

Avaliação da rotação nos esquemas de modulação M-QAM em canais com desvanecimento Rice

Carlos Danilo M. Regis

regis.danilo@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus Campina Grande.

RESUMO

Desvanecimento causado por multipercurso em comunicação sem fio pode degradar o desempenho de uma comunicação em um sistema digital. Diversas técnicas têm sido propostas para melhorar o desempenho, incluindo a rotação da constelação. A rotação da constelação é uma técnica que introduz redundância através de uma escolha cuidadosa do ângulo de constelação de referência. Este artigo apresenta uma avaliação da técnica considerando a transmissão através de um canal Rice, que é suficientemente flexível para representar ambientes de transmissão diferentes (área aberta, suburbana, urbana com baixa densidade e urbana com média densidade). Os ângulos ideais de rotação foram estudados para o esquema de modulação M-QAM para os diferentes ambientes.

Palavras-chave: M-QAM, Canal Rice, Modulação, Rotação da Constelação, Diversidade.

ABSTRACT

Fading caused by multipath in wireless communication can degrade the performance of digital communication systems. Several techniques have been proposed to improve the performance, including constellation rotation. The rotated constellation is a technique that introduces redundancy through a careful choice of the reference angle in a QAM constellation. This letter presents an evaluation of that technique considering the transmission over a Rician fading channel, which is flexible enough to represent different transmission environments (Open, Suburban, Low-Density Urban, Medium-Density Urban area). The optimum angle of rotation of 4-QAM and 16-QAM were obtained for those environments.

Keywords: *Rotated Constellation, Modulation, Rice fading channel, M-QAM, Diversity.*

1 Introdução

Nas comunicações móveis, quando há uma linha de visada (LOS) entre o transmissor e o receptor, esse sinal recebido é conhecido por ter a distribuição Rice (DOUKAS; KALIVAS, 2006). A relação entre as componentes de visada direta e a componente difusa é dada pelo fator de Rice, K , que mede a intensidade relativa da componente de visada direta, e, portanto, é uma medida da qualidade da transmissão.

O valor do fator de Rice é uma medida de desvanecimento, com $K = 0$ sendo o pior caso do desvanecimento (*Rayleigh fading*) e $K = \infty$ representando a ausência de desvanecimento. Várias técnicas têm sido propostas para melhorar seu desempenho. Entre elas, as técnicas de diversidade, os esquemas de modulação codificada e a rotação da constelação.

A rotação da constelação é uma técnica que consiste em introduzir redundância por meio de uma escolha criteriosa do ângulo de referência de uma constelação QAM, combinada com o entrelaçamento independente das componentes dos símbolos a serem transmitidos.

Essa técnica pode melhorar o desempenho de sistemas de comunicações móveis considerando a ausência de erros de estimação da resposta ao impulso (RI). Este artigo apresenta o desempenho da rotação das constelações M-QAM, a escolha do ângulo ótimo para diferentes ambientes e do efeito da rotação sobre a taxa de erro de bits (BER).

2 Rotação da Constelação

O método para reduzir os efeitos dos desvanecimentos é a técnica que consiste em introduzir redundância por meio de uma escolha adequada do ângulo de referência de uma constelação QAM, combinada com o entrelaçamento, independente das componentes dos símbolos a serem transmitidos, que pode ser chamada de diversidade de modulação ou rotação da constelação.

O esquema QAM foi primeiro proposto por C. R. Cahn, em 1960 (CAHN, 1960). Ele estendeu a modulação de fase para modulação em fase com múltiplas amplitudes. Isto é, há mais de uma amplitude associada a uma fase. Neste esquema, o sinal transmitido é dado por

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n p(t - nT_s) \cos(\omega_c t) + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n p(t - nT_s) \sin(\omega_c t) \tag{1}$$

em que,

$$a_n, b_n = \pm d, \pm 3d, \dots, \pm(\sqrt{M} - 1)d$$

$$p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

onde ω_c e A são a frequência e a amplitude da portadora, respectivamente.

