2
Descrição dos Sistemas

2.1.
Introdução

Este capítulo apresenta as principais características e requisitos dos sistemas envolvidos neste estudo: o Sistema Móvel LTE Release 10 Femtocell, com base nas especificações do 3GPP, e o Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD), incluindo os requisitos indicados pela ABNT (*Associação Brasileira de Normas Técnicas*) e ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) quanto aos aspectos de proteção contra interferências e qualidade. Adicionalmente, será descrita a ferramenta de simulação utilizada. O simulador é o Seamcat, que na sua versão 4.0.1 realiza cálculos de probabilidade de interferências com um módulo que inclui a possibilidade de trabalhar com características de Rádio Cognitivo. Esta ferramenta foi desenvolvida pelo ECO (*European Communications Office*), CEPT *Working Group Spectrum Engineering* (WG SE), SEAMCAT *Management Committee* e o grupo de trabalho SEAMCAT *Technical Group* (STG). Será ainda descrito o funcionamento e as características do algoritmo de rádio cognitivo implementado em cada uma das situações avaliadas.

Neste capítulo, serão também descritos os modelos de propagação considerados na configuração dos cenários de simulação incluindo o modelo de propagação Okumura-Hata e sua versão adaptada para ambientes fechados (*indoor*), o modelo de propagação Okumura-Hata SRD (*Short Range Devices*) [15] [16] desenvolvido pela CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administraations*) no Project TEAM SE-24 em estudos que incluem dispositivos de curto alcance.

Finalmente, neste capítulo será descrito o modelo de propagação utilizado na simulação dos cenários de televisão digital com base na Recomendação da

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

ITU-R P. 1546-4 [17] descrevendo-se os principais parâmetros considerados nas simulações.

2.2. O Sistema Móvel LTE Release 10 e as Femtocélulas

2.2.1. Introdução

A evolução dos sistemas móveis começou no ano de 1947 com o desenvolvimento do conceito de "células" apresentado pelos laboratórios Bell, permitindo o aumento substancial da capacidade das redes de comunicações móveis através da divisão da área de cobertura em pequenas células utilizando o reuso de frequências.

Os primeiros sistemas móveis foram implantados nos Estados Unidos e Europa atraindo somente a um pequeno número de usuários, pois os equipamentos eram caros e sem padronização aberta. A primeira geração (1G) de sistemas móveis celulares utilizava tecnologia analógica nos canais de voz e incluía uma série de sistemas desenvolvidos de forma independente, como por exemplo, o AMPS (*Analogue Mobile Phone System*, utilizado na América do Norte), o TACS (*Total Access Communication System*) e o NMT (*Nordic Mobile Telephone*) usados na Europa e o J-TACS (*Japanese Total Access Communication System*) utilizado principalmente no Japão e em Hong Kong [3], entre outros sistemas similares em outros países.

O crescimento comercial dos sistemas celulares começou na década de 1980 como sistemas de segunda geração (2G) estabelecendo a era digital da comunicação móvel. O padrão europeu GSM (*Global System for Mobile Communications*) tornou-se um padrão robusto, interoperável e amplamente aceito, graças aos avanços na tecnologia que resultaram em terminais pequenos, baratos e com baterias de longa duração. A aceitação do padrão GSM excedeu todas as expectativas iniciais e ajudou a criar um vasto mercado mundial.

A terceira geração (3G) de sistemas móveis celulares utiliza tecnologia CDMA (*Code Division Multiple Access*) como técnica de acesso, estabelecido por

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

meio do padrão (WCDMA, *Wideband Code Division Multiple Access*) também denominado *Universal Mobile Telephone System* (UMTS). Sua evolução corresponde à atual quarta geração (4G) e leva o nome de *Long Term Evolution of UMTS* ou LTE [3] na sua versão LTE-Advanced. O LTE é caracterizado por uma evolução dos aspectos do núcleo da rede (*core network*) e de aspectos não relacionados com radiofrequência, referidos pelo termo *System Architecture Evolution* (SAE) [3], conceito que também inclui a rede denominada *Evolved Packet Core* (EPC) [3] onde tanto a rede básica como o rádio acesso utilizam unicamente comutação por pacotes.

Para chegar ao LTE, as especificações originais do Release 99 do sistema UMTS foram estendidas com melhorias nos esquemas de transmissão dos sentidos *Downlink* e *Uplink* por meio dos *high-speed downlink* e *high-speed uplink* (HSDPA e HSUPA, nos Releases 5 e 6 respectivamente).A especificação do *High Speed Packet Access* (HSPA) foi apresentada através do Release 7, que tornou-se conhecido como HSPA+, com modulações de ordem superior e a comunicação MIMO (sistema de antenas de *Multiple-Input Multiple-Output*) [3].

A primeira versão de LTE corresponde ao Release 8 nas especificações da 3GPP e dentre suas características de camada física mais relevantes destaca-se a flexibilidade da largura de banda do canal, que não é mais fixa como no caso dos sistemas 3G com 5 MHz. O LTE foi beneficiado pelo desenvolvimento tecnológico das tecnologias HSPA e a HSPA+ em relação á otimização da pilha do protocolo e à facilidade de adoptar uma nova tecnologia sem as limitações de compatibilidade ou da largura de faixa de 5 MHz [3].

A seguir apresenta-se a fig. 2 [3], que mostra a evolução dos sistemas de comunicação móvel e suas tecnologias de acesso.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

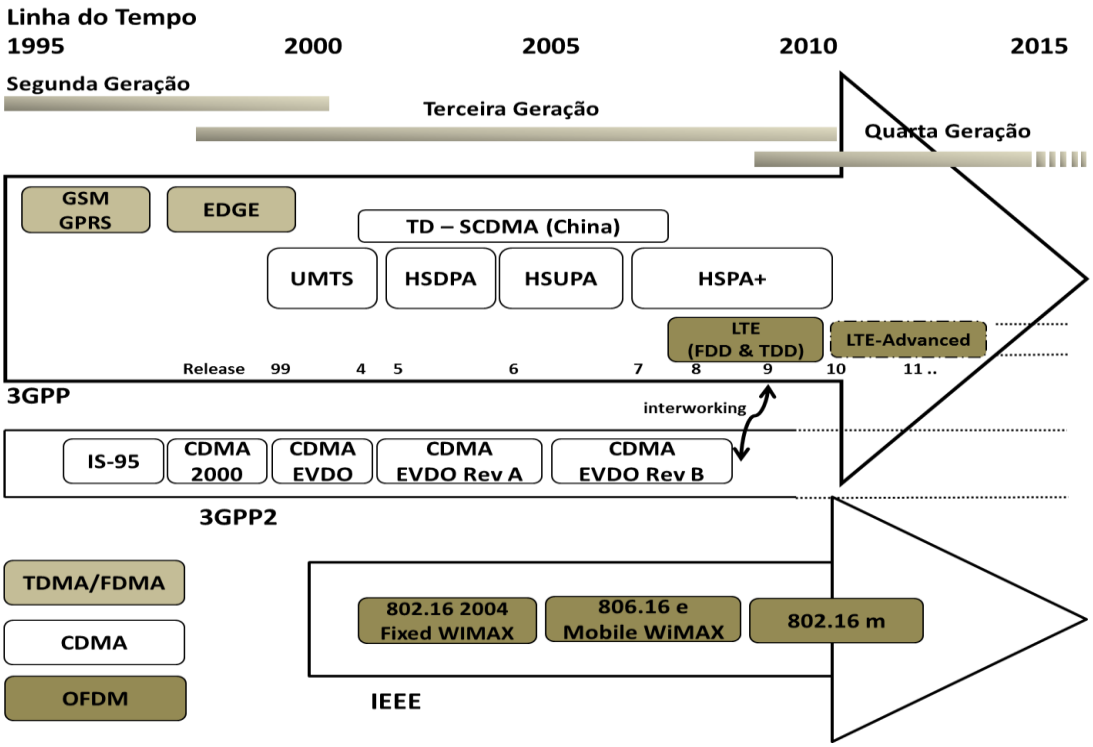


Fig. 2 Linha de Tempo dos Sistemas de Comunicação Móvel [3]

2.2.2. LTE Release 10

A segunda versão de LTE foi desenvolvida no Release 9 que continua em evolução com o lançamento do Release 10 sendo este o padrão o início do LTE-Advanced [3].

As principais características do LTE-Advanced acrescentadas no Release 10 [3] são mencionadas a seguir:

- *Carrier Aggregation* (Agregação de Portadora), que corresponde à agregação de portadoras para o aumento da taxa de transmissão, conseguindo picos de taxa de dados de até 1 Gbps no enlace de descida e de 500 Mbps no enlace de subida [3]. Além disso, possibilita um uso eficiente do espectro e suporta o desenvolvimento de redes heterogêneas.

- Melhoramento nas múltiplas antenas de transmissão no enlace de descida a fim de obter uma eficiência espectral igual a 30 bps/Hz [3].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

- Múltiplas antenas de transmissão no enlace de subida, a fim de obter uma eficiência espectral igual a 15 bps/Hz [3].

- *Relaying* [3], correspondente a uma rede de nós desenhados para complementar a rede da macrocélula (eNodeB), reduzindo os custos, ampliando a área de cobertura e aumentando a capacidade da rede.

- Desenvolvimentos de redes heterogêneas.

As redes heterogêneas estão constituídas por uma camada de macrocélulas e outra camada de microcélulas coexistindo com pelo menos uma portadora que é comum entre elas [3]. Nesse cenário as transmissões de uma célula podem interferir fortemente com os canais de controle da outra impedindo os processos de *scheduling* e sinalização.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

2.2.3. Características LTE – Release 10

As principais características incorporadas no padrão LTE Release 10 são descritas a seguir:

a) Melhor Coordenação da Interferência Inter-Cell

As redes heterogêneas consistem em pequenas células sobrepostas dentro da área de cobertura da macrocélula. Estas pequenas células podem se comprimir em picocélulas, femtocélulas, ou inclusive em *Relay Nodes* ou nós de repetição.

