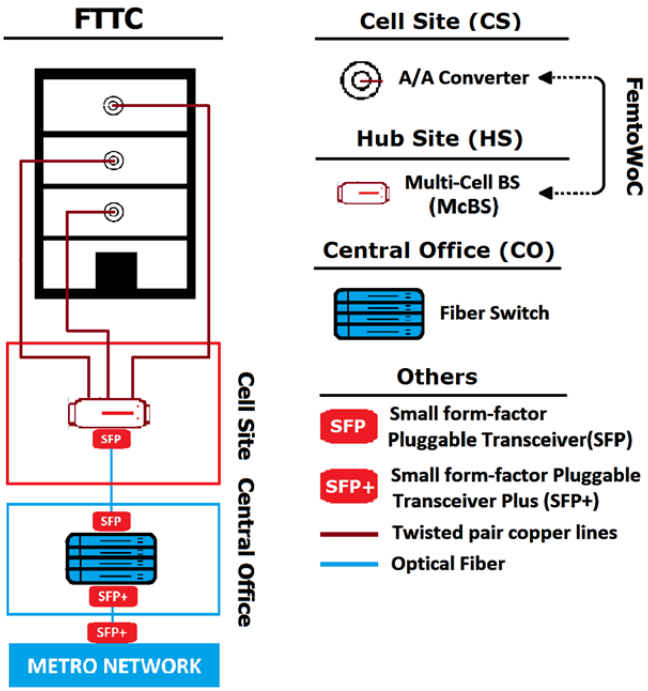


Figura 3.7: FemtoWoC sobre rede *backhaul* FTTC.

$$N_{McBS}(t, FTTB_{FemtoWoC}) = \left\lceil \frac{BS(t, A/A)}{N_{McBS_{ports}}} \right\rceil \tag{23}$$

$$N_{ONU}(t, FTTB_{FemtoWoC}) = N_{McBS}(t, FTTB_{FemtoWoC}) \quad (24)$$

$BS(t, A/A)$ e $N_{McBS_{ports}}$ é a quantidade de conversores A/A e de portas do McBS, respectivamente. O tráfego agregado no ONU é encaminhado para um *splitter* óptico. No HS, o *splitter* agrega o tráfego de N ONUs, onde N é o fator de divisão, e encaminha esse tráfego para uma porta do OLT. A quantidade de *splitters* é dada pela equação 25

$$N_{Splitter}(t, FTTB_{FemtoWoC}) = \left\lceil \frac{N_{ONU}(t, FTTB_{FemtoWoC})}{N_{Splitter_{ports}}} \right\rceil \quad (25)$$

Sendo $N_{Splitter_{ports}}$ o fator de divisão do *splitter*. O tráfego agregado pelo *splitter* é encaminhado para uma porta do OLT, localizado no CO, por uma fibra. Portanto, a quantidade de OLT é dada pela quantidade de portas destinadas para *splitters* e a quantidade de *splitters* na rede, como mostra a equação 26.

$$N_{OLT}(t, FTTB_{FemtoWoC}) = \left\lceil \frac{N_{Splitter}(t, FTTB_{FemtoWoC})}{N_{OLT_{ports}}} \right\rceil \quad (26)$$

No CO, o OLT agrega o tráfego dos *splitters* igual à quantidade de portas que possui. Então, este tráfego agregado é encaminhado para o MN através de links de fibra de 10 Gbps, que utilizam um par de SFP+. Dessa forma, temos que a quantidade de OLT é dada pela equação (26). Onde $N_{OLT_{ports}}$ é a quantidade de portas presentes no OLT.

3.5.5 ARQUITETURA 5: FTTC PARA FEMTOWOC BS

A solução FTTC para FemtoWoC ($FTTC_{FemtoWoC}$), apresentada na Figura 3.3 (e), é uma arquitetura híbrida composta de cobre e fibra. Nesta arquitetura, cada conversor A/A é instalado por piso, portanto cada A/A atenderá a demanda dos apartamentos deste piso. O tráfego de cada conversor A/A é encaminhado para o McBS via enlace cabeado ponto a ponto, no caso o cabo é de cobre. Neste cenário, os McBS são instalados em gabinetes na rua. Como este equipamento agrega o tráfego dos conversores A/A, a localização de instalação do McBS é considerada como CS. A quantidade de McBS é dada pela equação (27).

$$N_{McBS}(t, FTTC_{FemtoWoC}) = \left\lceil \frac{BS(t, A/A)}{N_{McBS_{ports}}} \right\rceil \quad (27)$$

O tráfego agregado pelo McBS é encaminhado para uma porta do *switch* de fibra (SF) por um enlace ponto a ponto de fibra de 1 Gbps. Este enlace utiliza também um par de SFPs. Dessa maneira, a quantidade de SF é dada pela equação (28).

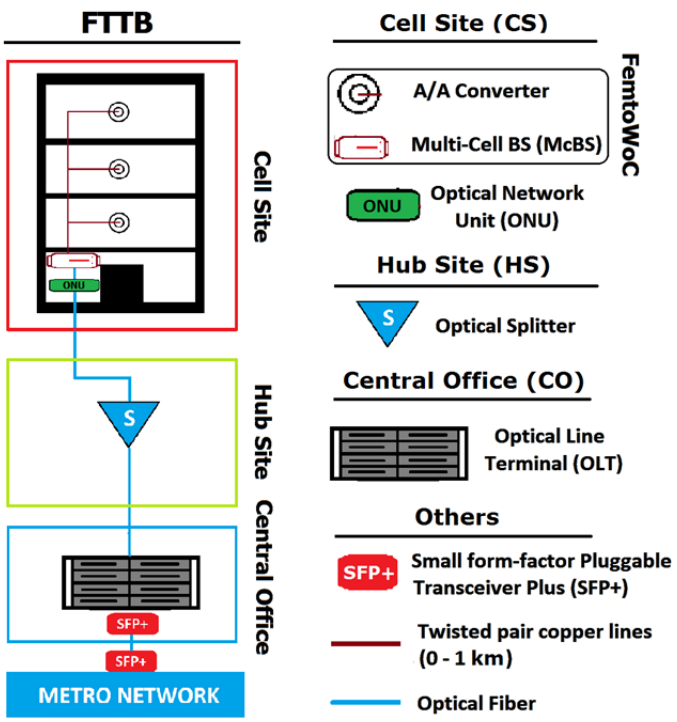


Figura 3.8: FemtoWoC sobre rede *backhaul* FTTB.

$$N_{SF}(t, FTTC_{FemtoWoC}) = \left\lceil \frac{N_{McBS}(t, FTTC_{FemtoWoC})}{N_{SF_{ports}}} \right\rceil \tag{28}$$

No CO, o tráfego agregado pelo SF é encaminhado para rede metro (*metro network*, MN) através do enlace de fibra que utilizam um par de SFP+. O SFP+ é uma versão melhorada do SFP que permite taxas de transmissão de até 10 Gbps [34].

3.6 CONSUMO DE ENERGIA

Considerando a arquitetura genérica de *backhaul* apresentada no capítulo II, subseção 2.2, o consumo total de energia, dado em "Watt" é obtido pela equação (29). É considerado que as funções de agregação, comutação e roteamento são desempenhadas idealmente durante o tráfego de dados entre o núcleo da rede e a rede de acesso.

$$P(t,a) = P_{CS}(t,a) + P_{HS}(t,a) + P_{CO}(t,a) \tag{29}$$

Sendo P_{CS}, P_{HS} e P_{CO} representam o total consumo de energia na célula local, ponto de convergência local e escritório central, respectivamente. Na qual "a" representa a arquitetura *backhaul* estudada. O total consumo de energia por segmentos das arquiteturas de *backhaul* descritas na seção 3.5 são apresentadas nas próximas subseções.

