

6 Análise dos Resultados das Medições

6.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada a análise dos resultados obtidos nas medições no cenário de coexistência entre o Sistema Vítima (SBTVD) e o Sistema Interferente (LTE Femtocélula - USRP) na faixa de frequência de 700 MHz.

O canal de televisão digital de teste avaliado foi o canal 51 sintonizado em uma frequência central de 695 MHz. O sinal OFDM gerado pela LTE Femtocell-USRP operou em canais adjacentes variando-se a frequência offset em passos de 1 MHz na faixa de frequências de 700 MHz até 705 MHz.

No cenário de teste foram utilizadas distâncias de separação de 2 a 25 metros entre os sistemas estudados e diferentes potências de transmissão do sistema interferente. A variação da potência de transmissão permitiu obter o raio de proteção para garantir a coexistência destes sistemas na faixa de 700 MHz.

No sistema interferente, não se considerou nenhum tipo de filtro, assumindo as imperfeições de RF da USRP (vazamentos fora e dentro de banda). A potência máxima conseguida da USRP oscila entre 15 dBm e aproximadamente 17 dBm, sendo a potência mínima para o experimento igual a aproximadamente -13 dBm.

Além disso, no sistema vítima (SBTVD) foi mantida uma potência constante de transmissão igual a -5 dBm, valor que garante o correto desempenho dos equipamentos e da recepção do sinal de TV digital de teste em 695 MHz.

A Razão de Proteção e o Controle de Potência

A análise dos resultados obtidos na medição leva em conta dois parâmetros para avaliar a interferência produzida no Sistema Brasileiro de Televisão Digital. O primeiro critério corresponde à “Razão de Proteção” [69] que corresponde a ajustar a margem de potência do sinal interferente e a potência do sinal desejado a

fim de determinar o nível de potência do sinal interferente que não afeta à qualidade do sinal de TV digital.

Neste caso, o controle de potência de transmissão da femtocélula-USRP foi utilizado para garantir uma boa recepção do sinal de TV digital segundo os requisitos estabelecidos pela ABNT.

Um segundo critério se baseia nas avaliações subjetivas do sinal recebido pelo STB com o propósito de analisar as flutuações dos valores do BER e da MER. A ABNT estabelece que o valor requerido do BER para garantir a recepção do sinal de TV digital seja menor do que $2 * 10^{-4}$.

6.2. Resultados e Análise das Medições

6.2.1. Avaliação da máxima potência do sistema interferente

A seguir são apresentados os resultados experimentais expressos em função do nível máximo admissível de potência de transmissão (dBm) da USRP em função da frequência de offset (frequência de guarda) para diferentes esquemas de modulação (QPSK, 16 QAM e 64 QAM) e distâncias de separação entre o SBTVD e o LTE Femtocell USRP.

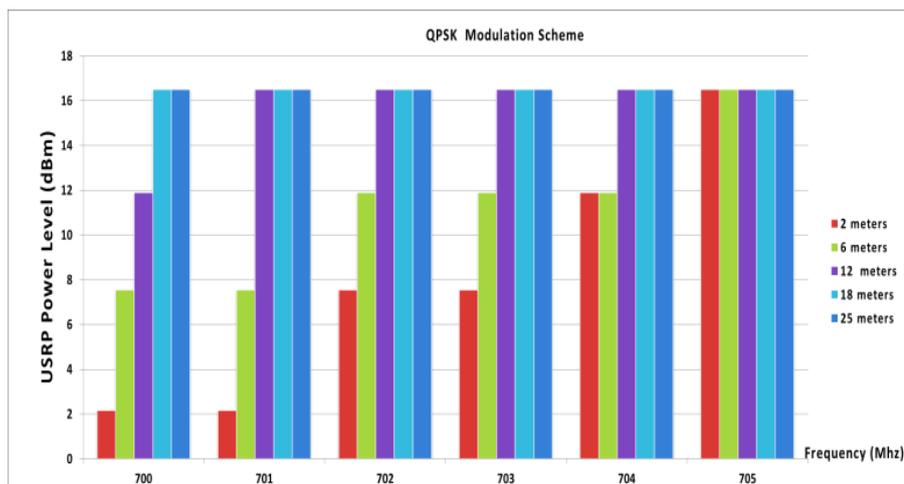


Fig. 113 Nível de Potência da Femtocélula em diferentes frequências para uma Modulação QPSK.

A Fig. 113, apresentada acima, considera o caso de utilização do esquema de **modulação QPSK** no sistema vitima para distâncias de separação entre 2 a 25 metros em relação ao sistema interferente.

Para uma distância de 2 metros de separação com o sistema interferente (LTE Femtocell-USRP) em 700 MHz, por exemplo, a potência máxima estabelecida do equipamento de raio USRP tem que ser igual a aproximadamente 2.10 dBm para garantir a correta recepção do sinal de TV digital.

Para uma distância de separação de 6 metros, também em 700 MHz, a potência máxima permissível aumenta para 7.5 dBm. Este valor garante a recepção do sinal de TV digital segundo os requisitos estabelecidos do BER e da MER que são corroborados nas avaliações subjetivas do sinal recebido.

Para 12 metros de separação, ainda em 700 MHz, a potência máxima permissível do interferente aumenta para aproximadamente 11.9 dBm.

Na mesma frequência, a partir de 18 metros de separação entre os sistemas praticamente a interferência é evitada mesmo com a potência máxima de transmissão da USRP (aproximadamente 17 dBm).

Resultados mais favoráveis foram obtidos, como era de esperar, quando a frequência aumenta, permitindo o aumento da potência de transmissão do equipamento de rádio.

Em **705 MHz**, por exemplo, independente da distância de separação e assumindo a potência máxima do USRP se consegue a recepção do sinal de TV digital.

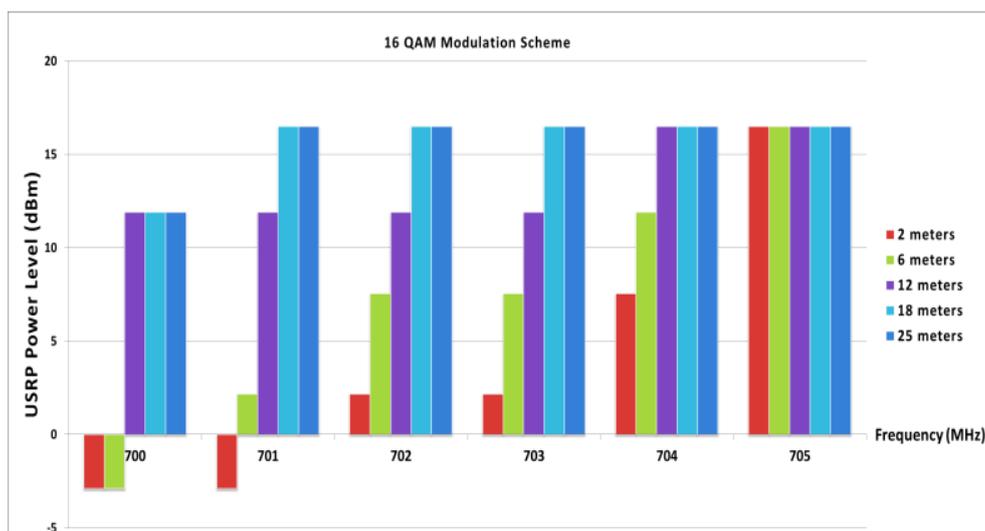


Fig. 114 Nível de Potência da Femtocélula em diferentes frequências para uma modulação 16 QAM.