Podemos observar a partir da Equação 1 que a informação transmitida em uma componente é independente da informação transmitida na outra. Além disso, a transmissão dos sinais em canais com desvanecimento independente pode introduzir um ganho de diversidade se houver redundância entre as duas componentes. A introdução de redundância no esquema QAM pode ser realizada combinando a escolha do ângulo de referência da constelação de sinais θ , com o entrelaçamento independente das componentes (SLIMANE, 1998).

No processo de entrelaçamento, as componentes em fase e quadratura de um símbolo transmitido são afetados por desvanecimentos independentes. O resultado dessa técnica é aumentar a robustez do receptor em cenários de propagação com profundo desvanecimento. Para a constelação rotacionada, o sinal transmitido pode ser escrito como

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n p(t - nT_s) \cos(\omega_c t) + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} y_{n-k} p(t - nT_s) \sin(\omega_c t) \tag{2}$$

na qual k é um inteiro que representa o atraso (expresso em número de símbolos) introduzido pelo entrelaçamento entre as componentes I e Q . Além disso,

$$x_n = a_n \cos \theta - b_n \sin \theta$$

$$e \quad y_n = a_n \sin \theta + b_n \cos \theta \tag{3}$$

são os novos símbolos QAM.

O ganho de desempenho proporcionado por essa técnica é fundamentado nos picos dos desvanecimentos serem profundos, mas de curta duração, eles podem degradar toda informação (componentes em fase e em quadratura de um símbolo) em uma transmissão convencional. Isto dificilmente ocorre com o uso da constelação rotacionada, pois as componentes de um símbolo são transmitidas em instantes de tempo distintos e existe redundância entre as componentes em fase e quadratura.

O ganho de desempenho obtido quando se utiliza constelações rotacionadas depende da escolha do ângulo de rotação. O ângulo de rotação ótimo depende da modulação escolhida e do tipo de canal. Uma característica interessante desse esquema é que o valor de θ não influencia o desempenho do sistema quando os sinais transmitidos são afetados apenas pelo ruído gaussiano branco (canal AWGN), pois a distância euclidiana entre os símbolos da constelação não depende do ângulo θ .

3 Canal de comunicação com desvanecimento Rice

Em comunicações móveis terrestres o canal de comunicações é constituído por todo o meio físico existente entre o transmissor e o receptor. Quando diferentes componentes de onda incidem sobre o móvel com amplitudes aproximadamente iguais e ângulos de chegadas uniformemente distribuídos devido ao espalhamento sofrido pelo sinal na vizinhança do móvel, o sinal no receptor tem uma envoltória com distribuição *Rayleigh*.

Porém, se houver uma componente incidindo sobre o móvel, diretamente ou por reflexão, com uma potência maior que as demais, então o sinal no receptor tem uma envoltória com distribuição Rice. A componente com potência predominante recebe o nome da componente direta ou componente especular, ou ainda componente LOS.

Essa situação de propagação tem sido comumente observada em ambiente microcelular, podendo ocorrer em macrocélulas quando houver linha de visada na transmissão, em canais de comunicação móvel via satélite, entre outros.

A distribuição Rice é

$$f_{|u|}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A_0^2}{\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA_0}{\sigma^2}\right), r \geq 0 \quad (4)$$

Reescrevendo $f_{|u|}(r)$ como função do valor médio quadrático, b_R e o fator K , tem-se

$$f_{|u|}(r) = \frac{2r(K+1)}{b_R} \exp\left(-K - \frac{r^2(K+1)}{b_R}\right) I_0\left(2r\sqrt{\frac{K(K+1)}{b_R}}\right) \quad (5)$$

$$r \geq 0$$

4 Modelo computacional

Para gerar numericamente os coeficientes do desvanecimento Rice deve-se somar uma componente especular aos coeficientes de desvanecimento Rayleigh. Assim, os coeficientes discretos de desvanecimento Rice podem ser dados por

$$u[n] = L_1(nT_s) + c[n] = A_0 e^{j(\omega_n T_s + \phi_0)} + c[n] \quad (6)$$

Para os parâmetros K e b_R pode-se obter A_0 e σ^2 (SILVA, 2004):

$$A_0 = \sqrt{\frac{K}{K+1}} b_R \quad \text{and} \quad \sigma^2 = \frac{1}{2(K+1)} b_R \quad (7)$$