A sobreposição das pequenas células permitem altas reutilizações do espectro devido ao *cell-splitting* que é o processo de dividir a área de cobertura da célula em dois ou mais novos sítios de cobertura a fim de outorgar um incremento na capacidade, suportando desta maneira alta densidade de tráfego [3].

As redes heterogêneas podem ser categorizadas principalmente em três cenários [3]: Macro-Pico, Macro-Femto e *Hybrid Access Mode*.

- **Macro-Pico.-** As pequenas células são células OSG (*Open Subcriber Group*), disponíveis para todos os assinantes da macrocélula.

- **Macro-Femto.-** As pequenas células são células CSG (*Closed Subcriber Group*) acessíveis somente a um grupo de assinantes.

- ***Hybrid Access Mode*.-** As pequenas células pertencem ao CSG outorgando serviço a todos os assinantes mas, dá preferencia a aqueles que incluem o CSG ID (identificação) chamados de *CSG members*.

b) Minimização dos *Drives Test*

O *Drive Test* é utilizado para detectar as possíveis ineficiências e problemas de cobertura quando os usuários estão se deslocando através da rede de acesso. As características do MDT (*Minimization of Drive Test*) [3] ajudam a eliminar algumas destas campanhas de testes, permitindo que sejam substituídas pela coleta automática das medições feitas pelas eNodeB's, reduzindo o custo da otimização da rede.

c) *Machine -Type Communication* (MTC)

Corresponde a uma forma de comunicação de dados que envolve uma ou mais entidades que não necessariamente precisam da interação humana. Os dispositivos MTC são usuários equipados para se comunicar através da PLMN (*Public Land Mobile Network*) com os servidores da MTC e com outros dispositivos MTC.

2.2.4. Requisitos e Aspectos Técnicos

Frequências de 2.5 GHz no Brasil

O padrão LTE é o padrão de 4G único no Brasil, sendo adotado por todas as operadoras. A Anatel realizou em 2012 uma licitação de frequências em 2500 MHz para a implementação de redes 4G. As empresas de telecomunicações que adquiriram estas frequências foram Vivo, Tim, Claro, Oi, Sky e Sunrise.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

As faixas de frequência entre 2500 – 2570 MHz e 2620 – 2690 MHz, incluindo as sub-faixas P, W, V e X foram destinadas para a operação de sistemas FDD (*Frequency Division Duplex*) que se caracterizam por ter canais separados tanto para a transmissão e recepção. Para as subfaixas T e U localizadas entre 2570 e 2620 MHz foram destinadas para sistemas TDD (*Time Division Duplex*), que utilizam a mesma sub-faixa de frequências para transmissão nas duas direções, isto é transmissão e recepção no mesmo canal.

A seguir, a Tabela 1 apresenta a designação de cada uma das sub-faixas.

Tabela 1. Designação de sub-faixas

Sub-faixa (MHz)	**Blocos (MHz)**	**Transmissão da**	
		Estação Móvel (MHZ)	**ERB (MHZ)**
P	10+10	2500 - 2510	2620 - 2630
W	20+20	2510 - 2530	2630 – 2650
V1	10+10	2530 - 2540	2650 - 2660
V2	10+10	2540 - 2550	2660 – 2670
X	20+20	2550 - 2570	2670 – 2690
T	15	2570-2585	
U	35	2585-2620	

Fonte: http://www.abnt.org.br/

A figura seguinte (ver fig. 3) apresenta a designação das sub-faixas na faixa de frequências de 2500 MHz no Brasil.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

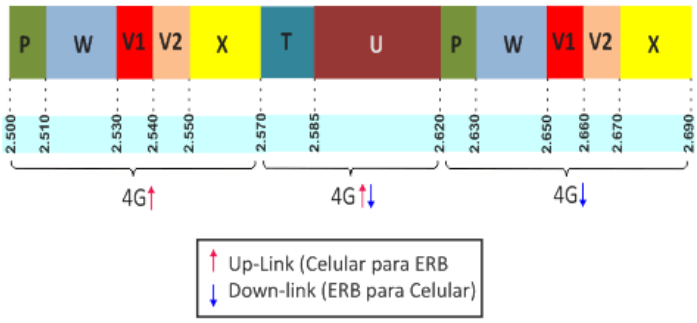


Fig. 3 Faixa de Frequências em 2500 MHz

A Tabela 2 apresenta a designação de faixas para as empresas de telecomunicações no Brasil que têm designado as seguintes frequências na banda de 2500 MHz.

Tabela 2. Designação de Frequências

Operadora	Frequências Adquiridas
Vivo	Banda X (20 + 20 MHz) em todo o Brasil
Claro	Banda W (20 + 20 MHz) em todo o Brasil 19 lotes da Banda P
TIM	Banda V1 (10 + 10 MHz) em todo o Brasil 6 lotes da Banda P.
Oi	Banda X (20 + 20 MHz) em todo o Brasil 11 lotes da Banda P
Sky	12 lotes da Banda U
Sunrise	12 lotes da Banda U

Fonte: http://www.abnt.org.br/

Frequências de 700 MHz no Brasil

O Ministério das Comunicações publicou no dia 6 de fevereiro de 2013, a portaria N° 14 [18] que estabelece as diretrizes para a aceleração do processo de transição da TV Aberta analógica para a TV aberta digital no Brasil e determina que a Anatel inicie os estudos para disponibilizar a faixa de 698 MHz a 806 MHz para sistemas 4G.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Além disso, a Anatel apresentou o regulamento sobre a nova destinação da faixa de 700 MHz [19] onde recomenda-se a adoção do plano de banda da APT (modelo de Ásia Pacífico) que permite uso de 90 MHz (45 + 45 MHz) de espectro sendo um plano FDD (banda 28) e outro TDD (banda 44). O próximo passo da Anatel foi a elaboração do edital de licitação que passou por consulta pública. A Anatel iniciou os procedimentos administrativos para a verificação da viabilidade da atribuição, destinação e distribuição da faixa de 698 MHZ a 806 MHz segundo o estabelecido em [18] [19].

Em resposta deste edital, foi apresentada e aprovada a Resolução n° 625, da Anatel, de 11 novembro de 2013 que apresenta a "Atribuição, a Destinação e o Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências na Faixa de 698 MHz a 806 MHz"[1]. Nesta resolução foram estabelecidos os limites para emissões fora de faixa e espúrios (potência transmitida), os limites para emissões fora de faixa pela estação móvel/terminal, os limites para emissões indesejáveis e emissão de espúrios pela estação base. Além disso, na Resolução n° 625 foram estabelecidos os blocos das subfaxias de radiofrequências para a banda de 700 MHz[1].

Requisitos e Aspectos Técnicos

O cenário das simulações realizadas no programa Seamcat na sua versão 4.0.1 considera um sistema móvel LTE operando na banda de 700 MHz. Os requisitos, parâmetros e considerações do sistema móvel LTE se baseiam nos aspectos técnicos descritos pela ETS ITS 136 101 (LTE UE) [20] e ETS ITS 136 104 (eNodeB) [20] para o enlace de descida na faixa de frequência de 700 MHz para um sistema FDD (*Frequency Division Duplex*) correspondente a banda número 12 [3] e assumindo uma alocação do espectro de 10 MHz [3] [20].

2.2.4.1. O Transmissor e o Receptor no padrão LTE Release 10

Os principais parâmetros da torre de transmissão LTE (*Evolved Node B*, eNode B) estão baseados em parâmetros estabelecidos em [3] [20] [21]

[1] Resolução n° 625, de 11 de novembro de 2013. http://legislacao.anatel.gov.br/resolucoes/2013/644-resolucao-625

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

considerando uma potência de transmissão de 46 dBm, um rádio de cobertura de 9 km e uma altura típica de torre de 30 metros para um ambiente urbano.

Além disso, os parâmetros do receptor LTE (*User Equipment*, UE) se baseiam segundo os parâmetros estabelecidos em [3], [20], [21] considerando uma altura típica do receptor de 1.5 metros. Outras características do LTE UE são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros Receptor LTE UE

Potência (dBm)	23
Largura de Faixa (MHz)	10
Largura de Faixa Efetiva (MHz)	9
Figura de Ruído (dB)	9
Thermal Noise (dBm)	-104,43
Noise Floor (dBm)	-95,43

A seguir, apresenta-se a Tabela 4 considerando os diferentes esquemas de modulações e sensibilidade do LTE UE segundo os requisitos do LTE Release 10 fornecidos e detalhados em [3][22][24].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Tabela 4. Característica e Parâmetros do LTE UE

