

3

Planejamento de Sistemas LTE

O processo de planejamento de rede é realizado com o objetivo de se obter a maior cobertura de atuação com a menor quantidade de equipamento possível, e ao mesmo tempo prover a capacidade de rede necessária para se atender a demanda de tráfego dos usuários atendidos.

Para que estes objetivos sejam alcançados, existem estágios típicos a serem realizados, que incluem a definição dos parâmetros de projeto (plano inicial e detalhado) e otimização.

O primeiro estágio do planejamento consiste em se obter informações tais como a cobertura desejada, a quantidade de usuários e sua respectiva distribuição na região de cobertura, estimativas de tráfego por usuário, serviços a serem oferecidos, a qualidade de serviço requerida (QoS - *Quality of Service*), a capacidade necessária, características de possíveis equipamentos e funcionalidades que podem ser utilizadas.

O resultado final deve ser a mínima densidade de estações rádio base a ser instalada, para atender aos objetivos do projeto. Esse estágio usualmente envolve uma simulação para estimar a cobertura e capacidade requerida para os usuários do sistema.

O planejamento detalhado pode ser dividido em processos que incluem [9]:

- *Ajuste do Modelo de Propagação (Model Tuning)* - Processo para calibração do modelo de propagação teórico utilizado. Essa calibração geralmente é realizada através da importação nas ferramentas de predições de arquivos obtidos em medições de campo específicas;
- *Definição dos Locais de Instalação (Site Selection)* - Nos sistemas celulares, a seleção de locais para instalação dos equipamentos é um grande desafio. Esse processo envolve a identificação dos candidatos que podem atender às necessidades de projeto, tais como: KPIs (*Key Performance Indicator*), Cobertura e Capacidade;

- *Dimensionamento* - O objetivo final desta etapa é o dimensionamento do equipamento (células e eNodeBs) para atender a demanda de cobertura e capacidade da região a ser atendida;
- *Parametrização* - Os parâmetros do sistema precisam ser identificados e configurados para o melhor desempenho da rede;

O processo de otimização pode ser dividido em pré-lançamento e pós-lançamento. Devido à carga que o sistema passará a receber após o lançamento comercial da rede, é necessário o acompanhamento dos indicadores de capacidade, cobertura, interferência, entre outros, alterando-se os parâmetros associados para que o sistema fique adequado às necessidades do momento.

3.1. Link Budget

O *Link Budget* é uma das etapas realizadas no Planejamento Celular. Com o Link Budget é calculada a máxima perda de propagação permitida para que os usuários alocados nas bordas das células tenham condições de utilizar o sistema.

Através do *Link Budget* podem-se determinar a área de cobertura e 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, etc.) no qual a rede será instalada, influenciam o resultado do *Link Budget*, devido às múltiplas reflexões que o sinal propagado irá sofrer.

O *Link Budget* também varia de acordo com o objetivo de cobertura desejado, seja ela *indoor*, *incar* ou *outdoor*, pois para cada uma destas, as perdas de propagação do sinal são diferentes.

A potência de transmissão, o ganho das antenas e as perdas do sistema são alguns dos parâmetros que devem ser levados em consideração no cálculo do *Link Budget*.

Cálculos independentes para o *uplink* e para o *downlink* são realizados, dada a distinção dos parâmetros em cada sentido de transmissão.

O sistema celular é raramente limitado pelo *downlink*, pois, a potência transmitida pela estação rádio base é maior que a potência que o móvel é capaz de transmitir.

A equação básica para o cálculo do *Link Budget* em dB é:

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Requerida} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad 3.1-1$$

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];
- M - Margem de Desvanecimento [dB].

A Margem de Desvanecimento ou *Fade Margin* é a margem a ser considerada no *Link Budget* a fim de garantir que o terminal móvel consiga operar na borda das células, onde a relação SINR (Sinal Ruído + Interferência) é baixa. Devido aos efeitos do multipercurso presentes nos sistemas celulares esta garantia, ou Margem de Desvanecimento deve ser considerada.

Uma boa referência para ser adotada como margem de desvanecimento, é o desvanecimento cujo canal de rádio segue a distribuição de Rayleigh, onde para áreas urbanas o valor adotado deve ser entre 4 dB e 6 dB [10].

Uma das formas adotadas para minimizar os efeitos de *Fading* é a técnica da diversidade, que atua fornecendo ao receptor réplicas do mesmo sinal transmitido, que chegam através de caminhos de propagação independentes.

Neste trabalho assumimos como sendo de 3 dB o Ganho de Diversidade no *Link Budget de Uplink* [11].

O SNR vai depender da modulação e da taxa de código adotada, ou seja, está diretamente relacionado à taxa de transferência de dados e ao número de *Resource Blocks* alocados [12].

Conforme mencionado anteriormente, faz-se necessário calcular o *Link Budget* para o *downlink* e para o *uplink*, e a máxima perda encontrada (menor valor de L na comparação entre *downlink* e *uplink*) será adotada na determinação do raio da célula.

3.1.1. Link Budget de Downlink

Na tabela 3.1 encontramos os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do *Link Budget de Downlink*, com exceção da sensibilidade requerida na recepção.

A sensibilidade requerida na recepção segundo a Série 36101 da 3GPP [13] está apresentada na tabela 3.2 e se referem apenas para a modulação QPSK, sendo que os valores variam de acordo com a largura de banda adotada e também com a faixa de frequência de operação do sistema.

Potência de Transmissão	60W; 48 dBm
Ganho da Antena Transmissora	18 dBi
Perdas na Transmissão	3 dB
SNR	0 dB
Ganho da Antena Receptora	0 dBi
Perdas na Recepção	0 dB
Ganho de Diversidade	0 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB

Tabela 3.1 – Valores dos Parâmetros para o *Link Budget de Downlink*.

O valor da Sensibilidade Requerida na Recepção adotado no cálculo do *Link Budget de Downlink* foi de -92 dBm (a maior sensibilidade requerida, para 20 MHz de largura de banda). Este cálculo deve ser realizado para o pior caso, pois se operarmos com larguras de bandas diferentes, perde-se cobertura,

impactando diretamente na configuração espacial das eNodeBs planejadas para cobrir a área original, podendo até mesmo faltarem eNodeBs para atender os objetivos de cobertura e capacidade.

Sensibilidade Requerida Recepção - 5 MHz	-98 dBm
Sensibilidade Requerida Recepção - 10 MHz	-95 dBm
Sensibilidade Requerida Recepção - 15 MHz	-93,2 dBm
Sensibilidade Requerida Recepção - 20 MHz	-92 dBm

Tabela 3.2 – Sensibilidade Requerida na Recepção para a modulação QPSK [13].

Utilizando a equação 3.1-1 e a tabela 3.1, que apresenta os valores adotados no *Link Budget de Downlink*, podemos determinar o valor de L em dB:

$$L_{DL} = 48dBm + 18dBi - 3dB - 0 - (-92dBm) + 0 - 0 + 0 - 4 \quad 3.1-2$$

$$L_{DL} = 151dB \quad 3.1-3$$

3.1.2. Link Budget de Uplink

Na tabela 3.3 encontramos os parâmetros necessários e os valores adotados para o cálculo do *Link Budget de Uplink*.

