

ARTIGO CIENTÍFICO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

**CIÊNCIA E
TECNOLOGIA**



ESTUDO SOBRE A CAPACIDADE DE COBERTURA DA TECNOLOGIA DE 4ª GERAÇÃO – LONG TERM EVOLUTION (LTE) – NO TEATRO DE OPERAÇÕES RURAL

UEINI CARDOSO DA TRINDADE

Pós-graduado em Gestão de Sistemas Táticos de Comando e Controle

RESUMO: A MAIS AVANÇADA TECNOLOGIA MÓVEL CELULAR QUE TEM SIDO EMPREGADA NO SEGMENTO DE OPERADORAS DE TELECOMUNICAÇÕES PARA APROVISIONAR OS SERVIÇOS DE DADOS DE BANDA LARGA E DE VOZ É O LTE (LONG TERM EVOLUTION). AO COMPARAR O DESEMPENHO DAS REDES MÓVEIS CELULARES DE TECNOLOGIAS ANTERIORES COM ÀS DE 4ª GERAÇÃO, OBSERVA-SE QUE ESTA ALCANÇA ATUALMENTE GANHOS EXPRESSIVOS EM DIFERENTES FATORES, COMO POR EXEMPLO: FLEXIBILIDADE E EFICIÊNCIA NO USO DO ESPECTRO, TAXAS DE TRANSMISSÃO ELEVADAS E SIMPLIFICAÇÃO DA ARQUITETURA DE REDE. NO PROJETO EM ESTUDO PROCURA-SE ANALISAR A ARQUITETURA BÁSICA LTE, SEGUINDO OS MODELOS DE PREDIÇÃO DE ÁREA OKUMURA HATA, PARA PREVER A CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DE DADOS E A ÁREA DE COBERTURA DO SISTEMA EM UM AMBIENTE RURAL PARA APOIO AS OPERAÇÕES MILITARES. OS CÁLCULOS SE FAZEM NECESSÁRIOS PARA DEFINIR A POTENCIALIDADE DO LINK PARA DOWNLINK E A CAPACIDADE DE COBERTURA DE UM SITE EM 758 MHz A 763 MHz CORROBORANDO COM A RESOLUÇÃO 625 DA ANATEL.

PALAVRAS-CHAVE: CAPACIDADE; COBERTURA; LTE, OKUMURA HATA.

INTRODUÇÃO

O acesso às informações, de modo instantâneo, exige o aperfeiçoamento das tecnologias de celular. O surgimento da comunicação sem fio refletiu na transformação do modo como as pessoas passaram a se comunicar. Diante desse cenário que atualmente as tecnologias necessitam abarcar vazão necessária para essa demanda crescente, não obstante os sistemas de comando e controle do teatro de operações crescem concomitantemente com as necessidades do teatro de operações.

Os ganhos tecnológicos de capacidade e de flexibilidade da tecnologia de quarta geração foram aprovados pela Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) dando destaque a ações para aplicação do LTE nos setores de defesa e segurança pública (Resolução 625, Anatel, 2013). O documento trata da destinação e regulamentação quanto às condições de uso da faixa de frequência 703MHz a 708MHz e 758MHz a 763 MHz adicionalmente ao Serviço Limitado Privado (SLP), em aplicações de segurança pública, defesa nacional e infraestrutura, em caráter primário.

O trabalho tem como problema analisar uma estrutura padrão de tecnologia de quarta geração em aproveitamento às iniciativas de aquisição deste segmento tecnológico pelo Exército Brasileiro.

O artigo objetiva o estudo da capacidade de cobertura da rede de telefonia móvel de quarta geração LTE, em um ambiente rural. Tendo como objetivos específicos: apontar a estrutura básica da rede de telefonia móvel de quarta geração LTE; realizar o estudo da amplitude de cobertura da estrutura básica da rede LTE em um ambiente rural; e estimar a capacidade de transmissão da banda disponível pela faixa de radiofrequências de 703 MHz a 708 MHz e 758 MHz a 763 MHz, em um cenário rural.

O presente trabalho contribuirá na análise das potencialidades da tecnologia em estudo em prol de um sistema de comando e controle mais eficiente.

Buscaram-se no campo do conhecimento as principais referências na definição da mais avançada tecnologia móvel celular que tem sido empregada no segmento de operado-



ras de telecomunicações para aprovisionar os serviços de dados banda larga e de voz, LTE.

Ao comparar o desempenho das redes móveis celulares e as tecnologias anteriores com a LTE, ela alcança atualmente ganhos expressivos em diferentes fatores, como por exemplo: flexibilidade e eficiência no uso do espectro, taxas de transmissão elevadas e simplificação da arquitetura rede.

No projeto de cobertura, o modelo utilizado é o Okumura Hata. Os cálculos se fazem necessários para definir a capacidade de uma unidade básica de quarta geração em 758MHz a 763MHz.

1 METODOLOGIA

Além de pesquisa bibliográfica, foram utilizados os cálculos para o projeto de capacidade onde se estima o tráfego dos usuários, cálculos da capacidade média da célula e do número de células necessárias para atender o tráfego estimado. Será feita ainda, uma proposta de otimização desta rede de cobertura, bem como, capacidade e qualidade de uma rede LTE para o cenário da resolução 625 da Anatel destinado para o SLP, em aplicações de Segurança Pública, Defesa Nacional e infraestrutura, atendendo a iniciativa do Exército Brasileiro no Projeto SISNACC (Sistema Nacional de Comunicações Críticas) de 2013.

