

## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

### Capítulos 1 a 3

Notação e Convenções:

- Modelo simplificado de perda de percurso:  $L(d)=L(d_0) + 10n \log (d / d_0)$ ,  $d$ : distância transmissor-receptor,  $d_0$ : distância de referência;  $n$ : expoente de perda de percurso.
- Em todas as questões nem todos os efeitos de propagação são considerados ao mesmo tempo. O(a) estudante deve trabalhar com os dados fornecidos.
- $G_t$ : ganho da antena de transmissão em dBi;  $G_r$ : ganho da antena de recepção em dBi;  $\sigma$ : desvio padrão do desvanecimento de larga escala (sombreamento) em dB.
- $P_a$ : potência elétrica de alimentação no transmissor

1. Em uma área rural, duas estações rádio base (ERB1 e ERB2) cobrem um segmento reto de uma rodovia. Um terminal móvel se desloca sobre a rodovia, no segmento que liga a ERB1 à ERB2, com velocidade uniforme de 90 km/h, enquanto mantém uma chamada servida pela ERB1. A direção de movimento é tal que o móvel se afasta de ERB1 enquanto se aproxima de ERB2. As duas ERBs estão distantes 2 km. Quando o móvel está a 500m da ERB1, a intensidade de sinal é de -100 dBm. O nível mínimo de sinal necessário para manter a chamada é -120 dBm. Perguntas: (i) em qual distância máxima  $d$  sobre o segmento da rodovia deve ocorrer um *handoff* da chamada de ERB1 para ERB2 (considere a ERB1 posicionada em  $d=0$ ). (ii) considerando que o sistema celular leva 5 segundos para processar todas as informações e efetuar o *handoff*, sugira o valor mínimo de um limiar de iniciação do processo de *handoff* (em dBm) para evitar a queda da chamada. Considere que neste ambiente de propagação o expoente de perda de percurso vale  $n=4$ , podendo-se utilizar um modelo simplificado de perda de percurso.
2. Em um sistema de telefonia móvel a relação sinal-ruído (SNR) mínima para recepção com boa qualidade é de 10 dB. Foi medido que a potência de ruído térmico no telefone móvel é de -120 dBm. Considere ainda os seguintes parâmetros: (a) ganhos das antenas transmissora e receptora: 3 dBi; (b) frequência de operação: 800 MHz; (c) altura da antena da estação base: 20m; (d) altura da antena da estação móvel: 1,5 m; (e) potência de alimentação na antena da base: 1 W. Calcule o alcance de um sinal de rádio realizado nestas condições utilizando: (i) o modelo de propagação do espaço-livre (ii) o modelo de propagação de 2 raios (iii) o modelo COST231-Hata para cidade grande.
3. Em uma área rural plana é estabelecido um enlace ponto a ponto, em cuja região geográfica podemos aplicar o modelo de propagação de dois raios, visando modelar os efeitos da perda de percurso. A distância entre as antenas transmissora e receptora é inicialmente de 1200 m. A altura da torre da antena transmissora é de 10 m e da antena receptora é de 5 m. A frequência de transmissão é de 450 MHz. Posteriormente verificou-se a necessidade de mudar a localização do ponto de recepção cuja distância passará a ser de 2400 m. Determine se é



possível manter a mesma potência de recepção da situação original com a montagem de novas torres e quais seriam possíveis valores para as respectivas alturas. A altura máxima de uma torre na região, devido à carga de vento, é de 40 m.