Na Fig. 114, apresentada acima, considera apenas a utilização no sistema vitima do esquema de modulação 16 QAM.

Para distâncias de 2 metros de separação e com o sistema interferente (LTE Femtocell-USRP) em 700 MHz, por exemplo, a potência máxima do equipamento de rádio USRP tem que ser igual a aproximadamente -2.9 dBm contra, 2.1 dBm quando foi utilizada a modulação QPSK.

Para 12 metros de separação, ainda em 700 MHz, a potência máxima permissível do interferente aumenta para aproximadamente 11,9 dBm.

Para distâncias de separação de 18 a 25 metros de separação, ainda em 700 MHz, a potência máxima permissível aumenta, mesmo com a potência máxima de transmissão da USRP (aproximadamente 17 dBm).

Como no caso da modulação QPSK, obtém-se melhores resultados quando a frequência de guarda do sistema interferente vai se deslocando com um passo de 1 MHz. Na frequência de 705 MHz, independente da distância de separação e assumindo a potência máxima da USRP se consegue uma boa recepção do sinal de TV digital.

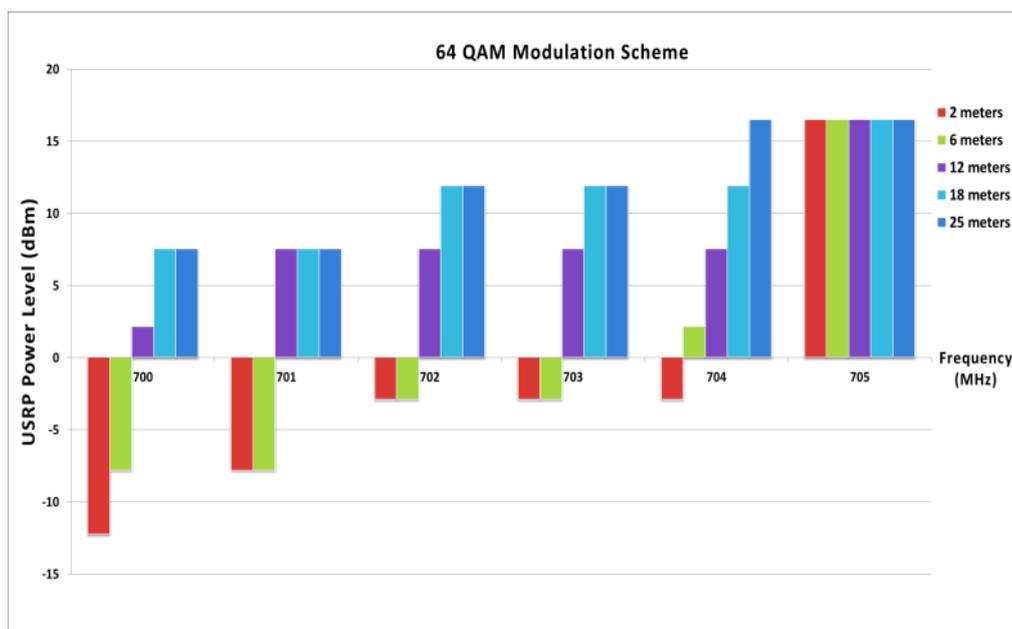


Fig. 115 Nível de Potência da Femtocélula em diferentes frequências para uma modulação 64 QAM

A Fig. 115, apresentada acima, considera a utilização no sistema vitima do esquema de modulação 64 QAM, assumindo distâncias de separação entre 2 a 25 metros em relação à posição do sistema interferente, e dos diferentes níveis de potência máxima do equipamento de rádio USRP.

Pode-se perceber que, o comportamento da potência máxima permissível da LTE Femtocell – USRP exige valores bem menores que os utilizados nos cenários apresentados anteriormente, devido a que esta modulação 64 QAM é menos robusta ante a interferência e portanto, esta mais exposta a apresentar problemas de interferência de canal adjacente. Caso contrário acontece quando é utilizada uma modulação mais robusta, como é a modulação QPSK.

Para uma distância de separação entre 2 e 6 metros em 700 MHz, os níveis de potência máxima permissível são menores (-12.26 e - 7.81 dBm, respectivamente) a fim de garantir uma boa recepção do sinal de TV Digital.

A partir dos 12 metros de separação entre os sistemas estudados, ainda em 700 MHz, a potência vai se aumentando sendo o valor de potência máxima permissível igual a 2.16 dBm.

Para distâncias de separação de 18 e 25 metros em 700 MHz, a potência máxima permissível da USRP é igual a 7.54 dBm para obter uma boa recepção do

sinal de TV digital. Em 705 MHz, como foi apresentado nos cenários avaliados anteriormente, e independente da distância de separação se garante a recepção do sinal de TV digital.

As figuras a seguir (ver fig. 116 - 120) avaliam o comportamento da interferência em relação de cada esquema de modulação e da distância de separação.

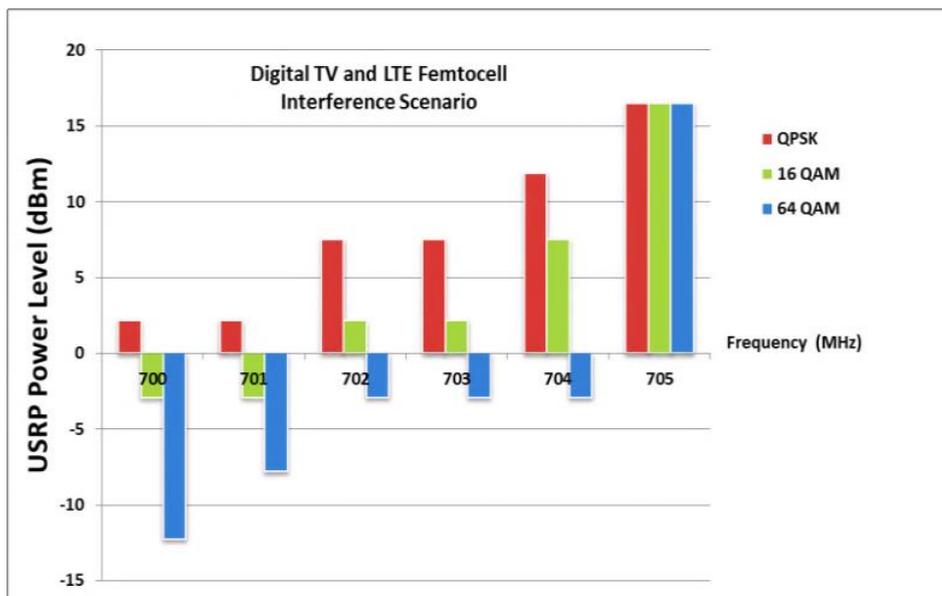


Fig. 116 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 2 metros.