Foram apresentados os conceitos básicos da tecnologia de quarta geração LTE, como a arquitetura e suas bandas de frequência e conceitos de radiofrequência necessários para o entendimento do processo de otimização propriamente dito, onde são apresentados os modelos de propagação e os cálculos do downlink para uma estação rádio base, sendo este um dos passos realizados no planejamento celular. O Link Budget tem por finalidade calcular a perda máxima de proliferação permitida para que os usuários colocados nas margens das células possam utilizar o sistema. É por meio do Link Budget, cálculo final de potência de todo o percurso entre TX e RX, que se determina a área de cobertura e raio da célula,

o qual permitirá estimar a quantidade de estações rádio base necessária para cobrir a região onde se pretende oferecer o serviço.

Foi estudado o projeto de capacidade onde se estima o tráfego dos usuários, cálculos da capacidade média da célula e do número de células necessárias para atender o tráfego estimado. Foi feita ainda, uma proposta de otimização desta rede de cobertura, bem como, capacidade e qualidade de uma rede LTE para o cenário da resolução 625 da Anatel.

Por fim, foi descrito o processo de otimização utilizado, os resultados obtidos através das simulações que justificam a conclusão do projeto, bem como a análise para o cenário proposto. As conclusões foram exibidas nas considerações finais o que encerra a apresentação do projeto.

2 ARQUITETURA LTE

É de grande conhecimento que a atual geração de padrões sem fio para sistemas celulares é o 4G (quarta geração), projetado para ser o sucessor do padrão 3G (terceira geração). A International

Telecommunications Union (ITU) nomeou que as condições de velocidade de pico para o padrão 4G precisam ser 100 Mbps para a conexão móvel e 1 Gbps para conexões fixas. Na atualidade, a rede LTE é exclusiva operando comercialmente como serviço de Internet móvel de quarta geração no Brasil. De modo que não signifique que com sua chegada o desenvolvimento das outras tecnologias de acesso via rádio de 3G tenham fim.

As metas de desempenho do sistema para LTE foram definidos pelo 3rd Generation Partnership Project (3GPP) em 2005 e documentadas em 3GPP TR 25.913, junto com as metas de capacidade, complexidade, implantação e arquitetura. A seguir, as principais medidas de desempenho do sistema:

a. Taxa de transferência média, medida por MHz como a média dos usuários;

b. Rendimento de usuário de ponta, medido por MHz nos 5% da distribuição de usuários (95% dos usuários com melhor desempenho);

c. Eficiência do espectro, que indica o rendimento do sistema por setor em termos de bps/MHz.(GONÇALVES, 2011).

d. A tecnologia LTE foi desenvolvida de modo a cumprir determinados requisitos como:

e. Suporte a várias larguras de banda 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz nos modos de Frequency Division Duplex (FDD) ou Time Division Duplex (TDD);

f. Utilização de modulação adaptativa (QPSK, 16 QAM e 64 QAM); Downlink: 100 Mbps; Uplink: 50 Mbps;

g. Suporte a SIMO e MIMO 2x2 e 4x4;

h. Aumento da eficiência Espectral (cerca de 2-4 vezes superior à tecnologia precedente). (TECHNICAL SPECIFICATION GROUP (TSG), 2012).

Considerando-se a banda máxima de 20 MHz que corresponde à eficiência espectral de pico de 5 e 2,5 bps / Hz respectivamente. Em tempo, observa-se que ao nível do acesso rádio em LTE, são utilizadas as modulações *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), para *downlink* e *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SCFDMA), para *uplink*. Ambas se baseiam nos mesmos princípios, porém, apresentando pequenas diferenças (PERNES e NEVES, 2009).

Diante do exposto, observou-se que os produtos LTE têm a vantagem de possuir por exemplo: aspectos como instalação plug and play, autoconfiguração e auto otimização que propiciarão a simplificação e redução do custo de implantação e gerenciamento da rede. Cita-se ainda que o LTE será implementado paralelamente com as redes de transporte e núcleo baseado em IP simples, nos quais a construção, manutenção e introdução de serviços são simplificadas. (MAZZONI, 2014)

De acordo com a teoria e conforme já mencionado anteriormente, o alcance de uma rede LTE é de 300 Mbps de downlink e 75 Mbps de uplink. Porquanto na prática, esses números caem para 100 Mbps de downlink e 50 Mbps de uplink, podendo-se atribuir esse fato aos overheads e dos obstáculos da infraestrutura da rede. Na hipótese mais otimista, porém, ainda teoricamente, os smartphones atuais, conseguem operar com velocidades de 7.2 Mbps de downlink e 348 Kbps de uplink. Que traduzindo, quer dizer que o LTE é pelo menos 10 vezes mais eficiente que o aparelho.

Pode-se, deste modo, entender e resumir que ao introduzir a flexibilidade do LTE nas áreas de segurança pública existem possibilidades ainda inimagináveis de sua utilização. O setor de Defesa no Brasil perfilha a precisão de melhorias tecnológicas na comunicação banda larga Militar e recorre à LTE na busca pela evolução em direção à tecnologia Privado para Defesa e Segurança Pública no Brasil. (ANDRUSENKO, BURBANK E OUYANG, 2015)

São vários os países que utilizam os sistemas LTE na prestação de serviços de missão crítica como: situações de calamidade pública e combate a desastres naturais, ou ainda, situações de crise da infraestrutura de comunicação básica, além de eventos com grande concentração de pessoas.