3.6.1 CÉLULA LOCAL (CS)

Considerando as arquiteturas descritas na seção 3.5 e as quantidades de dispositivos e conexões no CS, temos que o total consumo de energia da $FTTC_{FemtoC}$, $FTTB_{FemtoC}$, $FTTH_{FemtoC}$, $FTTB_{FemtoWoC}$ e $FTTC_{FemtoWoC}$ no CS são dadas pelas equações (30), (31), (32), (33) e (34).

$$P_{CS}(t, FTTC_{FemtoC}) = N_{Modem}(t, FTTC_{FemtoC}) * P_{Modem} \tag{30}$$

$$P_{CS}(t, FTTB_{FemtoC}) = N_{Modem}(t, FTTB_{FemtoC}) * P_{Modem} \tag{31}$$

$$P_{CS}(t, FTTH_{FemtoC}) = N_{ONU}(t, FTTH_{FemtoC}) * P_{ONU} \tag{32}$$

$$P_{CS}(t, FTTB_{FemtoWoC}) = N_{McBS}(t, FTTB_{FemtoWoC}) * (P_{ONU} + P_{McBS}) \tag{33}$$

$$P_{CS}(t, FTTC_{FemtoWoC}) = N_{McBS}(t, FTTC_{FemtoWoC}) * (2 * P_{SFP} + P_{McBS}) \tag{34}$$

Onde P_{Modem} ,P_{ONU}, P_{McBS} e P_{SFP} representam o consumo de energia do modem xDSL, ONU, McBS e SFP, respectivamente. E $N_{Modem}(t, FTTC_{FemtoC})$, $N_{Modem}(t, FTTB_{FemtoC})$, $N_{ONU}(t, FTTH_{FemtoC})$, $N_{McBS}(t, FTTB_{FemtoWoC})$ e $N_{McBS}(t, FTTC_{FemtoWoC})$ são obtidos pelas equações (14), (17), (20), (23) e (27), respectivamente.

3.6.2 PONTO DE CONVERGÊNCIA LOCAL (HS)

Considerando as arquiteturas descritas na seção 3.5 e as quantidades de dispositivos e conexões no CS, temos que o total consumo de energia da $FTTC_{FemtoC}$, $FTTB_{FemtoC}$, $FTTH_{FemtoC}$ e $FTTB_{FemtoWoC}$ no CS são dados pelas equações (35), (36), (37) e (38). A $FTTC_{FemtoWoC}$ não possui HS.

$$P_{HS}(t, FTTC_{FemtoC}) = N_{DSLAM}(t, FTTC_{FemtoC}) * (P_{DSLAM} + 2 * P_{SFP}) \tag{35}$$

$$P_{HS}(t, FTTB_{FemtoC}) = N_{\mathrm{mini}DSLAM}(t, FTTB_{FemtoC}) * (P_{\mathrm{mini}DSLAM} + 2 * P_{SFP}) \tag{36}$$

$$P_{HS}(t, FTTH_{FemtoC}) = N_{Splitter}(t, FTTH_{FemtoC}) * P_{Splitter} \tag{37}$$

$$P_{HS}(t, FTTB_{FemtoWoC}) = N_{Splitter}(t, FTTB_{FemtoWoC}) * P_{Splitter} \tag{38}$$

Na qual P_{DSLAM}, $P_{\text{mini}DSLAM}$ e $P_{Splitter}$ representam o consumo de energia do DSLAM, miniDSLAM e *Splitter*, respectivamente. Como ser passivo, o $P_{Splitter}$ é igual a zero. $N_{DSLAM}(t, FTTC_{FemtoC})$, $N_{\text{mini}DSLAM}(t, FTTB_{FemtoC})$, $N_{Splitter}(t, FTTH_{FemtoC})$ e $N_{Splitter}(t, FTTB_{FemtoWoC})$ são obtidos pelas equações (15), (18), (21) e (25), respectivamente.

3.6.3 ESCRITÓRIO CENTRAL (CO)

Considerando as arquiteturas descritas na seção 3.5 e as quantidades de dispositivos e conexões no CS, temos que o total consumo de energia da $FTTC_{FemtoC}$, $FTTB_{FemtoC}$, $FTTH_{FemtoC}$, $FTTB_{FemtoWoC}$ e $FTTC_{FemtoWoC}$ no CS são dados pelas equações (39), (40), (41), (42) e (43).

$$P_{CO}(t, FTTC_{FemtoC}) = N_{SF}(t, FTTC_{FemtoC}) * (P_{FS} + 2 * P_{SFP+}) \tag{39}$$

$$P_{CO}(t, FTTB_{FemtoC}) = N_{SF}(t, FTTB_{FemtoC}) * (P_{FS} + 2 * P_{SFP+}) \tag{40}$$

$$P_{CO}(t, FTTH_{FemtoC}) = N_{OLT}(t, FTTH_{FemtoC}) * (P_{OLT} + 2 * P_{SFP+}) \tag{41}$$

$$P_{CO}(t, FTTB_{FemtoWoC}) = N_{OLT}(t, FTTB_{FemtoWoC}) * (P_{OLT} + 2 * P_{SFP+}) \tag{42}$$

$$P_{CO}(t, FTTC_{FemtoWoC}) = N_{FS}(t, FTTC_{FemtoWoC}) * (P_{FS} + 2 * P_{SFP+}) \tag{43}$$

Na qual P_{FS}, P_{OLT}, P_{SFP+} representam o consumo de energia do FS, OLT e SFP+, respectivamente. $N_{FS}(t, FTTC_{FemtoC})$, $N_{SF}(t, FTTB_{FemtoC})$, $N_{OLT}(t, FTTH_{FemtoC})$, $N_{OLT}(t, FTTB_{FemtoWoC})$ e $N_{FS}(t, FTTC_{FemtoWoC})$ são obtidos pelas equações (16), (19), (22), (26) e (28), respectivamente.

CAPÍTULO IV
CASO DE ESTUDO E RESULTADOS

4.1 CASO DE ESTUDO

Neste capítulo é apresentado o cenário para qual é feito o estudo de consumo de energia do *backhaul* para *smallcells*. São apresentadas nesta mesma seção, as características da cidade, assim como o tráfego gerado pela rede nesta cidade. E também são abordadas as caraterísticas da rede móvel, bem como as do *backhaul*.

4.1.1 CIDADE

Para este estudo, a cidade tem características de uma cidade urbana europeia, como a Suécia, disposta segundo o padrão do modelo Manhattan de cidade, no qual os quarteirões possuem as mesmas dimensões e estão igualmente espaçados, como ilustrado na Figura 4.1. Considerando as dimensões da cidade e dos quarteirões iguais a 10 km x 10 km e 100m x 100m, respectivamente. A cidade é divida em duas zonas: urbana densa e urbana. A ideia é simular o funcionamento de uma cidade típica, onde a parte urbana densa e urbana representam a zona de trabalho e de residência, respectivamente. Cada zona tem características distintas em relação à quantidade de quarteirões ($N_b(z)$), prédio por quarteirão ($N_{bpb}(z)$), pisos por prédio ($N_{fpb}(z)$) e apartamento (ou escritório) por piso ($N_{apf}(z)$), que são mostrados na Tabela 4.1.

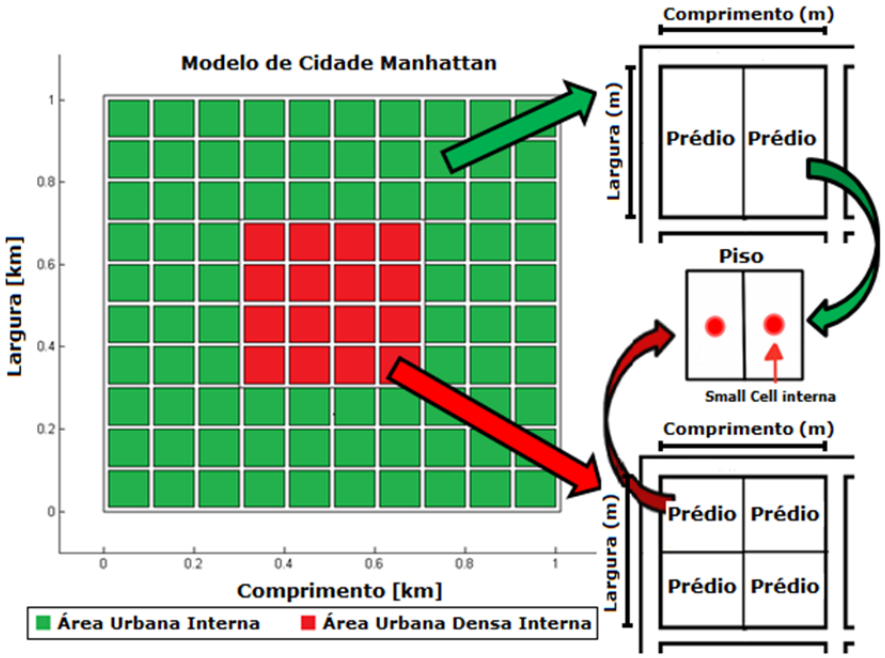


Figura 4.1: Exemplo da organização da cidade inspirado no modelo Manhattan.