	MODULAÇÕES	Largura de Faixa Efetiva (MHz)	Sensibilidade de Referência (dBm)	C/N (dB)	UE NF	Thermal Noise (dBm)	Receiver Noise Floor (dBm)	Sensibilidade do Receptor (dBm)	Maximum Dynamic Range (dB)
1	QPSK 1/8	9,00E+06	-101	-5,7	9	-104,4327212	-95,43272121	-101,1327212	76
2	QPSK 1/5	9,00E+06	-98	-3,7	9	-104,4327212	-95,43272121	-99,13272121	73
3	QPSK 1/4	9,00E+06	-97	-3	9	-104,4327212	-95,43272121	-98,43272121	72
4	QSPK 1/3	9,00E+06	-96,5	-1,65	9	-104,4327212	-95,43272121	-97,08272121	71,5
5	QPSK 1/2	9,00E+06	-94,5	1,3	9	-104,4327212	-95,43272121	-94,13272121	69,5
6	QPSK 2/3	9,00E+06	-93	3,3	9	-104,4327212	-95,43272121	-92,13272121	68
7	QPSK 4/5	9,00E+06	-89	5,3	9	-104,4327212	-95,43272121	-90,13272121	64
8	16QAM 1/2	9,00E+06	-88	7,3	9	-104,4327212	-95,43272121	-88,13272121	63
9	16QAM 2/3	9,00E+06	-84,5	11,65	9	-104,4327212	-95,43272121	-83,78272121	59,5
10	16QAM 4/5	9,00E+06	-83	11,75	9	-104,4327212	-95,43272121	-83,68272121	58
11	64 QAM 2/3	9,00E+06	-79,5	13,5	9	-104,4327212	-95,43272121	-81,93272121	54,5
12	64 QAM 3/4	9,00E+06	-76,5	15,65	9	-104,4327212	-95,43272121	-79,78272121	51,5
13	64 QAM 4/5	9,00E+06	-76	17	9	-104,4327212	-95,43272121	-78,43272121	51

Para melhor entendimento da Tabela 4, cada coluna é descrita a seguir:

- **Modulações**

  Tomaram-se em conta diferentes esquemas de modulação segundo o estabelecido em [21] considerando a modulação mais robusta à interferência, a QPSK 1/8 e a modulação que oferece a maior taxa de transmissão, a 64 QAM 4/5.

- **Largura de Faixa Efetiva (B)**

  Obtida pela multiplicação da largura de faixa do *Resource Block* cujo valor definido é igual a 180 kHz, multiplicado pelo numero de *Resource Blocks* para um canal de largura de faixa igual a 10 MHz sendo este igual a 50 [3] [22]. Portanto, levando em conta estes parâmetros obteve-se que o valor da Largura de Faixa Efetiva é igual a 9 MHz.

- **Sensibilidade de Referência**

  Correspondente à mínima intensidade média do sinal recebido aplicado à antena que atende ao limiar de SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio* [3]) para um esquema de modulação, que permite obter o mínimo throughput requerido de 95% do máximo possível, a figura é apresentada com maior detalhe em [3].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

- ***Carrier to Noise Ratio* (C/N)**

  Corresponde aos diferentes valores da razão portadora ruído para cada esquema de modulação segundo o estabelecido e detalhado em [21].

- **UE NF**

  Refere-se à razão de ruído de saída no qual poderia permanecer se o próprio receptor não apresenta ruído. A figura de ruído típica do LTE UE é igual a 9 [3] [24].

- ***Thermal Noise***

  O ruído térmico (*Thermal Noise*) se obtém utilizando a seguinte equação:

  $$\mathbf{10\log(B * T * k) + 30} \qquad \mathbf{(1)}$$

  Onde:

  - T corresponde à temperatura do receptor em Kelvin, igual a 290 [3].
  - k corresponde à constante de Boltzman igual a $\mathbf{1.380662 * 10^{-23}}$ [**3**].
  - B corresponde à largura de faixa efetiva.

- ***Receiver Noise Floor***

  Corresponde ao piso de ruído (*Noise Floor*) obtido ao subtrair do Valor do *Thermal Noise* o valor típico da figura de ruído do *User Equipment* [3] [16].

- **Sensibilidade do Receptor**

  Corresponde à soma do piso de ruído (*Noise Floor)* e a razão portadora ruido (C/N) sendo estes valores diferentes [3] para cada esquema de modulação.

- **Faixa Dinâmica Máxima *(Maximum Dynamic Range)***

  A faixa dinâmica máxima [3] corresponde à razão dos níveis máximo e mínimo do sinal necessário para manter o throughput ou estado de erro. Para um LTE UE a entrada máxima é igual a -25 dBm fazendo a diferença com o nível mínimo do sinal (sensibilidade de referência) é possível encontrar a faixa dinâmica máxima, expresso em decibéis (dB), sendo que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

o valor mudará dependendo do esquema de modulação utilizado no cenário de avaliação de interferência.

2.2.5. HeNB (*Home enhanced Node B*)

A tecnologia das femtocélulas é uma solução que promete oferecer melhoria da taxa de transmissão com face do aumento do tráfego de dados, permitindo assim manter um equilíbrio da rede e incrementando a cobertura da macrocélula em ambientes fechados.

Esta solução faz com que os serviços das redes de quarta geração (4G) proporcionem um uso eficiente do espectro, permitindo o deslocamento do LTE UE, garantindo a qualidade da cobertura indoor e acrescentando o nível do throughput.

Entre as principais vantagens [25] para a integração das macro e femtocélulas, tem-se:

- **Soluções de capacidade e cobertura. -** As femtocélulas possibilitam um maior alcance e capacidade do sistema móvel permitindo o reuso de frequência em um ambiente fechado.
- **Redução de Custos e Infraestrutura.-** Permite à diminuição dos custos de implementação de uma macrocélula.
- **Redução de Potência.-** A área de cobertura de uma femtocélula é de curto alcance, portanto suas transmissões utilizam menor potência do que as macrocélulas que apresentam problemas para atravessar as paredes.
- **Qualidade de Serviço (QoS).-** Ao estabelecer uma estação indoor, o LTE UE poderia utilizar o acesso de internet para acessar à rede da macrocélula, aumentando a taxa de dados e melhorando o nível de sinal recebido.

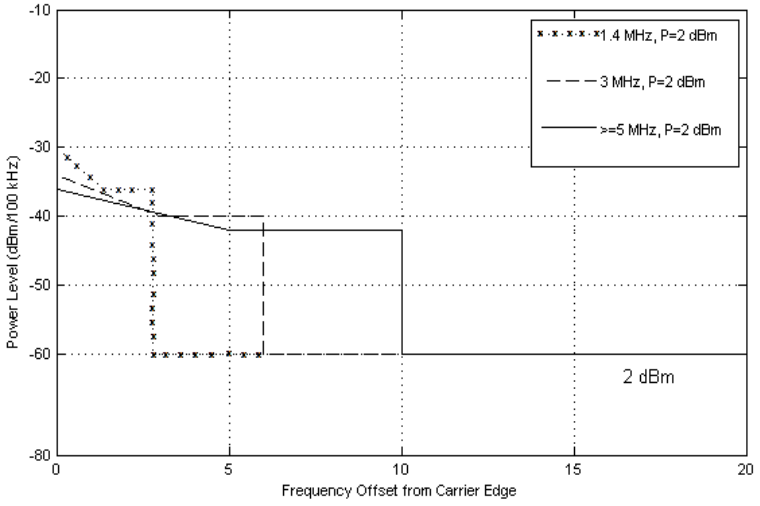
Os principais parâmetros da HeNB foram obtidas de [3] [12] [13] [25] [26] [27] e estão resumidos na Tabela 5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Tabela 5. Parâmetros da HeNB

Potência [dBm]	20; 17; 14; 11
Largura de Faixa [MHz]	1,4; 3; 5;10;20
Power Control Step Size [dB]	0.5
Minimum Threshold [dBm]	-10
Dynamic Range [dB]	20
Figura de Ruído [dB]	13
Altura (m)	1.5 – 3

A máscara de emissão espectral da HeNB apresentada em [3] considera uma potência mínima de 2 dBm e uma potência máxima de 20 dBm, como ilustrado na figura 4. Esta máscara está disponível para canais com largura de faixa entre 1.4 MHz, 3 MHz e para larguras de faixas maiores a 5 MHz.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

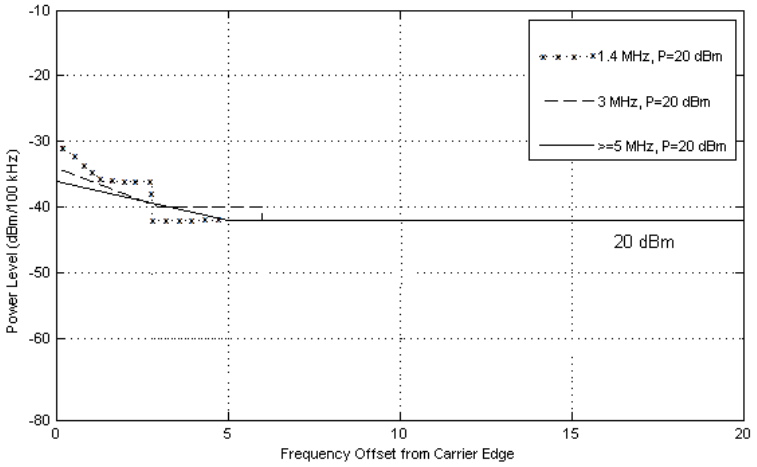


Fig. 4 Máscara de emissão espectral da HeNB para 2 e 20 dBm

2.2.5.1. Problemas de Interferência

As redes das femtocélulas devem enfrentar diferentes tipos de interferência tanto no enlace de descida como no enlace de subida. Cada um destes cenários de interferência é discutido a seguir:

- No enlace de descida**, (macro a femto-célula)**: Os usuários conectados às femtocélulas são mais susceptíveis a sofrer interferência se a femtocélula encontra-se perto das macrocélulas, pois, esta tem uma maior potência de transmissão.
- No enlace de descida, (**femto a macro-célula**): Os receptores que recebem as transmissões no enlace de descida da macrocélula poderiam sofrer interferência por parte da femtocélula fazendo com que o macro usuário (LTE UE) seja incapaz de receber o sinal da macrocélula.

