

### 3 Modulação e Codificação Adaptativa

Entre as diversas técnicas de melhorias destinadas a aumentar a capacidade dos sistemas de comunicações móveis está a adaptação de enlace. Ou seja, técnicas de adaptação, onde parâmetros de transmissão do sinal (modulação, taxa de código, etc) são dinamicamente adaptados às condições variantes do canal. Uma forma já usual de adaptação de enlace é o controle de potência, cujos benefícios já são bem conhecidos.

Ultimamente, muitas pesquisas têm investigado os efeitos da adaptação de enlace no domínio do tempo, assim como no domínio da frequência e do espaço. Alguns exemplos de técnicas de adaptação de enlace no domínio do tempo são modulação e codificação adaptativa, técnicas de retransmissões automáticas, procura rápida de células, rápido agendamento, etc. A adaptação no domínio da frequência ocorre principalmente em sistemas multi-portadoras. A idéia básica é evitar a transmissão em portadoras com canal ruim e usar modulações com eficiência espectral maiores nas portadoras que possuem um canal melhor. Por sua vez, a adaptação no domínio do espaço pode ser exemplificada por sistemas que utilizam antenas inteligentes, em particular sistemas MIMO (*multiple-input multiple-output*). Esses sistemas usam múltiplas antenas tanto no transmissor como no receptor e conseguem assim obter grande diversidade de transmissão/recepção. Um êxito ainda maior pode ser conseguido através da combinação de algumas ou de todas essas técnicas de adaptação.

Neste capítulo, faremos uma breve apresentação de algumas técnicas de adaptação de enlace existentes. Em seguida, abordaremos a técnica de modulação e codificação adaptativa, explicando seus fundamentos e os critérios existentes para fazer a adaptação.

### 3.1. Técnicas de Adaptação de Enlace

Diversas técnicas de adaptação de enlace têm sido propostas recentemente [13] [14] [18] [19]. As mais importantes serão descritas brevemente a seguir.

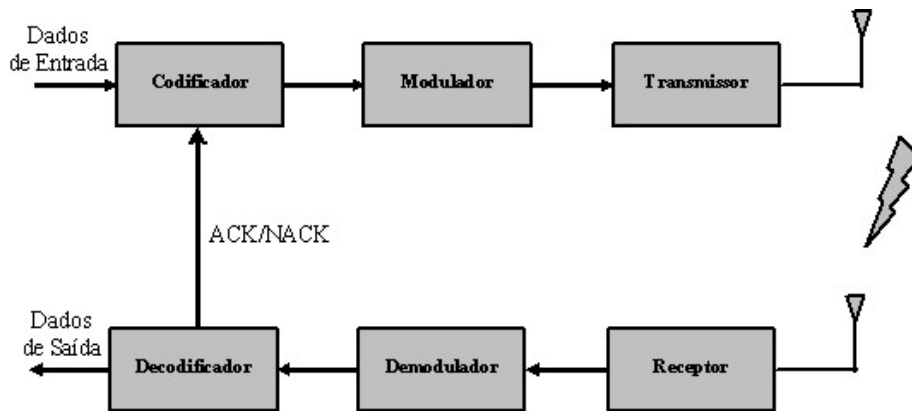


Figura 9: Modelo de um sistema de comunicação digital.

Apresentamos na figura 9 um modelo geral de um sistema de comunicação digital, com o intuito de facilitar o entendimento das diferentes técnicas de adaptação de enlace. Os dados de entrada são gerados a uma taxa  $R_b$  (bit/s), e passam por um pré-processamento que pode incluir formatação de quadros ou pacotes e codificação para detecção e correção de erros. Em seguida, os bits resultantes entram no modulador, cuja finalidade é gerar um sinal analógico adequado à transmissão através do canal. Na sequência tem-se o transmissor que pode simplesmente amplificar o sinal e transmiti-lo, ou criar formas mais elaboradas como a utilização de múltiplas antenas. Estes elementos estão associados a elementos correspondentes no lado da recepção.