Tabela 4.1: Características da cidade em função da zona.

	Zonas	
Variável	Urbana	Urbana Densa
N_b (Quarteirões)	8745	3600
N_{bpb} (Prédios por quarteirão)	2	4
N_{fpb} (Piso/andar por prédio)	2	3
N_{apf} (Apartamentos por piso/andar)	2	2

4.1.2 DEMANDA DE TRÁFEGO

Para este estudo é considerado apenas a demanda de tráfego gerada em ambiente *indoor*, que corresponde aproximadamente a 80% de todo o tráfego da rede móvel [4], durante o horário de pico, para os anos entre 2015 (tempo inicial, t_0) e 2030. Durante o horário de pico, 16% das assinaturas móveis estão ativas ($\alpha_{\max}$), ou seja, utilizam a rede móvel [31]. Sendo que o percentual de assinaturas por zona ($\varphi(z)$) são 75% das assinaturas em zona urbana densa e 25 % em zona urbana [31]. É considerado apenas o tráfego gerado pelos dispositivos *mobile* PC, *tablet* e *smartphone*. As assinaturas de serviço móvel são distribuídas entre esses dispositivos da seguinte maneira: 20%, 5% e 50% das assinaturas correspondem a dispositivos ($\gamma(d)$) *mobile* PC, *tablet* e *smartphone*, respectivamente, no ano de 2015 [31]. Sendo que os usuários destes dispositivos subdivididos em dois grupos: comuns (ordinário) e frequentes.

Os usuários são divididos em dois grupos sendo o perfil de uso: comuns (ordinário) e frequentes. Em 2015, os usuários frequentes demandam em média taxas de dados ($r(t_0, d)^{heavy}$) de 2 Mbps, 1 Mbps e 0.25 Mbps em *mobile* PC, *tablet* e *smartphone*, respectivamente. Os usuários ordinários demandam 1/8 do consumo dos usuários frequentes. A taxa de crescimento anual da demanda de tráfego ($r_{tx}(d)$) é igual a 20 %, 30 % e 25% para *mobile* PC, *tablet* e *smartphone*, respectivamente [3].

A densidade populacional inicial da cidade foi considerada de 4000 pessoas/km², sendo 1000 pessoas/km² e 3000 pessoas/km² a densidade populacional da zona urbana e urbana densa, respectivamente [31]. Considera-se que o crescimento populacional da cidade (tx_p) é igual a 0,7% por ano; este percentual de crescimento é o mesmo da cidade de Stockholm [32]. Na Suécia, a quantidade média de dispositivos móveis por pessoa ($s_p(t_0)$) é de 1.3156 unidades por pessoa, conforme informa em [33]. E em [33] mostra que a quantidade de dispositivo móvel por pessoa na Suécia cresce (g_{s_p}) de 0.0314 unidades a cada ano.

Tabela 4.2: Dados relevantes para o modelo de previsão de tráfego.

	Dispositivo Móvel		
Variável	Mobile PC	Tablet	Smartphone
$r(t_0, d)^{heavy}$	2 Mbps	1 Mbps	0.25 Mbps
$r_{tx}(d)$	20 %	30 %	25 %
$\gamma(d)$	20 %	5 %	50 %

	Zonas	
Variável	Urbana	Urbana Densa
$\rho(z)$	1000 pessoas/km²	3000 pessoas/km²
$\varphi(z)$	25 %	75 %

Variável	Valor
$\alpha_{\max}$	16 %
$s_p(t_0)$	1.3156
tx_p	0.7%
g_{s_p}	0.0314

4.1.3 REDE MÓVEL E *BACKHAUL*

A rede móvel *wireless indoor* estudadas são a *Femtocell* convencional (FemtoC) e *Femtocell Wireless over Cable* (FemtoWoC). Em estudo de FemtoC, são consideradas que todos os apartamentos/escritórios possuem uma unidade instalada. Enquanto no cenário de FemtoWoC, os conversores analógico-analógico (A/A) são instalados por andar de prédios. Assumi-se que as FemtoC e FemtoWoC têm capacidade de 50 Mbps. Considera-se que a FemtoC consome 9 W [6], enquanto que supõem-se que a FemtoWoC consome 6 W por conversor A/A e 70 W por McBS. Os dados dos equipamentos utilizados nas arquiteturas apresentadas na seção 3.5 são sumarizados em Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Dados dos equipamentos que compõem o *backhaul*.

Equipamento	Consumo de Energia	Portas (up|down)
Modem VDSL2	10 W	1:1
ONU	5 W	1:1
McBS	70 W	1:16
DSLAM	83 W	1:48
MiniDSLAM	64 W	1:16
Splitter Óptico	0 W	1:16
SFP	2.5 W	-
Fiber switch	300 W	1:24
OLT	300 W	1:40
SFP+	3 W	-

4.2 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados alcançados em relação ao consumo de energia em redes *small cells* (*Femtocell* convencional e *FemtoWoC*) considerando as arquiteturas *backhaul* propostas no estudo (abordadas na seção 3.5 e 3.6). Os resultados comparam o consumo de energia de maneira global, ou seja, da rede como um todo (*small cells* mais *backhaul*), e por segmento de *backhaul*. Além disso, compara a quantidade de equipamentos necessária por segmento de *backhaul* em cada rede. A avaliação dos resultados é dividida em duas partes: na primeira parte são abordados os resultados referentes à rede femtocelular convencional utilizando as arquiteturas *backhaul* abordadas nesse estudo; e na segunda parte os resultados referente à rede FemtoWoC utilizando as arquiteturas *backhaul* propostas nesse estudo. Pelos resultados, este estudo visa compreender o impacto gerado pelo *backhaul* no consumo de energia da rede móvel através da metodologia proposta.

4.2.1 REDE MÓVEL FEMTOCELULAR CONVENCIONAL

Um dos critérios chave à escolha da utilização ou não de determinada arquitetura *backhaul* para atender a rede móvel é o impacto causado no consumo de energia total da rede. Desta forma, inicialmente, é analisado o comportamento do consumo de energia das arquiteturas *backhaul* mais populares (FTTC, FTTB e FTTH) para *Femtocell* convencional. A escolha de uma arquitetura *backhaul* com baixo impacto no consumo de energia é crucial para a expansão de redes heterogêneas em função do aumento da quantidade implantada de *small cells*. Durante a avaliação do consumo energético da rede são considerados cenários em que o tamanho da rede, portanto, o consumo energético em dada área (kW/km²), está em função do tráfego gerado pelos usuários nesta área (Gbps/km²). A Figura 4.2 compara o consumo energético da rede móvel *Femtocell* convencional com três cenários de *backhaul*: FTTB,