Os dois cenários de interferência no enlace de descida descritos anteriormente são ilustrados na seguinte fig. 5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

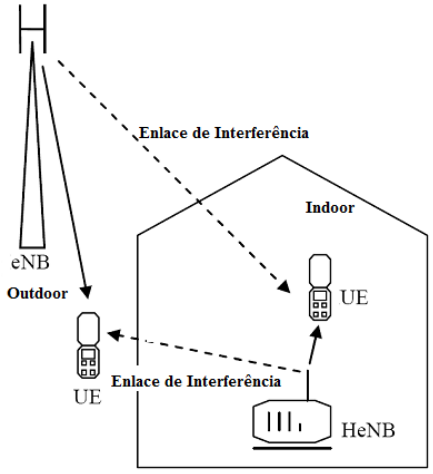


Fig. 5 Problemas de Interferência no enlace de descida

- No enlace de subida, (**macro a femto-célula**): Os receptores que recebem as transmissões do usuário da femtocélula podem sofrer interferência por parte dos usuários da macrocélulas.
- No enlace de subida, (**Femto a Macro-células**).- No enlace de subida as transmissões provenientes do usuário da macrocélula (LTE UE) sofre interferência devido à presença dos usuários da femtocélula.

Os dois cenários de interferência no enlace de subida descritos anteriormente são ilustrados na seguinte Fig. 6.

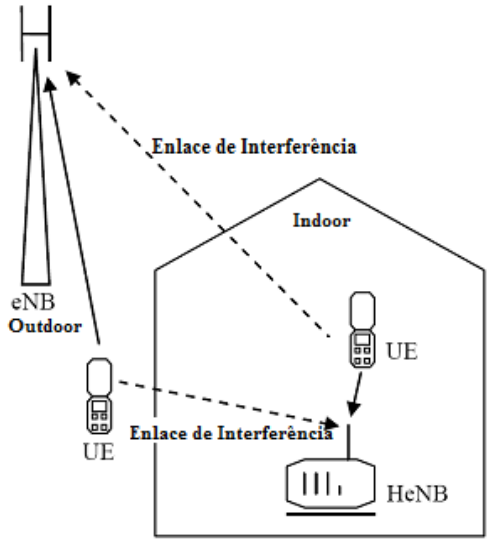


Fig. 6 Problemas de Interferência no enlace de subida

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

2.3.
Sistema Brasileiro de Televisão Digital (SBTVD)

A substituição do padrão de transmissão e difusão do sinal analógica terrestre pelo sistema digital baseado no padrão SBTVD (Sistema Brasileiro de Televisão Digital) implica uma melhora na qualidade da imagem e no som outorgando uma maior robustez ao sinal recebido pelos novos aparelhos de TV, maior número de canais disponíveis devido a que é possível multiplexar diversos programas e oferecer vários serviços interativos no conteúdo televisivo.

Entre as principais vantagens que apresenta a televisão digital está a possibilidade de transmitir, considerando uma largura de banda do canal de 6 MHz, ocupada por um sinal de televisão analógico, um sinal digital com 18 Mbps [28].

A Tabela 6 mostra as diferenças existentes entre os dois tipos de sinais.

Tabela 6. Diferenças sinal analógico e digital

Fator	Analógico	Digital
Resolução	525 linhas (4:3)	1080 linhas (16:9) 720 a 480 linhas (16:9)
Qualidade da imagem	Degradada	Não degradada
Novos Recursos	Não	Interatividade Múltiplos fluxos de áudio e vídeo
Otimização do Espectro	Uso do espectro limitado por interferências	Possível uso de canais adjacentes

Fonte.- http://www.abnt.org.br/

A imagem e o som oferecidos pela televisão digital tem um melhor grau de resolução e qualidade, possibilitando a interatividade com o assinante e a obtenção de informações sobre a programação. Além disso, a televisão digital

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

permite uma melhor utilização do espectro de frequências devido à capacidade de evitar a interferência tornando possível a utilização de canais adjacentes.

Outro benefício é a mobilidade, pois se outorga a possibilidade de recepção em deslocamento. Uma vantagem importante do SBTVD consiste no uso do entrelaçamento podendo-se configurar para um intervalo maior, eliminando assim as debilidades presentes em outros padrões ante o ruído impulsivo.

2.3.1. Características Técnicas do SBTVD

O Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD-T) adoptou como base, o padrão ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*) do Japão, possibilitando a transmissão digital em Alta Definição (HDTV, *High Definition* TV) e em definição padrão (SDTV, *Standard Definition TV*). Além disto, oferece-se a transmissão digital simultânea para recepção fixa, móvel e portável, e com interatividade.

A banda do canal de radiofrequência é dividida em 13 segmentos permitindo que vários segmentos de dados possam ser configurados. Cada segmento de dados pode ter os seus próprios esquemas de codificação e usar a modulação da portadora. Para recepção móvel utiliza-se a modulação DQPSK e para recepção fixa as modulações 16 QAM, 64 QAM ou QPSK. A largura de banda do canal é igual 6 MHz, permitindo taxas de dados entre 3,651 Mbps até 23,234 Mbps [29] [30].

O SBTVD difere do ISDB-T nas tecnologias utilizadas para a compressão de vídeo e áudio utilizando o padrão H.264 em lugar do MPEG-2 [30].

O SBTVD apresenta três modos de transmissão denominados “modo 1”, “modo 2” e “modo 3” estabelecendo diferentes condições em cada um destes, tais como o intervalo de guarda (determinado pela configuração da rede) e o deslocamento Doppler na recepção móvel.

A Tabela 7 lista os parâmetros mais importantes de cada um destes modos [28].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Tabela 7. Parâmetros do Sistema de Transmissão

Parâmetros		Valores
1	Número de Segmentos	13
2	Largura do Segmento	6000/14 = 428,57 kHz
3	Banda Ocupada	5,575 MHz **(modo 1)** 5,573 MHz **(modo 2)** 5,572 MHz **(modo 3)**
4	Número de Portadoras (Item 1 x Número de Portadoras)	108/segmento, Total 1405 **(modo 1)** 216/segmento, Total 2809 **(modo 2)** 432/segmento, Total 5617 **(modo 3)**
5	Método de Modulação	DQPSK, QPSK, 16 QAM , 64 QAM
6	Duração dos símbolos ativos	252 µs **(modo 1)** 504 µs **(modo 2)** 1008 µs **(modo 3)**
7	Espaçamento de portadoras	3,968 kHz **(modo 1)** 1,984 kHz **(modo 2)** 0,992 kHz **(modo 3)**
8	Duração do Intervalo de Guarda (1/4 ; 1/8; 1/16; 1/32)	63; 31.5 ; 15.75;7.875 µs **(modo 1)** 126; 63; 31.5; 75.75 µs **(modo 2)** 252; 126; 63; 31.5 µs **(modo 3)**
9	Duração total dos símbolos (1/4 ; 1/8; 1/16; 1/32)	315; 283.5; 267.75; 259.875 µs **(modo 1)** 628; 565; 533.5; 517.75 µs **(modo 2)** 1260; 1134; 1071; 1039.5 µs **(modo 3)**
10	Duração do quadro de transmissão	204 símbolos OFDM
11	Codificação de Canal	Código Convolucional, taxa = 1/2 com 64 estados. Puncionado para as taxas 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
12	Entrelaçamento Interno (1/4 ; 1/8; 1/16; 1/32)	0; 380; 760; 1520 símbolos (modo 1) 0; 190; 380;760 símbolos (modo 2) 0; 95; 190; 380 símbolos (modo 3)

Fonte: Recomendações da ABNT NBR 15601

Um segmento OFDM corresponde a uma porção do espectro de frequência com uma largura de 6/14 MHz [28] . O **modo 1** consiste de 108 portadoras por segmento; enquanto que os **modos 2** e **modo 3** tem dois vezes e quatro vezes o número de portadoras, respectivamente. As transmissões de televisão digital utilizam 13 segmentos com uma banda ocupada de aproximadamente 5.7 MHz.

Um quadro OFDM consiste de 204 símbolos dos quais tem se 187 bytes mais um byte de sincronismo e 16 bytes de redundância anexada ao intervalo de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

guarda. Ao aumentar o valor do intervalo de guarda se consegue diminuir a taxa de bit [28][30].

A Fig. 7 apresenta as máscaras do espectro de transmissão, denominadas "não crítica", "subcrítica" e "crítica", estabelecidas na Recomendação da ABNT NBR 15601 [28].