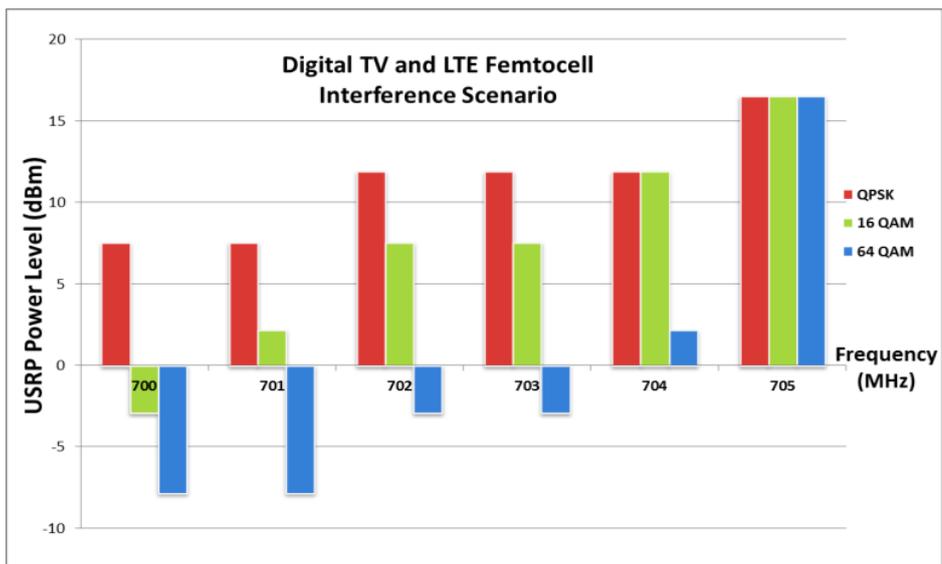


Fig. 117 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 6 metros.

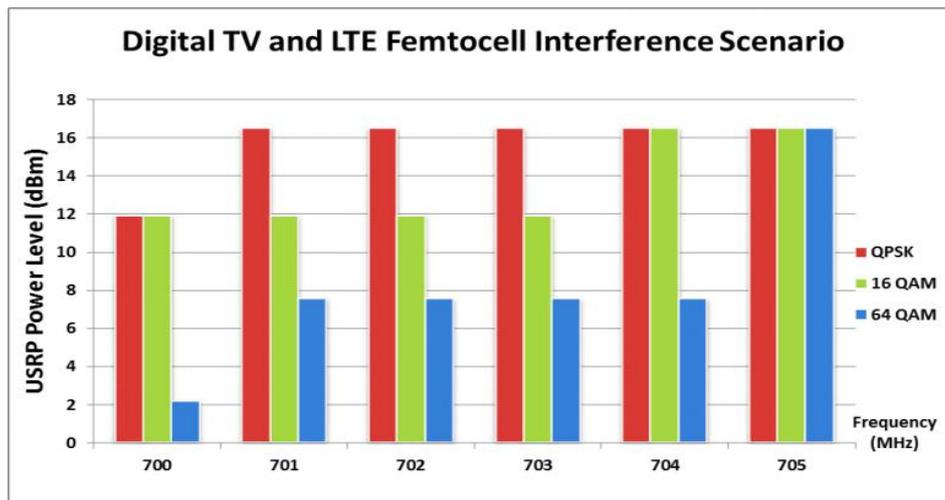


Fig. 118 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 12 metros.

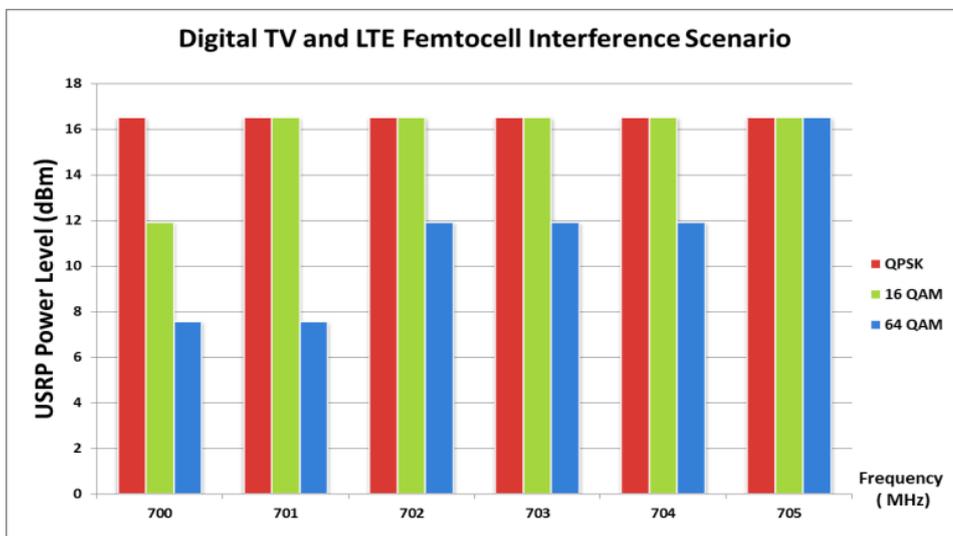


Fig. 119 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 18 metros.

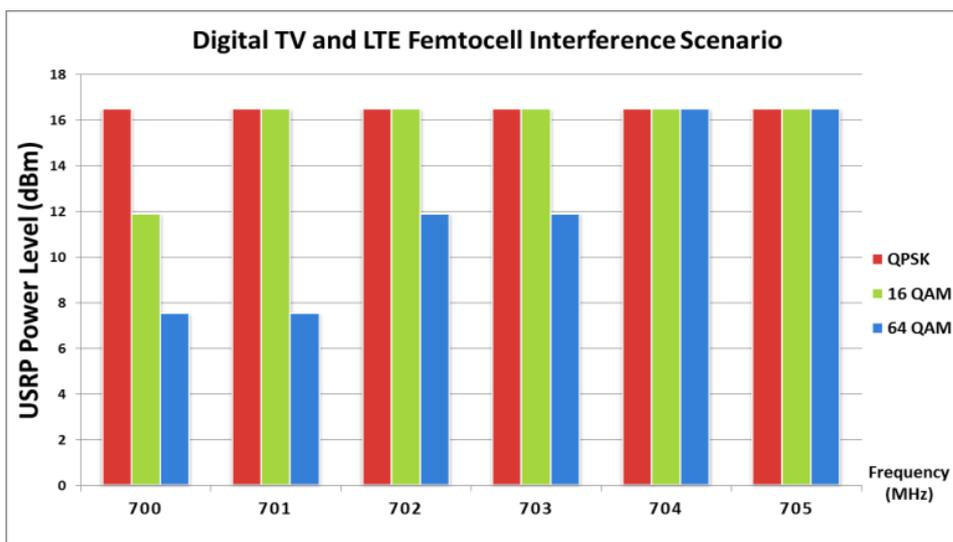


Fig. 120 Cenário de Interferência a uma distância de separação de 25 metros

Como esperado, o esquema de modulação que oferece melhor robustez e resultados mais satisfatórios é o esquema de modulação QPSK. Os piores cenários se apresentam quando é utilizada a modulação 64 QAM, que requer de menores potências de transmissão da femtocélula a fim de garantir a recepção do sinal de TV digital e obter os parâmetros do BER e da MER exigidos pela ABNT.

6.2.1.1.

Avaliação das flutuações dos valores do BER e da MER

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos durante as medições dos cenários de coexistência entre TV Digital e a femtocélula LTE USRP em função dos parâmetros BER e MER.