A partir da Equação (7) são obtidos os fatores do processo gaussiano complexo, dado por $\alpha = X + jY$, em que as componentes real e imaginária apresentam média μ e desvio padrão σ , i.e., $X, Y \sim N(\mu, \sigma^2)$, com média e desvio padrão dado por

$$\mu = \sqrt{\frac{K}{2(K+1)}}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{2(K+1)}} \quad (8)$$

4.1 Estimação do fator K

O fator K foi determinado experimentalmente medindo a resposta de impulso do canal. LECOURS *et al.* (1988) tomaram medidas em Ottawa, Canadá, a 900 MHz, para um raio de 30 km, com uma antena da estação base de 33,5 metros de altura. Quatro tipos de ambiente foram considerados: área aberta, suburbano, baixo e densidade média urbana.

Nesses ambientes, o modelo de canal Rice é mais apropriado para descrever estatisticamente os dados coletados, indicando a presença de um componente especular entre o transmissor e o receptor.

A Tabela 1 reproduz alguns resultados de LECOURS *et al.* (1988), os quais foram usados para determinar os valores de K em diferentes ambientes.

Tabela 1 – Parâmetros estimados para a distribuição de Rice (LECOURS *et al.*, 1988).

Ambiente	A_0	σ	K (dB)
Área aberta	0,9615	0,26910	8,0504
Suburbana	0,9514	0,29960	7,0261
Urbana baixa densidade	0,9256	0,36167	5,1519
Urbana média densidade	0,9022	0,40555	3,9349

5 Avaliação da rotação da constelação

Esta seção apresenta as simulações e a discussão dos resultados obtidos. Na simulação foram considerados a rotação da constelação e seu efeito em canais com diferentes parâmetros de Rice para 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM.

Para realizar a avaliação será analisada primeiro o ângulo ótimo e depois a taxa de erro de bit (BER) para cada esquema de modulação.

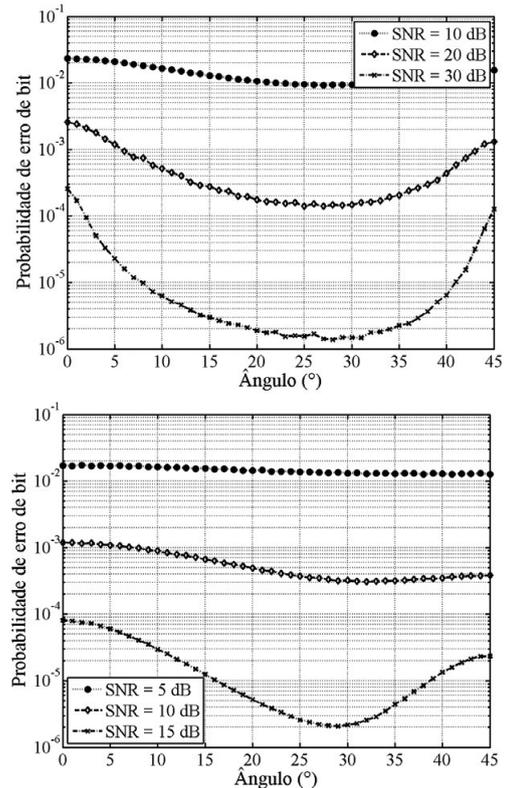
5.1 Avaliação do ângulo ótimo de rotação

Para avaliar o ângulo ótimo na transmissão foram utilizados os esquemas de modulação 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM. Esses esquemas de modulação foram usados por serem os usados no sistema de televisão digital adotado no Brasil (ISDB-Tb – *Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial built-in*) (TAKADA; SAITO, 2006; ABNT, 2007).

Para cada um dos esquemas de modulação foram variados os ângulos de 0 a 45° usando os valores de Rice listados na Tabela 1. A variação do parâmetro K de Rice é referente às diferentes regiões apresentadas na Tabela 1. Para todos os parâmetros de Rice utilizados percebe-se que o ângulo ótimo está na faixa de 27° a 29°, como apresentado na Figura 1.