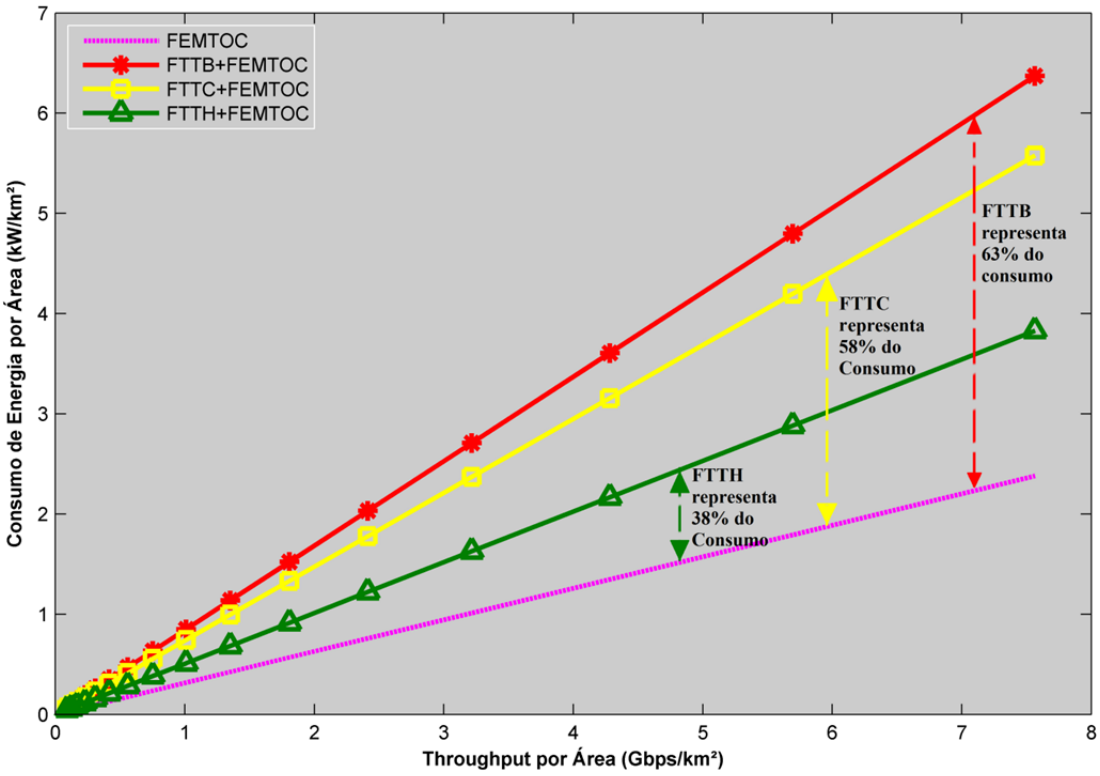


Figura 4.2: Comparação entre três arquiteturas de *backhaul* do consumo de energia por área em função do tráfego gerado pelos usuários.

FTTC e FTTH. Os resultados indicam que, quando considerado o *backhaul* no cálculo do consumo de energia, há um crescimento em média de 63%, 58% e 38% para os cenários FTTB, FTTC e FTTH, respectivamente. Ou seja, o *backhaul* representa uma parcela significativa do consumo de energia em redes heterogêneas, confirmando a descoberta de Monti [1] e Tombaz [6].

As arquiteturas FTTH e FTTB apresentaram o menor e o maior consumo de energia, respectivamente. A diferença do consumo de energia entre as arquiteturas é melhor compreendida quando analisado o *backhaul* por segmentos, como sugere a metodologia deste trabalho. Para tanto, é interessante avaliar o impacto energético causado pelos segmentos do *backhaul* em função da quantidade de equipamentos e consumo de energia da infraestrutura. A análise em termos de quantidade de equipamentos contabiliza por segmento de *backhaul* (ou seja, CS, HS e CO, vide seção 2.1) todos os equipamentos, exceto cabos e adaptadores ópticos (SFP e SFP+). Os resultados desta análise são retratados nas Figuras 4.3 (a), (b) e (c). Já a análise do consumo de energia por segmento do *backhaul* considera o consumo energético de todos os dispositivos, exceto os cabos, presentes no mesmo segmento (CS, HS e CO). Esse resultado é apresentado nas Figuras 4.4 (a), (b) e (c).

Considerando somente as arquiteturas, em parte, baseadas em VDSL2, ou seja, FTTB e FTTC, a Figura 4.2 (de "a" à "c") ilustra que o consumo de energia é maior em FTTB do que em FTTC. A razão disto é a quantidade de equipamentos em HS e CO, pois no CS estas arquiteturas de *backhaul* têm a mesma quantidade de equipamentos do mesmo modelo. A Figura 4.3 (b) ilustra que a quantidade de equipamentos no HS é aproximadamente três vezes maior em FTTB do que em FTTC. A Figura 4.3 (c) ilustra que no CO é aproximadamente duas vezes e meia maior do que a quantidade de equipamentos em FTTB do que em FTTC. A

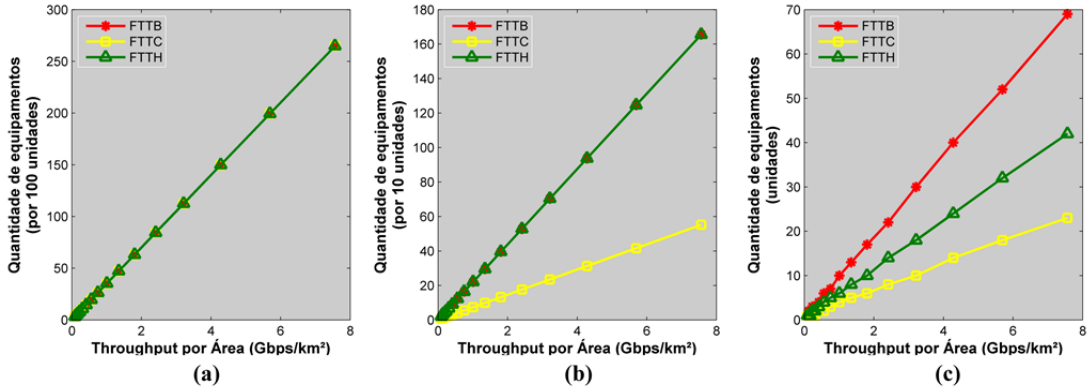


Figura 4.3: Quantidade de dispositivos das arquiteturas *backhaul* por segmento: (a) Segmento CS; (b) Segmento HS; (c) Segmento CO.

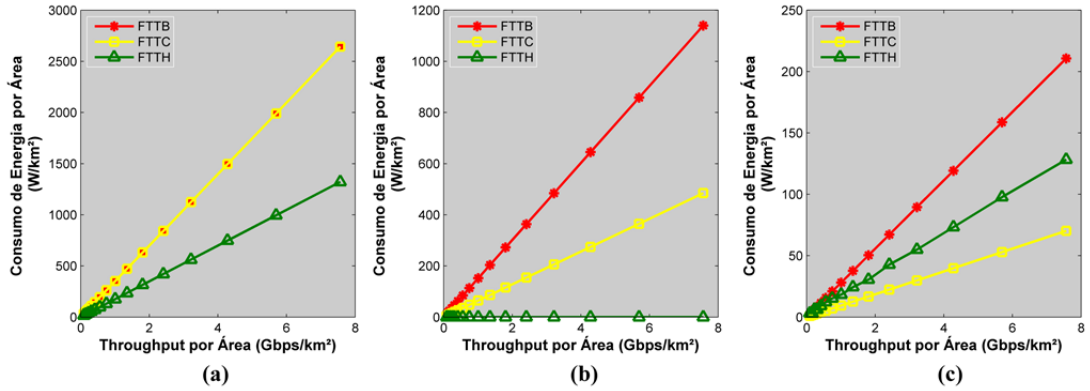


Figura 4.4: Consumo de energia das arquiteturas *backhaul* por segmento: (a) Segmento CS; (b) Segmento HS; (c) Segmento CO.

diferença na quantidade de equipamentos se deve a própria estrutura das arquiteturas, porque os miniDSLAMs da arquitetura FTTB e os DSLAMs da arquitetura FTTC são implementados por prédios e por conjunto de prédios, respectivamente. Dessa forma, FTTB possui mais equipamentos no HS do que FTTC. Como as configurações dos equipamentos são idênticas no segmento CO das arquiteturas FTTB e FTTC, a arquitetura FTTB necessita de mais equipamentos no CO do que a arquitetura FTTC, devido ao arranjo estrutural da rede no segmento HS. Estas diferenças numéricas de equipamentos por segmento de *backhaul* impactam diretamente no consumo de energia, como ilustrado nas Figuras 4.4 (b) e (c). O consumo de energia no FTTB em relação à FTTC é 2,35 e 2,95 vezes maior no HS e CO, respectivamente.

Quando comparamos as arquiteturas FTTH e FTTC, nota-se, vide a Figura 4.3 (a), que a quantidade de equipamentos no segmento CS é a mesma em FTTH e FTTC, porém FTTH apresenta maior quantidade nos segmentos HS e CO, vide as Figuras 4.3 (b) e (c). Essa diferença ocorre devido à configuração dos equipamentos de dado segmento em relação à quantidade de enlaces que podem agregar em relação a outro segmento. No segmento HS, os *splitters* da arquitetura FTTH agregam menos enlaces em relação ao CS do que os DSLAMs utilizados na arquitetura FTTC, portanto mais equipamentos são necessários em FTTH do que FTTC neste segmento. Contudo, no CO, os OLTs da arquitetura FTTH agregam mais enlaces que o *fiber switches* da arquitetura FTTC, porém a quantidade de equipamentos em FTTH para esse segmento é maior do que FTTC devido à alta quantidade de equipamentos existentes no HS e que necessitam de enlaces. Aliás, quando comparado FTTH e FTTB, observa-se a mesma quantidade de equipamentos em HS, pois os equipamentos adotados nesse segmento por essas arquiteturas *backhaul* têm a mesma capacidade de enlaces e precisam interligar a mesma quantidade de equipamentos do CS. Porém, a quantidade de equipamentos no CO é maior em FTTB, pois o *fiber switch* tem menos enlaces que o OLT da arquitetura FTTH.