O desempenho de um enlace digital é baseado em duas condições básicas, relacionando os principais parâmetros de desempenho. A primeira delas é o limitante na taxa de bits na entrada do modulador, imposto pela faixa  $B$  do canal (limitação de faixa), dado por:

$$R_b \leq LB, \quad (3.1)$$

onde  $L$  é o número de bits por símbolo usado na modulação.

A outra condição (limitação de potência) é o limitante na taxa de bits na entrada do modulador em função da taxa de erro de bit requerida, da potência do sinal no receptor,  $P_s$  e da densidade espectral de potência de ruído no canal  $N_0/2$ , dado por:

$$R_b \leq \frac{P_s}{N_0 \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{req}}, \quad (3.2)$$

onde  $\left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{req}$  é a razão entre a energia por bit e o dobro da densidade espectral de potência de ruído no receptor mínima necessária para se operar à taxa de erro de bit requerida.

A utilização de um código corretor de erro permite reduzir a razão  $E_b/N_0$  requerida para se obter uma determinada taxa de erro de bit. Esta redução está ilustrada na figura 10 e é definida como ganho do código. Por outro lado, o código introduz redundância nos dados, aumentando a taxa de bits na entrada do modulador. Este aumento é dado pela taxa do código,  $R_c$  ( $R_c < 1$ ), ou seja,

$$R = R_b / R_c. \quad (3.3)$$

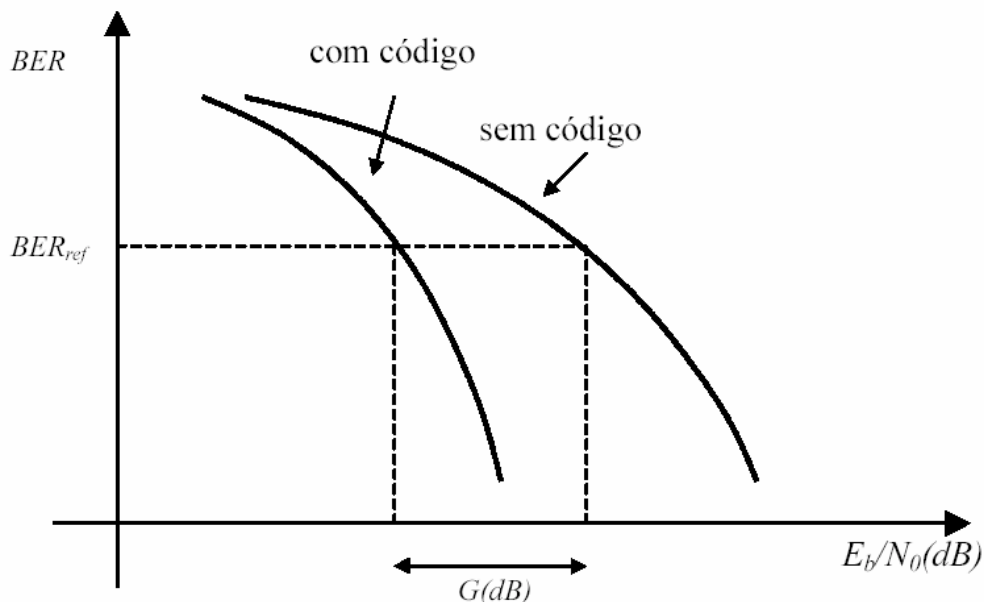


Figura 10: BER x  $E_b/N_0$  com e sem codificação.

Assim, com a utilização de um código corretor de erro de taxa  $R_c$  e ganho  $G$ , as condições definidas anteriormente ficam:

$$R_b \leq R_c LB \quad (3.4)$$

$$R_b \leq \frac{P_s G}{N_0 \left( \frac{E_b}{N_0} \right)_{req}}. \quad (3.5)$$

Quando se utiliza um código corretor de erro, o decodificador procura reproduzir a seqüência de informação a partir dos bits recebidos, mesmo em presença de erros. Quando o número de erros está abaixo de um determinado valor, estes erros são corrigidos e a seqüência reproduzida é correta. Porém quando o número de erros ultrapassa este valor, uma seqüência errada é reproduzida.