4. Considere que a potência recebida em um sistema de comunicações móveis segue o modelo simplificado mais uma variação aleatória log-normal. O expoente de perda de percurso foi estimado em  $n=4$ . Através de medidas verificou-se que a potência média recebida a uma distância de 1m do transmissor valia 1 mW. Além disso tais medidas também revelam que, a uma distância de 10m do transmissor, 10% das medidas mostraram potência superior a -30 dBm. Com base nestas informações estime o valor do desvio-padrão da distribuição normal (em dB) correspondente assumida para o desvanecimento de larga escala neste ambiente.
5. Sejam dados:  $p_a=15$  W,  $G_t=12$  dBi,  $G_r=3$  dBi. Seja a potência de ruído térmico no receptor -120 dBm. Qual o máximo raio de célula para o qual uma relação sinal-ruído (SNR) de 20 dB pode ser garantida em 95% do perímetro da borda da célula? Assuma  $n=4$ ,  $\sigma=8$  dB,  $f=900$  MHz. Calcule uma perda de percurso de referência média em  $d_0=1$  km utilizando o modelo de perda de percurso COST231-Hata sabendo-se que a altura da antena da ERB é de 20 m e a altura da antena do terminal móvel é de 1,8 m. O ambiente em questão é de área suburbana de uma cidade.
6. Sejam dados:  $p_a=10$  W,  $G_t=10$  dBi,  $G_r=0$  dBi. Seja a potência de ruído térmico no receptor -120 dBm. Qual a percentagem do contorno de uma célula com 10 km de raio no qual uma SNR mínima de 15 dB é verificada? Considere  $n=4$ ,  $\sigma=8$  dB,  $f=900$  MHz. Utilize o modelo de perda de percurso de COST231-Hata para calcular a potência média recebida em  $d=10$  km. A altura das antenas da ERB e do móvel são as mesmas do exercício anterior. O ambiente em questão é de cidade grande.
7. Seja a tabela abaixo o resultado de uma campanha de medidas:

Distância	Potência Recebida
100 m	-10 dBm
500 m	-35 dBm
1000 m	-56 dBm
2500 m	-63 dBm
3000 m	-74 dBm

- a) Encontre o valor do expoente  $n$  no modelo de perda de percurso simplificado de forma a minimizar o erro quadrático médio.
- b) Calcule o desvio padrão das estimativas.
- c) Estime a potência média recebida em  $d=2$  km a partir do modelo adotado.



- d) A proporção da borda de uma célula hipotética com raio  $R=4$  km na qual a potência recebida encontra-se acima de  $-80$  dBm. Utilize o desvio padrão calculado no item b para modelar o desvanecimento de larga escala como log-normal.
8. Uma operadora de telefonia celular pretende cobrir uma grande cidade com área de  $2500 \text{ km}^2$  usando ERBs com  $p_a=20 \text{ W}$  e  $G_t=3 \text{ dBi}$ . Os terminais móveis têm  $G_r=0 \text{ dBi}$ . Determinar o número de ERBs omnidirecionais necessárias para cobrir a cidade quando é esperado que 90% da periferia das células experimente cobertura de sinal a  $-90 \text{ dBm}$ . Assuma  $\sigma=8 \text{ dB}$  e  $f=900 \text{ MHz}$ . O modelo de COST231-Hata é válido neste ambiente. Você pode calcular uma potência média de referência em  $d_0=1 \text{ km}$  usando os seguintes parâmetros:  $h_b=20 \text{ m}$ ,  $h_m=1,8 \text{ m}$ .
9. Considere uma situação de propagação em ambiente interior (*indoor*). A antena transmissora encontra-se inicialmente fora da edificação e a perda de penetração estimada é  $30 \text{ dB}$ . O receptor encontra-se no piso térreo e o caminho do sinal até o mesmo atravessa uma partição horizontal e uma vertical cuja perda estimada é de  $15 \text{ dB}$  por partição. A antena transmissora encontra-se a  $500 \text{ m}$  da parede externa da edificação, sendo a frequência de operação  $f=900 \text{ MHz}$ ,  $h_b=20 \text{ m}$ ,  $h_m=1,8 \text{ m}$ , podendo-se utilizar o modelo de COST231-Hata urbano para calcular uma perda de percurso de referência. Internamente à edificação a perda de percurso é proporcional a  $d^{-2,5}$  além das perdas de penetração e partição já mencionadas. A distância interna entre a parede interna do edifício e o receptor é de  $10 \text{ metros}$ . Calcule a perda de percurso total nesta situação entre o transmissor e o receptor.
10. O provimento de cobertura celular em áreas rurais e remotas é um desafio para países como o Brasil, de grande extensão territorial. Considere uma situação em que um assinante de serviço de comunicação móvel encontra-se a  $10 \text{ km}$  da ERB. Faça uma análise dos enlaces de descida e de subida considerando os seguintes parâmetros: potências EIRP:  $37 \text{ dBm}$  na ERB;  $27 \text{ dBm}$  no TM; despreze demais ganhos e perdas no transmissor e no receptor; a potência do ruído térmico vale  $P_n=-120 \text{ dBm}$ ; perda de percurso pode ser modelada como  $L(d)=120+30\log(d)$ , sendo  $d$  a distância ERB-TM em [km]; a razão sinal ruído mínima para estabelecer o enlace é  $5 \text{ dB}$ . Analise o equilíbrio de desempenho entre os enlaces de subida e de descida. A operadora pode instalar, quando necessário, um repetidor (*relay*) que regenera o sinal da ERB ou do TM, transmitindo-o novamente em posição mais favorável. Suponha que o *relay* opera com mesma potência EIRP do TM. Nessas condições avalie a necessidade de instalar um *relay* para atuar em um dos enlaces. Além disso, determine uma distância ou faixa de distâncias para a instalação do *relay* de forma a beneficiar a comunicação rural em questão.
11. Um terminal móvel encontra-se na fronteira entre duas células vizinhas de mesmo tamanho e realiza um procedimento de varredura em frequência para determinar se há possibilidade de conexão em nível de sinal apropriado, com pelo menos uma delas. O nível mínimo de sinal para conexão é  $-100 \text{ dBm}$ . De acordo com a análise de enlace realizada pela operadora, o nível médio de potência recebido na borda de uma célula neste sistema é de  $-94 \text{ dBm}$ . Considerando que os dois enlaces móvel-base para cada célula são independentes e o desvio padrão do