Diferente do que acontece entre FTTB e FTTC, a comparação entre FTTH e FTTC apresenta diferenças no consumo de energia por segmento. FTTH apresenta menor consumo de energia no CS e HS e maior consumo no CO, como mostra as Figuras 4.4 (a), (b) e (c), respectivamente. Apesar de apresentar a mesma quantidade de equipamentos no CS, o consumo de energia em FTTH é menor devido o ONU apresentar menor consumo de energia do que os modens xDSL utilizados em FTTC, ou seja, ONU tem melhor eficiência energética do que os modens xDSL. Por isso, FTTH obtém uma redução de 50% no consumo de energia em relação ao FTTC nesse segmento. Já em HS, apesar do FTTH ter mais equipamentos do que FTTC, o consumo de energia no FTTH é nulo devido ao *splitter* óptico, dado que é um dispositivo passivo, logo não consome energia. Entretanto, o consumo de energia é maior no CO em FTTH do que FTTC porque a quantidade e o consumo de energia dos equipamentos nesse segmento são mais elevados.

Apesar de se ter identificado os motivos por trás de uma dada arquitetura *backhaul* possuir menor consumo de energia do que outra, ainda é necessária a compreensão de quanto cada segmento de *backhaul* é responsável pelo consumo de energia do *backhaul*. Assim sendo, podem-se identificar possíveis gargalos nas arquiteturas. Para isto, é avaliado o consumo energético dos segmentos *backhaul* em relação ao consumo total da estrutura em termos de percentual. As Figuras 4.5 (a), (b) e (c) retratam o percentual de consumo de energia por segmento para as arquiteturas FTTC, FTTB e FTTH indicando que o maior responsável pelo consumo de energia no *backhaul*, independente da arquitetura, é o CS. Além disso, nota-se que nas arquiteturas FTTB e FTTC o percentual por segmento é divido uniformemente, enquanto que no FTTH não, pelo menos não nos primeiros cenários (anos), ou seja, para quando a demanda por tráfego é baixa.

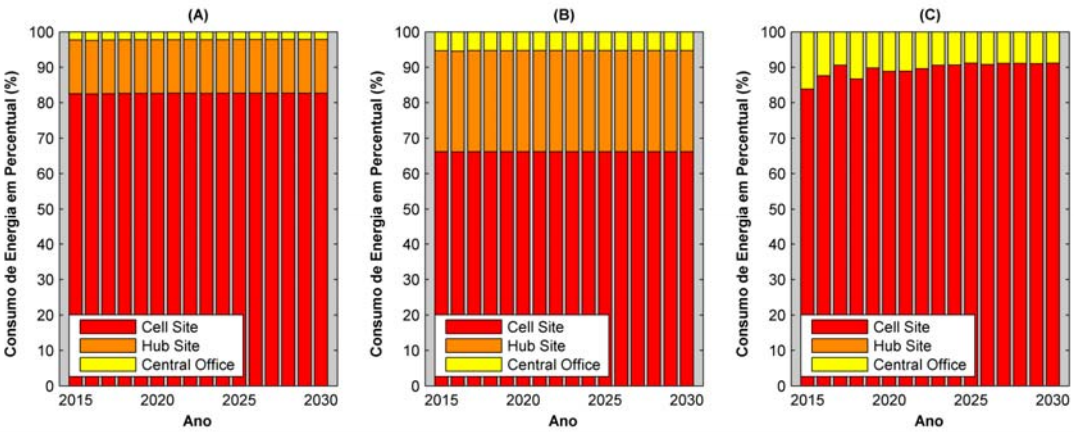


Figura 4.5: Percentual de consumo de energia nos segmentos do *backhaul* em redes *Femtocell* convencional: (A) para arquitetura FTTC; (B) para arquitetura FTTB; (C) para arquitetura FTTH.

Em termos percentuais, as arquiteturas FTTC e FTTB têm no CS cerca de 83% e 66% do consumo total do *backhaul*, respectivamente. O segundo segmento com maior consumo em ambas as arquiteturas é o HS, representando cerca de 15% e 29% do consumo total, respectivamente. Já o CO representa apenas 2% e 5% do consumo total do *backhaul* nas arquiteturas FTTC e FTTB, respectivamente.

Enquanto que em FTTH, o CS e o CO representam em média 89% e 11% do consumo total do *backhaul*, respectivamente. A variação nos primeiros anos (demanda de tráfego) da participação dos segmentos no consumo de energia ocorre porque a inclusão de um OLT no CO é altamente significativa em termos de consumo. Contudo, à medida que o CS cresce em quantidade de equipamentos e atinge a casa de milhares, o consumo desse segmento se torna tão alto que o impacto de novos equipamentos no CO não representa grande influência para aumentar a participação deste segmento no consumo total de energia do *backhaul*.

Portanto, pode-se concluir que o principal gargalo da arquitetura *backhaul* se encontra na borda de rede, ou seja, *cell site*; e consumo de energia do *backhaul* está intimamente ligado à organização da arquitetura, que determina a quantidade de equipamentos em cada segmento, e ao consumo energético individual dos equipamentos, que no caso óptico dispensa o uso de eletricidade. Logo, a adoção de arquitetura e equipamentos eficientes no segmento gargalo poderia reduzir significativamente o consumo de energia.

4.4.2 REDE MÓVEL *FEMTOCELL WIRELESS OVER CABLE*

Na subseção anterior foi identificado que o principal gargalo do *backhaul* é o CS e uma das maneiras de reduzir o consumo de energia é aplicar um melhor arranjo na arquitetura *backhaul* adotando equipamentos com menor consumo de energia. Portanto, mudar a estrutura baseada em cobre, ou seja, tecnologias baseada em VDSL2, por fibra óptica implica em uma redução no consumo de energia.

Gambine [28] propõem uma releitura da arquitetura da *Femtocell* convencional através da *Femtocell Wireless over Cable* (FemtoWoC), que no caso afeta diretamente o arranjo do *backhaul*, principalmente, no segmento CS. Desta forma, surge o seguinte questionamento: adotando a rede móvel FemtoWoC pode-se reduzir o consumo de energia nas arquiteturas FTTB e FTTC?

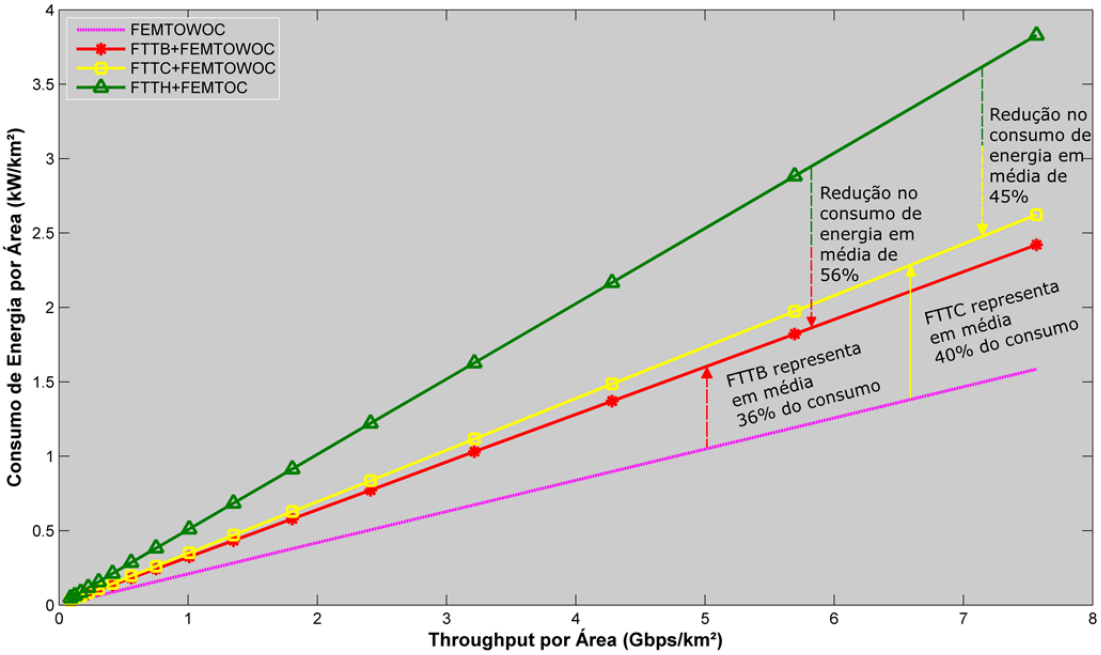


Figura 4.6: Comparação das soluções *backhaul* para *small cell* FemtoWoC em relação a melhor solução *backhaul* para *small cell Femtocell* convencional e a FemtoWoC em termos de consumo de energia em função do tráfego gerado pelos usuários em dada área.