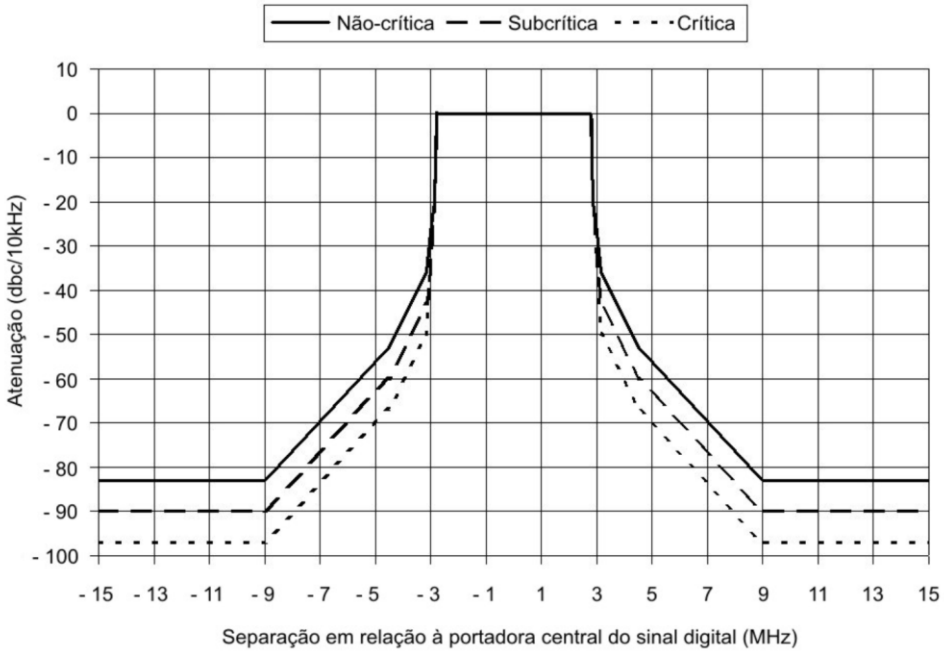


Fig. 7 Máscara do espectro de transmissão para radiodifusão de televisão digital terrestre

Na Tabela 8 estabelecem-se as principais características do receptor de televisão digital a fim de obter o nível mínimo de entrada [30].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Tabela 8. Características do Receptor TV digital

NÍVEL MÍNIMO DE ENTRADA			
FATOR	**SÍMBOLO**	**VALOR**	**FORMULA/COMENTÁRIOS**
Largura de Faixa Ocupada	B (MHz)	5,70E+06	
Constante de Boltzmann	k (Ws/k)	1,38E-23	
Temperatura Absoluta	T(Kelvin)	290	
Thermal Noise	Nt (dBm)	-106,42	Nt=10log (kTB)+30 (dBw => dBm)
Figura de Ruído do Receptor	Nr(dB)	10	Baseado em ensaios de laboratório realizados no Brasil
Limiar de C/N (Sistema Digital)	C/N (dB)	19	64QAM ; FEC 3/4
Mínima Potência do Sinal	Ps (dBm)	-77,4	Ps=Nt + Nr + C/N

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

É recomendado que a unidade de sintonia dos receptores de 13 segmentos, assim como a de um segmento, locado na parte central dos 13 segmentos satisfaça que o nível mínimo de entrada do sinal de antena seja de -77 dBm ou inferior. [30].Além disso, segundo as especificações detalhadas para o receptor de TV digital a relação de proteção é igual a -29 dB ou menor [30] assumindo um canal adjacente superior para a banda UHF.

Considerando a distância entre a localização do transmissor, a maioria das transmissoras de televisão digital utiliza a seguinte configuração dos parâmetros de transmissão [31] [32] definidos seguindo o modo 3 (8k), uma taxa de intervalo de guarda de 1/8 que implica a duração do intervalo de guarda igual a 126 microsegundos [28]. Os programas de HDTV transmitidos utilizam o esquema de modulação 64 QAM, com o uma taxa de código interno igual a 3/4 e aproximadamente o *time interleaving* igual a 200 milisegundos [28].

2.4. O Simulador Seamcat

O Seamcat (*Spectrum Engineering Advanced Monte Carlo Analysis Tool*) [15] é um modelo de simulações estatístico que utiliza a análise Monte Carlo para avaliar a interferência entre diferentes sistemas de rádio comunicação aplicando simulações de processos randômicos utilizando valores aleatoriamente de uma função densidade de probabilidade dos parâmetros estabelecidos no cenário de simulação (sistema vítima e sistema interferente) [15].

A fim de obter resultados confiáveis é sugerido realizar um número de simulações de amostras por evento maior que 20,000 [15]. Desta maneira, várias simulações serão executadas e o resultado é dado por uma média sobre o número de observações. Para cada instante de tempo ou simulação, um cenário é construído utilizando diferentes variáveis aleatórias, por exemplo, aonde o interferente vai estar localizado com respeito da posição da vítima, quão forte é o sinal desejado e sinais interferentes, que canais o interferente e a vítima estão utilizando, a distância de separação entre ambos os sistemas.

O procedimento do simulador SEAMCAT em um cenário típico de avaliação da interferência pode ser resumido em quatro passos básicos. Estes passos são descritos a seguir:

- O usuário define os parâmetros do sistema vítima, dos sistemas interferentes e do modelo de propagação a ser utilizado na simulação.
- SEAMCAT utiliza os parâmetros definidos para gerar amostras aleatórias baseando-se no método Monte Carlo chamando-os de *snapshots* ou eventos.
- Para todos os *snapsho*ts, o simulador SEAMCAT calcula os níveis do sinal desejado (*desired signal*) e os níveis do sinal interferente (*interfering signal*).
- Depois, o SEAMCAT calcula para cada *snapshot*, a probabilidade de interferência comparando a razão dos sinais desejados e interferentes no receptor vítima, com respeito aos critérios de interferência definidos de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

acordo às considerações do esquema de modulação estabelecido no cenário.

Os valores e avaliações de interferência se baseiam na análise de dois parâmetros importantes obtidos durante a execução das simulações:

- **Emissões não desejadas *(Unwanted Emissions*):** consiste das emissões de espúrios e das transmissões fora de banda (*out-of band emissions*) do transmissor interferente representado pelo parâmetro ACLR (*Adjacent Channel Leakage Ratio*) [3] interferindo na largura de faixa do receptor vítima [15].

- **Potência de Bloqueio do Receptor *(Receiver Blocking Power)*:** consiste na combinação entre, o parâmetro ACS (*Adjacent Channel Selectivity*) representando à capacidade do filtro do receptor de evitar as emissões de tipo não desejadas (*Unwanted Emission*) [15], e do modo de bloqueio ou atenuação do sinal interferente, representado pelo parâmetro de atenuação do receptor ($\boldsymbol{a_{vr}}$) [15]. Os modos de bloqueio disponíveis no simulador são o *Protection Ratio*, *User* ou o *Sensitivity Mode* [15].

Para uma melhor apreciação dos parâmetros de avaliação de interferência [15] apresenta-se a figura 8.

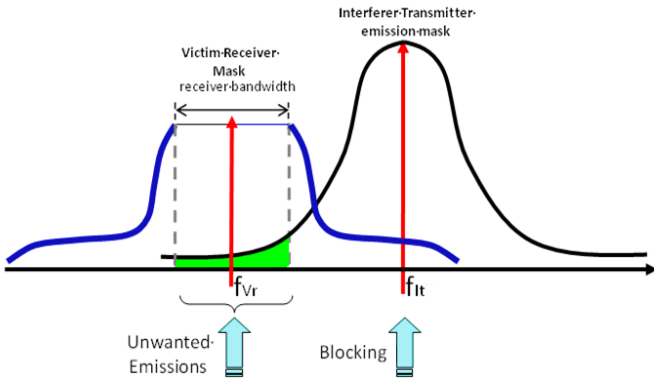


Fig. 8 *Emissões não Desejadas* e *Potência de Bloqueio do Receptor*

O cenário básico de avaliação de interferência [15] é apresentado na Fig. 9. O simulador SEAMCAT modela o *Victim Receiver* ou Receptor Vítima ($\mathbf{V_r}$) e é

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

conectado com o *Wanted Transmitter* ou Transmissor Desejado ($\mathbf{W_t}$) estabelecendo assim, o Sistema Vítima (*Victim Link*). O Sistema Vítima está localizado entre *Interferer Transmitters* ou Transmissores Interferentes ($\mathbf{I_t}$), mas, somente uma proporção deles estará ativada.

Este tipo de interferência pode pertencer ao mesmo sistema que da vítima, sistemas diferentes ou uma combinação de ambos. Depois, os interferentes são distribuídos aleatoriamente ao redor da vítima, para posteriormente permitir a conexão com o *Wanted Receiver* ou Receptor Desejado ($\mathbf{W_r}$) estabelecendo o Sistema Interferente (*Interfering Link*), criando desta maneira um cenário típico de interferência.

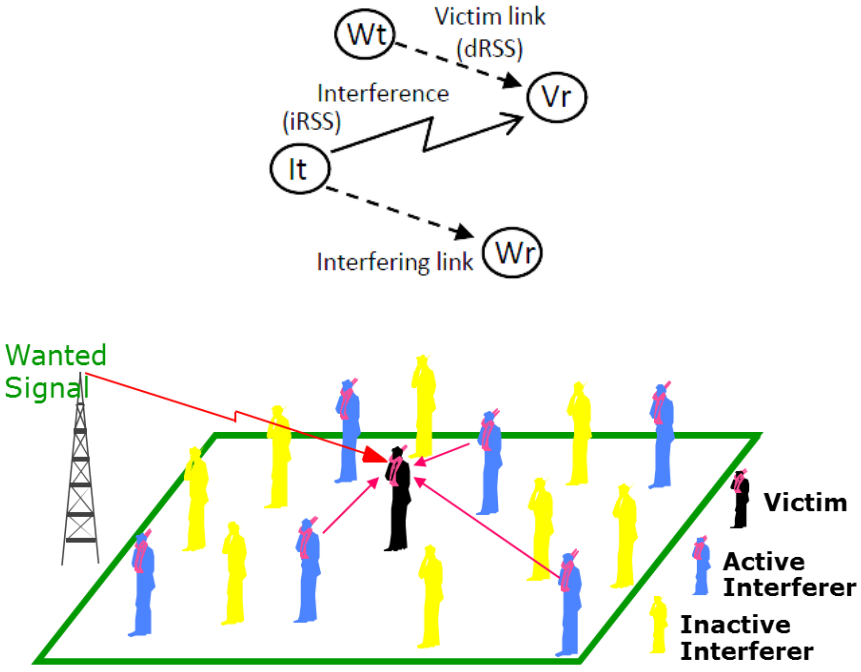


Fig. 9 Cenário típico de Interferência entre a Vítima e o Interferente

Portanto, a interferência ocorre quando a razão portadora/interferência (e.g. C/I) do $\mathbf{V_r}$ é menor que o valor mínimo permitido ($\mathbf{C/I}_{Evento}{}^{i} < \mathbf{C/I}_{Permitido}$) [15], a fim de calcular esta relação é necessário estabelecer o valor dRSS (*Desired Received Signal Strength* ou Intensidade do Sinal Desejado Recebido) correspondente a "C", e o iRSS (*Intefering Signal Strength* ou Intensidade do Sinal Interferente) correspondente a "**I**" [15].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

2.4.1. Intensidade do Sinal Desejado Recebido e Intensidade do Sinal Interferente

As amostras geradas são processadas para calcular o **dRSS** (*Desired Received Signal Strength* ou Intensidade do Sinal Desejado Recebido) [15] que corresponde à intensidade do sinal recebido no *Victim Receiver* (Receptor Vítima, $\mathbf{V_r}$) provenientes do *Wanted Transmitter* (Transmissor Desejado,$\mathbf{W_t}$), e todas as intensidades dos sinais interferentes (**iRSS**, *Intefering Signal Strength*) que corresponde à intensidade do sinal proveniente do *Interferer Transmitter* (Transmissor Interferente,$\mathbf{I_t}$) recebido no Receptor Vítima ($\mathbf{V_r}$). Este processo é repetido "N" vezes, onde "N" é o número de eventos (*snapshots*).