Potência de Transmissão	23 dBm
Ganho da Antena Transmissora	0 dBi
Perdas na Transmissão	0 dB
SNR	0 dB
Sensibilidade Requerida Recepção	-101,5 dBm
Ganho da Antena Receptora	18 dBi
Perdas na Recepção	3 dB
Ganho de Diversidade	3 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB

Tabela 3.3 – Valores dos Parâmetros para o *Link Budget de Uplink*.

A potência de transmissão adotada para o móvel se refere à máxima potência permitida segundo a Série 36101 da 3GPP [13], com tolerância de 2 dB para mais ou para menos.

O valor adotado para a Sensibilidade Requerida na Recepção está de acordo com a Série 36104 da 3GPP [14], sendo que os valores para as faixas de frequência de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz são de -101,5 dBm para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

Utilizando a equação 3.1-1 e a tabela 3.3, que apresenta os valores adotados no *Link Budget de Uplink*, determinamos o valor de L em dB.

$$L_{UL} = 23dBm + 0 - 0 - 0 - (-101,5dBm) + 18dBi - 3dB + 3dB - 4dB \quad 3.1-4$$

$$L_{UL} = 138,5dB \quad 3.1-5$$

Comparando os resultados das equações 3.1-3 e 3.1-5, concluímos que a máxima perda de propagação permitida ocorre no *Link Budget de Uplink*, conforme esperado, sendo este o valor que deverá ser adotado no cálculo do raio teórico da célula.

3.2. Cálculo do Raio Teórico

No dimensionamento de sistemas de comunicações sem fio, necessitamos uma adequada escolha de modelos de propagação. De modo geral, os modelos de propagação provêm estimativas das perdas de propagação considerando, distância entre transmissor e receptor, fatores de terreno, altura das antenas transmissoras e receptoras e as frequências utilizadas.

O modelo de propagação escolhido para ser utilizado neste trabalho é o modelo SUI (*Stanford University Interin*), que é uma extensão do trabalho realizado anteriormente por Erceg *et al*, para determinar a cobertura da rede [15].

Este modelo foi escolhido, pois é indicado pelo 3GPP para o planejamento de redes WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), padrão IEEE 802.16, que utilizam as faixas de frequência de 2.5 GHz e 3.5 GHz, cobrindo a necessidade que teremos em nosso dimensionamento LTE.

O modelo SUI distingue diferentes categorias para diferentes terrenos, que podem ser classificados como sendo do tipo:

- Terreno Tipo A – Terreno Montanhoso com Alta ou Moderada Densidade de Árvores;
- Terreno Tipo B – Terreno Montanhoso com Baixa Densidade de Árvores ou Planície com Alta ou Moderada Densidade de Árvores;
- Terreno Tipo C – Planície de Baixa Densidade de Árvores.

Para nossa análise, escolhemos a categoria A, pois com esta categoria estaremos realizando o dimensionamento para o pior caso, resultando em uma quantidade maior de estações rádio base.

As perdas de propagação (*Path Loss*, *Path Attenuation*) pelo modelo (em dB) são descritas da seguinte forma:

$$L = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s \quad 3.2-1$$

Que é válida para $d > d_0$, visto que $d_0 = 100m$ representa a distância de referência e A é a perda no espaço livre na distância d_0 . O termo X_f é a correção da frequência, X_h é a correção da altura da antena receptora, s corresponde ao desvanecimento dado pelo tipo de terreno e γ é o expoente de perda do caminho em função da altura da estação rádio base. O termo λ na equação 3.2-2 representa o comprimento de onda associado à frequência de operação do sistema.

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad 3.2-2$$

$$X_f = 6 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad 3.2-3$$

Onde f é a frequência em MHz.

$$X_h = -10.8 \log\left(\frac{h}{2}\right) \quad 3.2-4$$

Para terrenos do Tipo A e Tipo B e,

$$X_h = -20 \log\left(\frac{h}{2}\right) \quad 3.2-5$$

Para terrenos do Tipo C, onde h é a altura da antena receptora, onde $2 \text{ m} \leq h \leq 10 \text{ m}$.

$$\gamma = a - b.h_b + \frac{c}{h_b} \quad 3.2-6$$

Onde as constantes a , b e c foram determinadas empiricamente, e podem ser obtidas na tabela 3.4. A altura da antena da estação rádio base, h_b deve ter valores entre 10 e 80 metros.

Parâmetro	<i>Terreno Tipo A</i>	<i>Terreno Tipo B</i>	<i>Terreno Tipo C</i>
a	4.6	4.0	3.6
b (1/m)	0.0075	0.0065	0.0050
c (m)	12.6	17.1	20.0

Tabela 3.4 – Valores dos Parâmetros do Modelo SUI.

Neste trabalho adotamos a seguinte configuração:

- $f = 2.6 \text{GHz}$
- $h = 2 \text{m}$
- $h_b = 30 \text{m}$
- $s = 4 \text{dB}$

Obtendo os seguintes resultados para cada parâmetro:

Perda no Espaço Livre

$$A = 20 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot 100}{3 \cdot 10^8 / 2600 \cdot 10^6} \right) \quad 3.2-7$$

$$A = 80,74dB \quad 3.2-8$$

Correção da Frequência

$$X_f = 6 \cdot \log \left(\frac{2600 \cdot 10^6}{2000} \right) \quad 3.2-9$$

$$X_f = 0,6836dB \quad 3.2-10$$

Correção da Altura da Antena Receptora

$$X_h = -10,8 \cdot \log \left(\frac{2}{2} \right) \quad 3.2-11$$

$$X_h = 0dB \quad 3.2-12$$

Perda do Caminho em Função da Altura da Antena Transmissora

$$\gamma = 4,6 - 0,0075 \cdot 30 + \frac{12,6}{30} \quad 3.2-13$$

$$\gamma = 4,79dB \quad 3.2-14$$

Substituindo valores na equação 3.2-1, temos:

$$L = 80,74dB + 10 \cdot 4,79 \cdot \log \left(\frac{d}{100} \right) + 0,6836dB + 0 + 4dB \quad 3.2-15$$

Com os valores de L calculados nas seções 3.1.1 (*Link Budget de Downlink*) e 3.1.2 (*Link Budget de Uplink*), conforme os resultados demonstrados na tabela 3.5, realizamos o balanceamento do canal utilizando a equação 3.2-15 e a maior perda de percurso (L) permitida, 138,5 dB, para a determinação do raio máximo das células.

<i>Link Budget</i>	<i>Perda de Percurso (L)</i>
Downlink	151 dB
Uplink	138,5 dB

Tabela 3.5 – Valores calculados no *Link Budget*.

Substituindo o resultado da máxima perda de percurso permitida na equação 3.2-15, obtemos a máxima distância de atuação de uma célula (d):

$$138,5dB = 80,74dB + 10,4,79 \cdot \log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836dB + 0 + 4dB \quad 3.2-16$$

$$R = d \cong 1,3Km \quad 3.2-17$$

Existem ferramentas de predição que permitem obter com maior precisão o resultado do cálculo realizado, tornando possível a análise visual e um dimensionamento mais preciso. Tais ferramentas de predição consideram outros fatores, como edificação e relevo no cálculo de cobertura da estação rádio base do sistema.