Diante dessas situações, as infraestruturas das operadoras de telecomunicações são utilizadas. Levando-se em conta: a flexibilidade, os ganhos tecnológicos, capacidade, disponibilidade e barateamento dos terminais é que foram aprovadas e implementadas as ações para aplicação do LTE nos setores de Defesa e Segurança Pública, baseando-se na resolução 625 da Anatel publicada no ano de 2013. O documento trata da destinação e regulamentação quanto às condições de uso da faixa de 698 MHz a 806 MHz e 703 MHz a 708 MHz e 758 MHz a 763 MHz, foi destinado para o Serviço Limitado Privado (SLP), em aplicações de Segurança Pública, Defesa Nacional e infraestrutura, em caráter primário .



No contexto do que até aqui foi abordado, o próximo segmento trata especificamente a arquitetura e as tecnologias envolvidas em torno das redes LTE de quarta geração.

O LTE conforme já mencionado, foi idealizado para que tivesse contextualização com a existente terceira geração de tecnologia, a única diferença está na simplificação da arquitetura que mantém alguns elementos da estrutura 3G. O sistema novo foi selecionado fundamentando-se em um bloco chamado de EPS, do inglês *Evolved Packet System*, ou, Sistema de Pacotes Evoluído, que se converte nos elementos-chave: e-UTRAN, que é onde se agrupam os equipamentos do usuário, ou UE, do inglês *User Equipment*, e na estação base, chamada de eNodeB, ou eNB, do inglês *Evolved Node B*; e o EPC, do inglês *Evolved Packet Core*, onde são encontrados os elementos de acesso à rede, o que atualmente vem a contrastar com a arquitetura hierárquica do sistema 3G, que é possuidora de muitos nós de rede. (ZANETTI, 2011).

É o fato da rede utilizada no LTE ser mais simples que as redes anteriormente utilizadas que os pacotes são gerenciados e processados no núcleo EPC. O resultado desse processo está na produção de respostas em menor tempo, aprimorando a taxa de comunicação e o tempo de latência, o componente eNB adveio no suprimento das funções do *Radio Network Controller (RNC)* das redes UMTS, conectando-se diretamente ao núcleo EPC. Desse modo, o RNC concretiza a gestão de recursos de rádio, tendo ainda algumas das funções de gerenciamento de mobilidade e é neste ponto que é feita a criptografia antes que os dados do usuário sejam enviados entre os dispositivos (GUEDES E VASCONCELOS, 2014).

A rápida alteração na taxa de transmissão de dados é a característica mais comum nas redes sem fio, a arquitetura LTE utiliza-se da retransmissão no eNB no gerenciamento desta variação buscando contornar esse obstáculo. A adoção de mecanismos de controle de fluxo no núcleo principal da arquitetura EPC

colabora para evitar perda de dados ou overflow. (GUEDES e VASCONCELOS, 2014).

O *Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)* é a estrutura utilizada na correção dos pacotes de erros na camada física (PHY), podendo além do mais, existir a chance que certos pacotes sejam deixados mesmo com erros desde que sejam cabíveis para determinadas aplicações, sendo deste modo, passados para as camadas superiores. O mecanismo seguinte é o *Automatic Repeat Request (ARQ)* é exercido na camada Radio Link Control (RLC), que vigia os erros restantes podendo corrigir tais erros ou fazer o descarte dos pacotes.

O sistema LTE apresenta ainda outras características relevantes no projeto de uma rede. Entre as quais, se cita o uso de múltiplas antenas para transmissão e recepção, técnica conhecida como MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*). Esta técnica se destina à melhoria de desempenho e capacidade do sistema, obtenção de uma cobertura ampliada e de taxas de vazão mais elevadas. As configurações de MIMO padrão para LTE são 1x1, 2x2, 4x2 e 4x4, onde o primeiro número representa o número de antenas de transmissão e o segundo, o número de antenas de recepção utilizadas (ZANETTI, 2011).

Outro ponto relevante é o controle de potência do sistema LTE, podendo fazer com que o sistema seja melhorado em sua capacidade e reduza o consumo de energia. Para tanto, essa técnica controla a potência dos sinais de interesse enquanto limita a interferência no canal. Em resumo, essa técnica estabelece uma conexão entre o transmissor e o receptor, controlando a intensidade de sinal que um transmite para o outro (ZANETTI, 2011).

3 PLANEJAMENTO DE COBERTURA

O planejamento de rede é o processo realizado para obtenção da maior cobertura de atuação empregando a menor quantidade de equipamento, paralelamente, aprovisionar a capacidade de rede indispensável para que se



atenda a necessidade de tráfego dos usuários. É necessário que se passe por estágios específicos para que os objetivos sejam alcançados os quais incluem a definição dos parâmetros de projeto, ou seja, um plano inicial detalhado e sua otimização.

Nesse primeiro estágio incide a obtenção de informações como ajuste do modelo de propagação, que é o processo para calibração do modelo de propagação teórico utilizado; e definição da frequência utilizada. Com isso, será possível dimensionar área do site ou da eNodeB quantificando a demanda de transmissão e a cobertura da região calculada.

3.1 MODELO DE PROPAGAÇÃO

O Modelo de Okumura - Hata é um dos métodos mais empregados que cobre a faixa de 150 MHz a 3 GHz é adequado para distâncias entre 1 e 100 km. É fundamentado em uma ampla quantidade de medidas realizadas na cidade de Tóquio em frequências de até 1920 MHz, obtidas com um transmissor a uma altura efetiva de 200 m e o receptor móvel a uma altura de 3 m.

O modelo de Okumura Hata atende três tipos de terrenos e meio ambiente:

- a. área aberta: definida como espaço aberto, sem árvores altas ou edifícios;
- b. subúrbio: definido como vilarejos, rodovias dispersas com árvores e casas, onde possa haver alguns obstáculos perto do celular; e
- c. área urbana: definida como grande assentamento com edifícios altos que possuem dois ou mais andares próximos uns dos outros.