O **dRSS** (*Desired Received Signal Strength* ou Intensidade do Sinal Desejado Recebido) [15] é dado pela seguinte expressão:

$$\mathbf{dRSS} = \mathbf{p_{w_t supplied}} + \mathbf{g_{w_t \to v_r}} - \mathbf{pl_{w_t \to v_r}}(\mathbf{f_{v_r}}) + \mathbf{g_{v_r \to w_t}} \quad \textbf{(2)}$$

Onde:

- $\mathbf{p_{w_t supplied}}$, potência fornecida à antena do transmissor desejado (*Wanted Transmitter*).
- $\mathbf{g_{w_t \to v_r}}$, o ganho da antena em direção a $\mathbf{V_r}$.
- $\mathbf{pl_{w_t \to v_r}}(\mathbf{f_{v_r}})$, a perda de percurso entre o transmissor desejado (*Wanted Transmitter*) e o receptor Vítima (*Victim Receiver*).
- $\mathbf{f_{v_r}}$, a frequência do $\mathbf{V_r}$.
- $\mathbf{g_{v_r \to w_t}}$, o ganho da antena em direção a $\mathbf{W_t}$.

As seguintes equações apresentam os níveis de a **interferência *Unwanted*** e ***Blocking*** do transmissor interferente descritas em detalhe em [15]:

$$\mathbf{iRSS_{unwanted}} = \mathbf{f}(\mathbf{emission\ i_t}, \mathbf{gi_t\ PC}, \mathbf{g\ i_t \to\ v_r}, \mathbf{pl\ i_t \to v_r}, \mathbf{gv_r \to\ i_t})\mathbf{i} \quad \textbf{(3)}$$

$$\mathbf{iRSS_{unwanted}} = \mathbf{10}\boldsymbol{log}_{\mathbf{10}}(\sum_{i=1}^{n} \mathbf{10}^{\frac{iRSS_{unwanted_i}}{10}}) \quad \textbf{(4)}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

$$\mathbf{iRSS_{blocking}} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n\ interfers}} \mathbf{f(p\ i_t\ supplied, gi_t\ PC, g\ i_t \rightarrow v_r, pl\ i_t \rightarrow v_r, a_{v_r}, gv_r \rightarrow i_t)\ i} \quad \textbf{(5)}$$

$$\mathbf{iRSS_{blocking}} = \mathbf{10}log_{\mathbf{10}}\left(\sum_{i=1}^{n} \mathbf{10}^{\frac{iRSS_{blocking_i}}{10}}\right) \quad \textbf{(6)}$$

Onde:

- **i**, representa o "n" sinal interferente.
- **emission $\mathbf{i_t}$** , permite realizar os cálculos da interferência entre os sistemas localizados na mesma banda ou em bandas adjacentes.
- **$\mathbf{gi_t}$ PC** , corresponde ao controle do ganho de potência do **$\mathbf{i_t}$** com a função de controle de potência.
- **g $\mathbf{i_t \rightarrow v_r}$** , corresponde ao ganho da antena do **$\mathbf{i_t}$** em direção a **$\mathbf{v_r}$**.
- **pl $\mathbf{i_t \rightarrow v_r}$**, corresponde à perda de percurso entre o transmissor interferente e o receptor Vítima.
- **$\mathbf{gv_r \rightarrow i_t}$** , corresponde ao ganho da antena do **$\mathbf{v_r}$** em direção a **$\mathbf{i_t}$**.
- **p $\mathbf{i_t}$ supplied** , corresponde à potência fornecida à antena do **$\mathbf{i_t}$**.
- **$\mathbf{a_{v_r}}$** , corresponde ao parâmetro de atenuação do receptor Vítima.

A Fig. 10, ilustra o cenário de interferência típico considerando a avaliação dos parâmetros de Intensidade do Sinal Desejado Recebido (**dRSS**) e dos sinais interferentes (**$\mathbf{iRSS_{unwanted}}$** , **$\mathbf{iRSS_{blocking}}$**).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

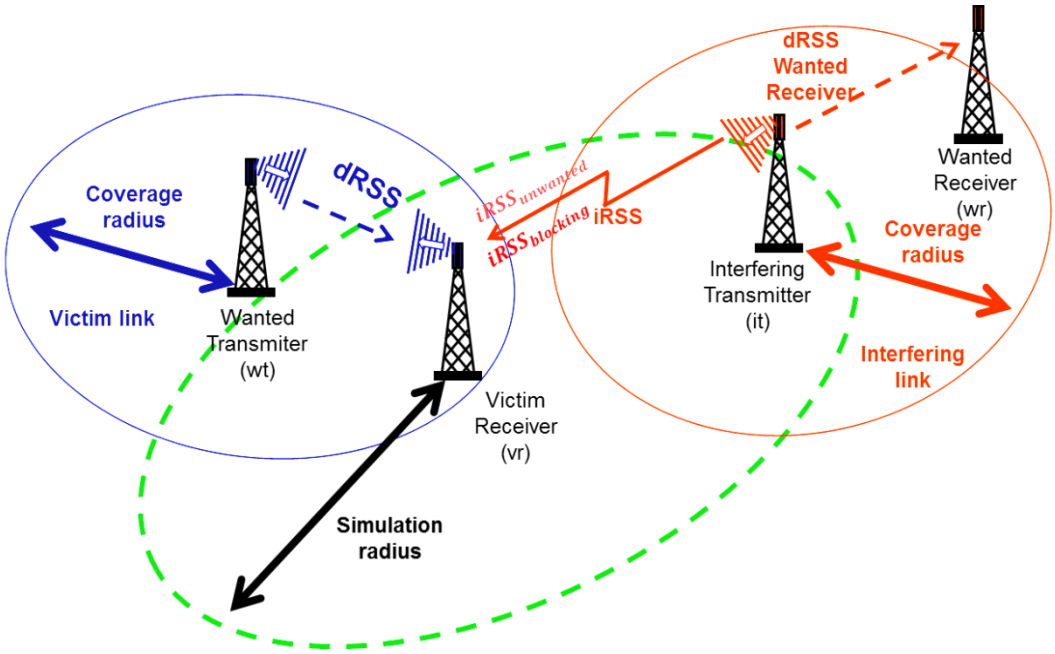


Fig. 10 Cenário típico de Interferência entre os enlaces Vítima e Interferente

2.4.2. Intensidade do Sinal de Sensoriamento Recebido (sRSS, *Sensing Received Signal Strength*)

A Intensidade do Sinal de Sensoriamento Recebido (sRSS, *Sensing Received Signal Strength*) [15] representa o sinal que é transmitido pelo $\mathbf{W_t}$ e é sensoriada pelo $\boldsymbol{i_t}$ (Transmissor Interferente ou *Interferer Transmitter*). É importante perceber que o $\boldsymbol{i_t}$ está atuando como o dispositivo transceptor. Este significa que quando a energia é sensoriada através da largura de faixa do dispositivo de sensoriamento, o Transmissor Interferente, atua como um dispositivo de recepção [15] [33], como é representado na fig. 11.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

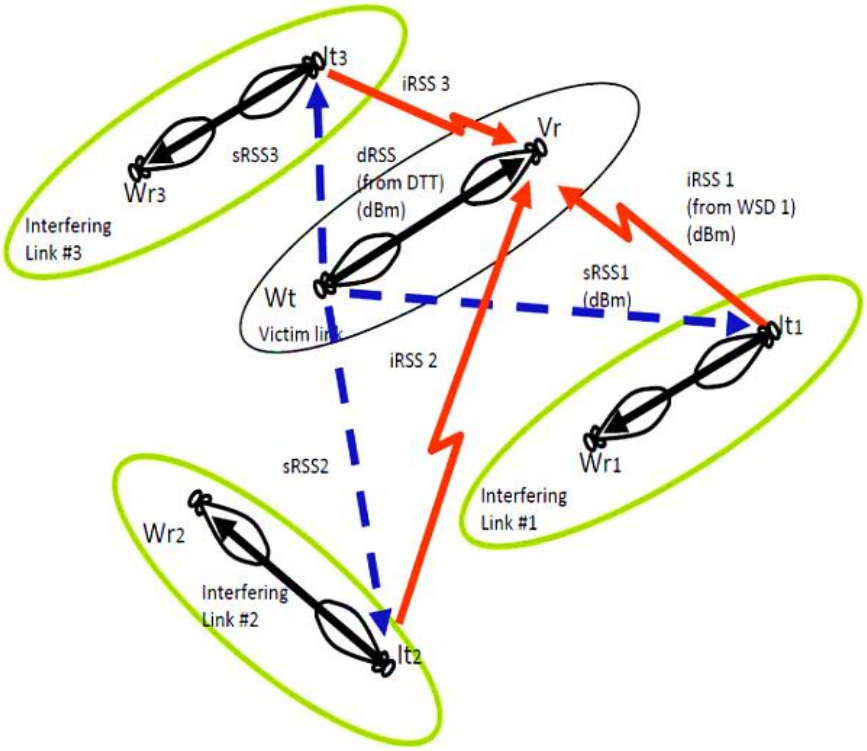


Fig. 11 Descrição de um sistema de Rádio Cognitivo

O sRSS é calculado como o *unwanted mask* (máscara não desejada) do sistema interferente no canal "m" e é dado [33] pela seguinte equação :

$$\mathbf{sRSS_{(f_m)}} = \mathbf{P_{w_t(f_m)}} + \mathbf{G_{w_t \rightarrow i_t}} + \mathbf{G_{i_t \rightarrow w_t}} + \mathbf{L} \quad \textbf{(7)}$$