sombreamento nesta região é de  $\sigma = 6$  dB, e considerando ainda que só existam estas duas ERBs disponíveis para conexão, a) qual a probabilidade que este terminal fique fora de serviço ? b) qual o nível médio de potência de recepção necessário para garantir a mesma probabilidade do item anterior, considerando que só houvesse uma única ERB ? c) como interpretar a diferença entre os níveis de médios de potências observado na situação com 2 ERBs e na situação com 1 ERB ?

12. Refaça a questão anterior considerando agora que o terminal móvel encontra-se na fronteira comum de 3 células e equidistante das 3 ERBs correspondentes. Demais parâmetros e condições são os mesmos da questão anterior.
13. Um sistema móvel celular é montado em uma pequena cidade com o intuito de prover serviço de acesso à internet por banda larga móvel. Vislumbra-se o uso em terminais estacionários como computadores portáteis e do tipo *tablet*. Uma única célula foi instalada visando cobrir toda a área do município. O sistema provê degraus de taxa no enlace de descida de acordo com um esquema de modulação e codificação adaptativa. Uma aproximação razoável da taxa bruta de *download* desse sistema é dada pela função  $R(\text{SNR})=\text{SNR}/5$  [Mbps], sendo  $\text{SNR}>0$  [dB] a razão sinal ruído. A transmissão é interrompida se  $\text{SNR}\leq 0$ . A taxa máxima do sistema satura em 10 Mbps. A operadora do serviço precisa dimensionar o raio de célula para fins de informação oficial à agência reguladora. Esta por sua vez requer que a taxa mínima oferecida para que se considere o serviço como de banda larga seja de 600 kbps. Esta vazão precisa ser observada em pelo menos 98% do perímetro definido como sendo a borda da célula. Considerando que o ambiente de propagação é caracterizado por uma perda de percurso que segue o modelo simplificado com  $n=3,5$  e o desvio padrão do desvanecimento de larga escala na região é assumido em  $\sigma = 8$  dB, dimensione o raio da célula a ser informado. Outras informações do projeto: potência do amplificador da antena transmissora: 20 W; ganho da antena transmissora: 10 dBi; ganho da antena receptora e demais perdas e ganhos de transmissão e recepção: 0 dB; potência de referência medida a uma distância de 100 m da antena transmissora:  $P_r(100 \text{ m}) = -45$  dBm; potência do ruído térmico no receptor: -110 dBm.

