

3

Simulações Sistema Móvel LTE Macro – LTE Femto

3.1.

Introdução

Neste capítulo serão apresentados e descritos os cenários das simulações desenvolvidas no programa Seamcat versão 4.0.1. O principal objetivo é a avaliação dois parâmetros que refletem o comportamento da interferência no cenário de simulação. O primeiro deles refere-se à interferência de canal adjacente (*unwanted signal*) e o segundo, corresponde à interferência do sinal de bloqueio (*blocking signal*).

Os cenários de simulação foram desenvolvidos na faixa de 700 MHz considerando ambientes de propagação fechados (indoor) e abertos (outdoor), utilizando a técnica de sensoriamento espectral implementada no módulo de Rádio Cognitivo do simulador Seamcat. A configuração e escolha dos parâmetros de cada cenário simulado foram baseados estritamente nos requisitos e normas técnicas fornecidas no padrão do Sistema Móvel LTE Release 10, descritas pelo 3GPP [3] [20-27].

Os cenários das simulações envolvem o estudo da interferência nas redes heterogêneas que se produz pela coexistência da macrocélula e da femtocélula LTE quando estas compartilham a mesma faixa de frequência, estando localizadas em canais adjacentes ou se encontram próximos da área de cobertura de cada rede. Deste modo, a redução da interferência gerada entre as redes femtocélulas e a macrocélula surge como um dos maiores desafios no planejamento dos sistemas móveis atuais que pode ser resolvido utilizando a tecnologia de sensoriamento de espectro e de rádio cognitivo.

O simulador Seamcat versão 4.0.1 tem desenvolvido o módulo de rádio cognitivo que se baseia na implementação do algoritmo de sensoriamento descrito em detalhe no Capítulo 2. Este módulo foi utilizado na execução de cada cenário de simulação considerando as restrições e requisitos segundo os relatórios da FCC

(*Federal Communications Commission*) [40] e da ECC (*Electronic Communications Committee*) [41].

A avaliação do cenário de coexistência das redes heterogêneas consistiu principalmente de dois tipos de cenários de simulação. O primeiro cenário considera a interferência produzida no usuário da macrocélula LTE quando este se encontra próximo da área de cobertura de quatro femtocélulas (HeNB) e ambos compartilham a mesma faixa de frequência (700 MHz). Neste cenário se assume uma potência máxima da femtocélula de 100 mW.

O segundo cenário de simulação considera o mesmo cenário descrito anteriormente, (o usuário da macrocélula LTE permanece fixo em 700 MHz), porém as quatro femtocélulas (HeNB) estão localizadas aleatoriamente em canais adjacentes entre 695 e 715 MHz assumindo diferentes potências de transmissão.

Finalmente, neste capítulo se apresentam paralelamente aos resultados obtidos nos cenários de simulação, a avaliação e a interpretação dos resultados segundo os requisitos exigidos pelo padrão do Sistema Móvel LTE Release 10.

3.2. Simulações LTE Macro – LTE Femto

Os dois cenários considerados para simulação são:

- Usuário Macrocélula LTE e HeNBs (estabelecidas com potência máxima de 20 dBm) localizados na mesma frequência.
- Usuário Macrocélula LTE e HeNBs (estabelecidas com várias potências típicas entre 11 e 20 dBm) localizados em diferentes frequências.

A seguir serão detalhados a configuração de cada cenário no simulador Seamcat e os resultados obtidos.

3.2.1. Cenário 1: “Usuário Macrocélula LTE e HeNBs localizados na mesma frequência”

Este cenário de simulação considera a localização de quatro femtocélulas HeNBs próximas à posição do usuário da macrocélula LTE na frequência de 700 MHz em um sistema móvel de 10 MHz de largura de faixa.

A fim de obter resultados mais confiáveis, as simulações desenvolvidas no programa Seamcat foram avaliadas considerando a geração de 30,000 eventos que asseguram desta maneira a estabilidade dos resultados de probabilidade de interferência obtida durante a execução das simulações, assim como é descrito e recomendado em [15].

Para cada uma das simulações consideram-se os parâmetros do padrão Sistema Móvel LTE Release 10 disponíveis em maior detalhe em [3] [42] [43] [44] resumidos na tabela 10. Além disso, as características e parâmetros técnicos da femtocélula ou HeNB foram obtidos de [3] [12] [13] [25] [27] e são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 10. Parâmetros da Macrocelula

Parâmetros LTE Release 10	
Banda de Frequência [MHz]	700 (FDD)
Potência [dBm]	46
Largura de Faixa [MHz]	10
Esquemas de Modulação	QPSK , 16QAM, 64 QAM
Raio de Cobertura [km]	9
Altura eNode B [m]	30

Tabela 11. Parâmetros da Femtocélula

Femtocélula HeNB	
Banda de Frequência [MHz]	700 (FDD)
Potência [dBm]	20
Largura de Faixa [MHz]	10
Power Control Step Size [dB]	0.5
Limiar Mínimo [dBm]	-10
Intervalo Dinâmico [dB]	20
Altura (m)	3

Além disso, é importante considerar as máscaras de transmissão espectral da femtocélula HeNB e as características técnicas do usuário da macrocelula LTE para um sistema móvel LTE com largura de faixa de 10 MHz.

A máscara de transmissão espectral utilizada na configuração da femtocélula HeNB foi apresentada na Fig. 4, detalhada no capítulo 2 desta dissertação.

Além disso, a máscara de bloqueio do LTE UE (ver Fig. 12 -13.) para um sistema de comunicação móvel LTE com largura de faixa de 10 MHz obteve-se de

[24] [45]. Esta máscara de bloqueio encontra-se também disponível no simulador Seamcat versão 4.0.1.

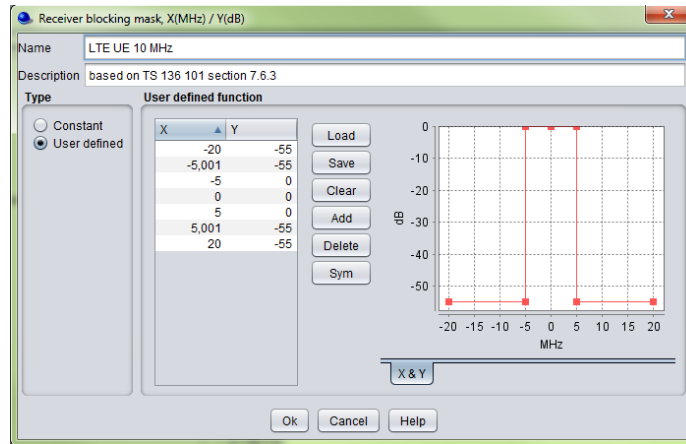


Fig. 12 Configuração da Máscara de Bloqueio LTE UE (10 MHz)

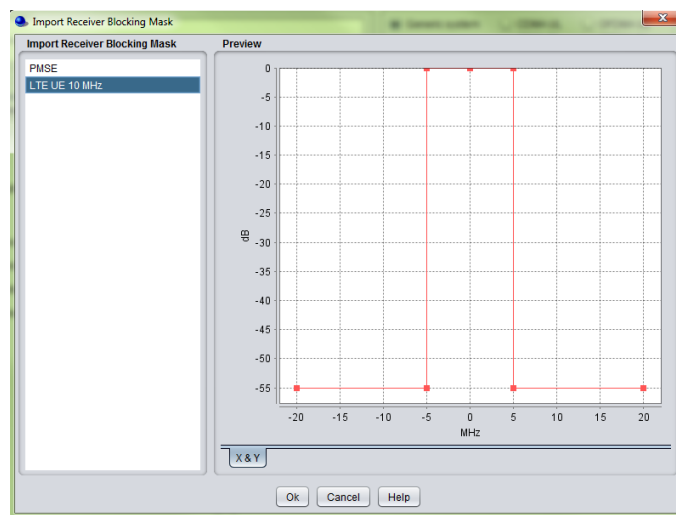


Fig. 13 Máscara de Bloqueio do usuário da macrocélula LTE

O modelo de propagação utilizado no cenário das simulações para um ambiente fechado (*indoor*) corresponde a uma modificação feita no modelo de propagação Okumura Hata Estendido, conforme o modelo Hata-SRD apresentado no Capítulo 2.

Em um ambiente externo (*outdoor*), o modelo de propagação utilizado no enlace de descida entre a macrocélula (eNode B) e o LTE UE corresponde ao modelo Okumura Hata Estendido que também foi configurado nas redes das femtocélulas no cenário cognitivo.

Além disso, os critérios e parâmetros técnicos definidos no módulo de rádio cognitivo estabelecidos no cenário de simulação são apresentados na Tabela 12 e estão disponíveis em maior detalhe em [40] [41] [47]. Os parâmetros definidos no cenário de simulação para a aplicação de Rádio Cognitivo foram obtidos dos documentos da FCC e da ECC detalhando-os na Tabela 12.

Os dispositivos de sensoriamento, a fim de detectar as faixas autorizadas e evitar interferi-las, devem ser capazes de detectar os sinais digitais, os sinais analógicas a -114 dBm transmitindo dentro dos dois segundos de detecção [46][47] [40] [41].

Tabela 12. Parâmetros de Rádio Cognitivo

<i>Probability of Failure (False Alarm)</i>	10 %
<i>Spectrum Detection Threshold</i>	-114 dBm
<i>Detection Bandwidth</i>	10 MHz

Além disso, consideraram-se os parâmetros utilizados para estabelecer a configuração de cada cenário da simulação os que estão em função do esquema de modulação estabelecido no terminal móvel da macrocélula LTE. Estes valores são expressos na Tabela 13, assumindo diferentes modulações e sensibilidades do LTE UE segundo os requisitos e características técnicas detalhas no padrão LTE Release 10 para um sistema de largura de faixa igual a 10 MHz apresentados em detalhe em [3] [22][24].

Tabela 13. 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

O cenário de simulação considera dois sistemas diferentes. O primeiro sistema é o **Sistema Interferente** que está formado por quatro femtocélulas ou HeNB localizadas em um ambiente interno (*indoor*) e um usuário da macrocélula LTE que está localizado aleatoriamente dentro da área de cobertura interna (*indoor*) da femtocélula sendo o valor típico assumido de aproximadamente 100 metros.

Além disso, tem-se o **Sistema Vítima** que corresponde à configuração da macrocélula com a localização fixa da eNodeB de raio de cobertura aproximadamente igual a 9 quilômetros. Dentro da área de cobertura, o usuário da macrocélula está localizado aleatoriamente considerando diferentes distâncias médias de separação que variam entre 10 metros e 100 metros com respeito da localização das quatro redes da femtocélula HeNB.

A fig. 14 ilustra o cenário de simulação descrito anteriormente.

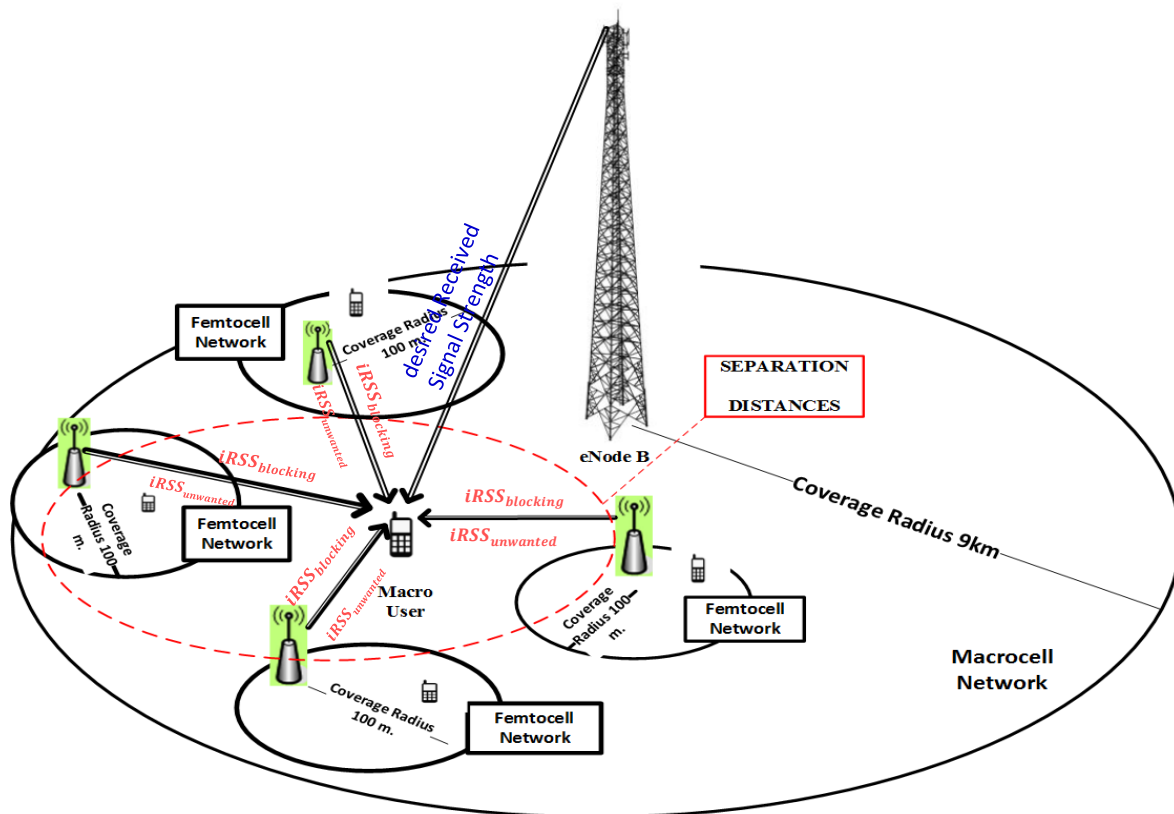


Fig. 14 Cenário Redes Heterogêneas

Nas figuras apresentadas a seguir mostra-se a execução típica da simulação no simulador Seamcat versão 4.0.1. Para cada esquema de modulação avaliado no cenário, a simulação foi executada mais de uma vez com o propósito de garantir os resultados de probabilidade de interferência, considerando em cada uma delas a utilização ou não do módulo de Rádio Cognitivo.

Cada simulação demorou aproximadamente 30 segundos, gerando aproximadamente 30,000 eventos, obtendo um total de 104 cenários simulados. Por segurança de estabilidade do programa Seamcat apenas são apresentados no cenário no máximo 1000 eventos [15].