Cada um dos cenários definidos no setup de medição considera diferentes potências de transmissão da femtocélula. Diferentemente da seção anteriores avalia-se as flutuações dos parâmetros MER e do BER com respeito às distâncias de separação entre ambos os sistemas e às frequências de guarda.

6.2.1.1.1.

Dependência com a modulação

Nesta seção, se apresentarão os resultados obtidos para uma distância de separação de 2 metros entre o sistema vitima (SBTVD) e o sistema interferente (LTE Femtocell - USRP).

As figuras apresentadas a seguir, representam os valores obtidos do BER para os esquemas de modulação QPSK, 16 QAM e 64 QAM.

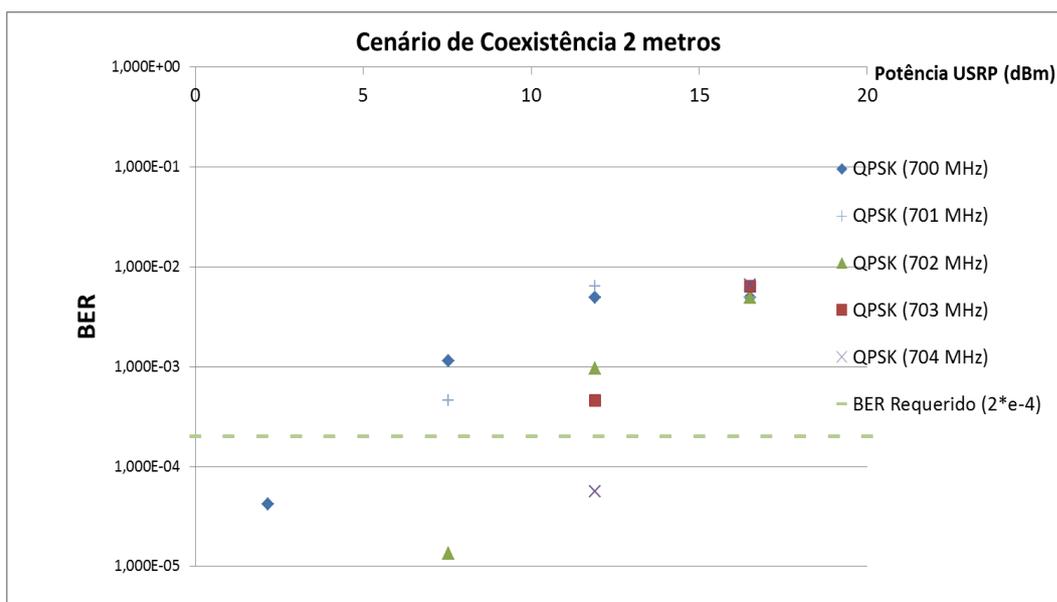


Fig. 121 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda

Da Fig. 121, apresenta-se o comportamento da interferência no SBTVD em função da frequência de guarda e da potência máxima do sistema interferente. Enquanto a femtocélula desloca-se em frequência, a potência de transmissão do USRP tem menor restrição, e portanto, menor interferência no sinal de TV digital. É importante também considerar, que em 701 MHz assumindo uma potência máxima permissível da USRP de 2.16 dBm o BER é de 0×10^{-7} . Caso semelhante, ocorre em 703 MHz com uma potencia de 7.54 dBm e em 705 MHz considerando a potência máxima da USRP.

Em 700 MHz e 701 MHz, por exemplo, a potência permissível da femtocélula LTE USRP tem que ser igual a aprox. 3 dBm em ambos os casos, sendo o BER igual a $4,2 \times 10^{-5}$ e 0×10^{-7} , respectivamente. Caso contrário, qualquer valor que seja maior do que o BER requerido de 2×10^{-4} apresentará níveis de interferência na recepção, ocasionando perda do sinal de TV digital. Por exemplo, em 703 MHz, com uma potência da femtocélula de 11.9 dBm, o BER é igual a 6.44×10^{-3} , valor acima do permitido causando interferência no SBTVD.

Além disso, foi corroborada pelas avaliações subjetivas que foi possível receber o sinal de TV digital mesmo assim que os valores do BER não satisfaçam

com o valor exigido, este comportamento deve-se ao ganho do STB que apesar de não satisfazer o requisito, o STB vai tentar receber o sinal. Este cenário ocorreu quando se utilizou uma potência da femtocélula de 7.54 dBm em 701 MHz sendo o BER de $4,57 * 10^{-4}$.

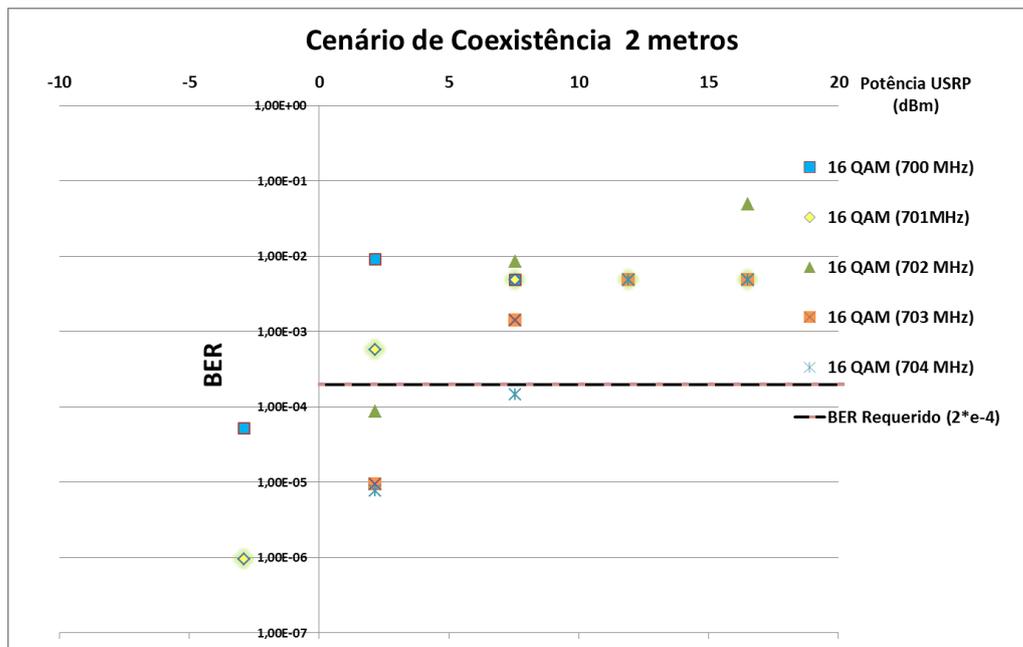


Fig. 122 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda

A diferença do cenário anterior, na Fig. 122 é possível perceber que ao utilizar a modulação 16 QAM têm se maiores restrições na potência máxima da USRP. Por exemplo, em 702 MHz, com uma potência menor do que o caso anterior, de 2.16 dBm garanta-se a recepção do sinal de TV digital. Além disso, neste cenário somente em 705 MHz, considerando a potência máxima permissível da USRP de 16.5 dBm o BER é de $0 * 10^{-7}$.