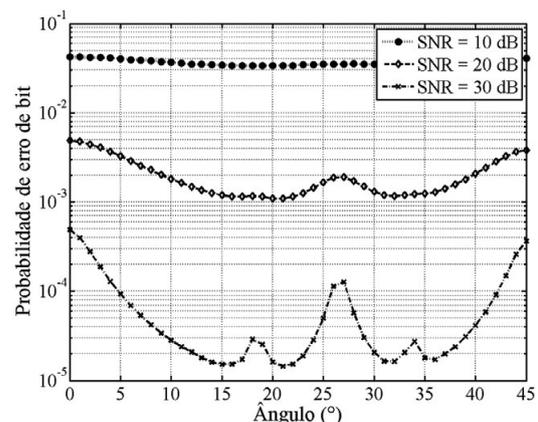
Observando a Figura 1 é possível verificar que com o aumento do fator de Rice, K , sua escolha se torna mais importante. Uma vez que para o $K = 0$ existe uma região de pontos quase plana, enquanto que para os outros valores de K essa região é menor, tornando necessária uma escolha criteriosa do ângulo.

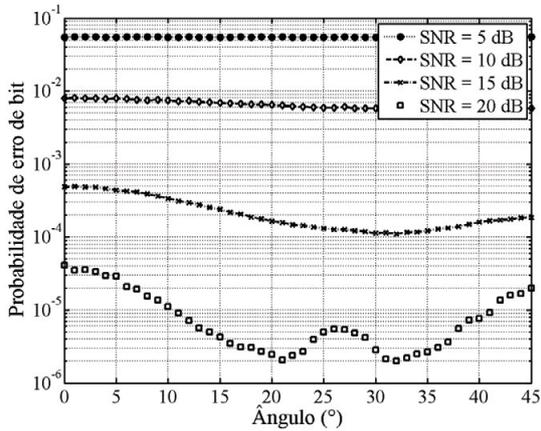
Figura 1 – Gráfico do ângulo ótimo para o esquema de modulação 4-QAM em um canal Rice (primeira para $K = 0$ e segunda para $K = 8, 05$)



No esquema de modulação 16-QAM a variação do parâmetro K de Rice ocorre de acordo com a Tabela 1. Para esse esquema de modulação surgem três regiões com bons desempenhos, descritas na Figura 2. As três regiões são formadas em torno dos ângulos 16,8°, 21° e 32°.

Figura 2 – Gráfico do ângulo ótimo para o esquema de modulação 16-QAM em um canal Rice (primeira para $K = 0$ e segunda para $K = 8,05$)



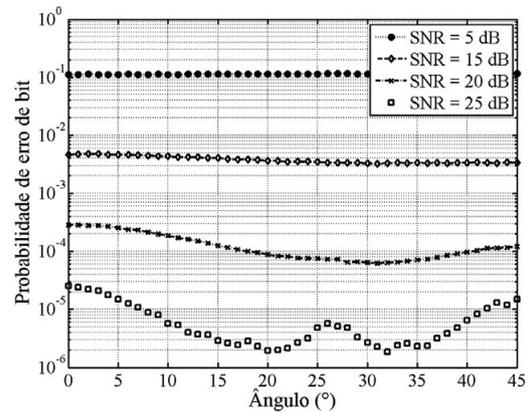
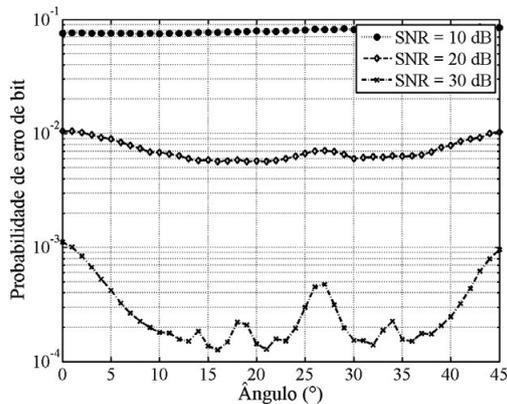


Na medida em que K , na modulação 16-QAM, aumenta, verifica-se que a região do ângulo $16,8^\circ$ não tem um comportamento tão bom quanto em torno de 21° e 32° .