## Capítulo 4

14. Uma operadora de serviço de telefonia móvel realiza um planejamento inicial do posicionamento das ERBs do sistema baseando-se num expoente de perda de percurso estimado  $n=4$ ; isto é: a potência média recebida é proporcional a  $d^n$ . Nestas condições a operadora opta por um padrão de reuso de  $N=7$  células omnidirecionais por *cluster*. Uma campanha de medidas posterior mostra que um expoente de perda de percurso  $n=3$  explica com mais precisão a relação da potência recebida com a distância. Qual o impacto que esta nova informação pode trazer no planejamento da rede de telefonia celular desta operadora, especificamente no que se refere à escolha do padrão de reuso?
15. Considere um cenário onde dois terminais móveis (TM1 e TM2) co-canais transmitem para suas respectivas ERBs (ERB1 e ERB2) no enlace reverso. A potência transmitida é de 100 mW. A largura de banda do sinal é 200 KHz e a densidade espectral de potência do ruído é de



-166 dBm/Hz. A atenuação do sinal pode ser modelada tendo a potência de sinal na recepção proporcional a  $d^{-3,5}$ . As distâncias envolvidas são as seguintes: ERB1-ERB2=1000m; TM1-ERB1=400m; TM2-ERB2=100m; TM1-ERB2=600m; TM2-ERB1=900m. Considerando os enlaces de interesse como sendo TM1-ERB1 e TM2-ERB2, calcule, para cada enlace, a razão sinal-ruído mais interferência (SINR) em dB. Dado: a perda de percurso numa distância de 1 km é estimada em 120 dB. Despreze outros ganhos e perdas nos enlaces.

16. Um sistema de telefonia móvel celular está sendo projetado para servir uma região de 3000 km<sup>2</sup> com 4,7 milhões de habitantes. Estima-se que 1% da população utilizará o serviço de voz desta operadora específica. No projeto do sistema é estimado que cada usuário gerará um tráfego de 0,1 Erl. O sistema deve operar em modo full-duplex/FDD e a banda total disponível para implantar o sistema é de 8,4 MHz. Cada canal ocupa largura de faixa de 30 KHz onde é possível alocar até 3 usuários com múltiplo acesso TDMA. Foi especificada uma probabilidade de bloqueio de 2% e um padrão de reuso de frequência de 7 células omnidirecionais por *cluster*. Supõe-se também que todas as células têm as mesmas dimensões e que cada célula retirará um canal de 30 KHz para controle. Nessas condições, admitindo-se distribuição uniforme do tráfego por toda a região e supondo tráfego regido pela teoria Erlang-B, calcule o número de células necessário para atender a demanda de tráfego
17. Você foi designado para projetar um sistema de transmissão sem fio de 4<sup>a</sup> geração. Trata-se de um sistema voltado exclusivamente para transmissão de dados sem fio. A taxa de transmissão em uma ERB no enlace de descida deste sistema é função da razão sinal-ruído (SNR, em dB) e pode ser aproximada pela seguinte expressão:  $R(SNR)=SNR$ , para  $0 \leq SNR \leq 50$  dB;  $R(SNR)=0$ , para  $SNR < 0$  dB;  $R(SNR)=50$ , para  $SNR > 50$  dB, em que R é a taxa de transmissão em Megabits por segundo. Nesta primeira etapa do projeto uma única ERB será instalada no centro de uma cidade pequena e objetiva cobrir uma área circular de 10 km de raio. A Prefeitura da cidade está contratando o serviço e quer saber de antemão de você: (i) qual a taxa média observada na periferia da cidade (borda da célula); (ii) qual a taxa média observada em toda a área coberta. Dados para o projeto: perda de referência em  $d_0=1$ km é 120 dB; potência de ruído térmico  $P_n = -120$  dBm; modelo de propagação simplificado com  $n=3,5$ ; potência EIRP de transmissão da ERB  $p_t=20$ W. Despreze outros ganhos, perdas e interferências.
18. Um sistema móvel celular é instalado em uma cidade de médio porte com o intuito de prover serviço de acesso à internet por banda larga móvel. Vislumbra-se o uso do serviço em terminais estacionários como computadores portáteis e do tipo *tablet*. Ao todo 3 células omnidirecionais foram instaladas visando cobrir toda a área do município. Para efeito de planejamento, as células são modeladas no formato hexagonal. Cada célula tem raio de 2 km. O sistema provê degraus de taxa de acordo com um esquema de modulação e codificação adaptativa. Uma aproximação razoável da taxa bruta no enlace de descida deste sistema é dada por:  $R(\gamma)=B \log_2(1+\gamma)$  [Mbps], sendo  $\gamma$  a razão sinal-ruído mais interferência no ponto de recepção e B a banda de transmissão em MHz. A taxa máxima de transmissão satura em 10 Mbps. A operadora do serviço dispõe de uma banda de 3 MHz para operar o sistema. Visando uma estratégia de máxima capacidade, a operadora decide inicialmente aplicar reuso unitário de frequência nas