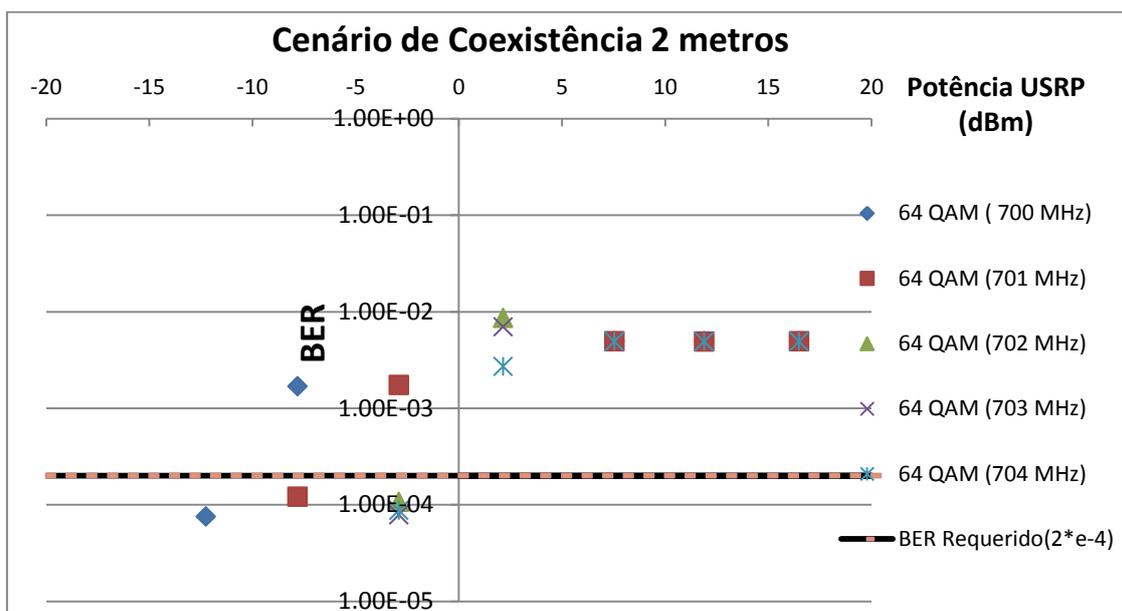


Fig. 123 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda

A diferença das modulações QPSK, 16 QAM e devido a que a modulação 64 QAM é menos robusta ante a interferência, apresenta maiores problemas na recepção do sinal no cenário de interferência. Portanto, deve se considerar mais restrições no controle de potência da femtocélula LTE USRP.

Em 700 MHz a potência máxima permissível da USRP é de -13 dBm e em 701 MHz de -7,81 dBm sendo estes menores que nos cenários apresentados anteriormente. O cenário mais favorável para a modulação 64 QAM foi em 705 MHz devido a que se apresentou menor interferência no sinal de TV digital.

As figuras apresentadas a seguir, representam os valores obtidos da MER para os esquemas de modulação QPSK, 16 QAM e 64 QAM para 2 metros de separação.

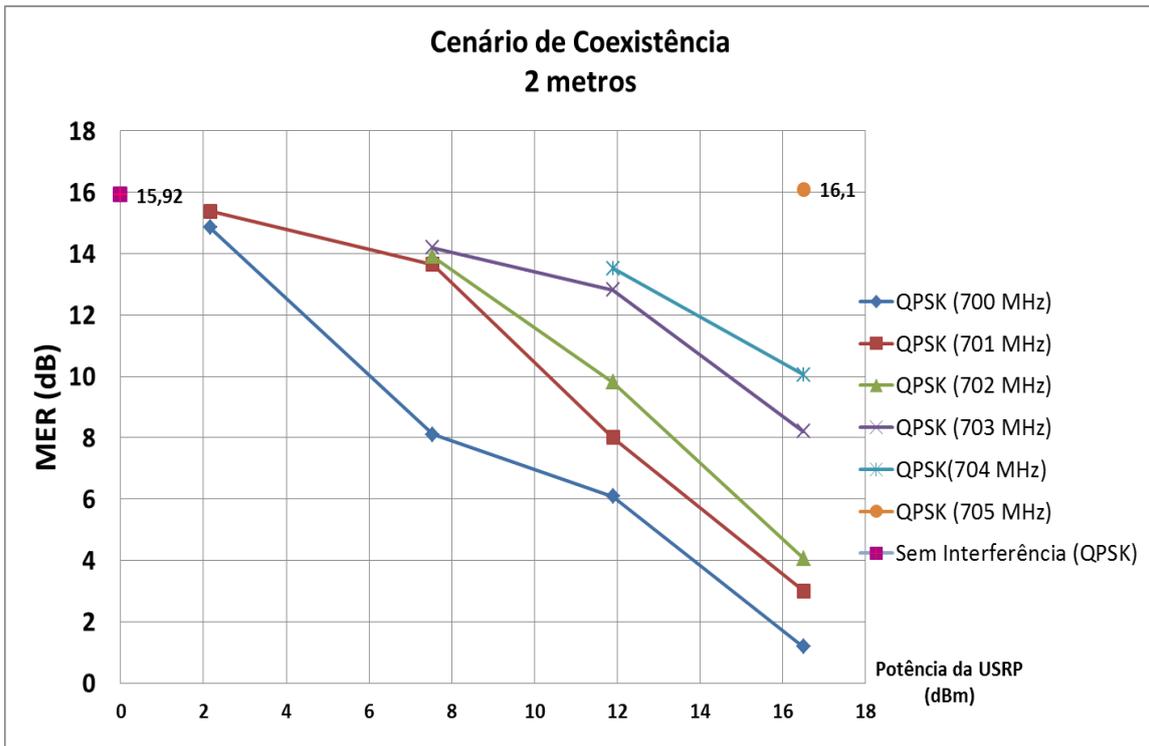


Fig. 124 Avaliação da MER em função da potência da femtocélula e frequência de guarda