3.3. Cálculo do Máximo Throughput Teórico

O *throughput* oferecido na camada física de uma estação rádio base LTE, pode ser calculado levando-se em consideração o tempo do símbolo, a modulação a ser utilizada na interface aérea (QPSK, 16 QAM, 64 QAM) e o número de subportadoras disponíveis, que está diretamente relacionada à banda adotada no sistema (como visto, a banda varia de 1.4 até 20 MHz), conforme equação 3.3-1 [3].

$$\text{Throughput} = \text{TempodeSímbolo} \times \text{Bits} \times \text{Subportadoras} \quad 3.3-1$$

Conforme mencionado na seção 2.5.2, o tempo de transmissão de um símbolo é de 71,367 μs .

Vamos calcular o *throughput* na camada física para as bandas de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz. Desta forma, a quantidade de subportadoras capazes de transportar dados é apresentado na tabela 3.6 [3]:

Largura de Banda	Subportadoras
5 MHz	300
10 MHz	600
15 MHz	900
20 MHz	1200

Tabela 3.6 – Largura de Banda e Subportadoras LTE.

Cada modulação adotada no sistema é capaz de transportar uma quantidade de bits por símbolo, sendo que a tabela 3.7 traz a capacidade de cada uma.

Modulação	Bits por Símbolo
QPSK	2
16 QAM	4
64 QAM	6

Tabela 3.7 – Capacidade de bits por símbolo das modulações utilizadas no *downlink*.

Utilizando as informações ilustradas nas tabelas 3.6 e 3.7, e fazendo-se uso da equação 3.3-1, somos capazes de determinar o *throughput* para cada modulação e largura de banda disponível. Como exemplo, vamos calcular o *throughput* para a modulação 64 QAM.

- 5 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = 1/0.000071367 \times 6 \times 300 \quad 3.3-2$$

$$\text{Throughput} = 25,2 \text{ Mbps} \quad 3.3-3$$

- 10 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = 1/0.000071367 \times 6 \times 600 \quad 3.3-4$$

$$\text{Throughput} = 50,4 \text{ Mbps} \quad 3.3-5$$

- 15 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = 1/0.000071367 \times 6 \times 900 \quad 3.3-6$$

$$\text{Throughput} = 75,7 \text{ Mbps} \quad 3.3-7$$

- 20 MHz e 64 QAM

$$\text{Throughput} = 1/0.000071367 \times 6 \times 1200 \quad 3.3-8$$

$$\text{Throughput} = 100,9 \text{ Mbps} \quad 3.3-9$$

Nas tabelas 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11, constam os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação 3.3-1 para as bandas de 5 MHz até 20 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM. A figura 3.1 ilustra estes resultados.

Largura de Banda e Modulação	Throughput (Mbps)
5 MHz – QPSK	8,4
5 MHz – 16 QAM	16,8
5 MHz – 64 QAM	25,2

Tabela 3.8 – *Throughput* para largura de banda de 5 MHz.

Largura de Banda e Modulação	Throughput (Mbps)
10 MHz – QPSK	16,8
10 MHz – 16 QAM	33,6

10 MHz – 64 QAM	50,4
-----------------	------

Tabela 3.9 – *Throughput* para largura de banda de 10 MHz.

Largura de Banda e Modulação	Throughput (Mbps)
15 MHz – QPSK	25,2
15 MHz – 16 QAM	50,4
15 MHz – 64 QAM	75,7

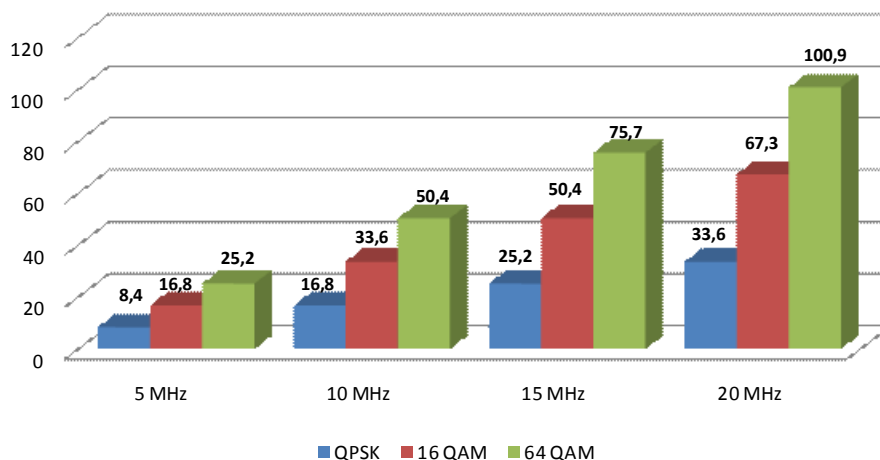
Tabela 3.10 – *Throughput* para largura de banda de 15 MHz.

Largura de Banda e Modulação	Throughput (Mbps)
20 MHz – QPSK	33,6
20 MHz – 16 QAM	67,3
20 MHz – 64 QAM	100,9

Tabela 3.11 – *Throughput* para largura de banda de 20 MHz.

Quando uma configuração MIMO 2x2 é utilizada, o *throughput* pode atingir valores de até 173 Mbps, e quando for utilizada a configuração MIMO 4x4, podemos chegar a taxas de transferência de até 326 Mbps [3].

Máximo Throughput Teórico

Figura 3.1 - *Throughput* na camada física do LTE.

3.4. Cálculo da Máxima Eficiência Espectral

A eficiência espectral para cada modulação pode ser calculada através da equação 3.4-1, e os resultados são apresentados na figura 3.2.

$$Ef. Espectral = Throughput / LarguraBanda \quad 3.4-1$$

Onde:

- Eficiência Espectral [bits/seg./hertz];
- *Throughput* [Mbps];
- Largura de Banda [MHz]

Máxima Eficiência Espectral

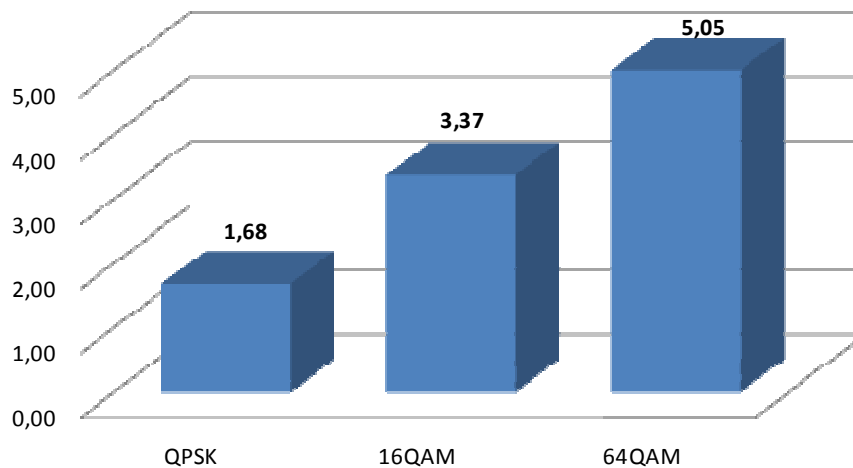


Figura 3.2 – Eficiência Espectral do LTE.