3 células. A operadora precisa informar à agência reguladora qual a taxa de transmissão de dados média de pior caso observada quando um único terminal está ativo, no enlace de descida, conectado a uma das 3 ERBs, e situado no ponto de intersecção das bordas das 3 células, considerando-se que as 3 ERBs encontram-se transmitindo ao mesmo tempo com a mesma potência. Considere ainda que o ambiente de propagação é caracterizado por uma perda de percurso que segue o modelo simplificado com  $n=4$ . Outras informações sobre o enlace de rádio de todas as ERBs: potência do amplificador da antena transmissora: 20W; ganho da antena transmissora = 10 dBi; ganho da antena receptora e demais perdas e ganhos de transmissão e recepção: 0 dB; potência de referência medida a uma distância de 100m da antena transmissora:  $P_r(100m) = -45$  dBm; potência do ruído térmico no receptor: -110 dBm.

19. Retome a questão anterior. Pense em uma abordagem alternativa de planejamento para aquela cidade. Considere alternativas em termos de padrão de reuso e padrão de radiação das antenas. Defina uma abordagem alternativa de implantação do sistema e resolva novamente a questão. Compare a taxa média de transmissão de dados obtida na nova abordagem com aquela observada na questão anterior e tire conclusões sobre os compromissos envolvidos em cada uma.
20. Uma célula com antena omnidirecional dispõe de 72 canais de tráfego de voz. Posteriormente seu esquema de antenas foi alterado para 3 setores de  $120^\circ$  com a correspondente divisão dos canais igualmente entre os setores. Posteriormente seu esquema de antenas foi novamente alterado para 6 setores de  $60^\circ$  com a correspondente divisão dos canais igualmente entre os setores. Calcule a capacidade de tráfego *por célula* em Erlangs em cada cenário. Considere probabilidade de bloqueio  $P_b = 2\%$ .
21. Em sistemas celulares com tecelagem hexagonal, as camadas (ou “anéis”) de interferentes têm formato também hexagonal. Observe ainda que a  $i$ -ésima camada interferente tem  $6i$  interferentes considerando antenas omnidirecionais. Considere como simplificação que a distância entre o usuário na borda da célula e as células co-canais da camada  $i$  é igual a  $iD$ , em que  $D$  é a distância de reuso. Use um modelo de perda de percurso simples do tipo  $L(d)=kd^n$  em que  $d$  é a distância transmissor-receptor e  $k$  uma constante. Suponha, por simplicidade, que a potência de transmissão e ganhos de antenas são normalizados para 1 para todas as ERBs e terminais.
  - a. Nestas condições demonstre que a interferência experimentada no enlace de descida por um terminal móvel na borda da célula central quando temos  $C$  camadas interferentes é igual a  $\frac{6}{(3N)^{n/2}} \sum_{c=1}^C \frac{1}{c^{n-1}}$ .
  - b. Para que valor converge a razão encontrada no item (a) quando o número de camadas tende a infinito com  $n = 4$ ?
  - c. Calcule a razão entre a interferência causada pelas 2 primeiras camadas em relação a interferência total quando  $n = 4$ . O que este resultado sugere?
  - d. Refaça o item b quando  $n = 2$ . O que se pode concluir?
22. Em algumas rodovias de grande porte (longos trechos retilíneos), o planejamento de um sistema de telefonia celular toma a forma particular de um sistema unidimensional em que as