A fig. 15, apresentada a seguir, mostra um *snapshot* ou evento dos diferentes valores médios obtidos do dRSS, iRSS *unwanted* e iRSS *blocking*. Além disto, na figura apresenta-se a localização aleatória dos Sistemas Vítima e Interferente.

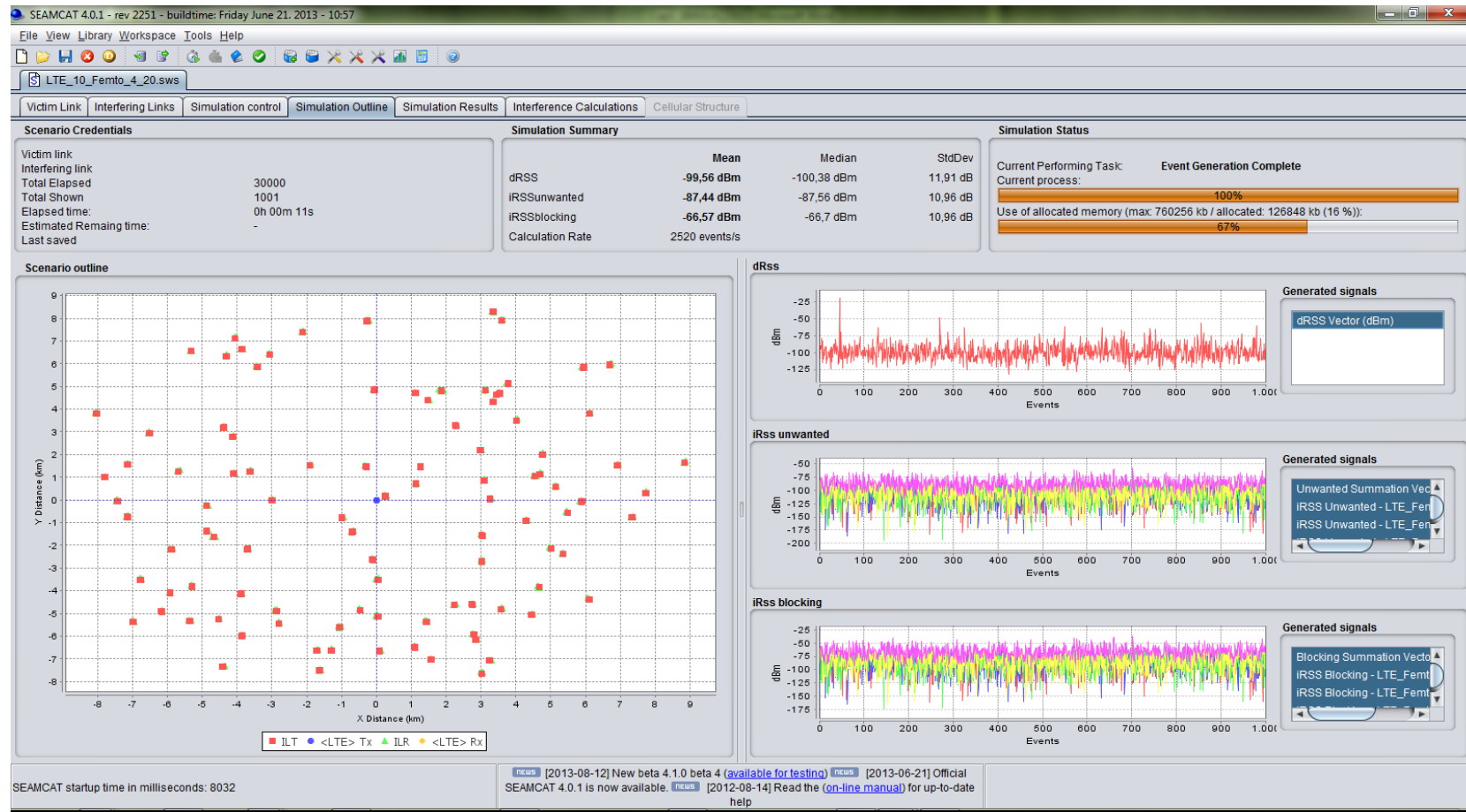


Fig. 15 Cenário Redes Heterogêneas (execução da simulação no programa Seamcat)

Além disso, nas figuras a seguir são apresentados dois gráficos. O primeiro gráfico representa a **Execução de uma Simulação** (ver Figura 16) que mostra a execução típica da simulação no programa Seamcat versão 4.0.1, apresentando a localização aleatória dos Sistemas Interferente e Vitima. Neste cenário se mantém fixa a distância de separação entre a femtocélula HeNB e o usuário da macrocélula dentro dos 9 quilômetros de raio de cobertura da estação base eNodeB.

O segundo gráfico (ver Figura 17), **Configuração básica de um evento**, mostra que os pontos da cor vermelha fazem referência às femtocélulas HeNB, e os pontos da cor verde indicam a localização aleatória do usuário LTE dentro da área de cobertura da femtocélula estabelecida em 100 metros aproximadamente.

O ponto da cor amarelo faz referência ao usuário da macrocélula LTE que manterá diferentes distâncias de separação com respeito à localização das redes da femtocélula. Finalmente, o ponto azul mostra a representação da posição fixa da estação base LTE eNode B.

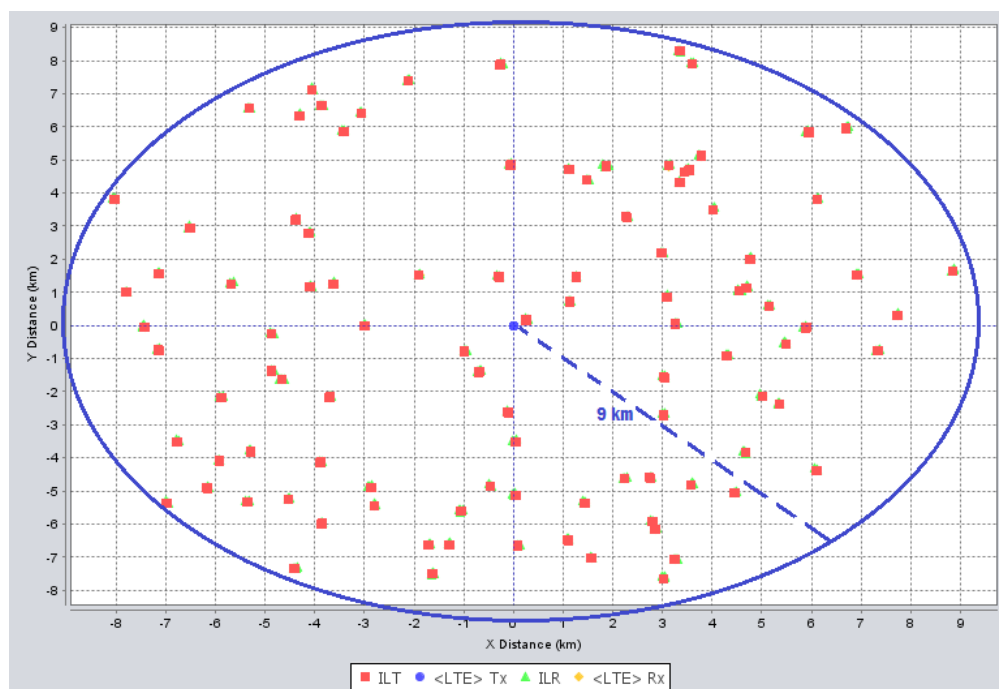


Fig. 16 Execução de uma Simulação (simulador Seamcat)

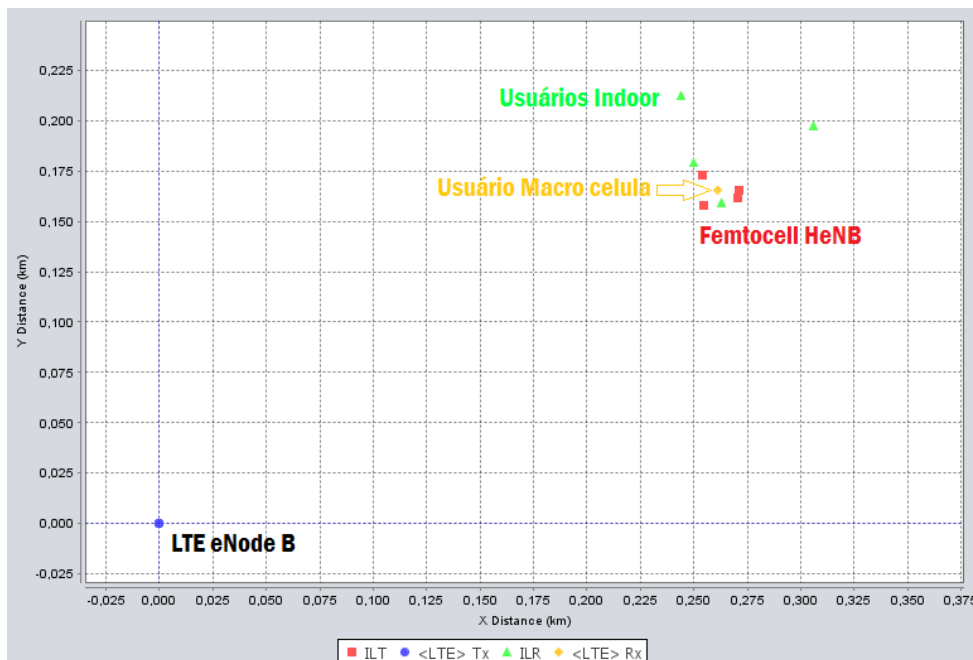


Fig. 17 Configuração básica de um evento (zoom no cenário)

3.2.1.1. Resultados das Simulações do Cenário 1

Os resultados obtidos nas simulações no programa Seamcat consideram a potência máxima da femtocélula HeNB igual a 20 dBm e a utilização de esquemas de modulação configurados no receptor vítima (LTE UE usuário da macrocélula). Para cada simulação foram obtidos dois parâmetros importantes referentes à avaliação da probabilidade de interferência no receptor vítima. Estes parâmetros correspondem à interferência de canal adjacente $iRSS_{unwanted}$ (*unwanted signal* ou sinal não desejada) e a interferência de *blocking signal* $iRSS_{blocking}$ (sinal de bloqueio).

Os níveis requeridos e estabelecidos da $iRSS_{unwanted}$ e da $iRSS_{blocking}$ foram obtidos de [3] [41] segundo as especificações estabelecidas para o usuário da macrocélula no Sistema Móvel LTE com largura de faixa igual a 10 MHz. Os valores correspondentes a estes parâmetros são apresentados na Tabela 14 que fazem menção aos valores estabelecidos do ACS (*Adjacent Channel Selectivity*), do *Out-of-Band-Blocking* e do *In-Band Blocking* iguais a -95.5 dBm [3] [41] sendo este o nível para um sinal desejado (*Wanted Signal*) no receptor LTE.

Tabela 14. Requisitos do nível de potência do sinal desejada para um sistema com largura de faixa de 10 MHz

	Sinal Desejado (dBm)
Sensibilidade de Referência	-101.5
Faixa Dinâmica	-70.2
In-channel Selectivity	-98.5
Narrowband Blocking	-95.5
ACS	-95.5
Out-of-band-blocking	-95.5
In-band blocking	-95.5
Co-located blocking	-95.5

A seguir apresentam-se os resultados obtidos nas simulações (ver fig. 18 - 28) que mostram a probabilidade de interferência devido à presença de sinais não desejadas (*unwanted*) e de bloqueio (*blocking*) para diferentes distâncias de separação (10 a 100 metros) entre o usuário da macrocélula LTE e a femtocélula HeNB.

Além disso, apresentam-se os resultados de valor médio obtido do $dRSS$, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ assumindo no cenário de simulação a utilização ou não do módulo de rádio cognitivo e do algoritmo de Sensoriamento de Espectro implementado no simulador Seamcat.

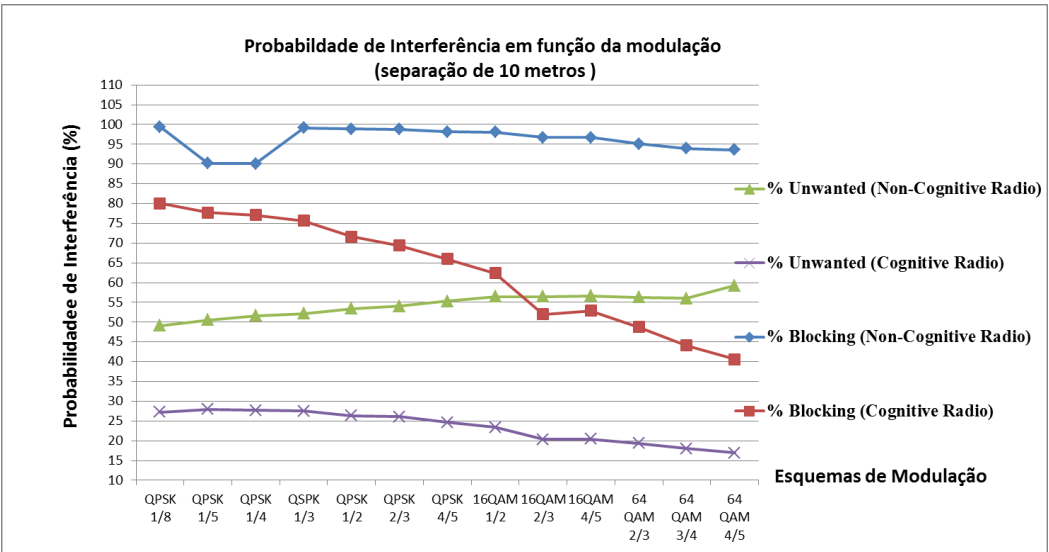


Fig. 18 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (10 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)

Na fig. 18 ilustra-se a probabilidade de interferência expressa em percentagem em função do esquema de modulação, considerando aproximadamente 10 metros de distância de separação entre o sistema vítima e interferente. Nesta figura, pode se apreciar o comportamento da probabilidade de interferência respeito de dois parâmetros de avaliação, o $iRSS_{unwanted}$ e o $iRSS_{blocking}$.

Nesta figura, a **linha roxa** e **verde** ilustram o comportamento da probabilidade de interferência ($iRSS_{unwanted}$) quando é utilizada e quando não é utilizada a tecnologia de Sensoriamento de Espectro e de rádio cognitivo pelas HeNB.