3.5. Cálculo da Capacidade do Canal e da Relação Sinal Ruído (SNR)

O tipo de modulação utilizado em sistemas de comunicações móveis tem influência na área de serviço de um sistema. Cada tipo de modulação tem um requisito mínimo de relação entre os níveis de sinal, ruído e interferência (SINR). Em uma célula, esta relação varia de um ponto para o outro, podendo fazer com

que em algumas áreas o requisito mínimo não seja atendido para os tipos de modulação disponíveis. Se isto ocorrer, a qualidade oferecida não será suficiente para que os serviços requisitados sejam atendidos.

Um importante ponto a ser destacado é que o ruído tratado é o AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), um ruído branco adicionado ao sinal, assim utilizaremos o termo SNR (Sinal Ruído) em vez de SINR.

As larguras dos canais utilizados influem diretamente na capacidade de um sistema, conforme o teorema de Shannon-Hartley, que afirma que a capacidade máxima, em bits por segundo, de um canal sujeito ao ruído pode ser calculada por:

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR) \quad 3.5-1$$

Onde:

- C - Capacidade do Canal [bps];
- BW - É a largura de faixa do canal utilizado [Hz];
- SNR - É a relação Sinal/Ruído [dB]

Teoricamente a taxa máxima de comunicação R que pode ser usada neste tipo de canal é menor ou igual à capacidade C do canal dependendo do esquema de modulação/codificação utilizado.

A taxa máxima de comunicação dependerá, portanto, da largura de faixa do canal alocado e das condições de propagação do canal de RF (da relação Sinal/Ruído). A interferência sentida irá influenciar no tipo de modulação que pode ser utilizada, causando efeito diretamente na capacidade do canal.

Na seção 3.3, calculamos as capacidades dos canais na camada física para larguras de faixa que variaram de 5 MHz até 20 MHz, para as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM, no entanto, não levamos em consideração as taxas de códigos. Nesta seção iremos determinar a capacidade dos canais e também o SNR requerido para que cada modulação seja utilizada.

A tabela 3.12 mostra as taxas de códigos que serão consideradas para o cálculo da capacidade do canal desta seção.

Modulação	Taxa de Códigos
QPSK	1/2
QPSK	3/4
16 QAM	1/2
16 QAM	3/4
64 QAM	1/2
64 QAM	2/3
64 QAM	3/4
64 QAM	5/6

Tabela 3.12 – Taxa de Código de Modulação.

A taxa de código indica a proporção dos bits de cada modulação que é transmitida como informação em cada símbolo. Como exemplo, para a modulação 64 QAM, que é capaz de transmitir 6 bits por símbolo, quando uma taxa de modulação de 5/6 é utilizada, apenas 5 bits serão transmitidos como informação.

Levando em consideração os valores das taxas de códigos de cada modulação que compõem a tabela 3.12, e fazendo uso da equação 3.5-2 (adaptação da equação 3.3-1, com inclusão da taxa de códigos), os valores de *throughput* calculados na seção 3.3 podem ser determinados novamente.

$$\text{Throughput} = \text{TempodeSímbolo} \times \text{Bits} \times \text{Taxa} \times \text{Subportadoras} \quad 3.5-2$$

Nas tabelas 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16, constam os valores do *throughput* calculados, fazendo-se uso da equação 3.5-2 para as bandas de 5 MHz até 20 MHz com as modulações QPSK, 16 QAM e 64 QAM e respectivas taxas de códigos.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	4,20
QPSK	3/4	6,31
16 QAM	1/2	8,41
16 QAM	3/4	12,61
64 QAM	1/2	12,61

64 QAM	2/3	16,81
64 QAM	3/4	18,92
64 QAM	5/6	21,02

Tabela 3.13 – *Throughput* para largura de banda de 5 MHz, adotando taxa de código.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	8,41
QPSK	3/4	12,61
16 QAM	1/2	16,81
16 QAM	3/4	25,22
64 QAM	1/2	25,22
64 QAM	2/3	33,63
64 QAM	3/4	37,83
64 QAM	5/6	42,04

Tabela 3.14 – *Throughput* para largura de banda de 10 MHz, adotando taxa de código.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	12,61
QPSK	3/4	18,92
16 QAM	1/2	25,22
16 QAM	3/4	37,83
64 QAM	1/2	37,83
64 QAM	2/3	50,44
64 QAM	3/4	56,75
64 QAM	5/6	63,05

Tabela 3.15 – *Throughput* para largura de banda de 15 MHz, adotando taxa de código.

Modulação	Taxa de Códigos	Throughput (Mbps)
QPSK	1/2	16,81
QPSK	3/4	25,22
16 QAM	1/2	33,63
16 QAM	3/4	50,44
64 QAM	1/2	50,44

64 QAM	2/3	67,26
64 QAM	3/4	75,67
64 QAM	5/6	84,07

Tabela 3.16 – *Throughput* para largura de banda de 20 MHz, adotando taxa de código.

Através da equação 3.5-3, e assumindo que o *throughput* calculado nas tabelas 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16 representam a capacidade máxima do canal para cada largura de faixa do canal, podemos encontrar o SNR requerido para cada modulação e taxa de código.

A equação 3.5-5 traz o resultado de um exemplo do cálculo do SNR, onde foi considerada a largura de banda de 20 MHz e o *throughput* de 84,07 Mbps.

$$C = BW \cdot \log_2(1 + SNR) \quad 3.5-3$$

$$84,07 \text{ Mbps} = 20 \text{ MHz} \cdot \log_2(1 + SNR) \quad 3.5-4$$

$$SNR = 12,41 \text{ dB} \quad 3.5-5$$

A tabela 3.17 traz a informação do SNR requerido para cada modulação e taxa de código.

Modulação	Taxa de Códigos	SNR (dB)
QPSK	1/2	-1,02
QPSK	3/4	1,45
16 QAM	1/2	3,44
16 QAM	3/4	6,76
64 QAM	1/2	6,76
64 QAM	2/3	9,68
64 QAM	3/4	11,06
64 QAM	5/6	12,41

Tabela 3.17 – SNR requerido para respectivas modulações e taxas de códigos.

Optou-se pela determinação do SNR requerido para cada modulação e respectiva taxa de código através de cálculos considerando a equação de

Shannon-Hartley, pois não foi encontrado na literatura e nas especificações da 3GPP, referências para cálculos dos níveis de projeto.

3.6. Cálculo da Interferência Co-Canal

Sistemas celulares se baseiam no reuso de freqüências para obter da rede uma maior capacidade e qualidade na cobertura.

Um conjunto de estações rádio base vizinhos que utilizem todo espectro disponível formam um cluster.