células são segmentos de reta de mesmo tamanho. Assume-se que no ambiente a potência recebida é proporcional a  $d^{-n}$ , onde  $d$  é a distância base-móvel e  $n$  é o expoente de perda de percurso. Considerando o enlace de descida, resolva as seguintes questões assumindo ser  $R$  o raio da célula e  $N$  o padrão de reuso:

- a. Defina valores factíveis para o padrão de reuso  $N$ .
  - b. Ilustre a organização das co-células para alguns valores de padrões de reuso  $N$ .
  - c. Identifique os anéis de interferência.
  - d. Estabeleça valores exatos para a distância das co-células.
  - e. Ache uma expressão para a SIR (razão sinal interferência) de pior caso (móvel na borda da célula central) considerando um número arbitrário de anéis de células interferentes.
  - f. Apresente valores da SIR de pior caso para valores típicos de  $n$  ( $n=3$  e  $4$ ) e  $N$  (considere os 3 primeiros valores factíveis de  $N>1$ ). Considere um número de anéis de interferência suficiente para uma boa aproximação. Organize seus resultados em uma tabela.
  - g. Verifique (analiticamente ou numericamente) se para  $n=2$  o valor da SIR converge quando o número de anéis de interferência tende a infinito. Compare com o caso de tecelagem hexagonal da questão anterior.
23. Seja um sistema de telefonia celular em área urbana densa, onde as células podem ser aproximadas por uma tecelagem de quadrados contíguos de mesmo tamanho, com as ERBs localizadas em seus centros. O raio  $R$  da célula é definido como a distância entre o centro e um dos vértices. O sistema emprega antenas omnidirecionais. Neste caso os *clusters* de células são agrupamentos quadrados com padrão de reuso  $N$ . A propagação de onda pode ser modelada através de um expoente de perda de percurso  $n$  com a potência recebida proporcional a  $d^{-n}$ . Considerando o enlace de descida, resolva as seguintes questões:
- a. Defina valores factíveis para o padrão de reuso  $N$ .
  - b. Ilustre a organização das co-células para alguns valores de padrões de reuso  $N$ .
  - c. Identifique os anéis de interferência.
  - d. Estabeleça valores exatos ou aproximados para a distância das co-células.
  - e. Ache uma expressão para a SIR (razão sinal interferência) de pior caso (móvel na borda da célula central) considerando um número arbitrário de anéis de células interferentes.
  - f. Apresente valores da SIR de pior caso para valores típicos de  $n$  ( $n=3$  e  $4$ ) e  $N$  (considere os 3 primeiros valores factíveis de  $N>1$ ). Considere um número de anéis de interferência suficiente para uma boa aproximação. Organize seus resultados em uma tabela.
24. Em uma determinada região há 2 ERBs operacionais. Em um dado momento 3 terminais móveis encontram-se na área de cobertura das 2 ERBs. A operadora dispõe de 6 canais de 1 MHz no enlace de descida. Esses canais estão centralizados em um *pool* e podem ser associados dinamicamente a qualquer ERB. Tanto as ERBs quanto os terminais são capazes de agregar mais de um canal visando aumentar a capacidade do enlace. As restrições para alocação dos recursos de rádio (ERBs, TMs e canais) são: (i) nenhum dos terminais pode ficar sem serviço; (ii) cada canal só pode ser alocado uma única vez. Considere que os três terminais iniciam o