Para uma modulação QPSK 1/8, por exemplo, a probabilidade de interferência de canal adjacente é igual a 49% sem uso de rádio cognitivo. Por meio de uso do algoritmo de sensoriamento espectral do módulo de rádio cognitivo, é possível perceber, que a probabilidade de interferência de canal adjacente diminui consideravelmente até aproximadamente 27 % neste cenário.

Se tomarmos em conta outra modulação, 16 QAM 1/2, por exemplo, a probabilidade de interferência de canal adjacente cai para 23% com o uso de rádio cognitivo, a respeito de 56% sem o seu uso.

Podemos perceber que, na situação de uso de uma modulação com maior taxa de transmissão e menor ocupação espectral, como por exemplo, com a modulação 64 QAM 4/5, a probabilidade de interferência em um ambiente cognitivo é igual a 16.96 % e de 59.29 % sem implementar femtocélulas cognitivas.

Adicionalmente, na fig. 18 pode se perceber que a **linha azul** e **vermelha** representam à avaliação do sinal de bloqueio (**Blocking Signal**) correspondente ao comportamento do parâmetro $iRSS_{blocking}$ ante a interferência das femtocélulas HeNB.

Na fig. 18, a linha azul representa a probabilidade de interferência expressa em percentagem sem uso de rádio cognitivo. Para cada simulação assumiram-se diferentes esquemas de modulação, obtendo resultados favoráveis no cenário cognitivo quando a taxa de dados ia se incrementando.

Por meio destas simulações, podemos verificar que, quando implementam-se femtocélulas cognitivas, a probabilidade de interferência $iRSS_{\text{blocking}}$ diminui. No caso da modulação QPSK 1/8, por exemplo, a probabilidade de interferência diminui de 99,39 % para 80,06 %. Considerando a modulação 16 QAM 2/3, consegue-se diminuir a probabilidade de interferência de 96.75 % para 52%. Para uma modulação 64 QAM 4/5, por exemplo, a probabilidade de interferência ($iRSS_{\text{blocking}}$) diminui de 93.61% para 40%.

As avaliações de probabilidade de interferência anteriormente descritas podem ser visualizadas também nas figuras a seguir. Nestas figuras (ver fig. 19 - 20) apresentam-se os níveis de potência recebidos em dBm, correspondentes ao sinal desejado (dRSS) e aos parâmetros de avaliação de probabilidade de interferência, o $iRSS_{\text{unwanted}}$ e o $iRSS_{\text{blocking}}$ para uma distância de separação de 10 metros.

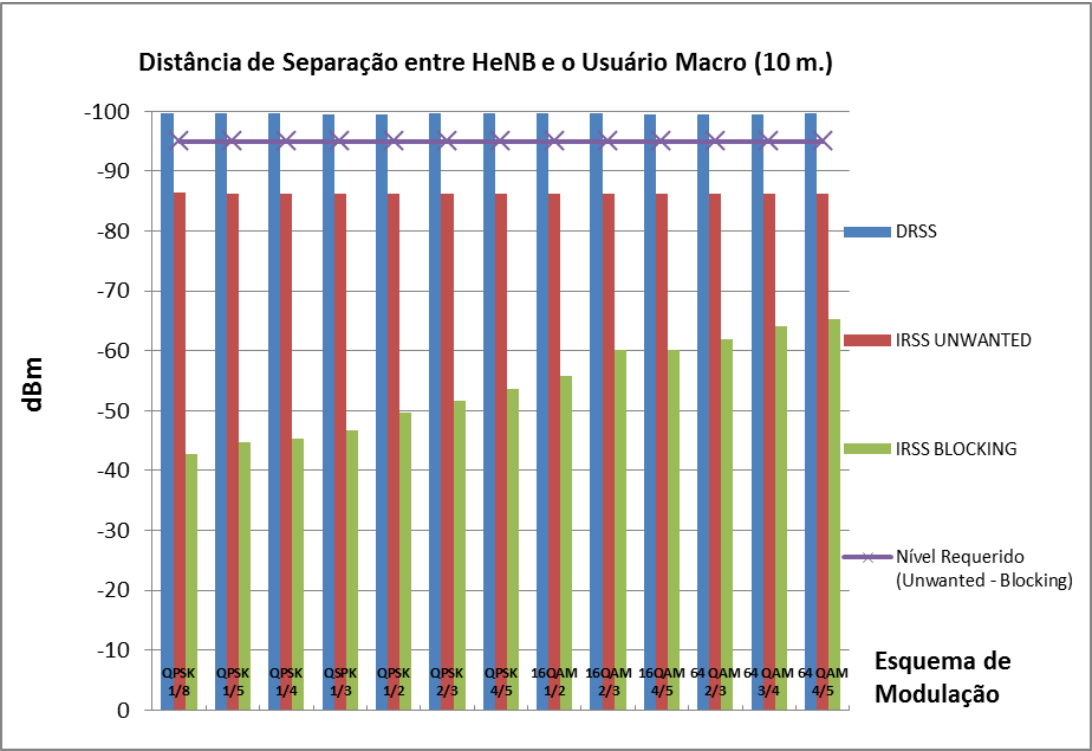


Fig. 19 Níveis Médios de dRSS, $iRSS_{\text{unwanted}}$ e $iRSS_{\text{blocking}}$ (Sem uso de Rádio Cognitivo)

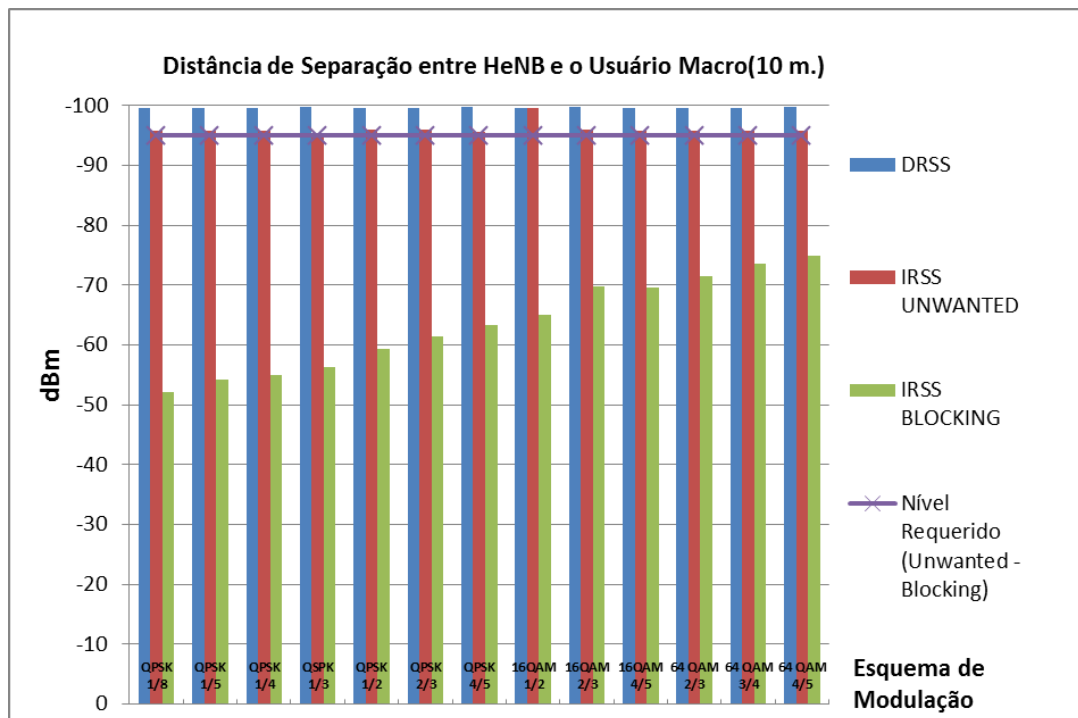


Fig. 20 Níveis Médios de dRSS , $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$ e $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$ (Com uso de Rádio Cognitivo)

Em ambas as figuras pode se distinguir os níveis médios de sinal desejado (dRSS), $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$ e $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$ expressos em dBm, que variam em função do esquema de modulação escolhido no LTE UE. Além disso, pode se perceber que o nível requerido de sinal desejado igual a -95.5 dBm para o $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$ e o $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$ está representado pela linha roxa.

O nível requerido (-95.5 dBm) a 10 metros de separação somente é obtido quando as femtocélulas HeNBs são cognitivas, obtendo melhores resultados de desempenho quando é utilizado o esquema de modulação 64 QAM 4/5. Como visto na fig. 18 quando a probabilidade de interferência é igual a 16,96%.

Os valores de percentagem de interferência correspondentes ao parâmetro $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$ são maiores que o valor requerido (-95.5 dBm) apresentando altos valores de probabilidade de interferência a 10 metros de separação, como é o caso da modulação QPSK 2/3 com nível de $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$ de -61,31 dBm, e consequentemente, resultando em uma probabilidade de interferência igual a 69,38 % já com femtocélulas cognitivas.

De forma a avaliar a menor separação, na qual tanto o valor desejado de interferência e sua contribuição para percentagem seja baixa, foram realizadas simulações contemplando maiores distâncias do que 10 metros.

Nas seguintes figuras 21 a 26, apresentam-se a probabilidade de interferência expressa em percentagem considerando 50 e 100 metros de separação respeito à posição das quatro femtocélulas HeNB e do usuário da macrocélula (LTE UE).

No caso de ter uma distância de separação de 50 metros, a probabilidade de interferência **iRSS_{unwanted}** e **iRSS_{blocking}** é reduzida obtendo melhores resultados quando as femtocélulas HeNB utilizam a técnica de Sensoriamento de Espectro e de rádio cognitivo implementada no simulador Seacat.

O valor médio requerido do **iRSS_{unwanted}**, expresso em dBm é obtido sem a necessidade de implementar femtocélulas cognitivas, contudo, resultados mais favoráveis são conseguidos quando utiliza-se o algoritmo de radio cognitivo implementado no programa, diminuindo desta maneira ainda mais a probabilidade de interferência de canal adjacente (**iRSS_{unwanted}**).

Além disso, a probabilidade de interferência **iRSS_{blocking}**, a 50 metros de separação, ainda não oferece valores que satisfazem o requisito, apresentando valores de probabilidade de interferência altos nos diferentes esquemas de modulação configurados no terminal LTE UE.

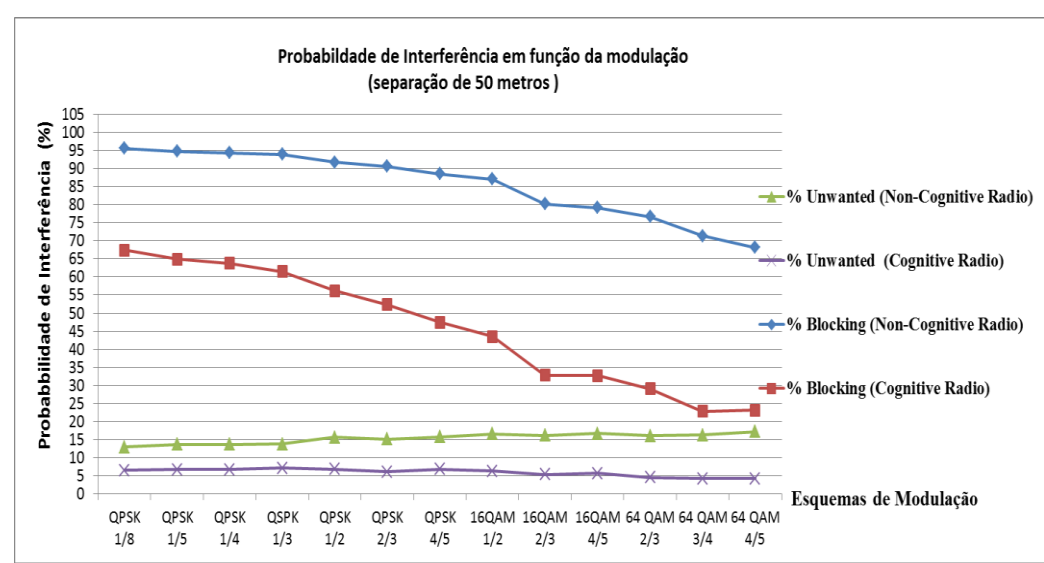


Fig. 21 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (50 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)

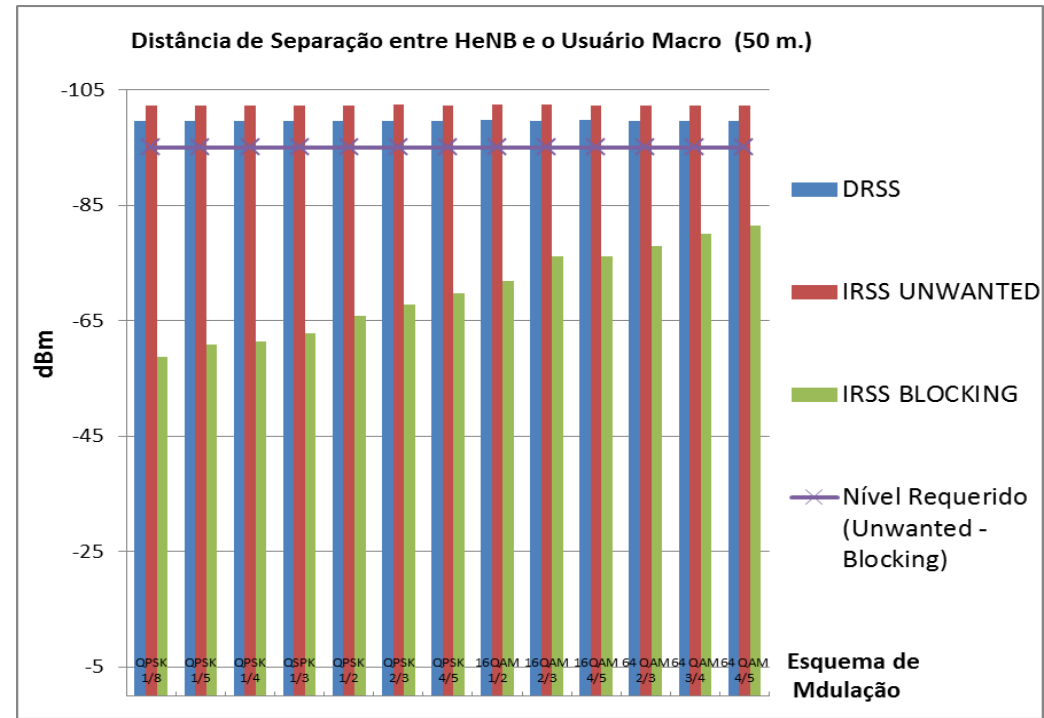


Fig. 22 Níveis Médios de dRSS, iRSS_{unwanted} e iRSS_{blocking} (Sem uso de Rádio Cognitivo)