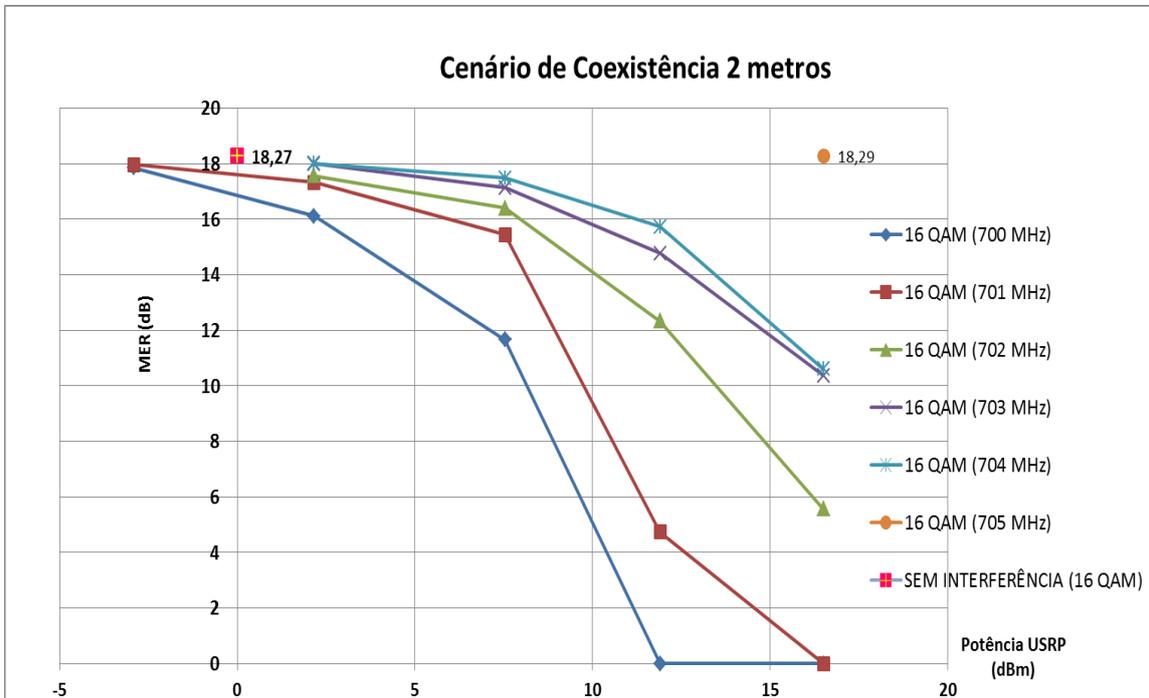


Fig. 125 Avaliação da MER em função da potência da femtocélula e frequência de Guarda

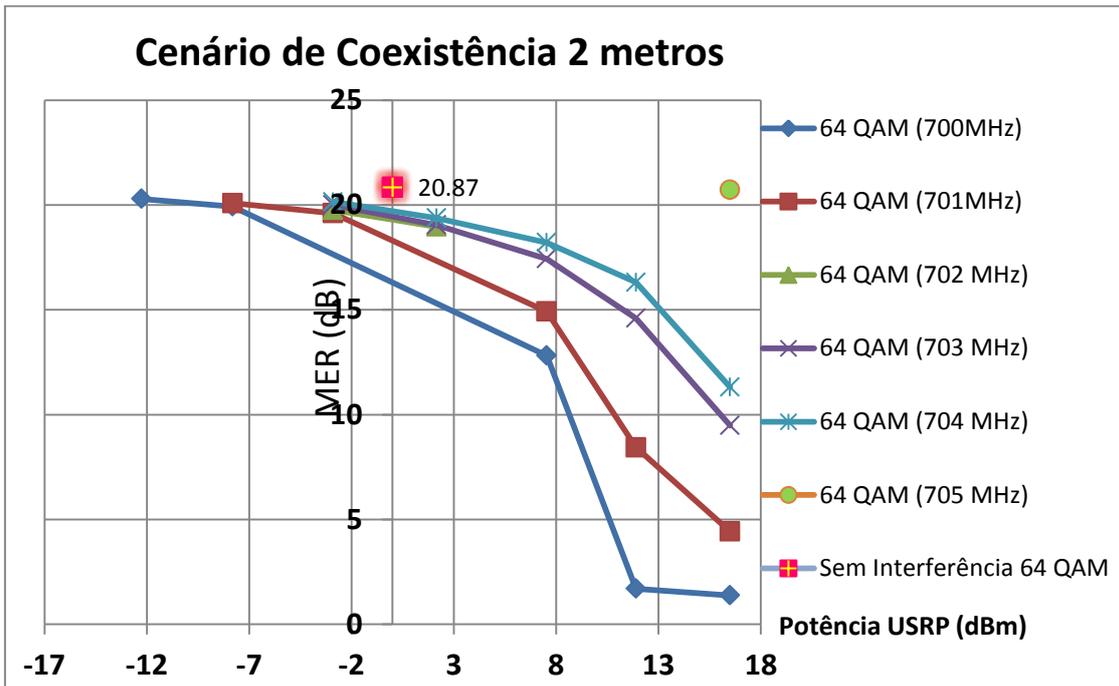


Fig. 126 Avaliação da MER em função da potência da femtocélula e frequência de Guarda

Nas figuras (Fig. 124 - 126) apresentadas acima, pode-se observar o comportamento da interferência no SBTVD em função da frequência de guarda e da potência de transmissão do sistema interferente (LTE Femtocell - USRP) representado pelos valores obtidos da MER.

Em 700 MHz, a femtocélula não pode utilizar uma potência de transmissão de 17 dBm devido a que os valores da MER mostram uma alta interferência intersímbolo independente do esquema de modulação configurado.

O melhor cenário de coexistência a 2 metros de separação foi quando se utilizou a modulação QPSK em 705 MHz devido a que foi possível utilizar a potência máxima permissível da USRP (aprox. 17 dBm) sem apresentar interferência nenhuma na recepção do sinal de TV digital. Isto pode ser corroborado nos valores obtidos da MER na Fig. 122.

Para as modulações 16 QAM e 64 QAM tiveram-se mais restrições na potência máxima da USRP (ver Fig. 125 a 126). O pior cenário apresentou-se em 700 MHz, quando a modulação 64 QAM foi utilizada já que MER foi a menor obtida, sendo igual a 1.38 dB.

Além destes cenários de avaliação de coexistência, no anexo deste trabalho, apresentam-se os resultados obtidos do parâmetro BER e MER para as distâncias de separação de 6, 12, 18 e 25 metros.

6.2.1.1.2. Influência da distância de separação

Nesta seção, é considerado o pior cenário de coexistência quando é utilizada a modulação 64 QAM para as distâncias de separação de 2, 12 e 25 metros de separação entre o sistema interferente (LTE Femtocell – USRP) e o sistema vítima (SBTVD.)

As figuras apresentadas a seguir, representam os valores obtidos do BER para o esquema de modulação 64 QAM.

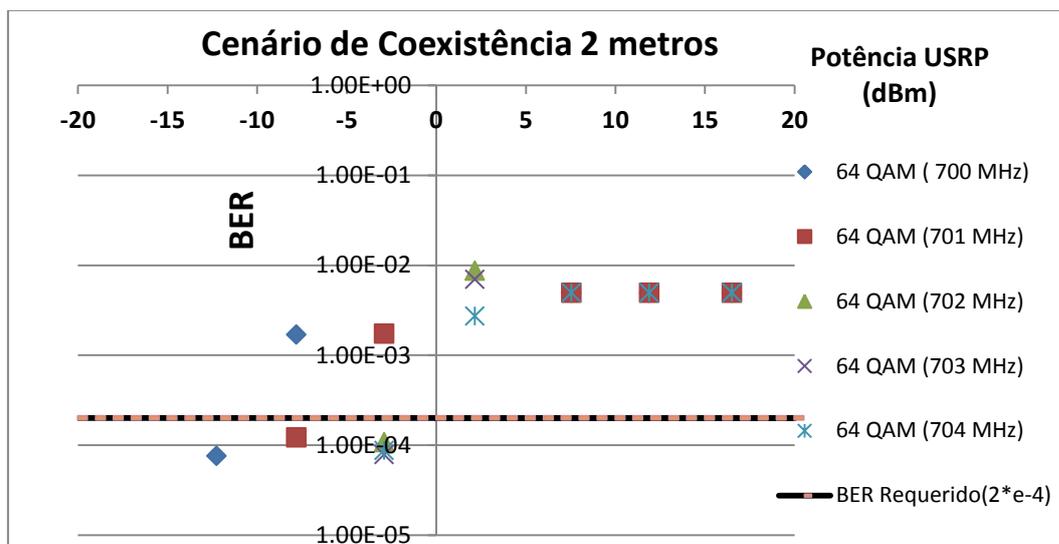


Fig. 127 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 2 metros de separação