*download* de um grande arquivo simultaneamente. A taxa média de transmissão de dados pode ser aproximada pela equação:  $R(\gamma)=B \log_2(1+\gamma)$  [Mbps], sendo  $\gamma$  a razão sinal-ruído mais interferência no ponto de recepção e  $B$  a banda de transmissão em MHz. A potência do ruído térmico vale  $P_n = -110$  dBm. A seguinte matriz de potências médias de recepção nos TMs é observada naquele momento:

$P_r$ [dBm]	TM1	TM2	TM3
ERB1	-110	-90	-107
ERB2	-120	-107	-90

Questões propostas:

- Inicialmente a operadora adota como política de gerenciamento de recursos de rádio a maximização da taxa média total (soma das taxas médias verificada em todos os terminais). Associe os 3 terminais às 2 ERBs e aos 6 canais seguindo este critério. Além da taxa total observe também a soma dos valores absolutos das diferenças nas taxas obtidas nos 3 terminais.
  - Posteriormente, a operadora modifica seu critério: deve-se minimizar a soma dos valores absolutos das diferenças nas taxas médias obtidas entre os 3 terminais. Associe os 3 terminais às 2 ERBs e aos 6 canais seguindo este critério. Observe novamente o resultado obtido em termos de taxa total e soma das diferenças absolutas entre os TMs.
  - Compare os resultados obtidos nas duas abordagens de alocação de recursos. Considere os impactos das diferentes políticas de gerenciamento de recursos de rádio na qualidade de experiência de cada usuário individualmente e também sob a perspectiva de negócio da operadora.
  - Considere agora que a restrição (ii) é modificada para: “cada canal só pode ser alocado uma única vez dentro da mesma ERB”. Qual o impacto dessa mudança? Como você abordaria a solução da questão sob essa nova restrição?
25. Comunicações D2D (*Device to Device*) consistem em uma importante tecnologia para as próximas gerações das comunicações móveis. Com essa tecnologia, ao invés da comunicação convencional entre a ERB e o TM (Terminal Móvel), em algumas situações, dois TMs podem comunicar-se diretamente reusando o mesmo canal de frequência da comunicação convencional entre a ERB e um dado TM. Um dos grandes desafios dessa tecnologia consiste no gerenciamento da interferência. A comunicação D2D somente é viável quando a interferência mútua com o enlace convencional (ERB-TM) está abaixo de certos limiares especificados para garantir a qualidade de serviço. Na figura abaixo, a ERB e o TM1 comunicam-se em uma arquitetura convencional usando um canal de frequência. De forma simultânea, os TMs 2 e 3 utilizam o mesmo canal para realizar uma comunicação D2D. Assuma que a comunicação convencional e a comunicação D2D precisam satisfazer uma SIR média (experimentada nos receptores; TM1 no sistema convencional e TM3 na comunicação D2D) maior ou igual



a 1 dB. As setas na figura a seguir indicam a direção em que há comunicação. Linhas sólidas indicam sinais de interesse enquanto que linhas tracejadas indicam interferência. A distância nos enlaces 1, 2, 3 e 4 são de 100 m, 200 m, 50 m e 200 m, respectivamente. A potência de transmissão da ERB e do TM2 são de 43 dBm e 28 dBm, respectivamente. A ERB apresenta um ganho de antena de 6 dBi e 2 dBi nas direções dos TMs 1 e 3, respectivamente. Todos TMs possuem ganho da antena de transmissão e de recepção de 0 dBi. Pode-se assumir que o desempenho nesse cenário é limitado por interferência.