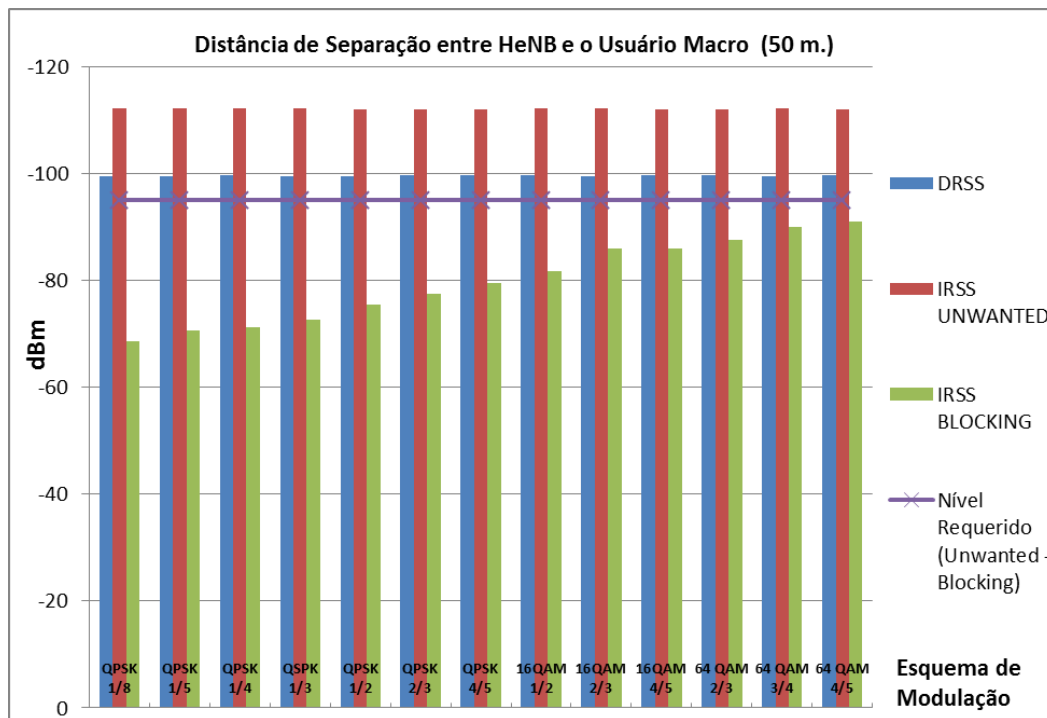


Fig. 23 Níveis Médios de $dRSS$, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ (Com uso de Rádio Cognitivo)

A 100 metros de distância de separação entre as quatro HeNBs e o usuário da macrocélula, a probabilidade de interferência (*unwanted* e *blocking*) é reduzida consideravelmente levando em conta o cenário cognitivo e a técnica de sensoriamento espectral implementada na femtocélula HeNB.

O requisito de -95.5 dBm, no caso da interferência devido ao sinal não desejado (*unwanted* - $iRSS_{unwanted}$) obteve-se assumindo um ambiente de femtocélulas HeNB cognitivas, por enquanto, os resultados já foram favoráveis a partir dos 50 metros de separação entre o Sistema Vítima e o Sistema Interferente.

No caso da probabilidade de interferência $iRSS_{blocking}$, a 100 metros de separação e assumindo femtocélulas HeNBs cognitivas tem se resultados favoráveis quando são utilizados os seguintes esquemas de modulação configurados no usuário da macrocélula LTE: QPSK 2/3, QPSK 4/5, 16 QAM 1/2, 16 QAM 2/3, 16 QAM 4/5, 64 QAM 2/3, 64 QAM 3/4 e 64 QAM 4/5.

Neste cenário de simulação, evidenciam-se menores níveis de probabilidade de interferência ($iRSS_{blocking}$) quando é utilizado o esquema de modulação 64 QAM 4/5 no terminal LTE UE como poder ser apreciado na fig. 25.

Por sua parte, a $iRSS_{unwanted}$ apresenta valores satisfatórios a 100 metros de separação, devido a que a probabilidade de interferência é baixa e próxima igual a 1% assumindo a aplicação da tecnologia de rádio cognitivo nas femtocélulas HeNB.

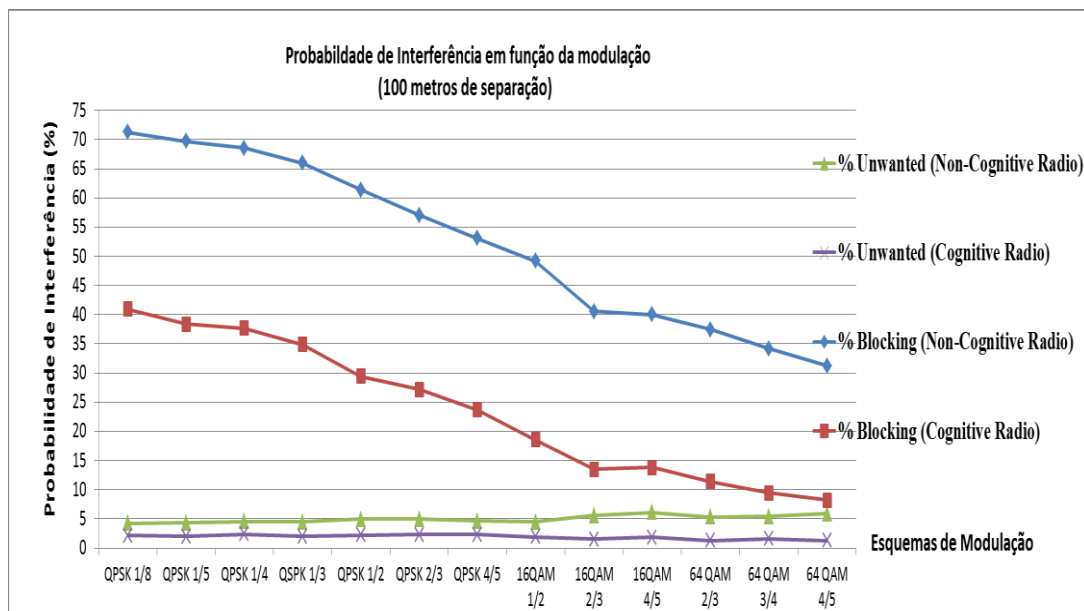


Fig. 24 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (100 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)

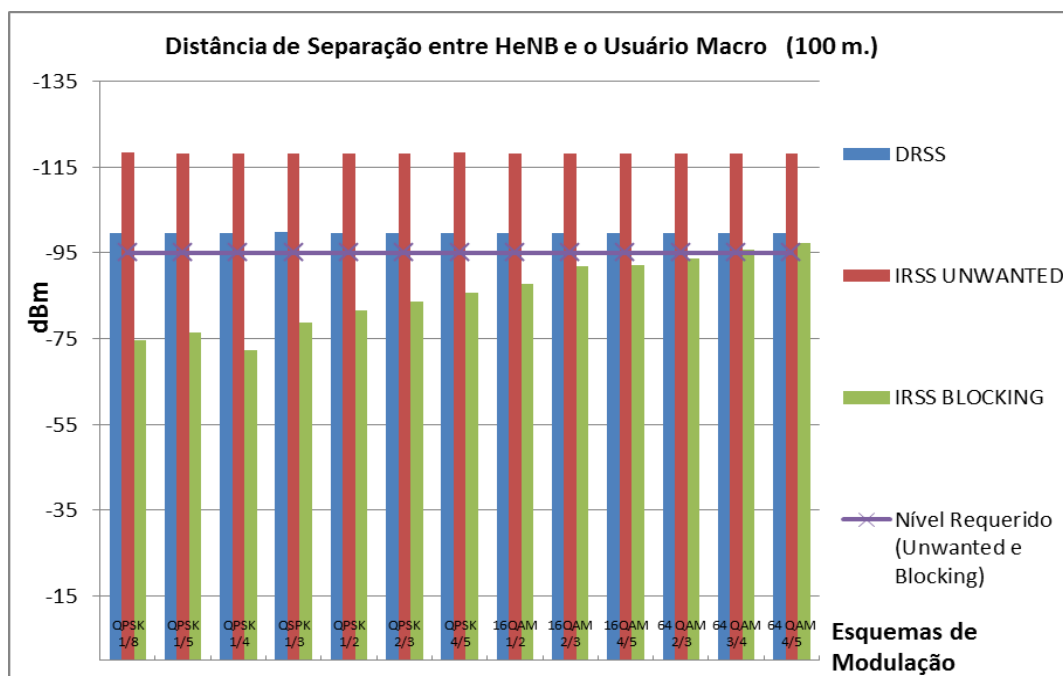


Fig. 25 Níveis Médios de dRSS, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ (Sem uso de Rádio Cognitivo)

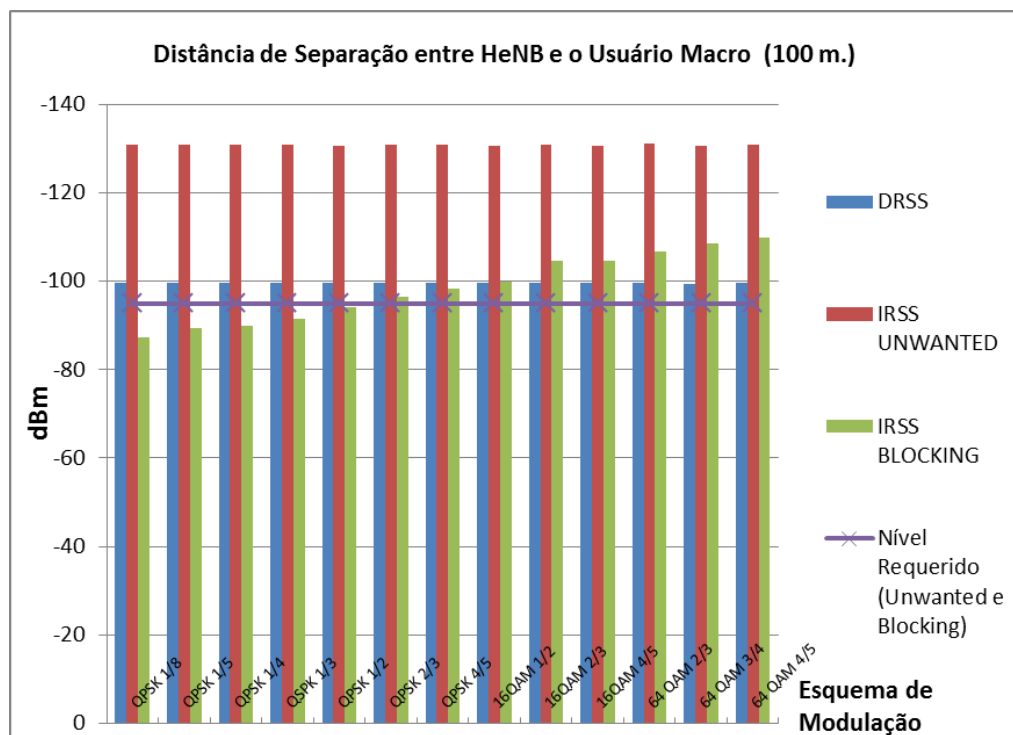


Fig. 26 Níveis Médios de dRSS, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ (Com uso de Rádio Cognitivo)

Nos gráficos anteriormente ilustrados é importante perceber que a redução da probabilidade de interferência de bloqueio ($iRSS_{blocking}$) deve-se, por uma parte, à diminuição da sensibilidade do receptor vítima (usuário da macrocélula) que está em função do tipo de modulação a utilizar. Além disso, a redução da probabilidade de interferência $iRSS_{blocking}$ se deve também à redução da ocupação espectral do canal que será menor enquanto a taxa de transmissão aumente. Esta situação pode ser percebida quando a modulação 64 QAM é utilizada no cenário de simulação.

Desta maneira, os resultados apresentados anteriormente demonstram que quando se utilizam femtocélulas LTE HeNB cognitivas, a probabilidade de interferência devido ao sinal não desejada ($iRSS_{unwanted}$) e de bloqueio ($iRSS_{blocking}$), dada a proximidade entre a vítima (usuário da macrocélula LTE UE) e o transmissor interferente (a femtocell HeNB), é reduzida consideravelmente garantindo a coexistência das redes heterogêneas na faixa de 700 MHz.

A fig. 27 apresenta a probabilidade de interferência de canal adjacente em função da sensibilidade do receptor vítima assumindo diferentes distâncias de separação entre o Sistema Vítima e o Sistema Interferente. A figura apresenta a avaliação da probabilidade de interferência devido à presença do sinal *unwanted* e *blocking*.

Portanto e conforme o esperado, os resultados mostram que enquanto a sensibilidade do receptor aumenta, o mesmo acontece com a probabilidade de interferência.