Nesta seção é analisado o impacto do *backhaul* FTTB e FTTC sobre consumo de energia em redes FemtoWoC. Os resultados são comparados com os resultados obtidos pela arquitetura *backhaul* FTTH em redes *Femtocell* convencional. Inicialmente é analisado globalmente o impacto energético do *backhaul* FTTB e FTTC sobre a rede. São considerados os cenários em que o tamanho da rede, portanto, o consumo energético em dada área (kW/km²), está em função do tráfego gerado pelos usuários nesta área (Gbps/km²). Os resultados, apresentados na Figura 4.6, mostram que quando considerado o *backhaul* no cálculo do consumo de energia há um crescimento em média de 40% e 38% para os cenários FTTC e FTTB, respectivamente. Vale ressaltar que na rede *Femtocell* convencional, baseada em FTTC e FTTB, este acréscimo atinge um valor médio de 58% e 63% do total consumo de energia. Ou seja, a adoção de uma nova e moderna alternativa para transportar o tráfego *indoor* ocasionou em uma redução de cerca de 20% e 13% da participação do *backhaul* no consumo de energia nas arquiteturas FTTB e FTTC, respectivamente. Além disso, FTTB e FTTC em FemtoWoC tem redução no consumo de energia em média de 61% e 52%, respectivamente, em relação ao FTTB e FTTC em *Femtocell* convencional. Portanto, migrar para uma arquitetura mais centralizada de *Femtocell* permitiu reduzir o consumo de energia do *backhaul*.

Comparando a rede FemtoWoC com *backhaul* FTTB e FTTC em relação a rede *Femtocell* convencional com *backhaul* FTTH, nota-se que a rede com FTTB e FTTC reduz o consumo de energia cerca de 56% e 45%, respectivamente. Portanto, o *backhaul* FTTB, que antes era a pior arquitetura para *Femtocell* convencional, tornou-se a melhor arquitetura em redes móvel FemtoWoC em termos de consumo de energia. Este resultado encoraja a utilização da infraestrutura de cobre já implantada na última milha de lares e empresas. Além disso, esta economia motiva o desenvolvimento de tecnologias baseadas na utilização de

cabos Ethernet para *smallcells*, como por exemplo, o *Radio Dot*, introduzido pela Ericsson em 2014 e possivelmente comercializado a partir de 2015.

Esta redução no consumo de energia nas arquiteturas FTTC e FTTB pode ser compreendida analisando o *backhaul* por segmentos. Conforme na seção anterior, os segmentos do *backhaul* são analisados em termos da quantidade de equipamentos e consumo de energia. A análise em termos de quantidade de equipamentos contabiliza todos os equipamentos, exceto os cabos, SFP e SFP+. Os resultados desta análise são retratados na Figura 4.7 (a), (b) e (c). Já na analise do consumo de energia por segmento do *backhaul* é considerado o consumo energético de todos os dispositivos, menos os cabos, presentes no mesmo segmento (CS, HS e CO). Os resultados dessa seção são mostrados na Figura 5.3 (a), (b) e (c).

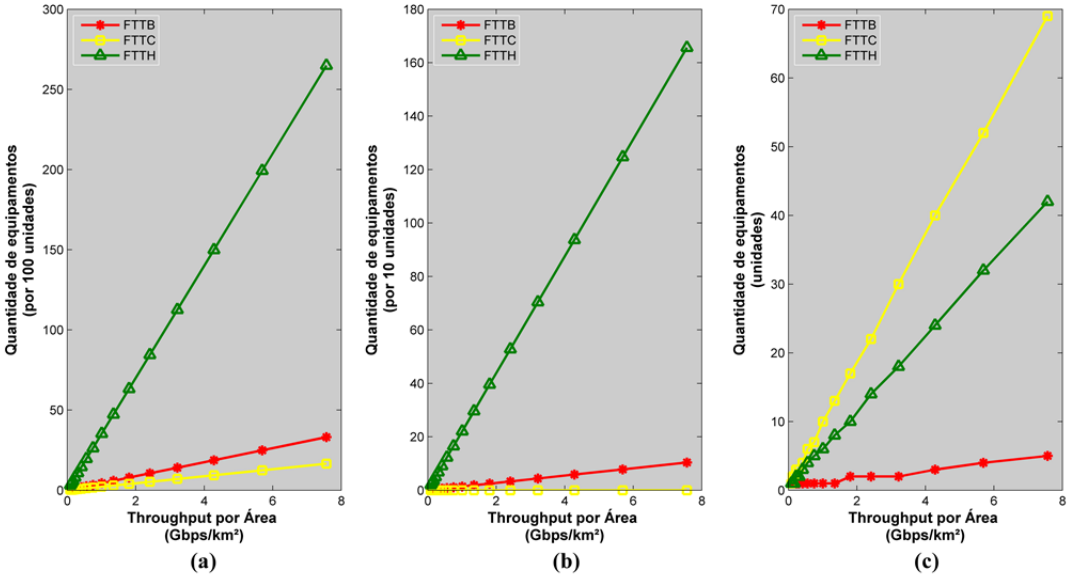


Figura 4.7: Quantidade de dispositivos das arquiteturas *backhaul* por segmento: (a) Segmento CS; (b) Segmento HS; (c) Segmento CO.

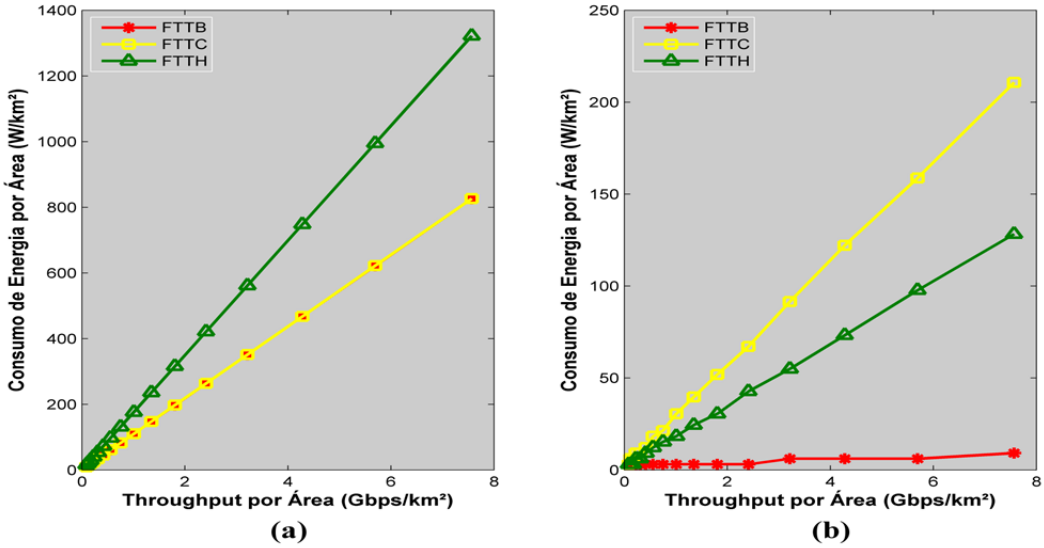


Figura 4.8: Consumo de energia das arquiteturas *backhaul* por segmento: (a) Segmento CS; (b) Segmento CO. No HS o consumo de energia é nulo para todas as arquiteturas.