O modelo usou a área urbana como um modelo padrão e introduziu fatores de correção para a aplicação do modelo às categorias. A fórmula empírica de perda de trajetória (*Path Loss*) desenvolvida é expressa em termos de dB conforme apresenta a equação: L_p

$$= 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 h_b - a + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log R. \text{ (MOURA, 2011), onde:}$$

PL - Path Loss médio na propagação [dB];

f - é a frequência em MHz sendo limitada na faixa de 150 MHz a 1500 MHz;

h_b - é a altura da antena da eNodeB em metros e o seu valor está dentro da faixa de 30 a 200 m;

h_m - é a altura da antena na estação rádio base móvel dado em metros e sua faixa varia de 1 a 10 m;

d - é a distância do enlace dada em km e pode chegar até 20 km;

K e h_m - variam com o tipo de área e são dados por:

Urbano: todas as áreas urbanas possuem $k = 0$ [dB].

Área aberta (rural), dada pela equação: $L_{op} = L_p \{Área Urbana\} - 4,78(\log f_c)^2 - 18,33 \log f_c - 40,94$.

3.2 LINK BUDGET

O *Link Budget* tem por finalidade calcular a perda máxima de propagação permitida para que os usuários colocados nas bordas das células possam utilizar o sistema. É por meio do *Link Budget* que se pode determinar a área de cobertura e o raio da célula, permitindo estimar a quantidade de estações rádio base necessárias para cobrir a região onde se pretende oferecer o serviço. Vale ressaltar que as características do ambiente (urbano denso, urbano, suburbano entre outros) no qual a rede será instalada influenciam em seu resultado devido às múltiplas reflexões que o sinal propagado irá sofrer podendo também o *Link Budget* variar conforme o objetivo de cobertura desejado seja ela indoor ou outdoor. Pois para cada uma dessas, as perdas de propagação do sinal são diferentes. A partir da máxima perda de propagação calculada, é possível se de-



terminar o raio da célula. De posse do raio da célula, é calculada a sua área e, dessa forma, pode ser feita a estimativa do número de eNobes indispensáveis para que seja possível a cobertura do sistema em uma determinada região. (MOURA, 2011).

Em meio aos parâmetros necessários para o cálculo, os fundamentais são a potência de transmissão, os ganhos das antenas e as demais perdas plausíveis de ocorrerem quando a onda se propaga do transmissor até o receptor. A Margem de Desvanecimento ou *Fade Margin* é a margem a ser considerada no *Link Budget* com a finalidade de afiançar que o terminal móvel possa operar na borda das células, onde a relação SINR (Sinal Ruído + Interferência) é baixa. Por causa dos múltiplos percursos nos sistemas celulares a margem de desvanecimento deve ser considerada. Uma margem de desvanecimento a ser aceita como boa referência é o desvanecimento, no qual o canal de rádio adota a distribuição de Rayleigh, onde para áreas urbanas o valor adotado deve ser entre 4 dB e 6 dB. (MOURA, 2011)

A equação: $L = P_{tx} + G_{tx} - l_{tx} - SNR_{requerida} - S_{rx} + G_{rx} - l_{rx} + G_{dv} - M$, apresenta o cálculo do Link Budget, onde:

L - Máxima Perda de downlink / uplink;

P_{tx} - Potência de Transmissão [dBm];

G_{tx} - Ganho da Antena Transmissora [dBi];

l_{tx} - Perdas na Transmissão [dB]

$SNR_{requerida}$ - Relação Sinal Ruído Requerida [dB];

S_{rx} - Sensibilidade Requerida na Recepção [dB]

G_{rx} - Ganho da Antena Receptora [dBi];

l_{rx} - Perdas na Recepção [dB];

G_{dv} - Ganho de Diversidade [dBi];

Não obstante, a ERP (*Effective Radiated Power*) é distinguida pelas perdas e ganhos - existentes entre o amplificador de potência e

a antena de transmissão. Caracteristicamente o ponto de parâmetro para a potência irradiada é a energia emitida pela antena. Sendo usada uma antena isotrópica como referência e por isso é usada a TX_{EIRP} (*Effective Isotropic Radiated Power*), definidos os parâmetros da TX_{EIRP} , ela pode ser representada pela equação: $TX_{EIRP} = P_{tx} + G_{TxDG} + GT_x - L_{TxLL}$ (MOURA, 2011), conforme valores apresentados na Tabela I.

TABELA I Valores para cálculo da TX_{EIRP}

PARÂMETROS	DOWNLINK
Potência de Transmissão - P_{tx}	46 [dBm]
Número de Antenas - N_{tx}	2
Ganho de Diversidade - G_{TxDG}	3 [dB]
Perda na Linha de Transmissão $- L_{TxLL}$	1 [dB]
Ganho da Antena - G_{Tx}	17 [dBi]

Onde:

Potência de transmissão: se refere à potência na saída do equipamento de rádio;

Número de antenas: número de antenas na transmissão;

Ganho de diversidade: ganho de diversidade obtido na transmissão com múltiplas antenas, dado pela equação $G_{TxDG} = 10 \log(N_{tx})$ (MOURA, 2011).

Perda na linha de transmissão: perdas encontradas entre a saída do equipamento de rádio e a antena transmissora;

Ganho da antena: ganho da antena de transmissão.

A RX_{EFS} (*Effective Receiver Faded Sensitivity*) é definida pelas perdas e ganhos entre o receptor e a antena de recepção e possui valores típicos. Define o menor sinal a ser recebido de forma a garantir o funcionamento do receptor nos requisitos determinados pelo padrão do sistema em questão:

Dadas às definições dos parâmetros da RX_{EFS} , a mesma pode ser calculada por: (MOURA, 2011).