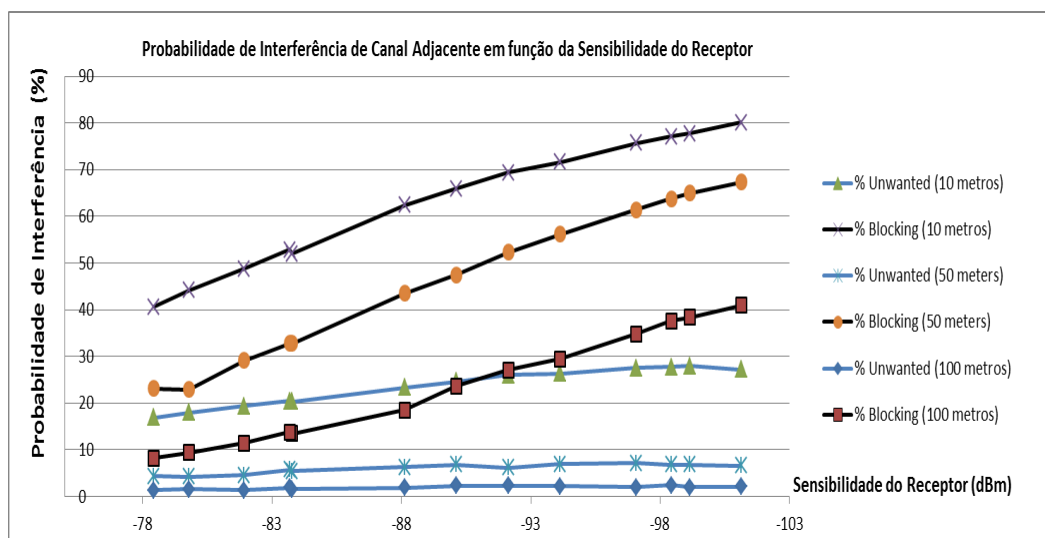


Fig. 27 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Sensibilidade do Receptor

A fig. 28 representa a distância ótima de separação a fim de obter uma probabilidade de interferência (%) menor do que o 1 % assumindo um ambiente de femtocélulas HeNB cognitivas, considerando apenas a avaliação da probabilidade de interferência de canal adjacente (sinal *unwanted*, $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$) e assumindo dois tipos modulações, a modulação QPSK 1/8 e a 64 QAM 4/5.

Para os demais esquemas de modulação, o comportamento da probabilidade de interferência de canal adjacente (sinal *unwanted*, $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$) terá valores estabelecidos entre aqueles obtidos para as modulações QPSK 1/8 e a 64 QAM 4/5.

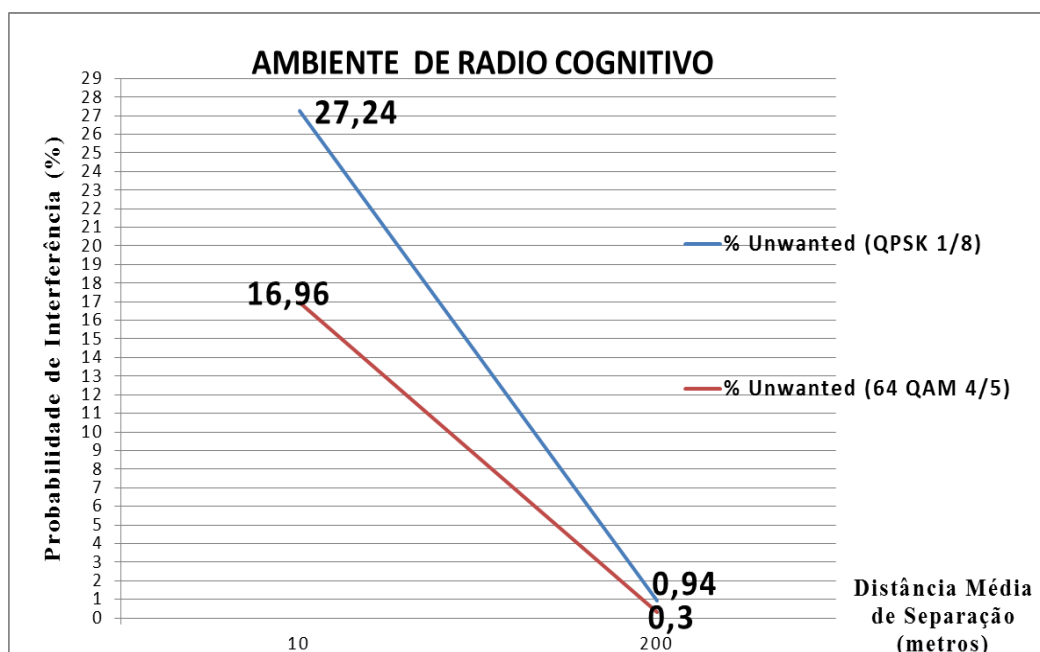


Fig. 28 Ambiente de Radio Cognitivo.

Portanto, segundo os resultados obtidos na figura 28 e a fim de obter uma probabilidade de interferência de canal adjacente menor do que 1%, a distância média de separação entre o Sistema Vítima (LTE UE) e o Sistema Interferente (Femtocélula HeNB) deve ser igual a aproximadamente 200 metros para qualquer esquema de modulação. Para a distância de separação de 10 metros de separação, a probabilidade de interferência devido à presença de sinais não desejadas (*sinál unwanted*) aumentará até 27% para modulação QPSK 1/8 e de 16,96% para uma modulação 64 QAM 4/5 no pior cenário de coexistência de redes heterogêneas aplicando a tecnologia de rádio cognitivo e Sensoriamento de Espectro nas femtocélulas HeNB.

Os resultados obtidos nas simulações desenvolvidas no simulador Seamcat versão 4.0.1 assumindo um cenário de interferência formado pelo Sistema Vítima (LTE UE - Macrocélula) e o Sistema Interferente (LTE Femtocélula HeNB) em uma frequência de 700 MHz demonstram que ao se ter configuradas femtocélulas HeNB cognitivas, a probabilidade de interferência produzida entre a a femtocélula HeNB no usuário da macrocélula LTE notavelmente diminui. O caso contrário ocorre quando não se tem implementadas femtocélulas HeNB cognitivas, pois os níveis de probabilidade de interferência ($iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$) aumentam consideravelmente.

3.2.2.

Cenário 2: “Usuário LTE e HeNBs localizados em diferentes frequências”

Neste cenário de simulação se consideram quatro femtocélulas HeNB localizadas aleatoriamente na faixa de 695 a 715 MHz. Cada femtocélula HeNB foi configurada com diferentes valores de potência de transmissão típicos que variam entre 20, 17, 14 e 11 dBm. Além disso, as femtocélulas HeNB foram posicionadas próximas do usuário da macrocélula LTE, operando em 700 MHz.

As simulações desenvolvidas no programa Seacat versão 4.0.1 foram executadas e avaliadas considerando a geração de 50,000 eventos a fim de assegurar a estabilidade dos resultados que correspondem aos parâmetros de probabilidade de interferência $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$ e $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$.

Os parâmetros estabelecidos no cenário de simulação consideram as especificações do padrão do sistema móvel LTE Release 10 [3] [26] [41] e são resumidos na Tabela 15. Além disso, as características e parâmetros da femtocélula ou HeNB foram obtidos de [3] [12] [13] [25] [27] e são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 15. Parâmetros da Macrocélula

Parâmetros LTE Release 10	
Banda de Frequência [MHz]	700 (FDD)
Potência [dBm]	46
Largura de Faixa [MHz]	10
Esquemas de Modulação	QPSK , 16QAM, 64 QAM
Raio de Cobertura [km]	9
Altura eNode B [m]	30

Tabela 16. Parâmetros da Femtocélula

Femtocélula HeNB	
Banda de Frequência [MHz]	695 a 715 (FDD)
Potência [dBm]	20, 17, 14, 11
Largura de Faixa [MHz]	10
Power Control Step Size [dB]	0.5
Limiar Mínimo [dBm]	-10
Intervalo Dinâmico [dB]	20
Altura (m)	3

A máscara de transmissão espectral da femtocélula HeNB e a máscara de bloqueio do usuário da macrocélula LTE são definidas nas Fig. 4 e Fig. 12-13, respectivamente.

O modelo de propagação utilizado no cenário de propagação interno (*indoor*) corresponde ao modelo de HATA-SRD descrito no Capítulo 2. O modelo de propagação usado no ambiente de propagação aberto (*outdoor*), no enlace de descida entre a macrocélula eNodeB e o LTE UE é também o modelo Okumura Hata Estendido. Este modelo foi utilizado também na configuração da femtocélulas cognitivas, pois a femtocélula HeNB neste cenário atua como dispositivo receptor.

Os critérios e parâmetros estabelecidos de rádio cognitivo foram definidos conforme Tabela 12.

Os valores dos parâmetros utilizados na configuração de cada cenário de simulação estão baseados no esquema de modulação definido no receptor vítima. Estes valores foram apresentados na Tabela 13, assumindo diferentes modulações e valores de sensibilidade do terminal LTE UE. A escolha destes parâmetros seguem os requisitos e características técnicas de LTE Release 10 para um sistema de comunicação com largura de faixa igual a 10 MHz.

A diferença do cenário de simulação desenvolvido na seção anterior. Para este, é que o **Sistema Interferente** está formado por quatro femtocélulas ou HeNB com potências de transmissão que variam entre (20 dBm, 17 dBm, 14 dBm, 11 dBm), sendo os valores típicos das diferentes classes de femtocélulas [3] [25].

Cada rede da femtocélula está em um ambiente de propagação fechado (*indoor*) e um usuário da macrocélula LTE esta localizado aleatoriamente dentro da área de cobertura interna (*indoor*) da femtocélula, cujo valor estabelecido foi de aproximadamente 100 metros.

Além disso, tem-se o **Sistema Vítima** que considera a localização fixa da eNodeB com um raio de cobertura de aproximadamente 9 quilômetros onde o usuário da macrocélula está localizado aleatoriamente. O LTE UE assume diferentes distâncias médias de separação que variam entre 10, 30, 50, 120 e 270 metros com respeito da localização das quatro redes da femtocélula HeNB.

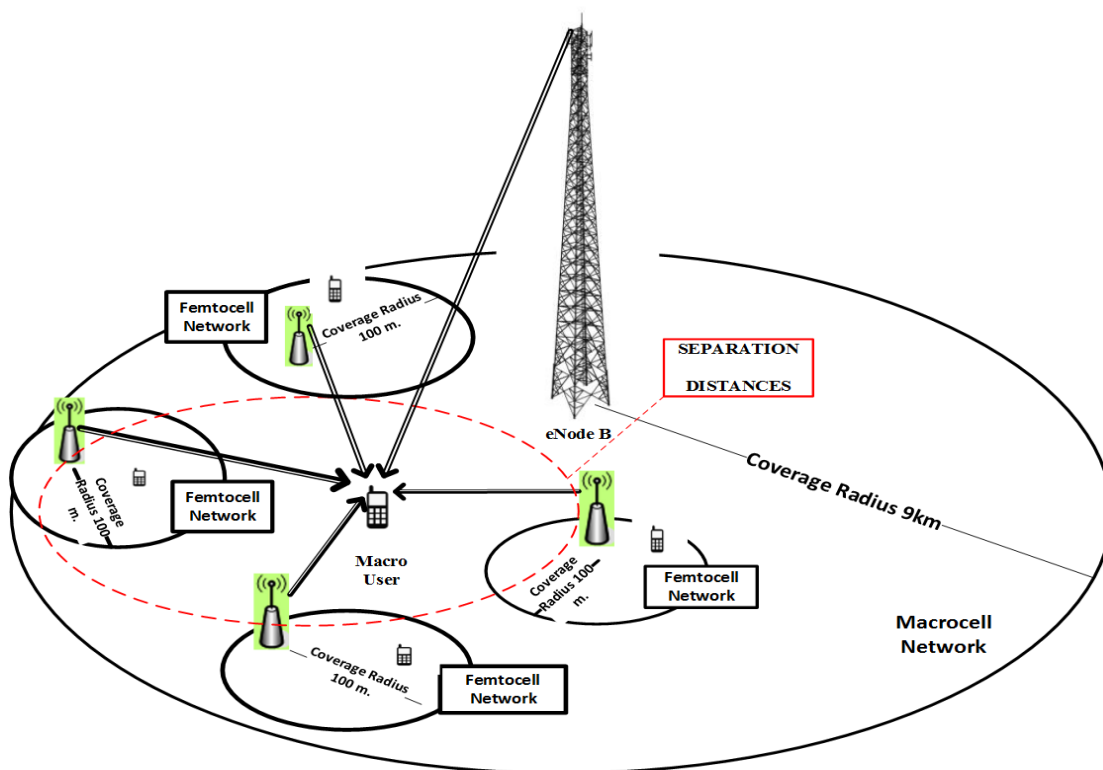


Fig. 29 Cenário de simulação

As figuras apresentadas a seguir mostram a execução típica da simulação no simulador Seamcat versão 4.0.1. Para cada esquema de modulação estabelecido no usuário vítima, executou-se mais de uma vez cada cenário garantindo assim os resultados obtidos.

Além disto, levou-se em conta a utilização ou não do módulo de rádio cognitivo a fim de avaliar o comportamento da probabilidade de interferência.

Cada simulação demorou ao redor de 30 segundos em finalizar, gerando aproximadamente 50,000 eventos, obtendo um total de 130 cenários simulados. Contudo, são mostrados apenas 1000 eventos a fim de garantir a estabilidade dos resultados do programa [15].

A fig. 30, ilustra a simulação do cenário das redes heterogêneas no simulador Seamcat. Em cada cenário de simulação foram obtidos diferentes valores médios do sinal desejado (*dRSS*), sinal interferente de canal adjacente (*iRSS unwanted*) e do sinal de bloqueio (*iRSS blocking*). Estes valores foram avaliados em função dos critérios de interferência definidos segundo o esquema de modulação estabelecido no cenário de simulação.