No esquema de modulação 64-QAM a variação do parâmetro K de Rice ocorre de acordo com a Tabela 1. Para esse esquema de modulação a avaliação do ângulo ótimo é semelhante ao do 16-QAM, como é descrito na Figura 3.

Nota-se que com o aumento do K o ângulo de $16,8^\circ$ é adequado para a transmissão com $K = 8,05$, como pode ser visto na Figura 3. Mas a partir de $K = 3,94$, em todos os casos verificados, os ângulos de 21° e 32° têm o melhor desempenho.

Figura 3 – Gráfico do ângulo ótimo para o esquema de modulação 64-QAM em um canal Rice (primeira para $K = 0$ e segunda para $K = 8,05$)



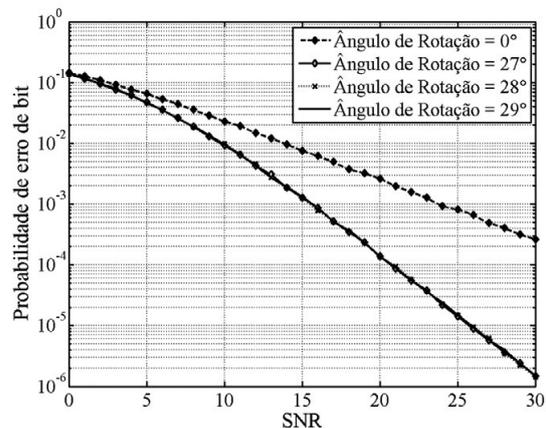
5.2 Avaliação da taxa de erro de bit (BER)

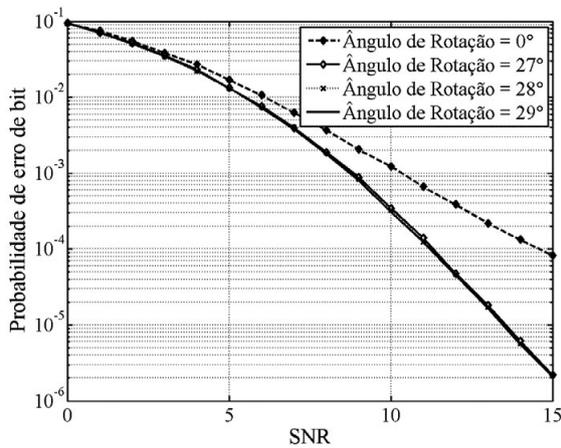
Para uma melhor avaliação do ângulo ótimo para a transmissão, foram traçadas as curvas da BER para os melhores ângulos encontrados. Para que possa ser feita uma comparação com o sistema DVB-T2 (*Digital Video Broadcast Terrestrial*), que já utiliza a rotação da constelação, foram acrescentados os ângulos usados neste sistema.

Para a avaliação da BER do esquema de modulação 4-QAM foram utilizados os valores de K de acordo com a Tabela 1, variando o ângulo de rotação para os valores de 0° , 27° , 28° e 29° , como pode ser visto na Figura 4. O ângulo 0° foi escolhido para que se possa realizar uma comparação com o sistema sem o uso do ângulo ótimo. O ângulo usado no DVB-T2 é de 29° .

Observando a Figura 4 não é possível detectar diferenças entre as curvas geradas com os ângulos de 27° , 28° e 29° . Em relação à transmissão sem a rotação da constelação, o ganho da rotação é de 4 dB para uma SNR de 10 dB.