Conforme dados apresentados na Tabela II.



TABELA II Valores para cálculo da RX_{EFS}

PARÂMETROS	VALORES
Parâmetro Downlink Ruído Térmico – N_o	174[dB m/Hz]
Largura de Faixa por Subportadora - SC_{zw}	15 [kHz]
Número de Subportadoras ocupadas - SC_o	-
Figura de Ruído - NF	6[dB]
Modulação	16 QAM
SNR (Relação Sinal Ruído) - SNR	4,140 [dB]
Margem de Implementação - IM	3 [dB]
Margem de Desvanecimento Rápido - FF	-
Ganho de Diversidade de Rx - GR_{DG}	3 [dB]
Ganho da Antena de Rx – GR_x	7 [dBi]
Perda na Linha de Rx - LR_{LL}	0 [dB]

Onde:

Ruído Térmico: densidade espectral de potência do ruído, dada pela equação $N_o = kT$ (MOURA, 2011), onde:

K - constante de Boltzman = $1,38 \times 10^{-23}$ [W/(Hz K)];

T - Temperatura ambiente em graus Kelvin = 290 [K]; e

Largura de faixa por subportadora: largura de faixa definida pelo 3GPP para as subportadoras LTE.

A seguir, a Tabela III define a banda das subportadoras, o número de subportadoras por Resource Block (RB) e o número de RBs associados com cada banda do canal. Esses valores serão em seguida empregados na determinação da sensibilidade efetiva de recepção.

TABELA III Largura de Banda das Subportadoras

Largura de Faixa	5 [MHz]	10 [MHz]	15 [kHz]	20 [MHz]
Banda (BW) por Subportadora [kHz]	15 [kHz]	15 [kHz]	15 [kHz]	15 [kHz]
Subportadora por Resource Block	12	12	12	12
Número de Resource Blocks	25	50	75	100

Onde:

Número de subportadoras ocupadas: número de subportadoras alocadas para downlink;

Figura de ruído: mede a degradação da SNR entre a entrada e a saída do receptor e é dada pela equação $NF_{db} = 10 \log(F)$ (MOURA, 2011), onde:

F é a figura de ruído do equipamento em escala linear.

Modulação: modulação usada no sistema;

SNR: compara a potência do sinal recebido com a potência do ruído.

A seguir têm-se alguns valores típicos de SNR em função do MCS (*Modulation and Coding Scheme Index*) apresentados na Tabela IV.

TABELA IV Valores típicos de margem de desvanecimento

PERFIL DO CANAL	QPSK	16-QAM	64-QAM
AWGN	0 [dB]	0 [dB]	0 [dB]
PB3	4,5 [dB]	5,3 [dB]	7,0 [dB]
VA30	5,2 [dB]	5,7 [dB]	8,0 [dB]

Onde:

PB3 e VA30: são modelos de canal para deslocamento pedestre e veicular com velocidade de até 30 km/h.

Ganho de diversidade: ganho de diversidade obtido pela utilização de duas ou mais antenas na recepção do sinal;

Ganho da antena de recepção: ganho máximo da antena de recepção na direção do lóbulo principal;

Perda na linha de Rx: perdas entre o receptor e a antena de recepção.

Tendo sido calculados os valores de TX_{EIRP} e RX_{EFS} a máxima perda de propagação é definida pela equação $PL = TX_{EIRP} - RX_{EFS} - L_B - M_{INT} - M_{SF}$ (MOURA, 2011).



A tabela V define os valores a serem calculados para o *Path Loss*.

TABELA V Valores típicos para o Cálculo de *Path Loss*

PARÂMETROS	DOWNLINK
Potência Efetiva Irradiada – $T\dot{X}_{EIRP}$	-
Sensibilidade Efetiva de Recepção – $R\dot{X}_{EFS}$	-
Perda por influência do corpo humano, carros, vegetação e construções – L_B	10[dB]
Margem de Interferência – M_{INT}	2 [dB]
Margem do Modelo Log Normal – M_{SF}	-

Onde:

Perdas: perdas causadas por influência do corpo humano, carros, vegetação e construções entre o transmissor e o receptor;

Margem de interferência: margem devido à interferência entre sites adjacentes e que usam as mesmas frequências;

Margem Log-Normal: quando um móvel está se deslocando, os obstáculos existentes entre ele e a estação rádio base podem causar obstrução do sinal; o que por sua vez, gera desvanecimento deste, acarretando flutuações na potência média recebida. Tal desvanecimento recebe o nome de desvanecimento de larga escala ou Log-Normal, uma vez que obedece a distribuição Log-Normal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CÁLCULO DA ÁREA DE COBERTURA PARA A FREQUÊNCIA DE 760,5 MHZ

Para a execução do Projeto de cobertura utilizando frequência de 760,5 MHz, sendo a frequência central da portadora, os valores dos parâmetros necessários foram selecionados de modo que atenda da melhor forma o projeto proposto. Com os dados apresentados na Tabela VI, é possível realizar os cálculos da potência efetiva de transmissão, sensibilidade efetiva de recepção, path loss, raio da célula, área da célula e área do site.

Na Tabela VI estão representados os

parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo de downlink, com exceção da sensibilidade requerida na recepção.

TABELA VI Parâmetros necessários e valores adotados para o cálculo de Link Budget de Downlink.