Quando as arquiteturas *backhaul* são comparadas no segmento CS, nota-se na Figura 4.7 (a) que as arquiteturas FTTB e FTTC, em rede FemtoWoC, têm menos equipamentos que a arquitetura FTTH em redes *Femtocell* convencional. Vale recordar que em redes *Femtocell* convencionais, as arquiteturas FTTB, FTTC e FTTH têm a mesma quantidade de equipamentos, como mostra a Figura 4.3 (a). Portanto, a migração de redes *Femtocell* convencional para FemtoWoC contribui para redução de equipamentos em nível de *backhaul* no segmento CS. Isso ocorre pela própria organização da arquitetura de rede, pois FemtoWoC emprega o conceito de centralização de múltiplas estações bases (um McBS sustenta vários conversores A/A), já a *Femtocell* convencional é descentralizada (cada *Femtocell* precisa de um modem para processar os dados). Esta redução numérica de equipamentos reflete diretamente no consumo de energia, como mostra a Figura 4.8 (a). Apesar da diferença numérica de equipamentos entre FTTC e FTTB, ambos têm o mesmo consumo de energia. Isto ocorre porque no cálculo de quantidade de equipamentos não são considerados os SFPs, logo em FTTB são computados o McBSs e ONUs e em FTTC são computados apenas os McBSs. Assim, como a quantidade de McBSs é idêntica, isto implica que a diferença númerica entre estas arquiteturas está relacionada à quantidade de ONUs. Contudo, no cálculo de consumo de energia no FTTC são computados os pares de adaptadores SFPs, cujo consumo de energia é idêntico ao consumo dos ONUs. Logo, o consumo energético no CS do FTTB é igual ao do FTTC, conforme mostra a Figura 4.8 (a).

Quando comparados às quantidades de equipamentos das arquiteturas backhaul em HS, observa-se que na Figura 4.7 (b) a arquitetura FTTC não possui nenhum dispositivo e a arquitetura FTTB tem menos equipamentos que a arquitetura FTTH. A FTTC emprega uma conexão ponto a ponto entre o CS e CO, logo não existe nenhum equipamento em HS. Já em FTTB a quantidade de dispositivos está em função direta da quantidade de dispositivos no CS, portanto a quantidade de dispositivos em HS será reduzida também. Como em HS os equipamentos presentes são os *splitters* ópticos, então o consumo de energia nesse segmento também é nulo.

No CO, na Figura 4.7 (c) observamos um aumento significativo de equipamentos em

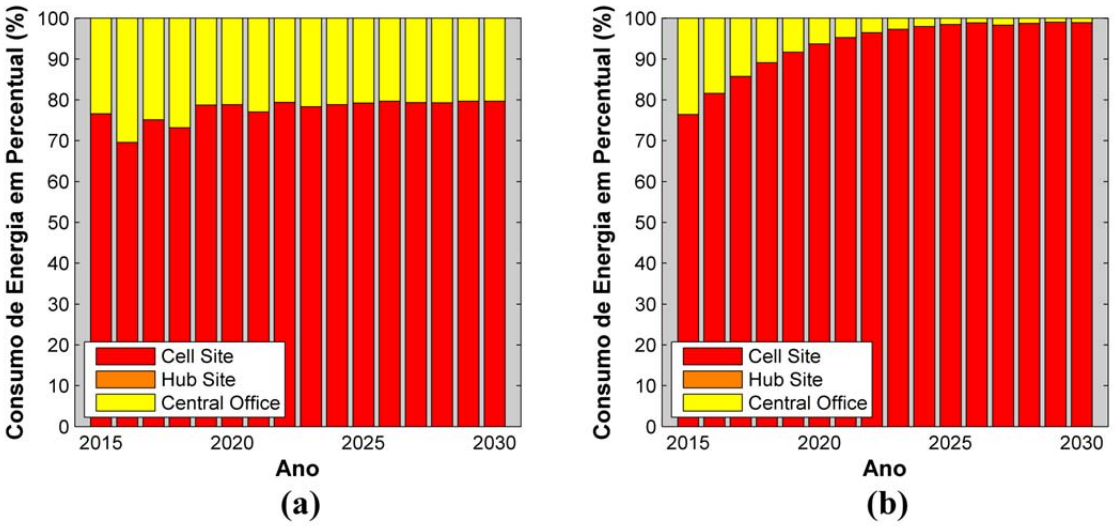


Figura 4.9: Percentual de consumo de energia nos segmentos do *backhaul* em redes FemtoWoC: (A) para arquitetura FTTB; (B) para arquitetura FTTC.

FTTC e uma redução em FTTB. A quantidade de dispositivos no CO em FTTB depende da quantidade de dispositivos em HS, portanto a quantidade em CO também será reduzida. Em FTTC, a quantidade de dispositivos aumenta em CO, devido à conexão ponto a ponto com CS. Como o consumo de energia é proporcional à quantidade de equipamentos nesse segmento, logo o consumo segue a mesma lógica: FTTC, FTTH e FTTB em ordem decrescente de consumo de energia, vide Figura 4.8 (b).

Portanto, nota-se que a mudança da rede de *Femtocell* convencional para FemtoWoC não só contribui para redução da quantidade de equipamentos no segmento considerado como gargalo, ou seja, *Cell Site*, como também reduz a quantidade de equipamentos nos demais segmentos. Esta redução de equipamentos contribuiu significativamente para a redução do consumo de energia do *backhaul*.

Para finalizar, analisamos a participação de cada segmento no consumo de energia. Para isto, avalia-se o consumo energético dos segmentos *backhaul* em relação ao consumo total da estrutura em termos de percentual. As Figuras 5.9 (a) e (b) retratam o percentual de consumo de energia por segmento para as arquiteturas FTTC e FTTB, indicando que o maior responsável pelo consumo de energia continua sendo o CS. O que não é nada fora do esperado. O interessante nesse resultado é a distribuição do consumo de energia entre o CS e CO em decorrência da existência ou não do segmento HS, independente de não consumir energia. A ausência do HS em FTTC dá esse comportamento irregular nas participações do CS e CO no consumo de energia, pois a inclusão de novos equipamentos no CO impactam mais significativamente no consumo total de energia do *backhaul.* Porém, quando existe um aumento do tráfego gerado pelos assinantes, portanto a expansão da rede FemtoWoC, a oscilação nas participações de CS e CO reduz.

Em FTTB, o comportamento do CO na participação total do consumo de energia é em virtude da existência do HS. Inicialmente, a participação do CO é significativa, porém se reduz com a expansão da rede FemtoWoC. Isto ocorre porque a utilização dos *splitters* reduz a necessidade de instalação de novos OLTs. E quando se faz necessário à instalação de novos OLTs, o consumo de energia deste equipamento causa menor impacto em comparação ao montante consumido pelo CS.

CAPÍTULO V
CONCLUSÃO

O principal foco desta pesquisa é propor uma metodologia para avaliação do consumo de energia em redes heterogêneas (HetNets). A grande vantagem dessa metodologia é poder analisar o consumo por partes, desde o consumo das estações bases até os segmentos do *backhaul*, podendo identificar no planejamento da rede possíveis gargalos energéticos e soluções. Como caso de estudo, este trabalho avaliou o impacto do *backhaul* no consumo de energia de redes *small cells* para ambientes *indoors* (HetNets), como *Femtocell* convencional e *Femtocell Wireless over Cable* (FemtoWoC). Para isto, o *backhaul* foi analisado como uma única estrutura e, posteriormente, por segmento, como propõe a metodologia. Pela primeira análise, os resultados apontam na mesma direção dos demais trabalhos na área, ou seja, o *backhaul* é responsável por grande parcela do consumo de energia em redes HetNets. Já pela segunda análise, os resultados indicam que principal responsável pelo consumo de energia do *backhaul* é o segmento responsável por agregar o tráfego das estações bases (ou seja, o *Cell Site, CS)*, podendo representar entre 66% e 99% do consumo total desta estrutura, dependendo do tipo de arquitetura empregada. A adoção de arquiteturas mais eficientes e equipamentos com baixo consumo de energia no segmento gargalo pode reduzir o consumo de energia do *backhaul*, podendo até permitir sobre vida a certos tipos de tecnologias de acesso ao meio até então descartados.