Na figura 3.3 podemos observar dois clusters formados por um conjunto de 7 estações rádio base cada, onde D representa a distância de reuso e R o raio de cada célula.

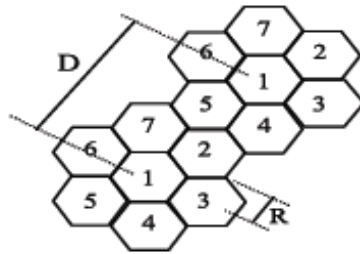


Figura 3.3 – Cluster.

Através dos valores de D e R , pode-se definir a razão de reuso q , como pode ser observado na equação 3.6-1.

$$q = \frac{D}{R} \quad 3.6-1$$

Sendo a a área de uma célula hexagonal (omnidirecional) e A a área de um cluster hexagonal, temos:

$$a = 3\sqrt{3} \frac{R^2}{2} \quad 3.6-2$$

$$A = \sqrt{3} \frac{D^2}{2} \quad 3.6-3$$

Assumindo que N seja o número de estações rádio base (células hexagonais) que formam um cluster, podemos definir que:

$$N = \frac{A}{a} = \frac{D^2}{3R^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R} \right)^2 \quad 3.6-4$$

$$(3N)^2 = \frac{D}{R} \quad 3.6-5$$

Substituindo 3.6-5 em 3.6-1:

$$q^2 = \left(\frac{D}{R} \right)^2 = 3N \quad 3.6-6$$

Fazendo uso da equação 3.6-6, pode-se calcular a razão de reuso q para diferentes formações de clusters, variando-se o reuso celular N . Na tabela 3.18 temos alguns exemplos.

Fator de Reuso (N)	Razão de Reuso (q)
1	1,73205
3	3
4	3,4641
7	4,58258
9	5,19615

Tabela 3.18 – Fator de Reuso e Razão de Reuso Celular.

A configuração celular, com reuso de frequências para grupos de células adjacentes, gera uma interferência dentro do sistema denominada de interferência co-canal.

Esta interferência co-canal pode ser determinada levando-se em consideração 6 células adjacentes (1º anel) a uma distância D , 12 células adjacentes (2º anel) a uma distância $2D$, ou ainda, 18 células adjacentes (3º

anel) a uma distância 3D e assim sucessivamente, conforme ilustrado na figura 3.4.

A relação entre o sinal desejado e a interferência co-canal é dada por:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{k=1}^6 I_{k1} + \sum_{k=2}^{12} I_{k2} + \sum_{k=3}^{18} I_{k3} + \dots} \quad 3.6-7$$

Onde:

- $S = C \times d^{-\gamma}$ - Intensidade do sinal desejado transmitido a uma distância d do transmissor;
- $I_{kn} = C \cdot D_{kn}^{-\gamma}$ - Intensidade do sinal interferente devido a células no n -ésimo anel, a uma distância D_{kn} do transmissor;
- γ - Fator de variação da perda de propagação com a distância;
- C - Constante que depende das características do transmissor e de parâmetros que influenciam a propagação tais como altura das antenas, frequência entre outros.

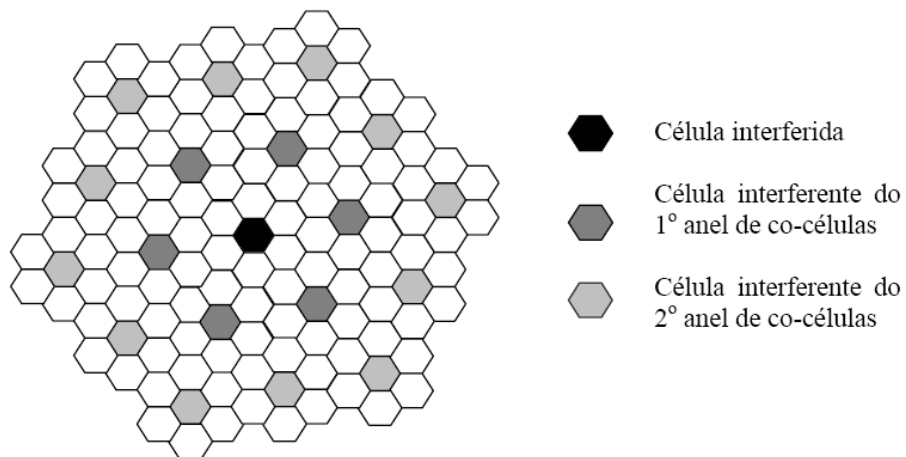


Figura 3.4 – Interferência dos anéis adjacentes.

Se pudéssemos considerar um móvel na borda da célula, assumimos assim que a distância d do transmissor seja aproximadamente igual ao raio celular, $d \cong R$ e para $D \gg R$ temos que $D_{kn} \cong nD$ e conseqüentemente:

$$\frac{S}{I} = \frac{Cd^{-\gamma}}{6CD^{-\gamma} + 12C(2D)^{-\gamma} + 18C(3D)^{-\gamma} + \dots} \quad 3.6-8$$

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{6\left(\frac{D}{R_c}\right)^{-\gamma} \cdot (1 + 2^{-\gamma} \cdot 2 + 3^{-\gamma} \cdot 3 + \dots)} \quad 3.6-9$$

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{6\left(\frac{D}{R_c}\right)^{-\gamma} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} k^{1-\gamma}} \quad 3.6-10$$

Através de uma aproximação que leva em consideração somente o primeiro anel interferente tem-se:

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{6\left(\frac{D}{R_c}\right)^{-\gamma}} \quad 3.6-11$$

$$\frac{S}{I} = \frac{q^\gamma}{6} \quad 3.6-12$$

Através da equação 3.6-12, observamos que a relação S/I (SIR) é maior quando adotamos um maior fator de reuso co-canal, maior valor para N .

SIR (dB)	$N = 1$	$N = 3$	$N = 4$	$N = 7$	$N = 9$
Terreno A	3,65746	15,09645	18,09185	23,91871	26,53542
Terreno B	2,655506	13,09254	15,82557	21,14205	23,52956
Terreno C	2,039225	11,85998	14,43163	19,43418	21,68072

Tabela 3.19 – Relação SIR considerando o primeiro anel interferente.

A tabela 3.19 traz a relação SIR calculada através da equação 3.6-12 para os casos onde o reuso N adotado varia de 1 a 9 para as três categorias de terreno observado no modelo de propagação de *Erceg et al*, lembrando que o fator de variação da perda de propagação com a distância, γ , pode ser calculado através da equação 3.2-6, onde a altura da antena transmissora seja $h_b = 30m$.

Considerando também os efeitos do segundo anel interferente temos:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{6 \left(\frac{D}{R_c} \right)^{-\gamma}} \cdot \frac{1}{(1 + 2^{1-\gamma})} \quad 3.6-13$$

$$\frac{S}{I} = \frac{q^\gamma}{6} \cdot \frac{1}{(1 + 2^{1-\gamma})} \quad 3.6-14$$

SIR (dB)	N = 1	N = 3	N = 4	N = 7	N = 9
Terreno A	3,355338	14,79433	17,78973	23,61659	26,2333
Terreno B	2,255863	12,6929	15,42592	20,74241	23,12992
Terreno C	1,565349	11,3861	13,95775	18,96031	21,20684

Tabela 3.20 – Relação SIR considerando o primeiro e o segundo anel interferente.