Figura 4 – Gráfico da BER para o esquema de modulação 4-QAM em um canal Rice (primeira para $K = 0$ e segunda para $K = 8,05$)

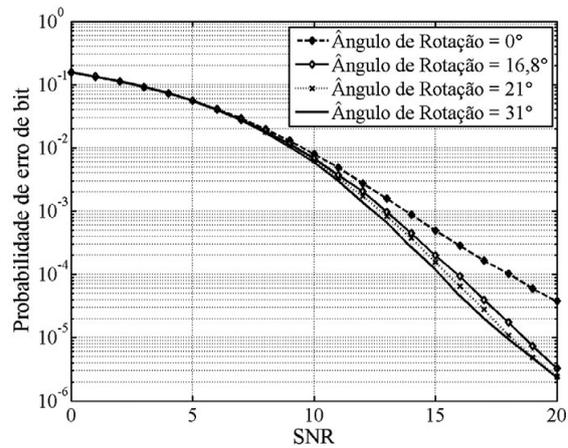
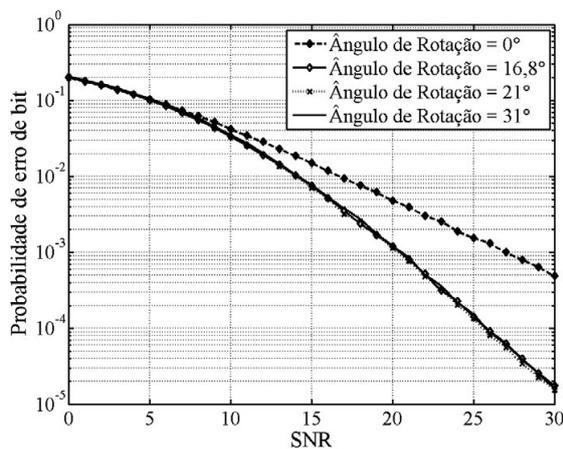




Para a avaliação da BER do esquema de modulação 16-QAM foram utilizados os valores de K de acordo com a Tabela 1, variando o ângulo de rotação para os valores de 0° , $16,8^\circ$, 21° e 31° , como pode ser visto na Figura 5. O ângulo 0° foi escolhido para que se possa realizar uma comparação com o sistema sem o uso do ângulo ótimo. O ângulo usado no DVB-T2 é de $16,8^\circ$.

Observando a Figura 5 não é possível definir o melhor ângulo, no primeiro gráfico, já que todos os ângulos avaliados têm o mesmo comportamento. O ganho do uso da rotação da constelação, ou seja, o ganho do uso de um ângulo diferente de zero, chega a 7 dB para uma SNR de 20 dB.

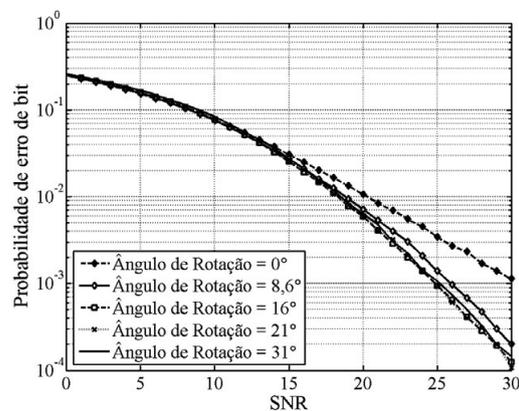
Figura 5 – Gráfico da BER para o esquema de modulação 16-QAM em um canal Rice (primeira para $K = 0$ e segunda para $K = 8,05$)

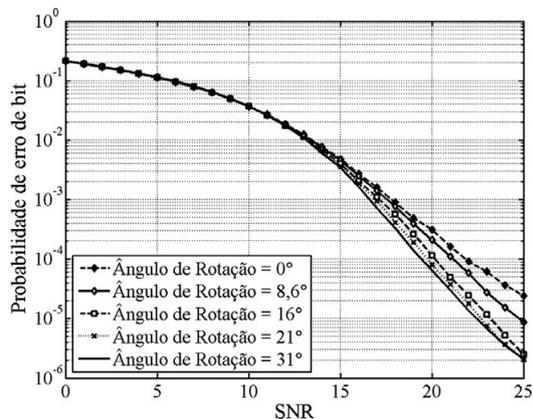


À medida que melhora o canal, ou seja, aumenta-se o K , a curva do ângulo 31° fica melhor que as outras. Assim, este ângulo, que obteve os melhores resultados, obtem um ganho de até 3 dB em relação à curva sem rotação. Observa-se também que as curvas com e sem rotação se diferenciam para SNRs maiores que 12 dB.