PARÂMETROS	DOWNLINK	
Modulação	16-QAM	
Largura de Faixa do Canal	5 [MHz]	
Número de Subportadoras para Largura de Faixa Por Subportadora	5 MHz, BW 15 kHz	300
Subportadora por Resource Block	3	
Número de Resource Blocks	100	
SNR para MCS Index	10	3,335 [dB]
Taxa de Codificação	0,332	
Margem de Desvanecimento Rápido para PB3	5,3 [dB]	
Margem de Log Normal para Abertura de Feixe da Antena	65°	4,2 [dB]
Expoente de Propagação	4	
Desvio Padrão	6	
Cobertura na Borda da Célula	90%	

Com a finalidade de calcular a potência efetiva de transmissão, primeiramente se deve realizar o cálculo do ganho por diversidade, conforme a equação $G_{TxDG} = 10 \log(N_{tx})$, logo $G_{TxDG} = 3,0103 [dB]$.

Após esse procedimento, é possível encontrar o resultado da equação: $T\dot{X}_{EIRP} = P_{tx} + G_{TxDG} + G_{Tx} - L_{TxLL}$.

De acordo com os parâmetros da Tabela VII o resultado é $T\dot{X}_{EIRP} = 66,0103 [dBm]$.

TABELA VII Valores calculados e adotados para cálculo da $T\dot{X}_{EIRP}$

PARÂMETROS	DOWNLINK
Potência de Transmissão – P	46 [dBm]
Número de Antenas – N_{Tx}	2
Ganho de Diversidade – G_{TxDG}	3,0103 [dB]
Perda na Linha de Transmissão – L_{TxLL}	1[dB]
Ganho da Antena – G_{Tx}	18[dBi]



De acordo com os parâmetros apresentados na Tabela VIII, pode-se realizar o cálculo da sensibilidade efetiva de recepção. É necessário calcular a densidade espectral de potência do ruído térmico por meio da equação $N_o = k \cdot T$, tem-se:

$$N_o = 4,002 \times 10^{-21} \text{ [W/Hz]}$$

Onde:

$$T - \text{Constante de Boltzman} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ [(W/Hz) \times K]}$$

$$K - \text{Temperatura ambiente em graus Kelvin} = 290 \text{ [K]}$$

De acordo com a equação $RX_{EFS} = N_o + 10 \log [\log (SC_{BW} \cdot SC_{\rho})] + NF + SNR + IM + FF - G_{RxDG} - G_{Rx} + L_{RxLL}$, encontra-se $RX_{EFS} = -99,83 \text{ [dBm]}$.

TABELA VIII Valores calculados e adotados para cálculo da RX_{EFS}

PARÂMETROS	DOWNLINK
Densidade Espectral de Potência do Ruído Térmico - N_o	-174[dBm/Hz]
Figura de Ruído - NF	6 [dB]
BW por Subportadora - SC_{BW}	1500 [Hz]
Subportadoras ocupadas - S_{CO}	300
Relação Sinal Ruído - SNR	3,335 [dB]
Margem de Implementação - IM	3 [dB]
Margem Desvanecimento Rápido - FF	5,3 [dB]
Ganho por Diversidade de Recepção - G_{TxDG}	0 [dB]
Ganho da Antena de Recepção - G_{Tx}	0 [dB]
Perda Cabeamento de Recepção - L_{TxLL}	0 [dB]

O cálculo de *Path Loss* aceitável é obtido por meio da equação $PL = TX_{EIRP} - RX_{EFS} - L_B - M_{INT} - M_{SF}$, conforme os dados da Tabela IX, sendo encontrado o valor de $PL = 155,64 \text{ [dB]}$.

Para efeitos dos cálculos, o $a(h_m)$ será de 0 [dB] para todas as áreas rurais.

Neste caso, o raio da célula, representado por "R" pode ser determinado

pela equação $L_p = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 h_p - a + (44,9 - 6,55 \log h_p) \log R$.

TABELA IX Parâmetros estimados e cálculos de Downlink

PARÂMETROS	DOWNLINK
Potência Efetiva de Transmissão - TX_{EIRP}	66,01[dB]
Sensibilidade Efetiva de Recepção - RX_{EFS}	-99,83 [dBm]
Margem de Log Normal - M_{SF}	4,2 [dB]
Margem de Interferência - M_{INT}	4 [dB]
Penetração Indoor - L_B	0 [dB]
$a(h_m)$	0 [dB]
Frequencia de Operação [MHz] - f_c	760,5 [Mhz]
Altura da antena da estação rádio base - h_b	30 [m]
Altura da antena da estação móvel - h_m	2 [m]
Fator de correção para áreas suburbanas - k	0 [db]

A Tabela X mostra os dados usados para o cálculo R, obtendo-se $R = 7,65 \text{ km}$.

TABELA X Valores dos parâmetros

PARÂMETROS	DOWNLINK
Frequência de Operação - f_c	760,5 [MHz]
Altura da Antena da Estação Rádio Base - h_b	30 [m]
Altura Efetiva da Antena Da Estação Móvel - h_m	2 [m]
Fator de Correção para Áreas Urbanas - k	0 [dB]
Fator de Correção Áreas Rurais - $a(h_m)$	0 [dB]
<i>Path Loss</i> - PL	155,64[dB]

Com o raio da célula determinado, pode-se calcular a sua área. O cálculo da área do site depende da setorização do mesmo. Neste projeto foram consideradas células hexagonais e sites com dois setores. Dessa forma, a área do site é dada pela equação $A_{SITE} = 9/8 \sqrt{3} R^2$. Obtém-se, para os valores de R encontrados anteriormente que $A_{SITE} = 114,03 \text{ [km}^2\text{]}$.



4.2 PROJETO DE CAPACIDADE

O cálculo da quantidade de usuários suportados em cada site é baseado no serviço de cada usuário, considerando o período de tempo mensal, bem como na capacidade total oferecida de pelo site.