Uma alternativa aos códigos corretores de erro, ou FEC (*Forward Error Correction*), é a técnica de retransmissão automática ou ARQ (*Automatic Repeat Request*). Neste caso, utiliza-se um código para detectar se houve erro em um pacote de dados e, havendo erro, uma mensagem de confirmação negativa ou NACK (*Negative Acknowledgement*) é enviada ao transmissor através de um canal de realimentação, como está ilustrado na figura 9. Após a recepção de um NACK, o transmissor transmite novamente a mesma seqüência de informação. Caso o transmissor tenha recebido uma mensagem de confirmação ACK (*Acknowledgement*), que indica que a mensagem foi corretamente recebida, ele transmitirá uma nova seqüência. O grande problema desses sistemas é o atraso introduzido ao sistema.

### 3.1.1. Retransmissão Automática Híbrida (H-ARQ)

Com o intuito de adaptar eficientemente o controle de erro às condições variantes do canal de sistemas de comunicações sem fio, diferentes combinações de FEC e ARQ foram apontadas como uma excelente solução. Enquanto os protocolos ARQ possibilitam a obtenção de baixas probabilidades de erro, através

das retransmissões, os protocolos FEC reduzem o número de retransmissões necessárias. Essas combinações são chamadas de ARQ Híbrido, ou H-ARQ.

Existem vários esquemas diferentes para a implementação do H-ARQ, como por exemplo, a combinação *Chase* e redundância incremental [18] [19].

No esquema de redundância incremental, ao invés de se enviar simples repetições do pacote codificado, informações redundantes adicionais são incrementadas se a decodificação falhar na primeira tentativa, aumentando assim as chances de decodificação correta.

No esquema de combinação *Chase*, retransmissões do mesmo pacote de dados codificado ocorrem. O decodificador do receptor combina essas cópias do mesmo pacote ponderadas pelos valores de RSR (Relação Sinal-Ruído) recebidos até conseguir fazer a decodificação sem falhas. Ou seja, sistemas que utilizam H-ARQ se adaptam às condições do enlace, seja adicionando mais redundância ao próximo pacote a ser enviado, caso o canal esteja ruim, ou fazendo uma ponderação dos pacotes recebidos em função da qualidade do canal.

### **3.1.2. Sistemas MIMO**

Os sistemas MIMO são baseados no conceito de antenas inteligentes (*smart antennas*). Sistemas que utilizam antenas inteligentes podem empregar antenas adaptativas ou antenas com comutação de feixes. No primeiro caso, um arranjo de antenas é usado e as saídas de cada antena são combinadas dinamicamente para se ajustar ao ruído, interferência e múltiplo percurso. No caso da comutação de feixes, o receptor seleciona o feixe que fornece a maior redução de interferência e o maior ganho do sinal. Esse tipo de sistema pode não oferecer o mesmo nível de performance que os sistemas com antenas adaptativas, mas são bem menos complexos.

Antenas inteligentes também podem ser usadas para separar os sinais espacialmente, possibilitando usuários diferentes a operarem na mesma frequência e ao mesmo tempo. Assim como temos sistemas com acesso múltiplo por códigos, frequência e tempo, sistemas com antenas inteligentes também possuem acesso múltiplo por espaço (SDMA).

Um sistema MIMO, como mostra a figura 11, utiliza arranjos de antenas tanto no transmissor como no receptor. Além das possibilidades de combinação no arranjo de recepção usadas nas técnicas usuais de antenas inteligentes, critérios de mapeamento das mensagens aos sinais transmitidos nas diversas antenas transmissoras aumentam o potencial de ganho de desempenho. Duas formas propostas para este mapeamento são o sistema BLAST, onde se procura minimizar a redundância entre os sinais de modo a maximizar a taxa de transmissão, e a codificação espaço-tempo, que procura, ao contrário, introduzir redundância entre os sinais de modo a minimizar a taxa de erro.