Observando os valores de SIR para os cenários onde levamos em consideração o primeiro anel interferente, tabela 3.19 e também o segundo anel interferente, tabela 3.20, concluímos que para o terreno do tipo A, que adotamos para a realização do dimensionamento de capacidade e cobertura, e com o fator de reuso $N=1$, os usuários da borda estariam atendidos com as modulações QPSK $\frac{1}{2}$ e QPSK $\frac{3}{4}$, que segundo a tabela 3.17 requerem uma SNR mínima de -1,02 dB e 1,45 dB respectivamente para operar.

Se adotássemos no sistema um fator de reuso $N=3$, com o auxílio das tabelas 3.17 e 3.20, podemos concluir que os usuários de borda estariam atendidos com todas as possibilidades de modulação do sistema, QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

De acordo com a literatura e com o 3GPP, o sistema LTE poderá adotar um fator de reuso de frequências unitário, $N=1$, desta forma, outras

possibilidades podem ser levadas em consideração para que a relação SIR seja melhorada, tais como a redução da altura da antena transmissora ou ainda a setorização, que consiste na divisão das células em setores, sendo cada um destes setores iluminados por uma antena direcional independente que recebe um subconjunto de frequências. Na prática a setorização tripla e sêxtupla são adotadas em sistemas celulares, sendo a setorização tripla a mais usual.

3.6.1.

Cálculo da Interferência Co-Canal com Setorização Tripla

A setorização tripla consiste na divisão celular em setores de 120°. Para facilitar a compreensão dos benefícios que a setorização pode trazer quanto à diminuição da interferência co-canál, analisando a figura 3.5 podemos observar que apenas as células 4 e 5 possuem setores voltados para a célula interferida que possuem o mesmo subconjunto de frequências.

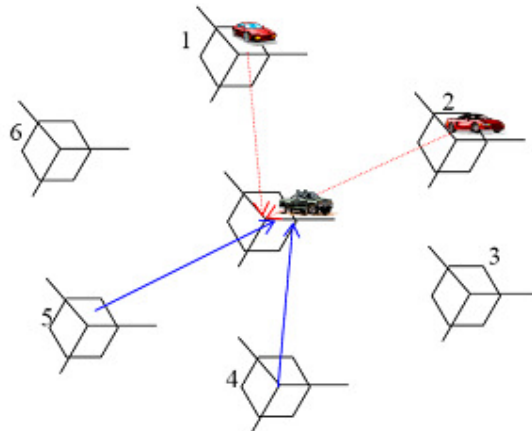


Figura 3.5 – Interferência com setorização tripla.

Se considerarmos somente o primeiro anel interferente, a relação SIR será dada por:

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{\sum_{k=1}^2 \left(\frac{D}{R_C} \right)^{-\gamma}} \quad 3.6-15$$

$$\frac{S}{I} = \frac{q^\gamma}{2} \quad 3.6-16$$

Para definirmos o ganho que a setorização tripla tem em relação a sistemas que não utilizam a setorização, podemos definir que:

$$G = \frac{SIR_{\text{célula setorizada}}}{SIR_{\text{célula sem setorização}}} \quad 3.6-17$$

Substituindo as equações 3.6-12 e 3.6-16 em 3.6-17, temos:

$$G = \frac{(q^\gamma / 2)}{(q^\gamma / 6)} \quad 3.6-18$$

$$G = 3 \quad 3.6-19$$

Aplicando o logaritmo na equação 3.6-19, temos que o ganho da setorização tripla em relação a sistemas sem setorização é:

$$G_{dB} = 10 \log_{10}(3) \quad 3.6-20$$

$$G_{dB} = 4,77dB \quad 3.6-21$$

Recalculando a relação SIR considerando a setorização tripla, e altura da antena transmissora $h_b = 30m$, chegamos aos valores da tabela 3.21.

SIR (dB)	N = 1	N = 3	N = 4	N = 7	N = 9
Terreno A	8,428672	19,86766	22,86306	28,68993	31,30664
Terreno B	7,426719	17,86375	20,59678	25,91326	28,30077
Terreno C	6,810438	16,63119	19,20284	24,2054	26,45193

Tabela 3.21 – Relação SIR considerando o primeiro anel interferente com setorização tripla.

Considerando o fator de reuso $N = 1$ e o terreno do tipo A, temos uma SIR de aproximadamente 8,43 dB o que seria suficiente para que os usuários na borda das células estivessem atendidos pelas modulações QPSK $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 16 QAM $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ e pela modulação 64 QAM $\frac{1}{2}$, que segundo a tabela 3.17 requerem uma SNR mínima de -1,02 dB, 1,45 dB, 3,44 dB, 6,76 dB e 6,76 dB respectivamente para operar.

3.6.2. Cálculo da Interferência Co-Canal com Setorização Sêxtupla

A setorização sêxtupla consiste na divisão celular em setores de 60° . Analisando a figura 3.6 podemos observar que apenas a célula 4 possui um setor voltado para a célula interferida que possui o mesmo subconjunto de frequências.

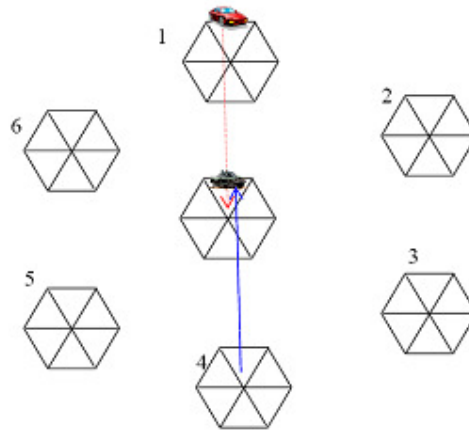


Figura 3.6 – Interferência com setorização sêxtupla.

Se considerarmos somente o primeiro anel interferente, a relação SIR será dada por:

$$\frac{S}{I} \cong \frac{1}{\sum_{k=1}^1 \left(\frac{D}{R_c} \right)^{-\gamma}} \quad 3.6-22$$

$$\frac{S}{I} = q^\gamma \quad 3.6-23$$

Para definirmos o ganho que a setorização sêxtupla apresenta em relação a sistemas que não utilizam a setorização, podemos definir que:

$$G = \frac{SIR_{\text{célula setorizada}}}{SIR_{\text{célula sem setorização}}} \quad 3.6-24$$

Substituindo as equações 3.6-12 e 3.6-23 em 3.6-24, temos:

$$G = \frac{q^\gamma}{(q^\gamma / 6)} \quad 3.6-25$$

$$G = 6 \quad 3.6-26$$

Aplicando o logaritmo na equação 3.6-26, temos que o ganho da setorização tripla em relação a sistemas sem setorização é:

$$G_{dB} = 10 \log_{10}(6) \quad 3.6-27$$

$$G_{dB} = 7,78 dB \quad 3.6-28$$

Recalculando a relação SIR considerando a setorização sêxtupla, e altura da antena transmissora $h_b = 30m$, chegamos aos valores da tabela 3.22.