O Projeto de Capacidade apresenta as seguintes características: banda de 5 MHz, prefixo cíclico normal (7 símbolos OFDM por time slot), eficiência espectral média de 4 bits por símbolo modulado, calculada pela média aritmética do número de bits por símbolo das modulações 64-QAM, 16-QAM e QPSK, uma vez que o sistema LTE emprega modulação adaptativa. (ZANETTI, 2011).

No projeto serão descontados os canais PDCCH (*Physical Downlink Control Channel*) e os sinais de referências. Os canais PDCCH são utilizados para transmitir informações de controle e os sinais de referências são *Resource Elements* existentes nos blocos de recursos, sendo estes empregados para a determinação da qualidade do canal (ZANETTI, 2011).

A transmissão de dados no LTE é realizada por *frames* de duração de $T_{FRAME} = 10\text{ms}$, sendo divididos em dez *subframes* com duração de $T_{SUBFRAME} = 1\text{ms}$. Em seguida o subframe é dividido ainda em dois *time slots*, obtendo um total de 20 *time slots*, com duração de $T_{TS} = 0,5\text{ms}$ cada. (ZANETTI, 2011).

Para o cálculo do tráfego mensal da rede (T_M), deve-se considerar o período de um mês (30 dias) e a taxa efetiva total. Torna-se também necessário considerar a carga das células na HMM, a porcentagem do tráfego diário nesse mesmo período, como a setorização dos sites.

A equações $R_{EFETIVA} = [(a.b.2 - c - d). e/2.T_{TS}].\#RB$ e $T_M = \{[R_{EFETIVA}.3600/8192].\%U_{hmm}.30.\#setores\}/\%T_dHMM$ determinam respectivamente a taxa efetiva total de uma célula e o tráfego mensal de um site, onde:

a - número símbolos OFDM por *time*

slot;

b - número de subportadoras por RB;

c - símbolos de referência por *subframe*;

d - canais PDCCH por *subframe*;

e - número de bits médio por símbolo das modulações;

#RB – número total de RBs;

T_{TS} – duração do *time slot*;

Onde:

T_M – Tráfego mensal de um site em Gb;

$R_{EFETIVA}$ – taxa efetiva total da célula em Mb/s;

% U_{hmm} – utilização da capacidade da célula na HMM;

#setores – número de setores da estação rádio base;

% T_dHMM – porcentagem do tráfego diário na HMM.

Para o cálculo aproximado da taxa efetiva total da célula, utilizam-se os valores da Tabela XI e a equação $R_{EFETIVA} = [(a.b.2 - c - d). e/2.T_{TS}].\#RB$. Dessa forma, a capacidade total da célula é $R_{EFETIVA} = 14,8$ [Mb/s].

Para o cálculo do tráfego mensal do site foram utilizados os valores da Tabela XII e a equação $T_M = \{[R_{EFETIVA}.3600/8192].\%U_{hmm}.30.\#setores\}/\%T_dHMM$, dada por:

Onde o resultado obtido é $T_M = 2048,73$ [Gb/mês].

O número de usuários por site é encontrado pela divisão do valor encontrado do tráfego mensal do site pela franquia mensal do usuário, sendo considerada como 3Gb/mês. Com isso, obtém-se o resultado do número aproximado de usuários por site ou *eNodeB* igual a 683 usuários.

TABELA XI Valores calculados e adotados para definição da Taxa Efetiva Total da Célula

PARÂMETROS	DOWNLINK
Duração do Frame – T_{FRAME}	10 [ms]
Número de Subframes em um Frame	10
Duração do Subframe - $T_{SUBFRAME}$	1 [ms]
Número de Time Slots em um Subframe	2
Duração do Time Slot – T_{TTS}	0,5 [ms]
Símbolo OFDM por Time Slot – a	7
Quantidade de Subportadoras por Resource Block – b	12
Símbolos de Referência – c	8
Canais PDCCH – d	12
Nº Médio de Bits por Símbolos das Modulações - e	4
Número de Resource Blocks Alocados - #RB	25

TABELA XII Valores calculados e adotados para definição do tráfego mensal do site

PARÂMETROS	DOWNLINK
Taxa Efetiva da Célula - $R_{EFETIVA}$	14,8 [Mb/s]
Utilização da Capacidade da Célula na Hora de Maior Movimento - $\%U_{hmm}$	70%
Número de Setores por Estação Rádio Base - #setores	3
Tráfego Diário na Hora de Maior Movimento - $\%Td_{HMM}$	20%

CONCLUSÃO

Após a execução do projeto com uma das frequências homologadas pela resolução 625 da ANATEL, para atender as necessidades dos órgãos de segurança pública, concluiu-se que a capacidade de operação de uma estação rádio LTE é diretamente influenciada pelos parâmetros auditáveis do projeto.

Os parâmetros adotados durante esse estudo buscaram atender recursos básicos de serviços em uma rede LTE, contudo para uma

aplicação real é imprescindível o destaque de duas grandezas envolvidas no projeto: a área a ser coberta e a capacidade de dados a ser transmitidos. Essas serão fundamentais para atender as necessidades dos usuários e a boa utilização de recursos financeiros na instalação de estações rádio base LTE, alcançando um alto desempenho em operações militares em ambientes rurais.

Destaca-se, ainda, que a tecnologia de quarta geração atende as expectativas de transmissão de dados. Ela alcança uma taxa de 14,8 [Mb/s] com uma infra-estrutura básica.

Analisando os resultados obtidos observa-se que os sites devem ser instalados em áreas com maior concentração de usuários e de necessidades estratégica para as operações em ambiente rural. Uma vez que a distribuição dos efetivos não é uniforme pela área do Teatro de Operações, como também existem regiões que não apresentam interesse de serem cobertas.