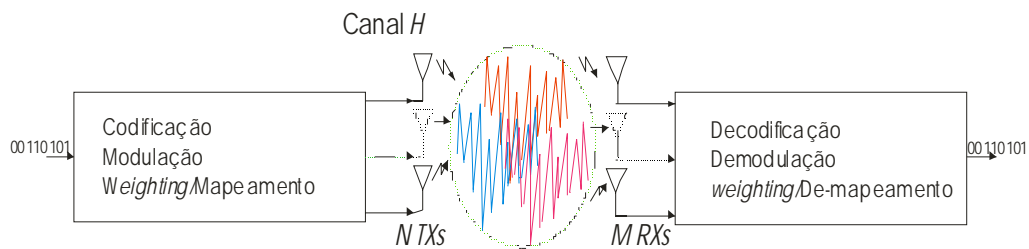


Figura 11: Diagrama de um sistema de transmissão MIMO.

É importante notar que as regras de mapeamento eficiente dos sinais nas antenas transmissoras dependem das características do canal. Ou seja, à medida que o canal varia, pode ser conveniente mudar a regra de mapeamento, o que permite incluir o sistema MIMO no conjunto de técnicas de adaptação de enlace.

### 3.1.3. Sistemas Multi-portadoras

Os sistemas que utilizam várias portadoras possuem adaptação no domínio da frequência. A idéia básica é evitar a transmissão em portadoras com canal ruim e usar modulações com eficiência espectral maiores nas portadoras que possuem um canal melhor.

Transmitir em várias portadoras requer um esquema de mapeamento de bits eficiente. Idealmente, o mapeamento associa um modo de transmissão (técnica de modulação e taxa de codificação) independente para cada portadora. A desvantagem deste método é que, apesar de obter um alto ganho em capacidade,

ele necessita de um bom conhecimento do canal no transmissor, que é obtido através de uma alta carga de sinalização.

Um exemplo de sistema com multi-portadoras é o sistema OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Esse sistema distribui os dados em uma grande quantidade de portadoras ortogonais. Na verdade, um canal de faixa larga seletivo em frequência é convertido em vários canais menores com desvanecimento plano. Os benefícios do OFDM são alta eficiência espectral, boa imunidade à interferência de RF e baixa distorção de múltiplo percurso, o que é extremamente útil e desejável.

OFDM é a técnica de modulação usada pelo padrão de TV digital na Europa, Japão e Austrália. Além disso, ela também é usada em redes locais sem fio (WLAN), ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) e DAB (*Digital Audio Broadcasting*), que é o sistema de áudio do padrão de TV digital europeu DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*).

### 3.2. Modulação e Codificação Adaptativa

O canal de um sistema de comunicação sem fio é variável no tempo devido a desvanecimentos e condições de interferência diferentes. Técnicas de modulação e codificação adaptativa (MCA) exploram justamente essas variações temporais a fim de maximizar a taxa de dados que podem ser transmitidas nesse canal de uma maneira eficiente. Uma questão que pode surgir é quanto à necessidade de se adaptar a potência do sinal ao mesmo tempo em que adaptamos a modulação e a taxa de códigos. Conforme ilustrado no apêndice A, a eficiência espectral de um sistema que utiliza as técnicas MCA com e sem potência adaptativa permanece praticamente a mesma. Dessa maneira, abordaremos apenas a modulação e codificação adaptativas, sem levar em conta a potência.

Técnicas de modulação e codificação adaptativa (MCA) são aplicadas principalmente em sistemas de dados sem fio que, diferentemente de sistemas de voz, não requerem uma taxa de dados constante. Isso possibilita aumentar a taxa de bits durante o período em que o canal está bom e alcançar uma vazão maior.