SIR (dB)	N = 1	N = 3	N = 4	N = 7	N = 9
Terreno A	11,43897	22,87796	25,87336	31,70023	34,31694
Terreno B	10,43702	20,87405	23,60708	28,92356	31,31107
Terreno C	9,820737	19,64149	22,21314	27,2157	29,46223

Tabela 3.22 – Relação SIR considerando o primeiro anel interferente com setorização sêxtupla.

Considerando o fator de reuso $N = 1$ e o terreno do tipo A, temos uma SIR de aproximadamente 11,43 dB o que seria suficiente para que os usuários na borda das células estivessem atendidos por todas as modulações do sistema,

QPSK, 16 QAM e 64 QAM, com exceção da modulação 64 QAM com taxa de códigos 5/6, que segundo a tabela 3.17 requerem uma SNR mínima de 12,41 dB para operar.

Analisando os resultados das seções 3.6.1 e 3.6.2, percebemos que se pode utilizar o reuso unitário ($N=1$) em sistemas LTE sem que os usuários da borda estejam desprovidos de cobertura e serviço.

3.7. Cálculo do Raio em Função da Modulação e SNR

Na seção 3.2 calculamos o raio máximo teórico da célula adotando valores nulos para a SNR requerida no sistema. O valor encontrado naquela seção é importante quando desejamos determinar a quantidade de estações rádio base necessárias para cobrir a área na qual se pretende oferecer o serviço celular, mas não deve ser levada em consideração na determinação do número de estações necessárias para um determinado tipo de serviço, como por exemplo a taxa de transferência (bps).

Nesta seção iremos repetir o que foi realizado na seção 3.2 levando-se em consideração os valores de SNR Requeridos para cada taxa de modulação, ou ainda, para cada MCS (*Modulation and Coding Schemes*) a fim de determinar os raios máximos de modulação e respectivo *throughput*.

Fazendo uso de ferramentas de predição também conseguimos determinar a área de atuação de cada modulação, levando-se em consideração outros fatores não considerados nos cálculos, tais como o relevo.

No LTE, o principal indicador relacionado à capacidade de transferência de dados é a distribuição do SNR ao longo da célula.

Conforme verificado anteriormente, a máxima perda permitida no sistema (L) ocorre no *uplink*, sendo assim, nesta seção realizaremos os cálculos somente para o *Link Budget de Uplink*, substituindo os valores de SNR requeridos para cada MCS.

A tabela 3.23 abaixo repete o que está ilustrado na tabela 3.17.

Modulação	Taxa de Códigos	SNR (dB)
QPSK	1/2	-1,02
QPSK	3/4	1,45
16 QAM	1/2	3,44

16 QAM	3/4	6,76
64 QAM	1/2	6,76
64 QAM	2/3	9,68
64 QAM	3/4	11,06
64 QAM	5/6	12,41

Tabela 3.23 – SNR requerido para respectivas modulações e taxas de códigos.

A tabela 3.24 traz as mesmas informações da tabela 3.3, com a diferença que o SNR adotado não será nulo e receberá valores variáveis de acordo com cada MCS representado na tabela 3.23.

Potência de Transmissão	23 dBm
Ganho da Antena Transmissora	0 dBi
Perdas na Transmissão	0 dB
SNR	Variável
Sensibilidade Requerida Recepção	-101,5 dBm
Ganho da Antena Receptora	18 dBi
Perdas na Recepção	3 dB
Ganho de Diversidade	3 dB
Margem de Desvanecimento	4 dB

Tabela 3.24 – Valores dos Parâmetros para o *Link Budget de Uplink*.

Com auxílio das tabelas 3.23, 3.24 e a equação 3.7-1, somos capazes de determinar os valores de L para cada MCS.

Como exemplo, calculamos para a modulação 64 QAM e taxa de código 5/6, a qual requer uma SNR de 12,08 dB.

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{Requerida} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad 3.7-1$$

$$L_{UL} = 23dBm + 0 - 0 - 12,41dB - (-101,5dBm) + 18dBi - 3dB + 3dB - 4dB \quad 3.7-2$$

$$L_{UL} = 126,09dB \quad 3.7-3$$

Substituindo o resultado da equação 3.7-3 em 3.7-4, chegamos ao máximo raio de atuação da modulação 64 QAM - 5/6 (equação 3.7-6).

$$L = 80,74dB + 10.4,79.\log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836dB + 0 + 4dB \quad 3.7-4$$

$$126,09dB = 80,74dB + 10.4,79.\log\left(\frac{d}{100}\right) + 0,6836dB + 0 + 4dB \quad 3.7-5$$

$$R = d \cong 705m \quad 3.7-6$$

Na tabela 3.25 constam os valores dos raios calculados para as demais modulações e respectivas taxas de códigos, da mesma forma como foi demonstrado no exemplo acima.

Modulação	Taxa de Códigos	SNR (dB)	Raio (m)
QPSK	1/2	-1,02	1343
QPSK	3/4	1,45	1193
16 QAM	1/2	3,44	1084
16 QAM	3/4	6,76	924
64 QAM	1/2	6,76	924
64 QAM	2/3	9,68	804
64 QAM	3/4	11,06	752
64 QAM	5/6	12,41	705

Tabela 3.25 – Raio de atuação das Modulações e respectivas taxas de códigos (MCS).

As figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 ilustram a variação do *throughput* conforme a distância para as larguras de banda de 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz respectivamente.

Conforme a distância entre a transmissão e a recepção se torna maior, os níveis de Sinal Ruído (SNR) se tornam menores devido ao acréscimo das perdas de propagação, logo, níveis de modulação que requerem valores de SNR maiores não poderão ser empregados, fazendo com que modulações robustas sejam adotadas.

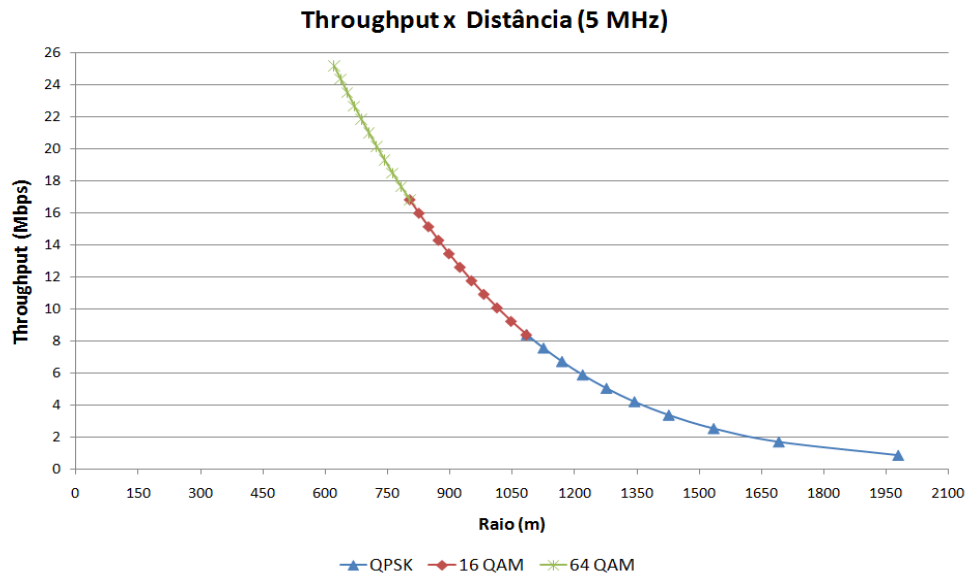


Figura 3.7 – Variação do *Throughput* (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 5 MHz.