Com isso, a implantação de sites ou eNodeB será proporcional a quantidade de usuários, obedecendo à distribuição das estações rádio base nas áreas de maior interesse. O sistema LTE atenderá dentro das capacidades deste projeto os elementos em operação do Teatro de Operações em ambiente rural, caso haja uma demanda de 2048,73 [Gb/mês], ou a necessidade de atender 683 usuários, para uma área de 114,03 km².

Por fim, o projeto de utilização de um Sistema LTE na faixa de frequência de 758 MHz a 763MHz é capaz de aprovisionar, processar e comutar dados para a demanda crescente de informação em uma operação militar, contribuindo como um meio capaz de embarcar os sistemas de comando e controle, e exaurindo as possibilidades de uma melhor utilização do espectro eletromagnético de uma rede sem fio na faixa de frequência em estudo.



THE STUDY ON THE COVERAGE CAPACITY OF 4TH GENERATION TECHNOLOGY LONG TERM EVOLUTION (LTE) AT THE RURAL OPERATING THEATER

ABSTRACT: THE MOST ADVANCED MOBILE CELLULAR TECHNOLOGY THAT HAS BEEN EMPLOYED IN THE TELECOMMUNICATIONS CARRIER SEGMENT TO PROVISION BROADBAND AND VOICE DATA SERVICES IS LTE (LONG TERM EVOLUTION). WHEN COMPARING THE PERFORMANCE OF MOBILE CELLULAR NETWORKS OF PREVIOUS TECHNOLOGIES WITH THOSE OF 4TH GENERATION, IT CAN BE OBSERVED THAT IT NOW ACHIEVES EXPRESSIVE GAINS IN DIFFERENT FACTORS, SUCH AS: FLEXIBILITY AND EFFICIENCY IN THE USE OF THE SPECTRUM, HIGH TRANSMISSION RATES AND SIMPLIFICATION OF THE ARCHITECTURE NETWORK. IN THE PROJECT UNDER STUDY, THE LTE BASIC ARCHITECTURE IS ANALYZED, FOLLOWING OKUMURA HATA AREA PREDICTION MODELS, TO PREDICT THE DATA TRANSMISSION CAPACITY AND THE AREA OF COVERAGE OF THE SYSTEM IN A RURAL ENVIRONMENT TO SUPPORT MILITARY OPERATIONS. THE CALCULATIONS ARE NECESSARY TO DEFINE THE POTENTIAL OF THE DOWNLINK LINK AND THE CAPACITY OF COVERAGE OF A SITE IN 758MHZ TO 763MHZ CORROBORATING WITH RESOLUTION 625 OF ANATEL.

KEYWORDS: CAPACITY. COVERAGE. LTE. OKUMURA HATA.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Marco Antônio F. R. - LTE (Long Term Evolution) A Evolução das Redes 3G - 2012. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallte/default.asp>> Acesso em: Março.2019.

David PERNES, David NEVES – 2012. Technical Specification Group Radio Access Network Requirements, 3GPP TR 25.913 V9.0.0 (2009-12) Release 9. Agência Nacional de Telecomunicações, “Resolução nº 625, de 11 de novembro de 2013. Disponível em: <www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2013/6_44-resolucao-625> Acesso em: 30 MAIO.2017.

GONÇALVES, J. Análise de Desempenho dos Sistemas LTE e LTE-Advanced com base em Simuladores. Instituto Superior Técnico, Julho 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Lisboa.

GUEDES, L.; VASCONCELOS, R. - UMTS, HSPA e LTE - 2009. Disponível em: <www.tinyurl.com/nrnfpoyp>. Acesso em: março 2019.

J. Andrusenko, J. L. Burbank, and F. Ouyang, “Future Trends in Commercial Wireless Communications and Why They Matter to the Military”, Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 33, Number 1 (2015).

‘LTE Network Throughput Estimation’ by Alexander Babkin, Alexey SEKI, Jorge; BAZZO, Juliano; BARROS, Sergio; TAKAKI, Ricardo; CARRILLO, Dick. - LTE Privado para Defesa e Segurança Pública no Brasil – 2016. Disponível em: <www.sbrt.org.br/sbrt2016/anais/ST21/1570280021.pdf> Acesso em: março de 2019.

MOURA, Carlos Gomes de, Predição de Campo em Comunicação sem fio. 2011.110f.

Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação. – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal 2011.

S. Forge, R. Horvitz and C. Blackman, “Is Commercial Cellular Suitable for Mission Critical Broadband?”, A study prepared for the European Commission DG Communications Networks, Content and Technology by: SCF Associates LTD. European Union, 2014.

T. C. Clancy, M. Norton, M. Lichtman, “Security challenges with LTE advanced systems and military spectrum”, Military Communications Conference, MILCOM 2013-2013 IEEE, 375-381, 2013.

“Telefonia Celular Digital - Livro - Editora Érica - MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR – ISBN 8536500174”.

ZANETTI, Paulo Rogério. Modelagem de canal sem fio para planejamento de rede celular de quarta geração em Brasília. 2011. xv, 95 f., il. Dissertação(Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

Ueini Cardoso da Trindade é bacharel em Ciências Militares pela Academia Militar das Agulhas Negras (AMAN). Concluiu com aproveitamento o curso de Comunicações. É pós-graduado em Engenharia de Sistemas de Radiocomunicação pelo Instituto Nacional de Telecomunicações. Atualmente, exerce a função de Instrutor do Núcleo de Preparação de Oficiais da Reserva da Companhia de Comando e Controle e pode ser contactado pelo email: ueini.trindade@eb.mil.br.