Essas técnicas foram introduzidas em sistemas celulares, como o sistema EDGE, por exemplo. Em termos práticos, os valores dos parâmetros de transmissão são organizados e agrupados em modos de transmissão. No EDGE, por exemplo, existem 9 modos de transmissão: 5 com modulação 8-PSK e taxas de código de 0,37 a 1, e 4 com modulação GMSK e taxas de códigos de 0,53 a 1. Esses diferentes modos de transmissão fazem com que a taxa máxima de transmissão varie de 8,8 a 59,2 Kbps em cada janela de tempo. Cada modo de transmissão é usado em situações diferentes do canal, uma vez que cada um tem taxa de dados e requisito de qualidade diferentes. A idéia é que a transmissão seja feita sempre no modo mais eficiente.

Recentemente, técnicas MCA foram propostas para a terceira geração de telefonia móvel *cdma2000 1xEV-DO*, ou HDR. Com o intuito de maximizar a vazão e usar com maior eficiência possível a banda disponível, as taxas de transmissão e recepção do HDR mudam continuamente à medida que as condições do canal variam. As taxas de dados do HDR variam desde 9,6 Kbps a 2,4576 Mbps.



### 3.2.1. Análise de Desempenho

Vamos agora fazer uma modelagem analítica da eficiência espectral de um sistema adaptativo. Para isto, vamos utilizar os limitantes da eficiência espectral obtidos em (3.1) e (3.2). Códigos corretores de erro serão desconsiderados nessa abordagem.

Notando que a eficiência espectral pode ser definida como a razão  $R/B$  e que  $\frac{P_s}{N_0} = RSR \times B$ , podemos escrever:

$$\frac{R_b}{B} \leq L \quad (3.6)$$

$$\frac{R_b}{B} \leq \frac{RSR}{\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req}}. \quad (3.7)$$

Observa-se que para RSR baixa prevalece a equação (3.7) até um valor máximo a partir do qual o limitante passa a ser (3.6). Na figura 12, curvas resultantes da combinação destes limitantes são apresentadas para as modulações QPSK, 8-PSK, 16-QAM e 64-QAM. A taxa de erro requerida é  $(BER)_{req} = 10^{-3}$ , o

que corresponde a  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} = 6,7895$  dB para a modulação QPSK,

$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} = 10,0102$  dB para a modulação 8-PSK,  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} = 10,5224$  dB para a

modulação 16-QAM e  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} = 14,7675$  dB para a modulação 64-QAM.