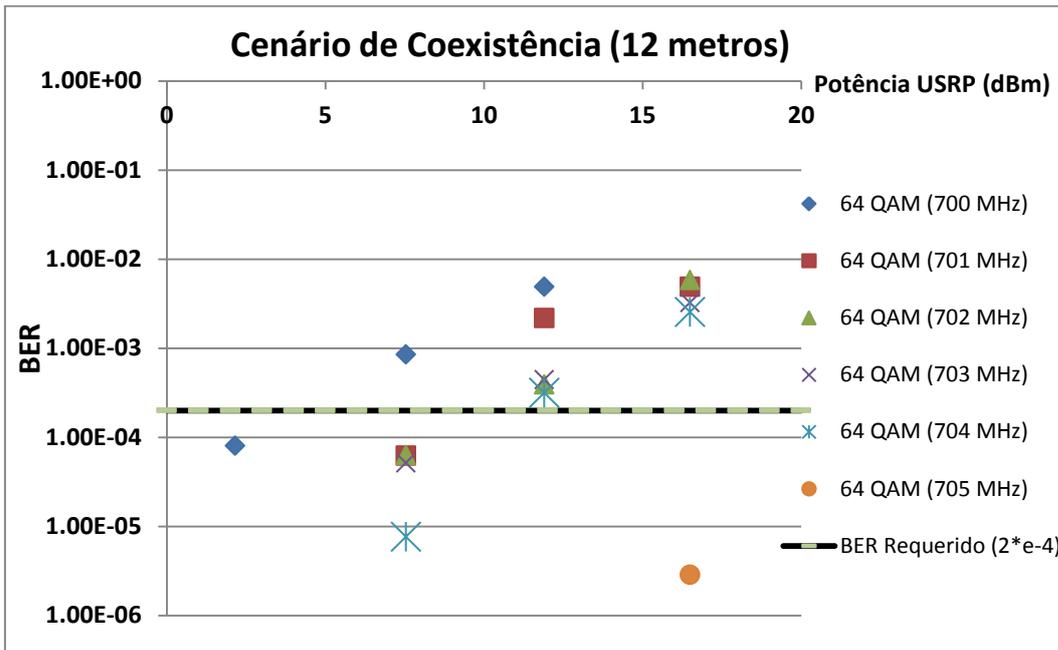


Fig. 128 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 12 metros de separação

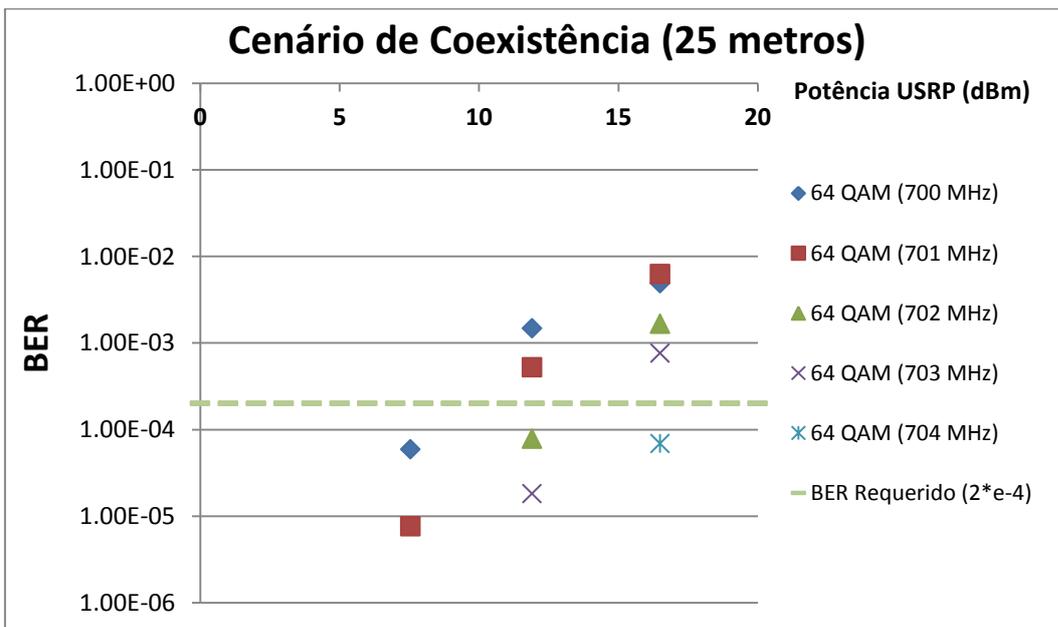


Fig. 129 Avaliação do BER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 25 metros de separação

É importante destacar que na modulação 64 QAM os níveis de potência máxima permissíveis da femtocélula são mais restritos e, portanto, as potências devem ser bem baixas para garantir a recepção do sinal de TV digital. Para 2 metros de separação, em 700 e 701 MHz, por exemplo, as potências são bem

baixas a fim de satisfazer o valor do BER exigido pela ABNT. Caso contrário acontece em 705 MHz, garanta-se a recepção do sinal mesmo assim utilizando a potência máxima do equipamento.

Como era de esperar, ao aumentar a distância de separação entre os sistemas em estudo, a interferência de canal adjacente diminui permitindo a utilização de potências de transmissão da USRP maiores que satisfazem o valor requerido do BER (ver Fig. 128).

Além disso, cabe mencionar que se apresentaram cenários nas medições em que se obteve a recepção do sinal de TV digital, porém, os valores do BER não satisfazem os requisitos, este comportamento deve-se ao ganho do STB que apesar de não satisfazer o requisito, o STB vai tentar receber o sinal. Este cenário se apresentou em 703 MHz com valores do BER acima do valor permitido para uma potência de 11.9 dBm (ver Fig. 128).

Para 25 metros de separação, a interferência é bem menor sendo percebido pelos valores de potência máxima permissível da USRP, os quais são maiores em comparação aos cenários avaliados anteriormente (ver Fig. 129).

As figuras apresentadas a seguir, representam os valores obtidos da MER para o esquema de modulação 64 QAM para 2 metros de separação.