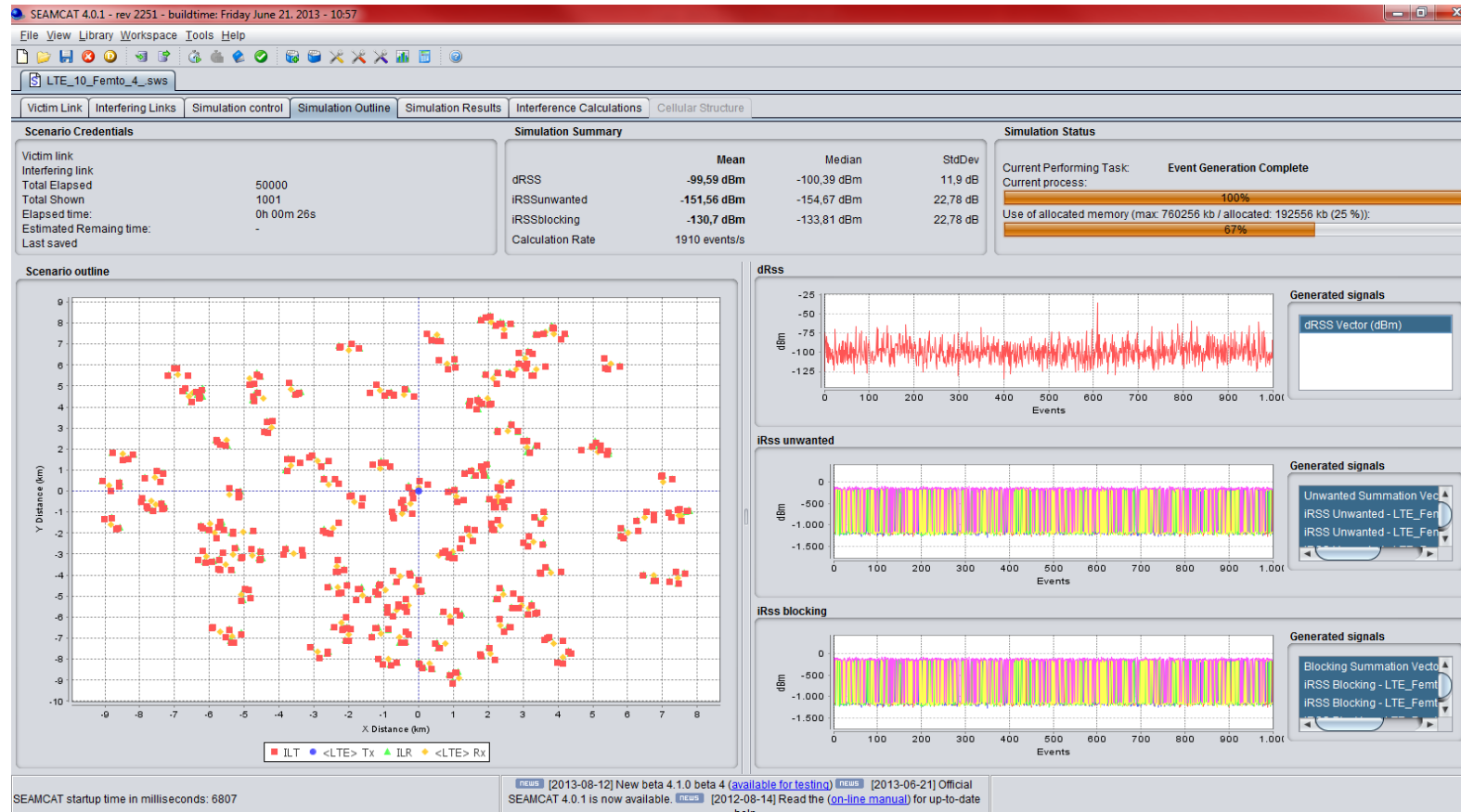


Fig. 30 Simulação de redes heterogêneas (Execução da simulação no programa Seamcat)

A seguir, na fig. 31 pode se apreciar a representação de uma execução típica da simulação no programa Seacat versão 4.0.1 mostrando todas as possíveis localizações aleatórias do Sistema Interferente (Femtocélula HeNB) e do Sistema Vítima (LTE UE), mantendo apenas fixa a distância de separação entre a femtocélula HeNB e o usuário da macrocélula.

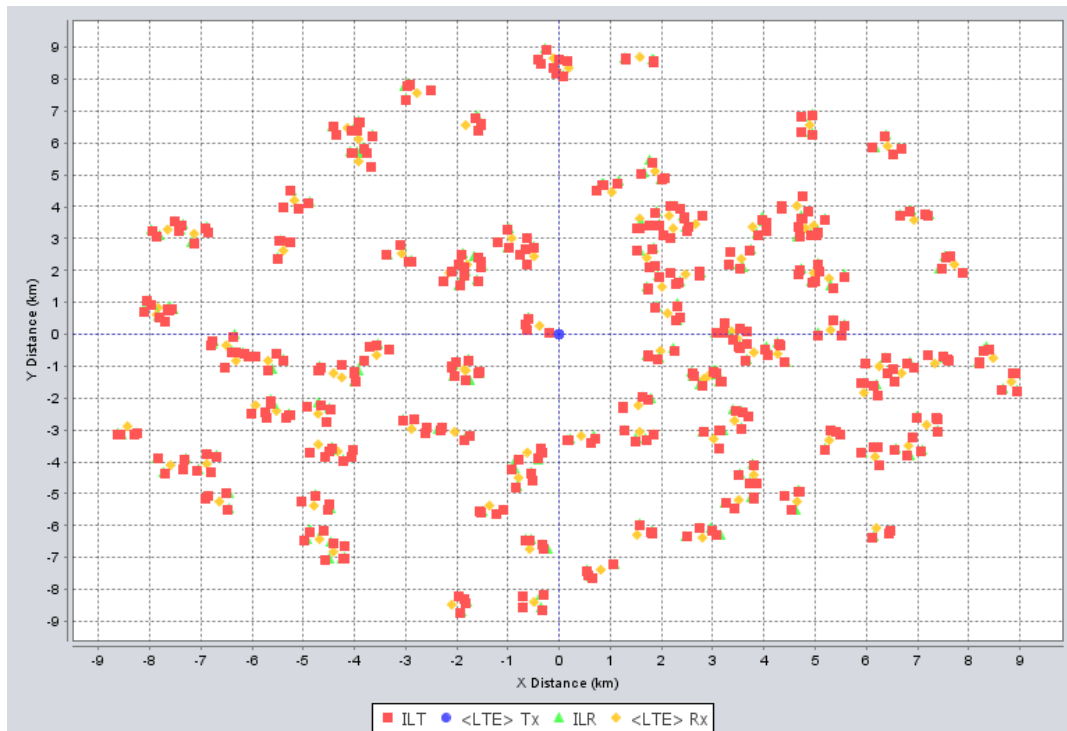


Fig. 31 Fim da Simulação

Na figura 32, pode se observar os pontos da cor vermelha que correspondem à representação das femtocélulas HeNB, os pontos da cor verde indicam a localização aleatória do usuário LTE dentro da área de cobertura da femtocélula estabelecida em 100 metros aproximadamente. Além disso, o ponto da cor amarelo faz referência ao usuário da macrocélula LTE que assume diferentes distâncias de separação respeito à localização das redes da femtocélula. Finalmente, o ponto da cor azul, mostra a posição fixa da estação base LTE eNodeB .

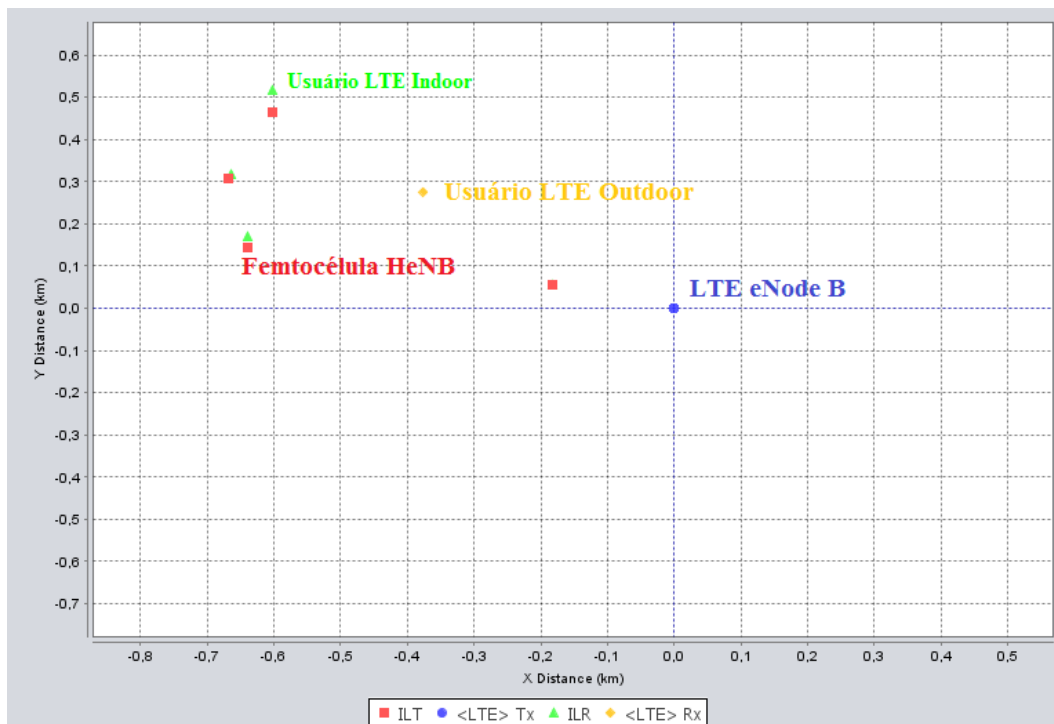


Fig. 32 Cenário de Avaliação Interferência

3.2.2.1.

Resultados das Simulações do Cenário 2

Os resultados obtidos nas simulações dos cenários desenvolvidos no programa Seacat consideram potências da femtocélula HeNB de 20, 17, 14 e 11 dBm. Além disso, foram avaliados os esquemas de modulação configurados no receptor vítima (LTE UE).

Para cada simulação foram obtidos dois parâmetros importantes referentes à avaliação da probabilidade de interferência no receptor vítima. Estes parâmetros correspondem à interferência de canal adjacente $iRSS_{unwanted}$ (*unwanted signal* ou sinal não desejada) e a interferência de *blocking signal* $iRSS_{blocking}$.

Os níveis requeridos estabelecidos da $iRSS_{unwanted}$ e da $iRSS_{blocking}$ foram obtidos de [3] [47] segundo as especificações para o usuário da macrocélula do sistema móvel LTE com largura de faixa igual a 10 MHz e são apresentados na Tabela 14.

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos nas simulações que mostram a probabilidade de interferência devido à presença de sinais não desejadas

(*unwanted*) e de bloqueio (*blocking*) (ver fig. 33 a 43) para diferentes distâncias de separação (10, 30, 50, 120 e 270 metros) entre o usuário da macrocélula e as femtocélulas HeNBs.

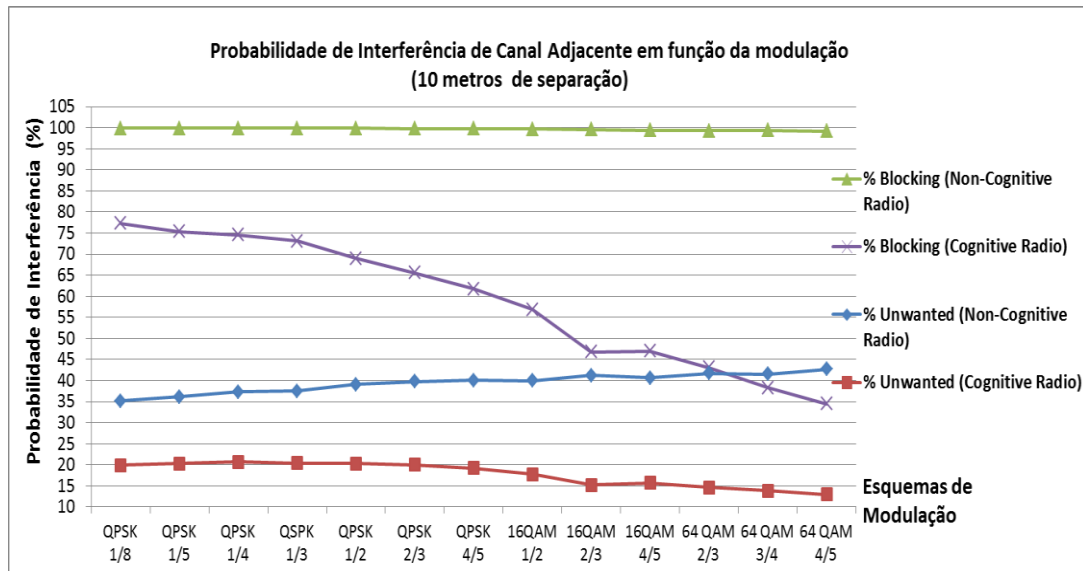


Fig. 33 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (10 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)

A fig. 33 ilustra a probabilidade de interferência expressa em percentagem em função do esquema de modulação para 10 metros de distância de separação. Nesta figura, pode se apreciar o comportamento da probabilidade de interferência com respeito a dois parâmetros de avaliação o $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$ e o $\text{IRSS}_{\text{blocking}}$.

Da figura, a probabilidade de interferência devido a um sinal não desejado ($\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$) está representada pela linha vermelha quando é utilizado rádio cognitivo nas femtocélulas LTE. Enquanto que a linha azul mostra o parâmetro $\text{IRSS}_{\text{unwanted}}$ quando não são implementadas femtocélulas cognitivas.

Para uma modulação QPSK 1/8, por exemplo, a probabilidade de interferência de canal adjacente é igual a 35.21% e utilizando radio cognitivo a probabilidade de interferência cai para 19.89 %.

Se tomarmos em conta outro esquema de modulação, o 16 QAM 1/2, por exemplo, a probabilidade de interferência diminui de 39.99 % para 17.72 % quando é utilizada a técnica de sensoriamento de espectro nas femtocélulas LTE.

No caso de utilizar a modulação 64 QAM 4/5, a probabilidade de interferência em um ambiente cognitivo é igual a 13.02 % e de 42.74 % sem implementar femtocélulas cognitivas. Neste cenário, a probabilidade de interferência diminui notavelmente em comparação com os outros esquemas de modulação configurados na simulação.

Além disso, da fig 33, a linha verde e roxa correspondem à avaliação do sinal de bloqueio (*Blocking Signal*) do parâmetro **iRSS_{blocking}**.

Da fig. 33, a linha verde representa a probabilidade de interferência expressa em percentagem sem utilizar rádio cognitivo assumindo diferentes esquemas de modulação. A probabilidade de interferência igual a 99 % deve-se ao fato de que se têm um maior número de canais de frequência na faixa de frequência de 695 – 715 MHz onde as femtocélulas podem se alocar. Portanto, a probabilidade de produzir altos níveis de interferência no LTE UE será maior.

Quando implementa-se a técnica de sensoriamento de espectro e rádio cognitivo nas femtocélulas, a probabilidade da interferência do parâmetro **iRSS_{blocking}** diminui consideravelmente.

Para a modulação QPSK 1/8, por exemplo, a probabilidade de interferência (**iRSS_{blocking}**) diminui de 99,89 % a 77,32 % assumindo o ambiente cognitivo. Se escolhermos outra modulação, o 16 QAM 2/3, por exemplo, o parâmetro **iRSS_{blocking}** apresentará menor probabilidade de interferência quando é utilizado rádio cognitivo, sendo esta igual a 46.76 %.