Onde [33]:

- $\mathbf{P_{w_t(f_m)}}$, potência de transmissão em dBm do $\mathbf{W_t}$.
- $\mathbf{f_m}$, a frequência do *white space device* (i.e. $\boldsymbol{i_t}$).
- $\mathbf{G_{w_t \rightarrow i_t}}$, corresponde ao ganho da antena em dBi do $\mathbf{W_t}$ em direção a $\mathbf{i_t}$.
- $\mathbf{G_{i_t \rightarrow w_t}}$, corresponde ao ganho da antena em dBi do $\mathbf{i_t}$ em direção a $\mathbf{W_t}$.
- **L**, a perda de percurso em dB entre o $\mathbf{i_t}$ e o $\mathbf{W_t}$.

No simulador SEAMCAT, os dispositivos de rádio cognitivo são assumidos como se fossem os interferentes e somente é permitido um sistema vítima e um ou mais sistemas interferentes por cenário de simulação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Além disso, é assumido que a frequência do dispositivo interferente de rádio cognitivo depende do tipo de frequência definido no Sistema Vítima (esta configuração pode ser apresentada como uma frequência constante, definida pelo usuário, uniforme ou distribuída entre uma frequência mínima e máxima [33]). Portanto, quando o módulo de Rádio Cognitivo é ativado no simulador, a frequência estabelecida do Sistema Interferente é desativada, pois o dispositivo de Rádio Cognitivo atua como transceptor mantendo-se à escuta das transmissões do Sistema Vítima.

Alguns dos parâmetros importantes definidos no modulo de Rádio Cognitivo [33] correspondem às características e parâmetros de Sensoriamento do Espectro tais como: o Limiar de Detecção expresso em dBm, a Probabilidade de Falha expressa em percentagem, que corresponde a falha de selecionar de maneira incorreta um canal não disponível, e a Largura de Faixa de Sensoriamento do WSD (i.e. $\boldsymbol{i_t}$) expressa em kHz. Além disto, dependendo do cenário de simulação é importante considerar a potência do WSD e o modelo de propagação a utilizar entre o Receptor Vítima ($\mathbf{V_r}$) e o Transmissor Interferente ($\mathbf{i_t}$) [33].

2.4.3. Algoritmo de Rádio Cognitivo

Neste item é detalhado o funcionamento do algoritmo de Sensoriamento de Espectro de Rádio Cognitivo implementado no simulador SEAMCAT disponível em mais detalhe no manual do simulador [33].

O principio de funcionamento do algoritmo baseia-se em assumir o caso ideal que estabelece dois fundamentos básicos:

- Se o $\mathbf{sRSS > Limiar\ de\ Detec\tilde{c}\tilde{a}o}$ então o dispositivo w*hite space* (i.e. $\boldsymbol{i_t}$) vai permanecer desligado sem gerar nenhum tipo de transmissão, portanto no haverá interferência.

- Se o $\mathbf{sRSS < Limiar\ de\ Detec\tilde{c}\tilde{a}o}$ então o dispositivo *white space* (i.e. $\boldsymbol{i_t}$) será ligado permitindo a avaliação e cálculo da probabilidade de interferência.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Considerando estes princípios a execução do algoritmo esta identificado em seis etapas segundo o estabelecido em [33].

1. **Etapa #1. Corresponde à identificação das frequências a serem avaliadas**

Neste caso assume-se que a frequência do dispositivo *white space* (i.e. $\mathbf{i_t}$) depende do tipo de frequência definido no sistema vítima, sendo desativada a frequência definida no sistema interferente.

A variável "M" definida no algoritmo, corresponde ao número possível de canais que o WSD poderia funcionar, para obter isto é importante considerar as formas de definir a frequência do sistema vítima [33].

a) **A Frequência do Sistema Vítima é constante.** Então a frequência do interferente é igual à frequência do sistema Vítima isto é M=1.
b) **A Frequência do Sistema Vítima é discreta.** Então as possíveis frequências do WSD são definidas pelo usuário sendo "M" igual ao valor definido.
c) **A Frequência do Sistema Vítima está definida em um intervalo entre uma frequência mínima ($\mathbf{f_{min}}$) e uma frequência máxima ($\mathbf{f_{max}}$).** Então as possíveis frequências do WSD [33] estão estabelecidas desde:

$$\mathbf{f_{min}} + (\mathbf{M-1}) * \textbf{largura de faixa do Vítima} \text{ até } \mathbf{f_{max}} .$$

2. **Etapa #2. Alocação de uma frequência ao WSD**

Para que cada evento aconteça deve-se satisfazer a condição em que o Sinal Desejado (dRSS) seja maior do que a sensibilidade do receptor. Posteriormente, o algoritmo calcula a Intensidade do Sinal de Sensoriamento Recebido (sRSS) utilizando a equação 7 apresentada anteriormente, e a máscara de transmissão interferente, para depois detectar os canais que se encontrarem disponíveis permitindo ou não que o WSD transmita. Finalmente, os resultados são comparados na simulação com o Limiar de Detecção estabelecido no cenário de simulação e seguem-se os princípios básicos de ligado ou não do WSD descritos na Etapa#1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

3. **Etapa #3. Probabilidade de Falha (*Probability of Failure*)**

Se esta opção estiver ativa no cenário de simulação, o simulador considerará a Probabilidade de Falha em todos os *snapshots* gerados. Nos cenários de simulação foi estabelecida uma Probabilidade de Falha igual a 10%.

4. **Etapa #4. Seleciona o canal disponível e determina o canal do WSD**

Nesta seção se estabelece se os canais estão todos disponíveis, ou se um ou mais canais estão bloqueados.

No caso de estarem bloqueados, procura-se outro WSD, e se não for este o caso, avalia-se o tipo de frequência estabelecida no Sistema Vítima. Se a frequência esta definida como frequência constante, então a potência máxima E.I.R.P. do WSD é deduzida do transmissor e do ganho da antena do WSD ($\mathbf{i_t}$).

Para as outras configurações de tipo de frequência estabelecida no cenário (ver Seção #1) será necessário determinar uma tabela de restrições da potência E.I.R.P. do WSD como é apresentado em [33] e no exemplo desenvolvido pelo grupo técnico em [34].

5. **Etapa #5. Armazena a frequência e a potência E.I.R.P de todos os WSD ativos para cada evento**

Uma vez armazenados os dados das seções anteriores, é calculada a interferência $\mathbf{iRSS_{unwanted}}$ e a $\mathbf{iRSS_{blocking}}$ de todos os dispositivos WSD ativos ($\mathbf{i_t}$) segundo os resultados de Sensoriamento de Espectro obtidos pelo sRSS [33].

6. **Etapa #6. Calculo da Interferência**

Finalmente, calcula-se os valores de probabilidade de interferência segundo os critérios de interferência (C/I, C/(N+I), (N+I)/N, I/N) estabelecidos no cenário de simulação.

2.5. Modelos de Propagação

A seguir detalham-se os modelos de propagação utilizados no desenvolvimento dos cenários de simulação no simulador SEAMCAT. Foram

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

utilizados basicamente três tipos de modelos de propagação: o modelo de Okumura Hata, o modelo de Okumura Hata SRD (*Short Range Devices*) e o modelo da ITU-R P. 1546.

Os modelos de propagação e os parâmetros utilizados nas simulações encontram-se já pré-estabelecidos no simulador SEAMCAT seguindo os requisitos de cada um destes modelos. No manual do simulador [15] descreve-se cada um dos modelos de propagação.

Além disso, o simulador inclui a opção de instalar *plug-ins* de modelos de propagação disponíveis em [35].

2.5.1. Modelo de Propagação Okumura Hata

O modelo de propagação Hata referido também como o Okumura-Hata foi originalmente desenvolvido para trajetos sem linha de visada em ambientes urbanos para serviços móveis que incluem baixa altitude das terminais móveis que se estão deslocando na célula.