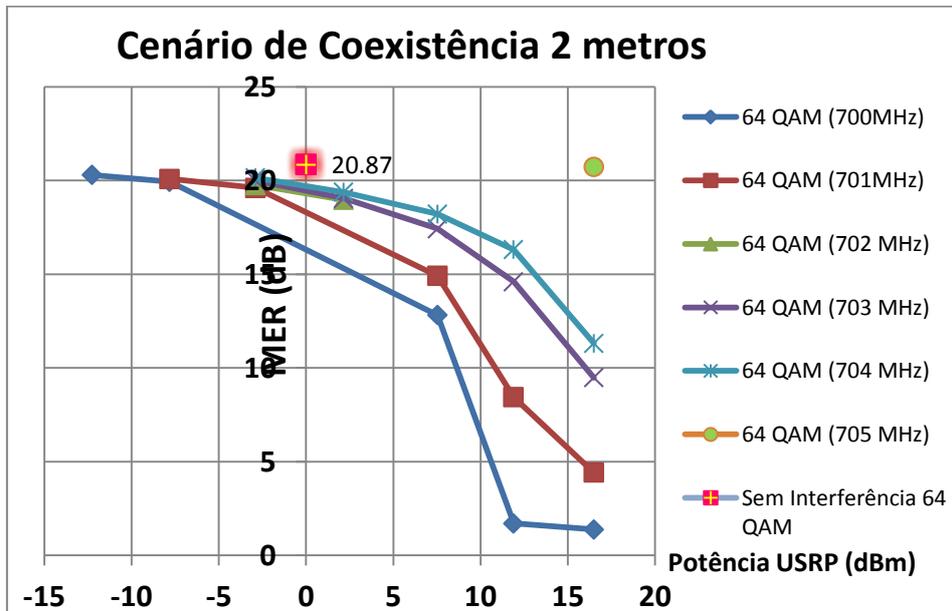


Fig. 130 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 2 metros de separação

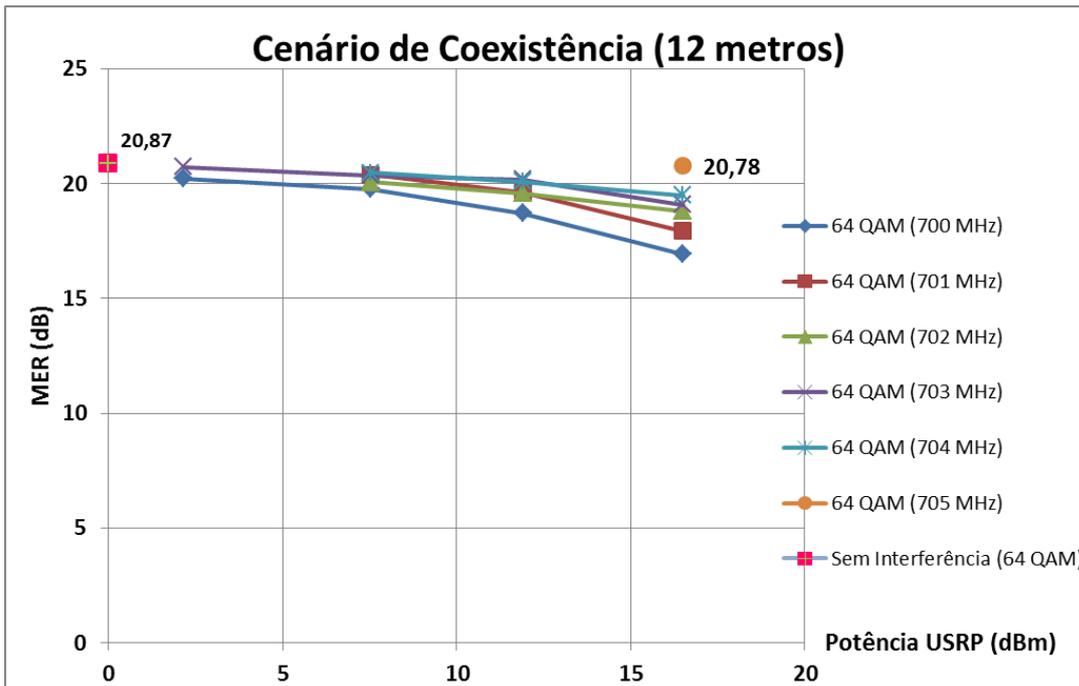


Fig. 131 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 12 metros de separação

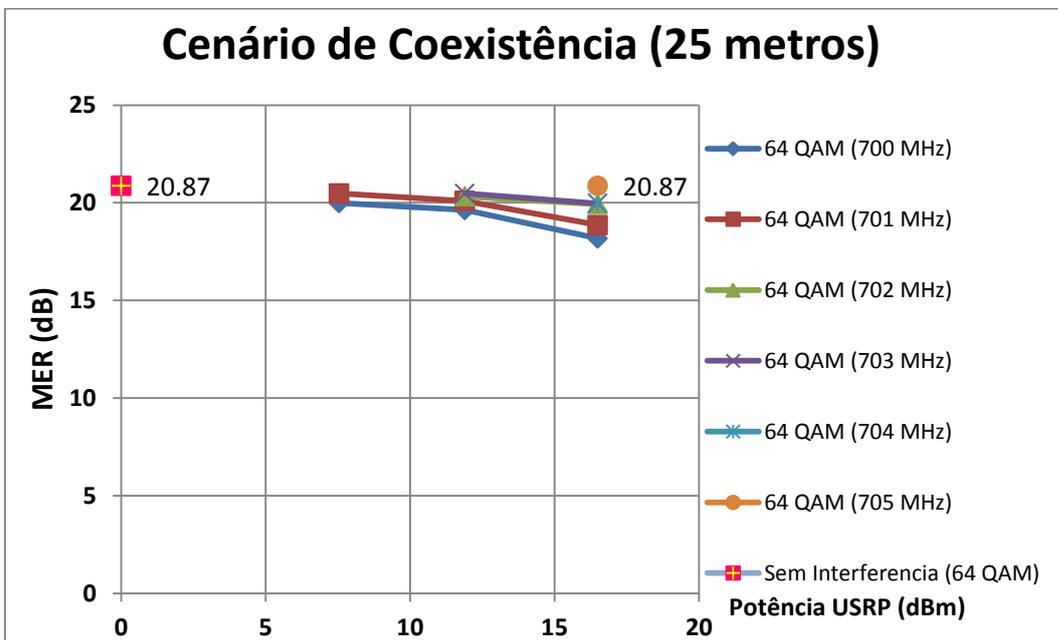


Fig. 132 Avaliação da MER em função da Potência da Femtocélula e Frequência de Guarda - 25 metros de separação

As figuras apresentadas acima mostram a interferência de canal adjacente no canal de TV digital 51 (operando em 695 MHz). Da Fig. 130 é possível perceber o

comportamento da interferência, representado pelos valores obtidos da MER, ao aumentar a potência da USRP. Por exemplo, o pior cenário apresentou-se em 700 MHz quando a MER obteve o valor mais baixo no cenário de medição (1.38 dB). Contudo, conforme o interferente desloca-se em frequência, as restrições na potência da LTE Femtocell diminuem, obtendo valores da MER próximos do limiar estabelecido (ver Fig. 131) que garanta a recepção do sinal de TV digital.

Considerando o cenário em 700 MHz, mas, aumentando a distância de separação, o valor obtido da MER (ver Fig. 131) é maior, contudo ainda não é possível garantir a recepção do sinal de TV digital. Como era de esperar e conforme se desloca em frequência e aumenta-se a distância de separação, os valores da MER estão próximas do limiar requerido, e portanto, a potência máxima da LTE Femtocell USRP tem menores restrições.

A 25 metros de separação a interferência de canal adjacente é praticamente evitada, devido a que os valores da MER (ver Fig. 132) estão bem próximos ao limiar requerido para garantir a boa recepção do sinal de TV digital. Porém, têm-se ainda cenários que precisam do controle de potência da LTE Femtocell USRP, como por exemplo, em 700 MHz, onde os valores da MER mostram interferência intersímbolo (ver Fig. 132) quando é utilizada a potência máxima da USRP (17 dBm).

Além destes cenários de avaliação de coexistência, no anexo deste trabalho, apresentam-se em detalhe os resultados obtidos para as distâncias de separação a 6 e 18 metros.