Observando os gráficos, pode-se notar que a máxima distância de atuação das modulações não se altera mesmo variando-se a largura de banda, devido ao fato que a sensibilidade requerida na recepção da estação rádio base ser a mesma para as quatro larguras de banda utilizadas no cálculo, -101,5 dBm [14], lembrando que o *Link Budget* está limitado no *uplink*.

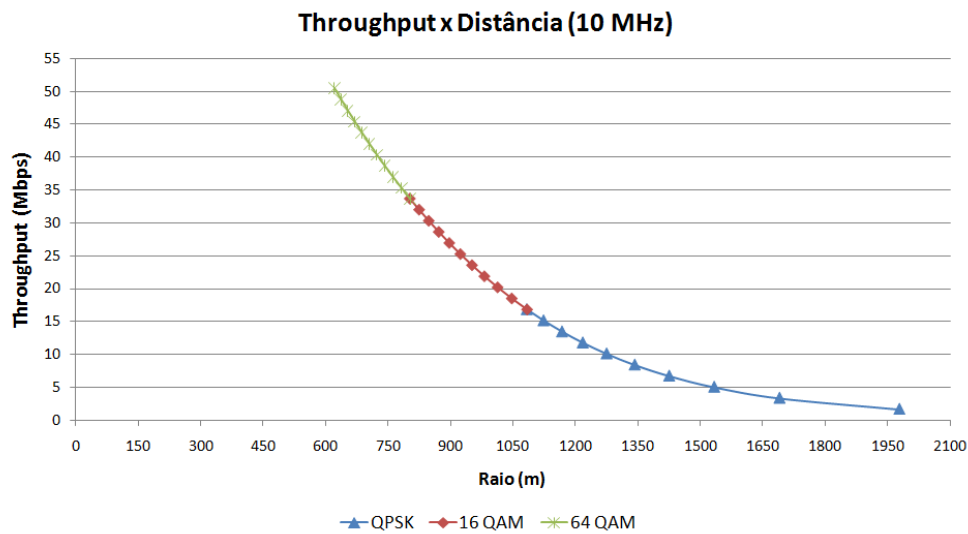


Figura 3.8 – Variação do *Throughput* (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 10 MHz.

Outro ponto importante, que pode ser observado nos gráficos, destaca para distâncias menores do que 620 metros o *throughput* não sofre variações, embora as condições rádio possam ser ainda melhores (SNR), pois a capacidade máxima de transporte de dados do canal já foi alcançada, conforme vimos na seção 3.5.

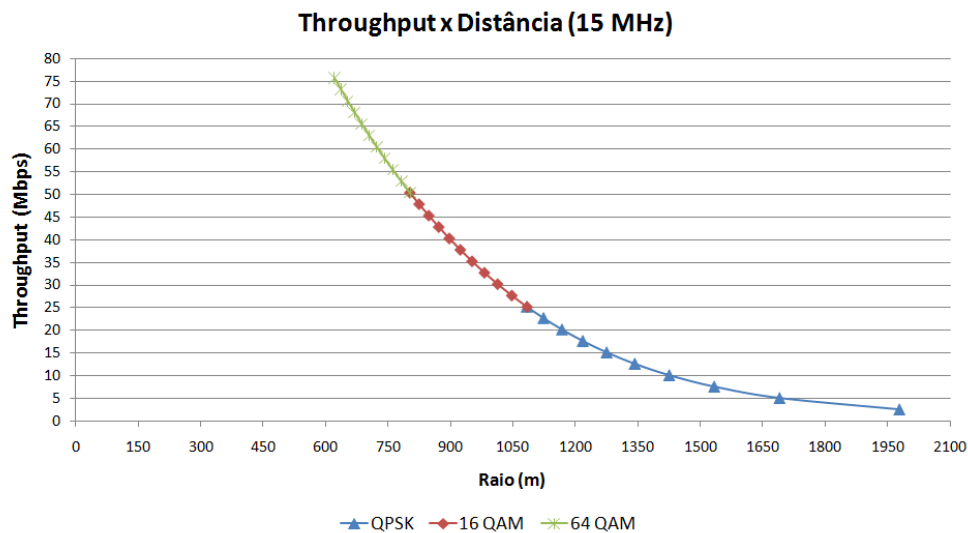


Figura 3.9 – Variação do *Throughput* (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 15 MHz.

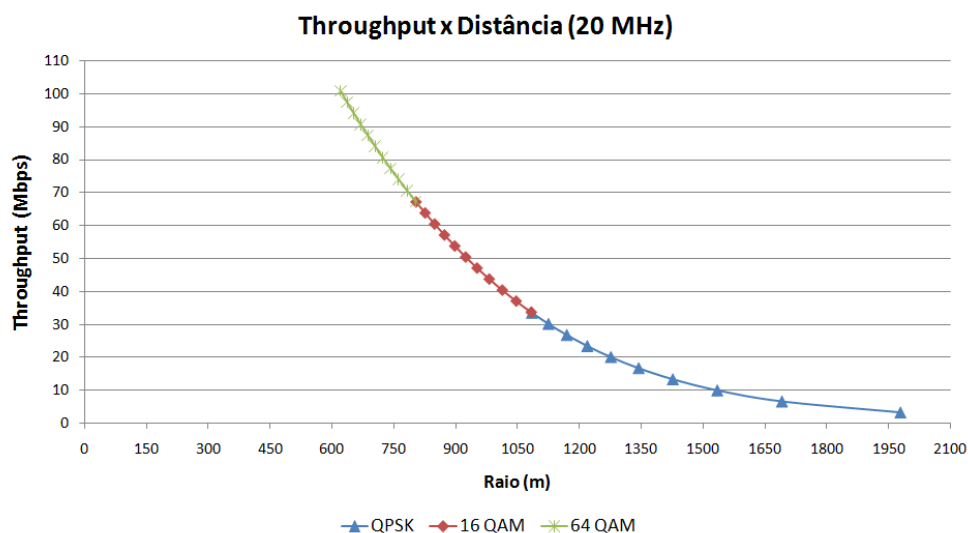


Figura 3.10 – Variação do *Throughput* (Mbps) conforme a distância (m) para largura de banda de 20 MHz.

O máximo *throughput* atingido com 20 MHz de banda é de 100,9 Mbps, logo taxas de dados maiores não serão atingidas devido ao limite que existe no canal de transmissão, com a máxima taxa de dados sendo atingida com 6 bits (64 QAM) por símbolo.