Para a modulação 64 QAM 4/5, por exemplo, a probabilidade de interferência (**iRSS_{blocking}**) diminui de 99.24% a 34 %. Portanto, tem-se menor probabilidade de interferência quando no cenário de simulação utiliza-se radio cognitivo.

As avaliações de probabilidade de interferência a 10 metros de separação podem ser corroboradas nas figuras apresentadas a seguir (ver fig. 34 - 35). Nestas apresentam-se os níveis médios de potência expressos em dBm do sinal desejado (dRSS), do sinal interferente de canal adjacente (**iRSS_{unwanted}**) e do sinal interferente do sinal de bloqueio (**iRSS_{blocking}**).

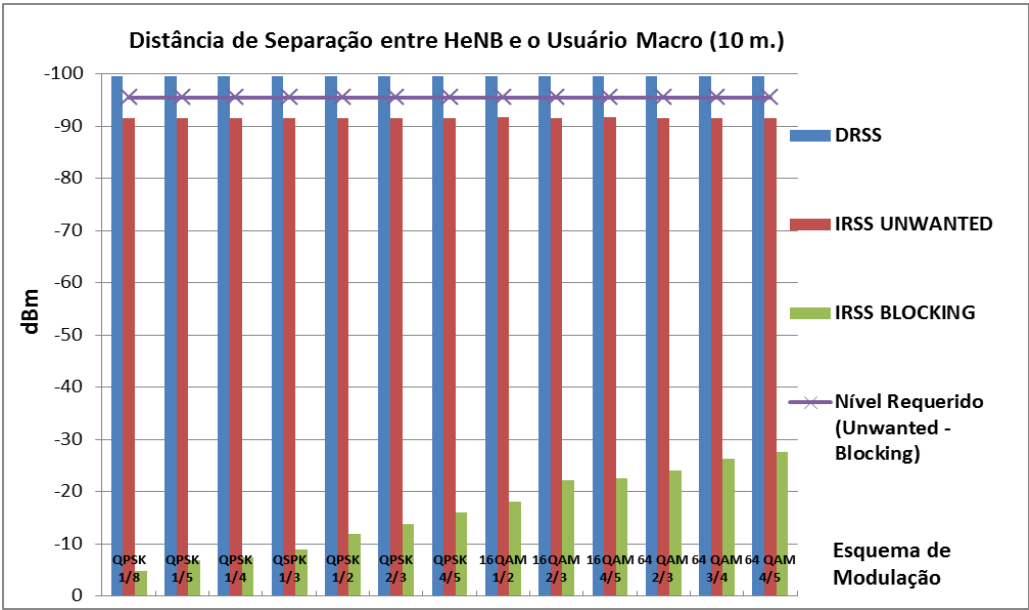


Fig. 34 Níveis Médios de $dRSS$, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ (Sem uso de Rádio Cognitivo)

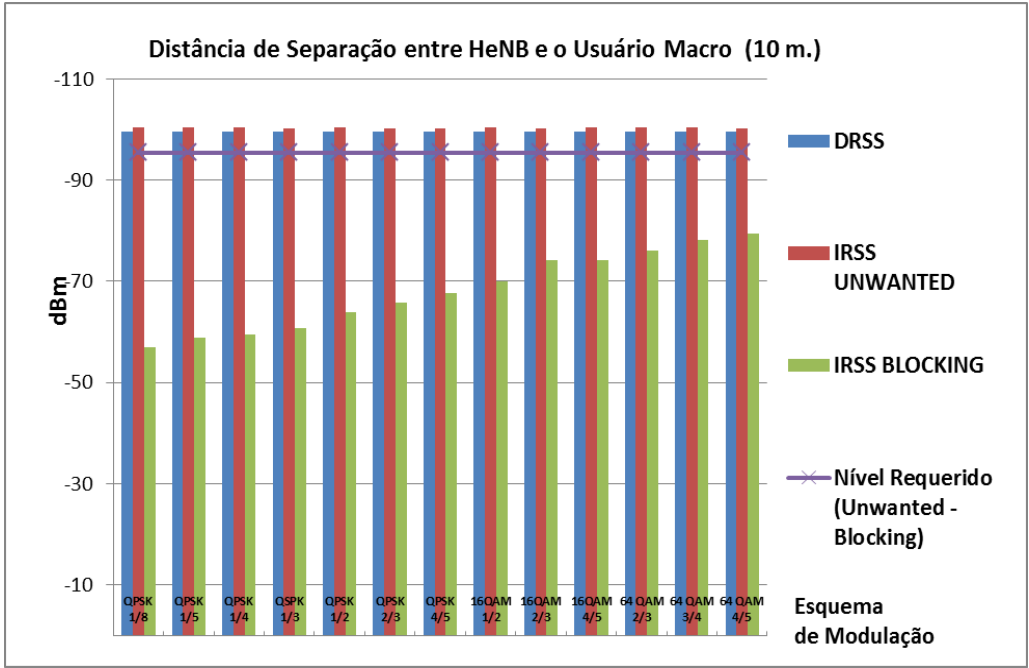


Fig. 35 Níveis Médios de $dRSS$, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ (Com uso de Rádio Cognitivo)

Em ambas as figuras pode se distinguir, os níveis médios de $dRSS$, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ expressos em dBm, em função do esquema de modulação levando em conta a aplicação ou não de rádio cognitivo. Nestas

figuras, tem-se ilustrado o nível requerido do sinal *unwanted* ($iRSS_{unwanted}$) e *blocking* ($iRSS_{blocking}$) igual a -95.5 dBm representado pela linha roxa.

O nível requerido de -95.5 dBm, a 10 metros de separação obtém-se quando as femtocélulas HeNBs são cognitivas, obtendo melhores resultados quando a modulação 64 QAM 4/5 é utilizada devido a que a probabilidade de interferência ($iRSS_{unwanted}$) é menor e igual a 13%.

Neste cenário, os resultados do parâmetro $iRSS_{blocking}$, são maiores do que o valor requerido (-95.5 dBm), apresentando altos níveis de probabilidade de interferência quando não são utilizadas femtocélulas cognitivas. Caso contrário acontece no cenário cognitivo, a probabilidade de interferência cai de 99 % a 34 % para uma modulação 64 QAM 4/5.

Nas seguintes figuras apresenta-se a probabilidade de interferência ($iRSS_{unwanted}$, $iRSS_{blocking}$) expressas em percentagem, considerando 30 e 50 metros de separação respeito à posição das quatro femtocélulas HeNB e do usuário da macrocélula (ver fig. 36-38).

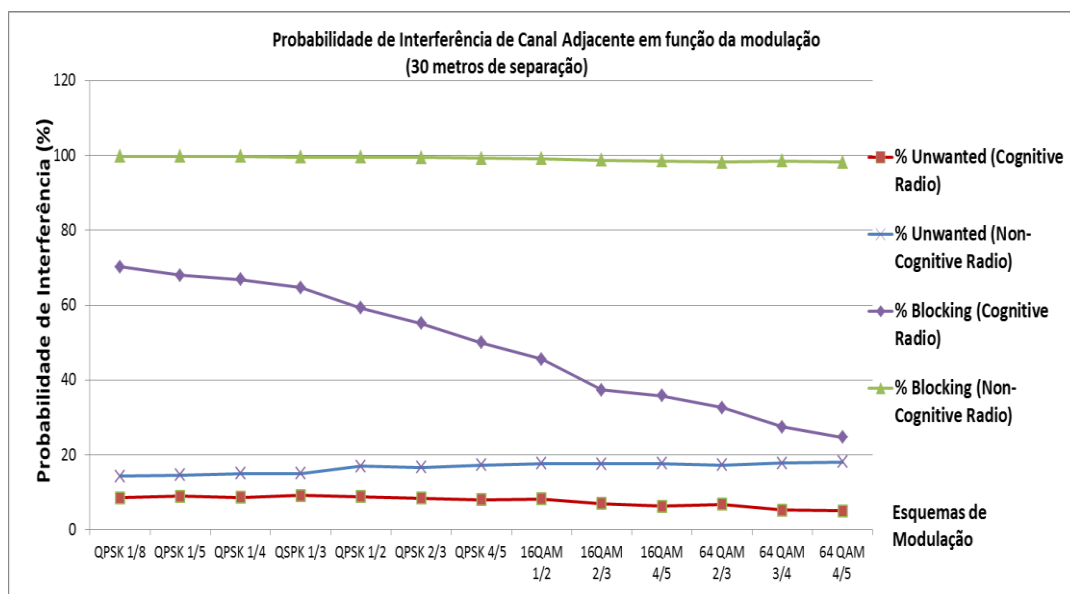


Fig. 36 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (30 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)

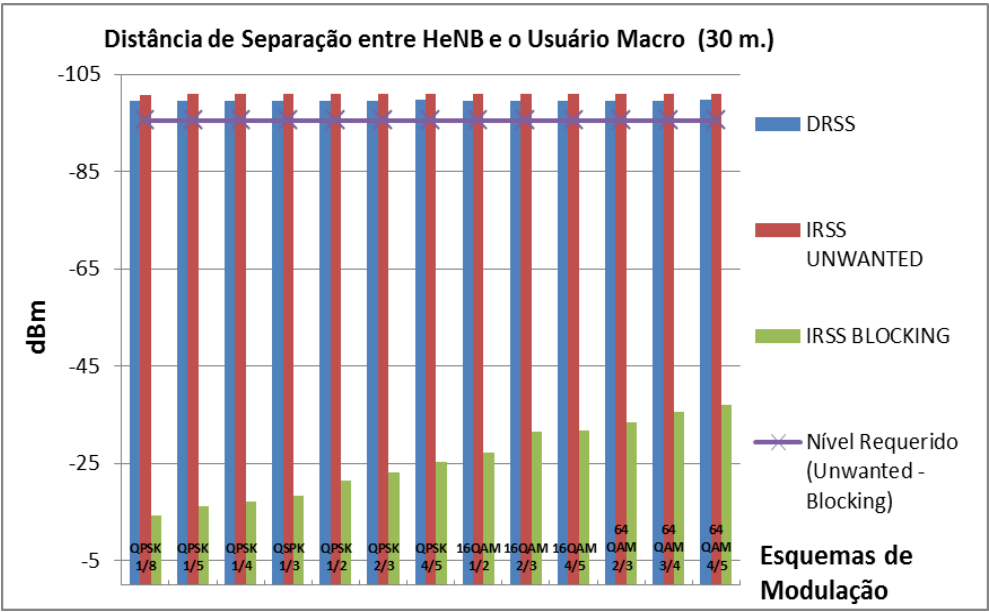


Fig. 37 Níveis Médios de $dRSS$, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ (Sem uso de Rádio Cognitivo)

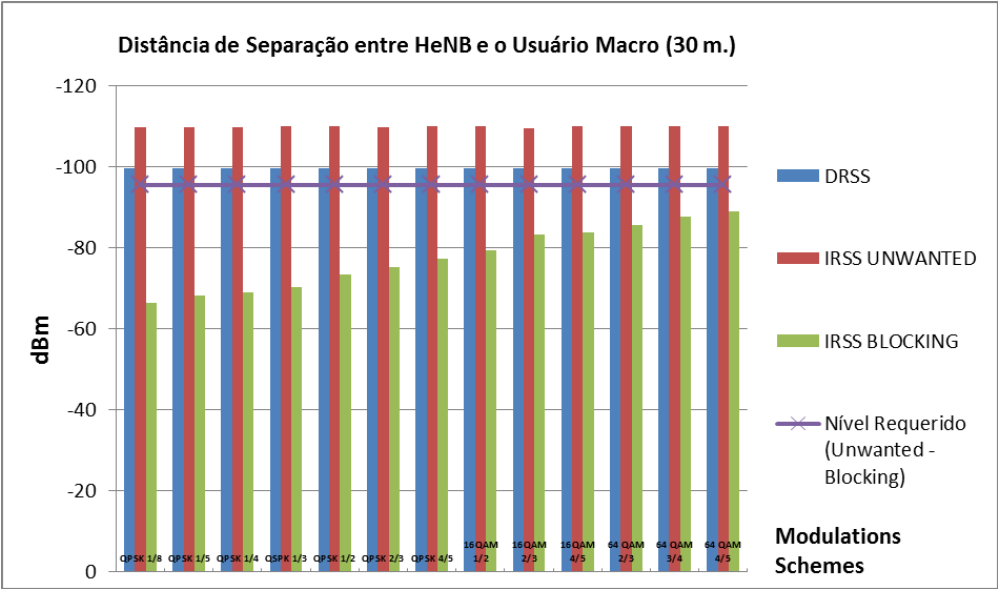


Fig. 38 Níveis Médios de $dRSS$, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ (Com uso de Rádio Cognitivo)

Para uma distância de separação de 30 metros a probabilidade de interferência $iRSS_{unwanted}$ é reduzida obtendo melhores resultados quando se utiliza rádio cognitivo. O valor médio do $iRSS_{unwanted}$ requerido, expresso em dBm, é obtido sem a necessidade de implementar femtocélulas cognitivas.

Contudo, melhores resultados obtiveram-se quando se utilizou o algoritmo de radio cognitivo no cenário de simulação.

Além disso, o parâmetro $iRSS_{\text{blocking}}$ mantém ainda altos níveis de probabilidade de interferência, inclusive quando é utilizado rádio cognitivo.

A seguir apresentam-se os resultados obtidos a 50 metros de separação entre o Sistema Vitima e o Sistema Interferente.