O modelo Estendido Hata implementado no simulador SEAMCAT calcula a perda de propagação entre o transmissor e receptor como é expresso na seguinte equação [36]:

$$\boldsymbol{f_{propage}(f, h_1, h_2, d, env) = L + T(G(\sigma))} \quad \textbf{(8)}$$

Onde:

- f: $frequência\ (MHz)$
- h1: altura da antena transmissora em metros (*above ground*).
- h2: altura da antena receptora em metros (*above ground*).
- d: distância entre o transmissor e receptor expressa em km.
- env: ambiente (*environment*).
- L= perda média de propagação expressa em dB.
- $\mathrm{H_m} = \min(\mathrm{h_1}, \mathrm{h_2})$.
- $\mathrm{H_b} = \max(\mathrm{h_1}, \mathrm{h_2})$.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Os intervalos validados no modelo de propagação COST 231 baseados no trabalho de Okumura e Hata devem ser aplicados quando se for utilizar o modelo Estendido Hata no SEAMCAT [36], considerando que:

- H_m: $1\ a\ 10\ metros$
- H_b: $30\ a\ 200\ metros$

Em [15] é proporcionada a seguinte Tabela 9 que descreve a perda de percurso média considerando as diferentes restrições respeito à frequência, distância e ambiente de propagação, segundo os critérios e requisitos estabelecidos do modelo de propagação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

Tabela 9. Considerações do Modelo de Propagação

Distância	Env.	Frequência	Perda Média
$\boldsymbol{d < 0,04\ \text{km}}$			$\boldsymbol{L = 32,4 + 20\log(\text{f}) + 10\log\left[d^2 + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6}\right]}$
$\boldsymbol{d > 0,1\ \text{km}}$	Urbano	$\boldsymbol{30\ \text{MHz} < \text{f} \leq 150\ \text{MHz}}$	$\boldsymbol{L = 69,6 + 26,2\log(150) - 20\log\left(\frac{150}{f}\right) - 13,82\log(max\{30, H_b\}) + [44.9 - 6.55\log(max\{30, H_b\})](\log(d))^{\alpha} - a(H_m) - b(H_b)}$
		$\boldsymbol{150\ MHz < f \leq 1500\ MHz}$	$\boldsymbol{L = 69,6 + 26,2\log(f) - 13.82\log(\max\{30, H_b\}) + [44.9 - 6.55\log(max\{30, H_b\})](\log(d))^{\alpha} - a(H_m) - b(H_b)}$
		$\boldsymbol{1500\ MHz < f \leq 2000\ MHz}$	$\boldsymbol{L = 46.3 + 33.9\log(f) - 13.82(\max\{30, H_b\}) + [44.9 - 6.55\log(max\{30, H_b\})](\log(d))^{\alpha} - a(H_m) - b(H_b)}$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

		$\mathbf{2000\ MHz < f \leq 3000\ MHz}$	$\boldsymbol{L = 46.3 + 33.9\log(2000) + 10\log\left(\frac{f}{2000}\right)}$ $\boldsymbol{- +[44.9 - 6.55\log(max\{30, H_b\})](\log(d))^{\alpha}}$ $\boldsymbol{- a(H_m) - b(H_b)}$
	Suburbano		$\boldsymbol{L = L(urban) -}$ $\boldsymbol{2 * \left\{\log\left[\frac{\min\{\max\{150; f\}; 2000\}}{28}\right]\right\}^2 - 5.4}$
	Espaço Aberto		$\boldsymbol{L = L(urban) -}$ $\boldsymbol{4.78 * \{\log[\min\{\max\{150; f\}; 2000\}]\}^2}$ $\boldsymbol{+18.33 * \log[\min\{\max\{150; f\}; 2000\}] - 40.94}$
$\mathbf{0,04\ km < d > 0,1\ km}$			$\boldsymbol{L = L(0.04) + \frac{[\log(d) - \log(0.04)]}{[\log(0.1) - \log(0.04)]} * [L(0.1) - L(0.04)]}$

Da tabela apresentada anteriormente, os parâmetros $\boldsymbol{a(H_m)}$, $\boldsymbol{b(H_b)}$, $\boldsymbol{\alpha}$ correspondem ao fator de correção para cidades pequenas e medianas, o ganho da antena e o coeficiente alfa, respectivamente. Cada um destes parâmetros pode ser calculado segundo as seguintes equações estabelecidas em [15]:

$$\boldsymbol{a(H_m) = (1.1log(f) - 0.7) * min\{10; H_m\} - \{1.56log(f) - 0.8\} + max\{0; 20log(\frac{H_m}{10})\}} \quad \textbf{(9)}$$

$$\boldsymbol{b(H_b) = \min\{0; 20\log(\frac{H_b}{30})\}} \quad \textbf{(10)}$$

$$\boldsymbol{\alpha = \begin{cases} 1 & d \leq 20km \\ 1 + (0.14 + 1.87 * 10^{-4} xf + 107 * 10^{-3} H_b) * \left(\log\frac{d}{20}\right)^{0.8} & 20km < d < 100km \end{cases}}$$

2.5.2. Modelo de Propagação Hata SRD

O modelo de Propagação Hata SRD (*Short Range Devices* ou Dispositivos de Curto Alcance) é uma versão modificada do Modelo Hata Extendido SE21 [36] desenvolvida no CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*) no projeto "*Project Team* SE24" para estudos de *Short Range Devices* (SRD) i.e. Dispositivos de Curto Alcance.

Como é mencionado em [36] é importante citar – "A modificação básica foi a suposição que, embora os dispositivos SRD estejam usualmente trabalhando com altura de antenas pequenas (tipicamente dispositivos pessoais, i.e. com altura de antena de 1.5 metros), mas, a interferência poderia usualmente ocorrer a distâncias relativamente pequenas (até 100 metros ou menos) assumindo linha de visada direta ou próxima. Portanto a expressão do parâmetro $\mathbf{b(H_b)}$ no modelo Hata que da uma perda extra para uma altura da antena transmissora menor a 30 metros foi considerada desnecessária. Então, a única diferença entre o modelo Hata-SRD e o modelo Hata está na nova expressão do fator do ganho da antena $\mathbf{b(H_b)}$ que para o caso do modelo Hata-SRD está expressado da seguinte forma:"

$$\boldsymbol{b = \min\ (0, 20\log(Hb/30))} \quad \textbf{(11)}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

A ser substituída por [36]:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{1.1}\log(\mathbf{f}) - \mathbf{0.7}) * \min(\mathbf{10}, \mathbf{H_b}) - (\mathbf{1.56}\log(\mathbf{f}) - \mathbf{0.8}) + \max\left(\mathbf{0}, \mathbf{20}\log\left(\frac{\mathbf{H_b}}{\mathbf{10}}\right)\right) \quad \textbf{(12)}$$

Um parâmetro importante no modelo de propagação Estendido Hata-SRD é assumir que a altura da antena de transmissão não deve exceder os 1.5 a 3 metros de altura [36].

2.6. Modelo de Propagação da ITU-R P. 1546

O modelo de propagação da ITU-R P. 1546 disponível no simulador SEAMCAT oferece a possibilidade de configurar os cenários de simulação segundo os requisitos da Recomendação ITU-R P.1546-1 [37] e da Recomendação ITU-R P.1546-4 [38].

O modelo de propagação da ITU-R P.1546-1 se baseou no primeiro modelo segundo a Recomendação da ITU-R P.370 [39], que propõe um modelo de predição ponto a área das medições em campo para *brodacasting*, *land mobile*, *maritime mobile* e serviços fixos (e.g. aqueles que utilizam sistemas ponto multiponto) no intervalo de frequência de 30 a 3000 MHz e para distâncias entre 1 km e 1000 quilômetros [39].

Os parâmetros [39] considerados neste modelo são listados a continuação:

- Parâmetros dependentes do percurso, constantes durante a simulação para um dado percurso, são:
  - *Time Percentage*: **pt** (%)
  - *Transmitter System: analog/digital*
  - *Transmitter Bandwidth*: $\mathbf{B_t}$
  - *Global Environment*: rural, suburbano, urbano.
- Parâmetros variáveis (i.e. variam para cada evento da simulação)
  - Altura efetiva da antena transmissora $\mathbf{h_t}$ em metros.
  - Altura da antena receptora (*above ground*) $\mathbf{h_r}$
  - Frequência $\mathbf{f}(\mathbf{MHz})$
  - Distância $\mathbf{d}(\mathbf{km})$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA

O procedimento do cálculo da perda do trajeto segundo as Recomendações da ITU-R P.1546 detalha-se em [39].

Além disso, o modelo de propagação da ITU-R P.1546-4 disponível no simulador SEAMCAT segui os requisitos definidos em [38] estabelecendo um modelo de predição ponto a área das medições em campo para *broadcasting digital/analog* e *mobile* apenas para um ambiente *Land* (terra) considerando o intervalo de frequência de 30 a 3000 MHz e distâncias entre 1 km e 1000 quilômetros [38].

Os parâmetros [38] considerados no modelo de propagação são listados a seguir:

- *General Environment*: Rural, Suburbano, Urbano, Denso Urbano.
- *System: Broadcasting Digital, Broadcasting Analogue, Mobile.*
- *Time Percentage* (min): **pt** (%) limitado no intervalo entre 1% a 50 % de tempo a fim avaliar o valor de intensidade em campo (*field strength*). [38]
- *Time Percentage* (max): **pt** (%)limitado no intervalo entre 1% a 50 % de tempo a fim avaliar o valor de intensidade em campo (*field strength*). [38]
- *Local Cluster Height* expressa em metros [38].
- *Standard Deviation* (Desvio Padrão) expressa em dB, varia segundo o tipo de serviço oferecido e a frequência estabelecida [37].
- *Area of Location Variability* (500x500 meters; <2 km raio; <50 km raio) [37] as curvas de propagação representam os valores de intensidade em campo que excedem o 50% das localizações dentro de uma área típica 500 metros por 500 metros, a fim de fornecer estatisticamente as condições de recepção em uma determinada área, em lugar de um ponto determinado [39].

Além disso, o simulador SEAMCAT recomenda que ao utilizar o modelo de propagação da ITU-R P.1546-4 nos cenários de simulação, é importante assumir o Anexo 5-1.1 a),b),c) que refere-se ao tópico "Designações das Terminais" descrito em detalhe em [38].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1213317/CA