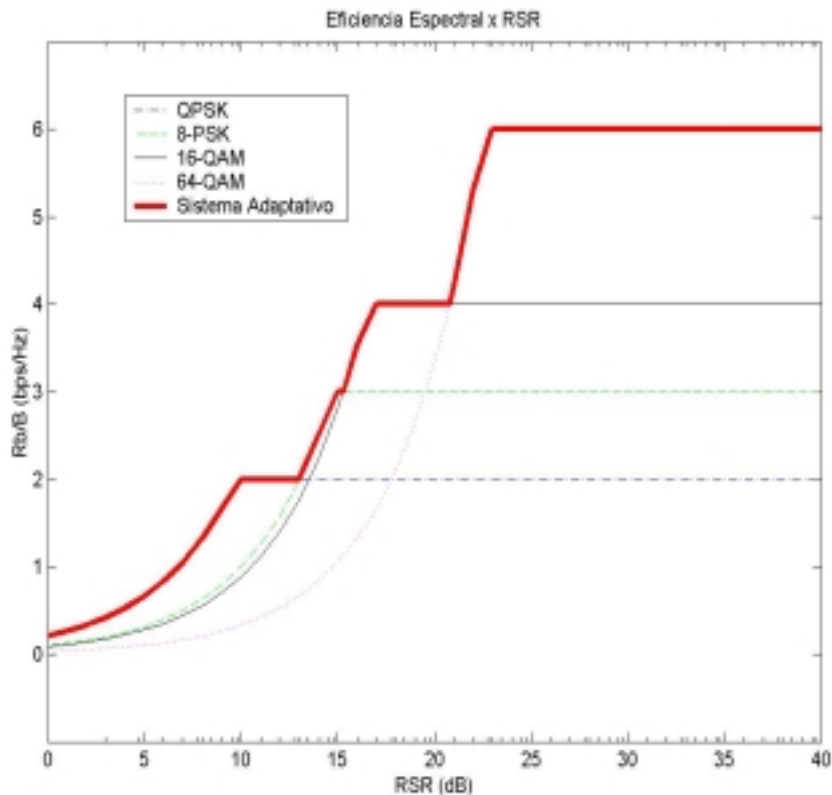


Figura 12: Eficiência espectral para várias modulações diferentes em função de RSR.

Um sistema que não utiliza técnicas MCA tem que funcionar também em situações onde a qualidade do canal é ruim. Com isso, ele é modelado para o pior caso de capacidade, obtendo uma máxima cobertura. Um sistema deste tipo está ilustrado na figura 12 pela linha correspondente à curva da modulação QPSK. No entanto, quando o canal está bom, ele continua transmitindo numa modulação de baixa eficiência espectral, deixando de se beneficiar da boa qualidade do canal.

Por sua vez, a linha mais grossa mostrada na figura 12 representa o potencial da eficiência espectral de um sistema que utiliza as técnicas MCA obtida com as diferentes modulações. Cada modulação é ideal para diferentes regiões de qualidade (diferentes valores de RSR) e sistemas que utilizam as técnicas MCA selecionam a modulação com maior eficiência espectral em cada momento. Vemos na figura 12 que a performance dos dois sistemas é igual até  $RSR = 13$  dB, mas a partir daí a eficiência espectral do sistema adaptativo pode chegar a até 3 vezes a do sistema não adaptativo.

Convém mencionar que a eficiência espectral de um sistema mais realístico não se comporta de forma contínua como a mostrada na figura 12. Na verdade, ela assume valores discretos, com o número de níveis igual ao número de modos de transmissão. No final, é feita uma média ponderada desses valores para se obter a eficiência espectral resultante.

### 3.2.2. Critérios de Adaptação de Enlace

O diagrama de fluxo básico de um sistema que utiliza técnicas de adaptação de enlace está ilustrado na figura 13.

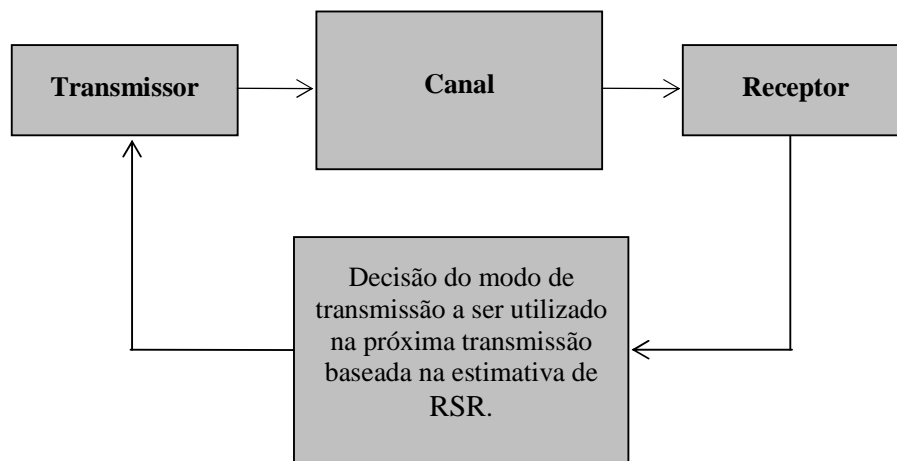


Figura 13: Diagrama de fluxo básico de um sistema adaptativo.