Analisando as arquiteturas *backhaul Fiber-to-the-Curb* (FTTC), *Fiber-to-the-Building* (FTTB) e *Fiber-to-the-Home* (FTTH) em redes *indoor* baseadas em *Femtocell* convencional foi identificado que as arquiteturas *backhaul* com menor e maior consumo de energia são FTTH e FTTB, respectivamente. A diferença no consumo de energia se deve basicamente em virtude da estruturação do *Cell Site* e *Hub Site*, que devido à organização da arquitetura *backhaul* e da rede contribuem para o aumento do consumo de energia de forma significativa. Outro motivo que contribui para FTTH ter menor consumo de energia é por adotar equipamentos com baixo consumo energético como os *splitters* e ONUs.

A pesquisa demonstrou que o planejamento adequado pode permitir que tecnologias baseadas em cobre, como VDSL2 e G.fast, se associadas com a tecnologia de fibra e *small cells* com processamento centralizado, podem ter uma sobrevida principalmente devido ao seu baixo custo de implantação e redução no consumo de energia.

Quando as *Femtocells* convencionais são trocadas por FemtoWoCs, as arquiteturas FTTC e FTTB são reorganizadas, principalmente no segmento CS. Estas mudanças nas arquiteturas *backhauls* provocam redução no consumo de energia, que, aliás, tem valores de consumo inferiores ao apresentado pela arquitetura *backhaul* FTTH em rede femtocelular convencional, melhor caso até então. Em rede FemtoWoC, a arquitetura *backhaul* que apresentou o menor consumo de energia foi a FTTB. As mudanças na estrutura do CS aliado a equipamentos com menor consumo de energia contribuíram significativamente para a redução do consumo em todos os segmentos e na

estrutura *backhaul* como um todo. Portanto, adotar soluções de arquitetura no segmento gargalo do *backhaul* aliado a equipamentos com menor consumo de energia reduz significativamente o impacto do *backhaul* sobre as redes heterogêneas impulsionadas pelas *small cells*.

Podemos concluir que o principal gargalo da arquitetura *backhaul* sempre se encontrará na borda de rede, ou seja, *cell site*; e que o consumo de energia pode ser reduzido significativamente ajustando o CS através da reformulação da arquitetura do segmento e por redução do consumo de energia nos equipamentos. Estes ajustes no CS impactam diretamente no consumo energético dos demais segmentos, contribuindo para redução total no consumo de energia do *backhaul*.

Como prosseguimento da pesquisa, são propostos como trabalhos futuros adoção da tecnologia G.fast para analisar o impacto energético dessa arquitetura no *backhaul Fiber-to-the-Distribuition point* (FTTDp). Também analisar outras tecnologias emergentes de *small cells*, como o *Radio Dot*, em termos de consumo de energia tanto na rede como no *backhaul*. Outra possibilidade é estudar o ambiente *outdoor* que tem outra realidade tanto em termo de demanda de tráfego e de consumo de energia.

REFERÊNCIAS

[1] P. Monti, S. Tombaz, L. Wosinska, J. Zander, "Mobile backhaul in heterogeneous network deployments: Technology options and powerconsumption," *Transparent Optical Networks (ICTON), 2012 14th International Conference on* , vol., no., pp.1-7, 2-5 July 2012.

[2] S. Tombaz, P. Monti; K. Wang, A. Vastberg, M. Forzati, J. Zander,"Impact of Backhauling Power Consumption on the Deployment ofHeterogeneous Mobile Networks," *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE* , vol., no., pp.1-5,5-9.Dec.2011.

[3] *Ericsson Mobility Report: on the pulse of the networked society*, Ericsson, Stockholm, Sweden, November 2013.

[4] Monica Paolini, "Beyond Data Caps – An Analysis of the UnevenGrowth in Data Traffic," *SenzaFili Consulting*, 2011.

[5] *High-Capacity Indoor Wireless Solutions: Picocell or Femtocell?*, Fujitsu Network Communications Inc., Richardson, Texas, September, 2013.

[6] S. Tombaz, P. Monti, F. S. Farias, M. Fiorani, L. Wosinska, J. Zander, "Is Backhaul Becoming a Bottleneck for Green WirelessAccess Networks?," *In IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, vol., no., pp.4029,4035, 10-14 June2014.

[7] Farias, F.S.; Monti, P.; Vastberg, A.; Nilson, M.; Costa, J.C.W.A.; Wosinska, L., "Green backhauling for heterogeneous mobile access networks: What are the challenges?," *Information, Communications and Signal Processing (ICICS) 2013 9th International Conference on* , vol., no., pp.1,5, 10-13 Dec. 2013

[8] "Mobile Backhaul: Fiber vs Microwave, " Cegragon white paper, year:2009.

[9] "Microwave Backhauling – Meeting the Capacity Challenges of 4G/LTEand Beyond," Ceragon technical brief, year 2012.

[10] *World Broadband Statistics – Q1 2013*,Point Topic World Broadband Statistics, London, UK, June, 2013.

[11] "DSL Acceleration: Making it work, " Heavy Reading white paper, June, 2012.

[12] H. Raza, "A brief survey of radio access network backhaul evolution: part I," *Communications Magazine, IEEE* , vol.49, no.6, pp.164,171, June 2011.

[13] Keiser, Gerd, *"FTTX Concepts and Applications"*, New York: John Wiley & Sons, 2006.

[14] Weinstein, S., Luo, Y., Wang, T.: Passive Optical Networks. IEEE Conference Publications, Piscataway, NJ (2012)

[15] Lee, C.H., Sorin, W.V., Kim, B.Y.: Fiber to the home using a PON infrastructure. IEEE/OSA J. Lightwave Tech. 24(12), 4568–4583 (2006). doi: 10.1109/JLT.2006.885779

[16] ITU-T G.984.1, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics", 2008.

[17] ITU-T G.983.1, "Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)", 2005.

[18] McGarry, M.P., Reisslein, M., Maier, M., Keha, A.: Bandwidth management for WDM EPONs. OSA J. Opt. Netw. 5(9), 637–654 (2006)

[19] ITU-T G.987.1, “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements”, 2010

[20] Metsälä, E. “Backhaul Transport Technologies”, *in Mobile Backhaul (eds E. Metsälä and J. Salmelin), 1st ed.*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp 129-163.

[21] J. M. Cioffi, "Lighting up copper [History of Communications]," *Communications Magazine, IEEE* , vol.49, no.5, pp.30-43, May 2011.

[22] F. S. Farias, G. S. Borges, R. M. Rodrigues, A. L. Santana, J. C. W. A. Costa, "Real-time noise identification in DSL systems using computational intelligence algorithms," *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2013 International Conference on* , vol., no., pp.252,255, 16-18 Oct. 2013.

[23] "Fiber, Microwave and Copper in the mobile backhaul", SELTA Business case, Market development, Nov. 2010, Ed. 2.

[24] F. S. Farias, “Identificação e Estimação de Ruído em Redes DSL: Uma abordagem Baseada em Inteligência Computacional”, M. S. thesis, Universidade Federal do Pará, Brazil, 2012.

[25] ITU-T G.993.1, “Very high speed digital subscriber line transceivers (VDSL)”.

[26] Leon Spencer, “ITU approves G.fast DSL high-speed broadband standard”, (ZDNet), [online] 2015, http://www.zdnet.com/article/itu-approves-g-fast-mixed-technology-broadband-standard/

[27] *Small cells –Big Ideas: How small cells left home – and where they’re going next*, Ver. SCF030.04.03, Rel. 4, Small Cell Forum, United Kingdom, February 2014 [Online]. Available: http://www.scf.io/en/download.php?doc=030

[28] J. Zhang and G. de la Roche, *Femtocells: Technologies and Deployment*, John Wiley & Sons, 2010

[29] J. Gambini, U. Spagnolini, "Wireless over cable for Femtocellsystems," *Communications Magazine, IEEE* , vol.51, no.5,pp.178-185, May 2013

[30] *Radio Dot System*, Telebriefings, Ericsson AB, 26 de setembro de 2013.

[31] *Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown*, Deliverable D2.3, EARTHproject, January 2012

[32] *Skatteverket and Sweco*, City of Stockholm, SCB, SMHI, Stockholm,Sweden, 2013.

[33] *Statistical Yearbook 2011*, 56th issue, United Nations, New York,2013.

[34] *SFP+ 10 Gb/s and Low Speed Electrical Interface*, SFF-8431 Rev 4.1 + Addendum, September 15, 2013.