Para a avaliação da BER do esquema de modulação 64-QAM foram utilizados os valores de K de acordo com a Tabela 1, variando o ângulo de rotação para os valores de 0° , $8,6^\circ$, 16° , 21° e 31° , como pode ser visto na Figura 6. O ângulo 0° foi escolhido para que se possa realizar uma comparação com o sistema sem o uso do ângulo ótimo. Os ângulos 16° , 21° e 31° foram obtidos pela análise realizada na subseção 5.1. Além desses ângulos foi usado o de $8,6^\circ$, por o usado no DVB-T2 (LECOURS et al., 1988).

Figura 6 – Gráfico da BER para o esquema de modulação 64-QAM em um canal Rice (primeira para $K = 0$ e segunda para $K = 8,05$)





Em todos os casos, o ângulo de 8,6° teve um resultado inferior aos ângulos obtidos na subsecção 5.1 a partir da SNR de 17 dB. Para SNRs menores os resultados se equivalem. A diferença entre o ângulo 31° e o ângulo 8,6° na Figura 6 chega a 2 dB.

Comparando a curva do ângulo 31°, que obteve os melhores resultados, com a curva sem a rotação há um ganho de até 3 dB. Observa-se também que as curvas com e sem rotação se diferenciam para SNRs maiores que 12 dB.

6 Conclusões

Este artigo apresenta a técnica de rotação da constelação, que melhora o desempenho de sistemas de comunicações móveis em canais de comunicações sujeitos aos efeitos do desvanecimento plano.

Os canais de comunicações móveis podem ser diferenciados por existir uma linha de visada (LOS) entre o transmissor e o receptor e a componente de múltiplos percursos, ou só os múltiplos percursos. O sinal recebido com visada direta, além da componente de múltiplos percursos, é conhecido por ter a distribuição Rice.

Neste artigo foi mostrado como é possível encontrar o valor de K para diferentes situações. A estimação do K apresentada leva em consideração a temporada climática, a altura da antena e a largura do feixe da antena. Também foram apresentados os valores de K obtidos por medições em quatro diferentes ambientes.

A partir dessas medições é possível saber o valor de K para os ambientes de área aberta ($K = 8,05$), de área suburbana ($K = 7,03$), área urbana de baixa renda ($K = 5,15$), área urbana de média densidade ($K = 3,93$) e área urbana de alta densidade ($K = 0$).

Os resultados apresentados mostram algumas opções para a escolha do ângulo de rotação para os esquemas de modulação 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM. Para o 4-QAM os melhores resultados foram 27°, 28° e 29°. Para o 16-QAM e o 64-QAM, os melhores resultados foram para os ângulos 16,8°, 21° e 31°.

Como trabalho futuro pretende-se encontrar um modelo matemático que confirme esses resultados. Também será realizado posteriormente a avaliação de outros elementos, como ruído de fase e *Jitter*, para verificar se esses elementos vão interferir na probabilidade de erro do sistema.

REFERÊNCIAS

ABNT, "ABNT NBR 15602-2, Digital terrestrial television – Video coding, audio coding and multiplexing – Part 2: Audio coding," November 2007.

CAHN C.; Combined Digital Phase and Amplitude Modulation Communication Systems. In: **IRE Transactions on Communications Systems**, vol. 8, no. 3, pp. 150–155, september 1960.

DOUKAS A.; KALIVAS G. Rician K Factor Estimation for Wireless Communication Systems. In: **International Conference on Wireless and Mobile Communications**, 2006.

LECOURS M.; CHOUINARD J.-Y.; DELISLE G.; ROY J.; Statistical modeling of the received signal envelope in a mobile radio channel, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, vol. 37, no. 4, pp. 204–212, nov 1988.

SILVA V. A.; **Modelagem Computacional de Canais de Comunicação Móvel**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

SLIMANE S. B.; An Improved PSK Scheme for Fading Channels, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, vol. 47, no. 2, pp. 703–710, May 1998.

TAKADA M.; SAITO M.; Transmission system for ISDB-T, In: **Proceedings of the IEEE**, vol. 94, no. 1, pp. 251–256, Jan. 2006.