Vemos, a partir da figura 13, que o transmissor necessita constantemente de informação do receptor, a fim de escolher o modo de transmissão do próximo quadro. A informação enviada pelo receptor pode ser tanto a qualidade do canal, deixando a decisão para o transmissor, quanto o modo de transmissão já selecionado. Em qualquer dos casos, o modo de transmissão escolhido depende da estimativa da qualidade do canal no receptor. As principais medidas de qualidade do canal são a taxa de erro de quadro (FER), taxa de erro de bit (BER) e RSR.

Idealmente, uma boa estimativa do valor de RSR deve ter as seguintes propriedades:

- Ser independente da frequência de Doppler
- Ser independente do modo de transmissão utilizado

- Ser estimável usando um pequeno número de amostras
- Prover uma estimativa precisa da qualidade do canal na presença de ruído e interferência

O exemplo da figura 13 é considerado ideal, uma vez que ele assume que o esquema de modulação é perfeitamente adaptado ao valor de RSR, e que a probabilidade de erro como função de RSR é conhecida com exatidão. Esse modelo ideal só pode ser aplicado se o canal considerado for RAGB, com realimentação instantânea da medida do canal. Entretanto, na prática, temos um atraso no caminho de realimentação. Neste caso, devemos utilizar as estatísticas de segunda ordem e de ordens mais elevadas para melhorar a estimativa e, por consequência, a adaptação, como veremos a seguir.

### **3.2.2.1. Adaptação Baseada no RSR Médio**

Para implementar transmissão adaptativa, a informação da qualidade do canal (RSR) deve estar disponível no receptor ou no transmissor, como já mencionado. Ela geralmente encontra-se no receptor, como ilustrado em [5]. Neste caso, os passos para adaptação podem ser resumidos em:

- Medir o valor de RSR no receptor;
- Converter este valor de RSR em BER para cada modo de transmissão candidato;
- Baseado no BER requerido, selecionar para cada medida de RSR instantâneo o modo de transmissão que fornece a maior vazão sem ultrapassar o requisito de qualidade;
- Enviar o modo selecionado para o transmissor.

Se considerarmos um sistema ideal, a implementação de todos estes passos é direta. Se o canal considerado não for RAGB e tiver desvanecimento, a conversão de RSR para BER só será válida se o RSR for medido num intervalo de tempo muito pequeno, a ponto de podermos considerar o canal constante durante

este intervalo. Fazendo esta consideração, podemos fazer a conversão de RSR para BER através das curvas de probabilidade de erro para um canal RAGB.

### **3.2.2.2.**

#### **Adaptação Baseada em Estatísticas Múltiplas do RSR**

Porém, se o canal tiver desvanecimento durante o intervalo de tempo de medição do valor de RSR, as curvas de um canal RAGB não poderão ser usadas para a conversão de RSR para BER. Nesse caso, limitações de implementação e atrasos de realimentação fazem com que a taxa de adaptação seja menor do que o tempo de coerência do canal. A solução deste problema é o uso de estatísticas de ordem 2 e superior do RSR recebido, ao invés do RSR médio.

Quando o canal varia durante o intervalo de medição do RSR, a conversão de RSR para o BER médio é determinada usando a função densidade de probabilidade (pdf) do RSR neste intervalo de tempo. No entanto, como esta pdf não pode ser obtida através de uma simples análise em canais reais, porque é uma função de vários parâmetros [5], podemos simplificar o problema estimando informações de estatística limitada da pdf, como o momento de ordem  $k$ , por exemplo, além da média (momento de 1ª ordem). Quanto mais momentos forem estimados, mais precisa será a estimativa da pdf, porém teremos um maior trabalho computacional.

Esse modelo baseado nos momentos do RSR recebido é válido para qualquer condição de canal: qualquer valor de espalhamento Doppler e espalhamento de atraso, além de ser válido para sistemas MIMO também, sem qualquer restrição quanto ao número de antenas transmissoras e receptoras.