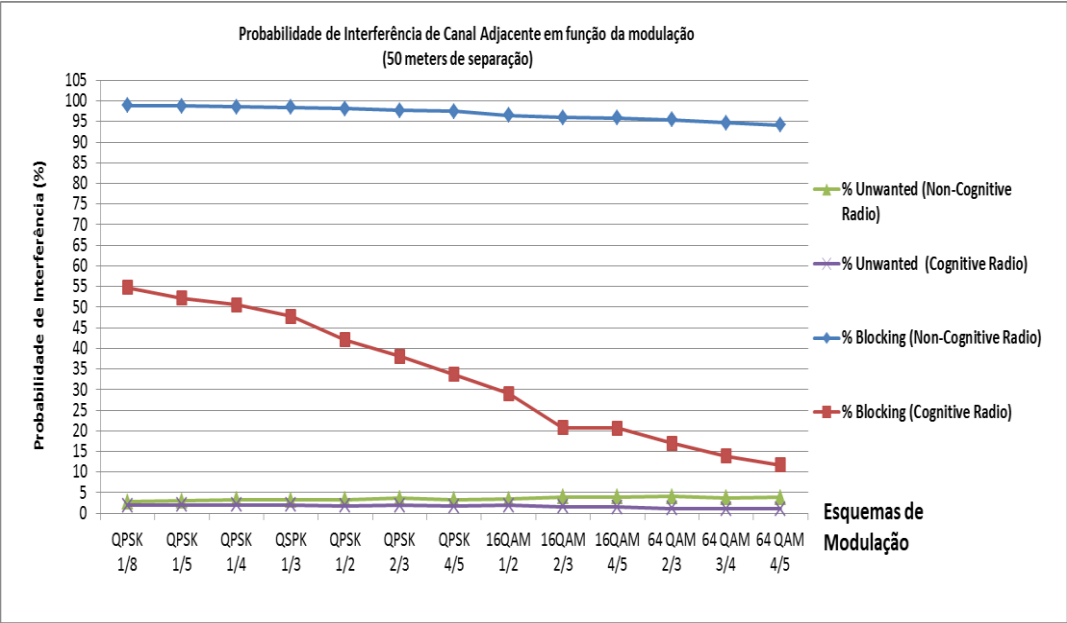


Fig. 39 Probabilidade de Interferência de Canal Adjacente vs Modulação (50 metros Distância de separação usuário macro - HeNB)

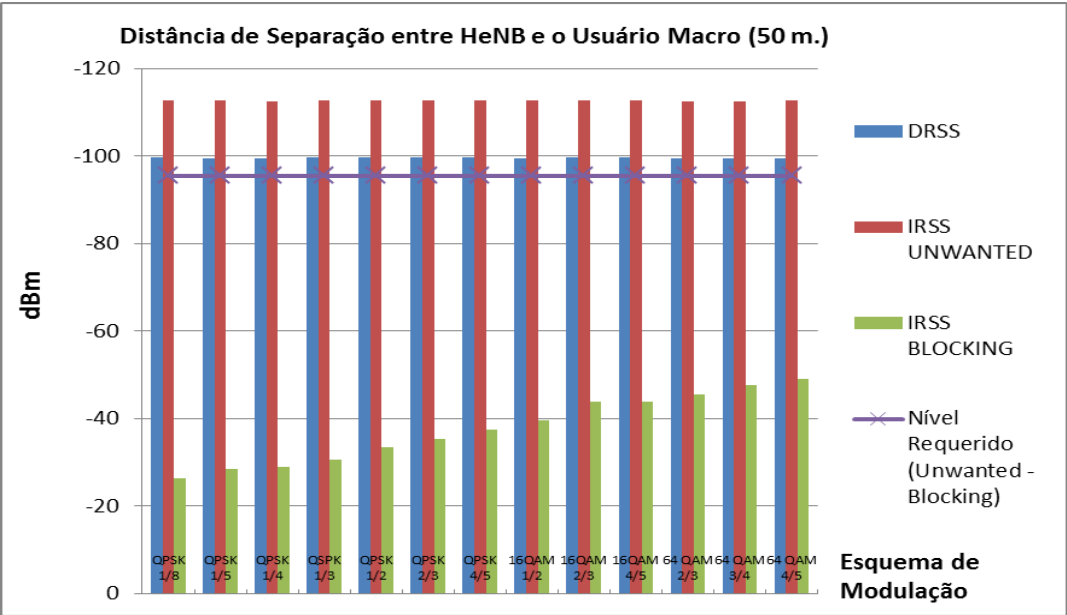


Fig. 40 Níveis Médios de dRSS, $iRSS_{\text{unwanted}}$ e $iRSS_{\text{blocking}}$ (Sem uso de Rádio Cognitivo)

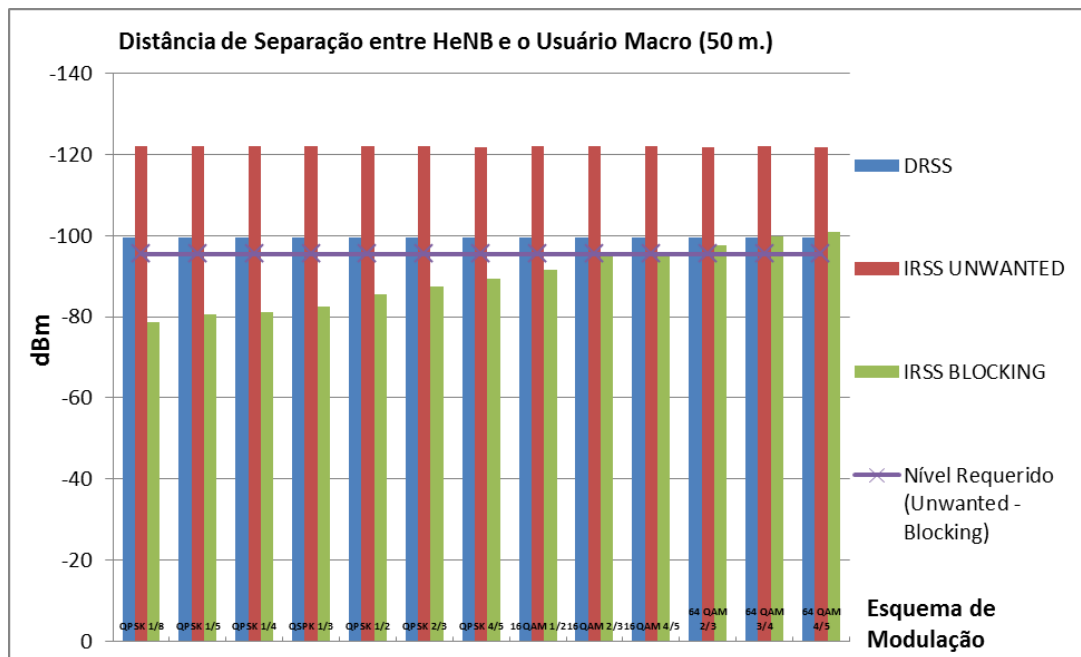


Fig. 41 Níveis Médios de $dRSS$, $iRSS_{unwanted}$ e $iRSS_{blocking}$ (Com uso de Rádio Cognitivo)

Sem a implementação de rádio cognitivo, a probabilidade de interferência $iRSS_{blocking}$, a 50 metros de separação não ofereceu valores que satisfazem o requisito, apresentando altos níveis de probabilidade de interferência independentemente dos esquemas de modulação configurados no receptor móvel LTE UE.

Caso contrário ocorreu quando foi utilizado rádio cognitivo, a probabilidade de interferência ($iRSS_{blocking}$) diminui satisfazendo com o valor requerido. Os cenários favoráveis obtiveram-se quando foram utilizados os seguintes esquemas de modulação no LTE UE: 16 QAM 2/3, 16 QAM 4/5, 64 QAM 2/3, 64 QAM 3/4 e 64 QAM 4/5.

Além disso, avaliando o parâmetro $iRSS_{unwanted}$, considerando as mesmas modulações anteriormente descritas, os valores de probabilidade de interferência reduzem até 1.04 % para o caso da modulação 64 QAM 4/5 com um nível de interferência do sinal não desejado ($iRSS_{unwanted}$) igual a -121.86 dBm, sendo este valor bem menor do que o requerido (-95.5 dBm).

Nas figuras apresentadas a seguir, procura-se obter a distância ótima de separação a fim de obter uma probabilidade de interferência menor do que o 1 %,

assumindo apenas um ambiente de femtocélulas cognitivas e considerando a avaliação da interferência de canal adjacente ($iRSS_{unwanted}$) (ver fig. 42-43).

Neste cenário foram selecionadas apenas duas modulações, a QPSK 1/8 e a 64 QAM 4/5. Esta escolha deve-se a que os outros esquemas de modulação apresentarão o comportamento do valor de probabilidade de interferência entre estes dois esquemas de modulação.

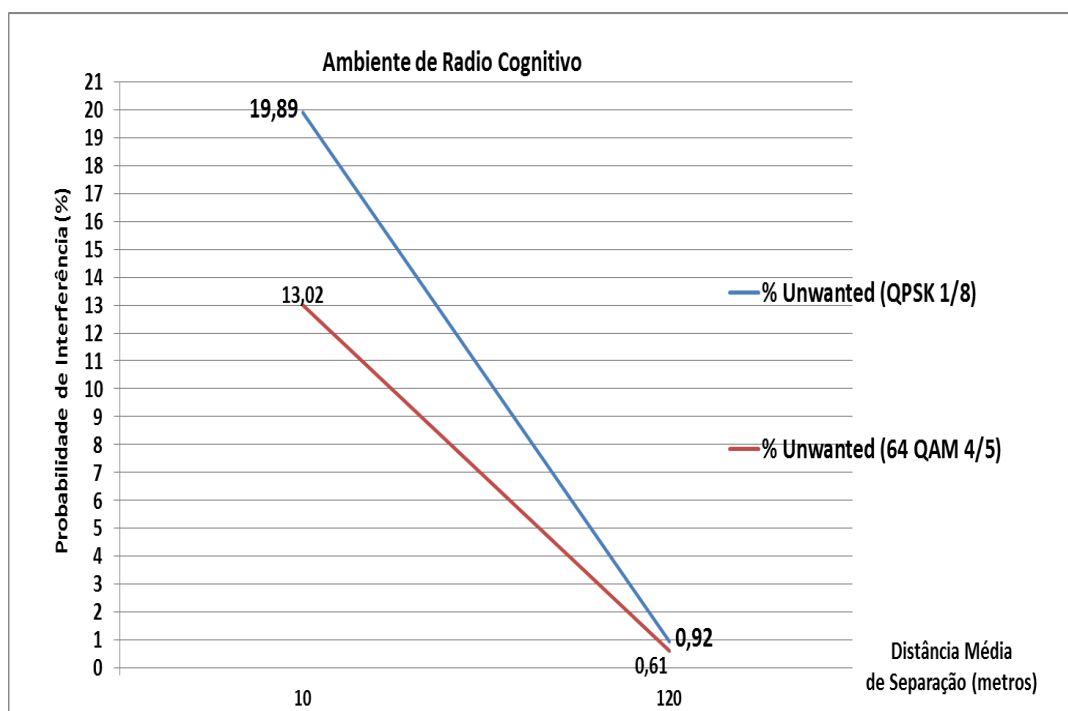


Fig. 42 Ambiente de Radio Cognitivo a 120 metros de separação.

Da figura 42 observa-se que para obter uma probabilidade de interferência menor do que o 1%, a distância média de separação entre o Sistema Vítima (LTE UE) e o Sistema Interferente (Femtocélula HeNB) deve ser igual a aproximadamente 120 metros para qualquer esquema de modulação.

No entanto, enquanto a distância reduz até os 10 metros de separação, a probabilidade de interferência devido à presença de sinais não desejados (*unwanted*) aumentará até 19.89 % para uma modulação QPSK 1/8 e de 13.02% para uma modulação 64 QAM 4/5.

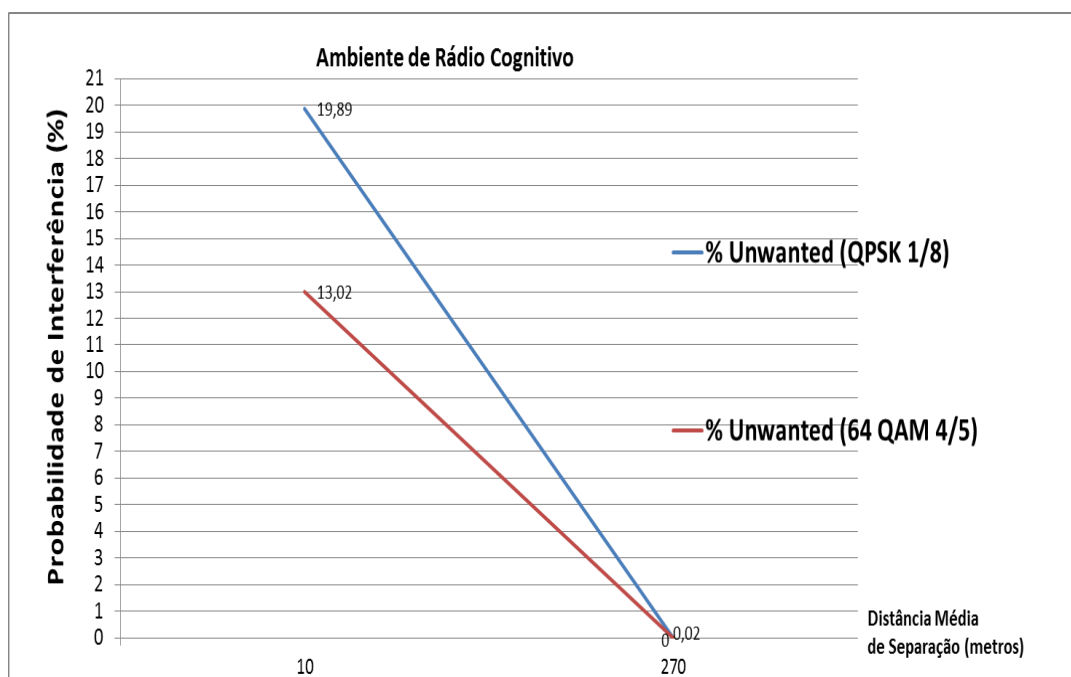


Fig. 43 Ambiente de Radio Cognitivo a 270 metros de separação.

Na figura anteriormente apresentada (ver fig. 43) considera a distância de separação máxima de 300 metros configurada no cenário de simulação. Esta distância esta baseada na restrição estabelecida pelo modelo de propagação HATA-SRD [15] [16] utilizado nos cenários de simulação. Neste cenário foi considerada uma distância de separação de aproximadamente igual a 270 metros.

Em um cenário de rádio cognitivo, a probabilidade de interferência de canal adjacente ($iRSS_{unwanted}$) é igual a zero para qualquer esquema de modulação quando a distância de separação está próxima do limiar de separação estabelecido para a correta utilização do modelo de propagação Estendido Hata – SRD.