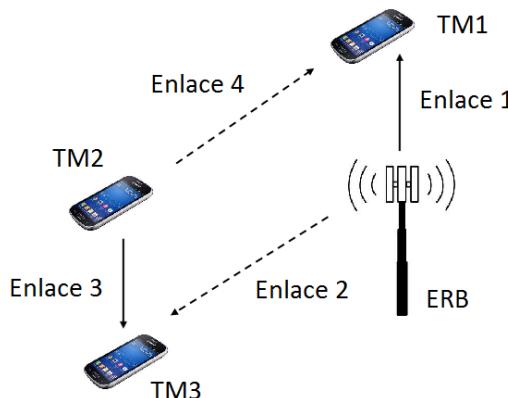
Assuma que a perda de percurso pode ser modelada por:

$$L[\text{dB}] = L(d_0) + 10n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

em que  $d_0 = 10 \text{ m}$ ,  $L(d_0) = 60 \text{ dB}$  e  $n = 4$  para todos os enlaces ERB-TM (enlaces 1 e 2 na figura). Os enlaces TM-TM (enlaces 3 e 4) apresentam condições de propagação mais favoráveis em que  $n = 3$ .

Baseado nessas informações:

- determine se a comunicação D2D e a comunicação convencional podem coexistir no cenário apresentado, satisfazendo o limiar de SIR prescrito.
- Supondo que as potências de transmissão da ERB e do TM2 possam ser reduzidas, existe um cenário em que a coexistência se faça possível?

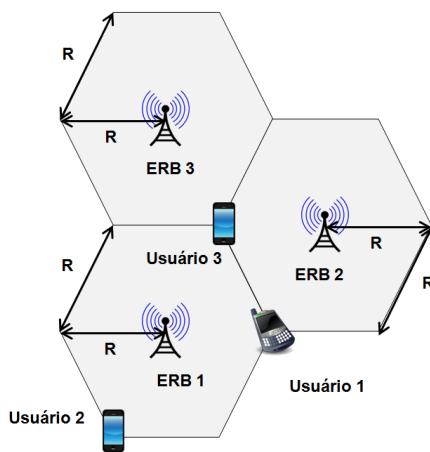


26. Considere um sistema celular composto de três células como mostrado na figura abaixo. Visando maximizar a capacidade, emprega-se reuso de frequência unitário de forma que os 3 TMs mostrados operam no mesmo canal. Em uma situação de pior caso, os 3 usuários interferem entre si no enlace reverso. O usuário 1 está conectado a ERB2, usuário 2 está conectado a ERB1 e usuário 3 está conectado a ERB3. Pode-se assumir que o desempenho nesse cenário é limitado por interferência. Os 3 TMs transmitem com a mesma potência e pode-se assumir que a perda de percurso é homogênea na região. Foi especificado que um usuário teria seu QoS mínimo atingido se sua conexão experimentasse uma SIR > 0 dB. A potência recebida na  $i$ -ésima ERB devida ao sinal transmitido pelo  $j$ -ésimo TM pode ser modelada por:



$p_{r,i} = k \cdot p_{t,j} \cdot d_{ij}^{-n}$  em que  $k$  é uma constante,  $p_{t,j}$  representa a potência de transmissão do  $j$ -ésimo usuário,  $d_{ij}$  a distância entre a  $i$ -ésima ERB e o  $j$ -ésimo TM;  $n$  é o expoente de perda de percurso. Questões:

- Obtenha expressões para a SIR dos três usuários quando todos utilizam a mesma potência de transmissão. Apresente os respectivos valores para  $n=4$ . Quantos e quais usuários encontram-se satisfeitos?
- Suponha agora que seja possível controlar as potências de transmissão dos três terminais. Proponha novo(s) nível(is) relativo(s) de potência, de um ou mais usuários, de forma que resulte em uma SIR satisfatória para o maior número de usuários.



## Capítulos 5 e 8

27. Demonstre que a probabilidade de erro de bit média da modulação BPSK em canal com desvanecimento Rayleigh plano e detecção coerente é dada por:

$$\bar{P}_e = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_b}{1 + \bar{\gamma}_b}} \right)$$

em que  $\bar{\gamma}_b$  é a relação  $E_b/N_0$  média.

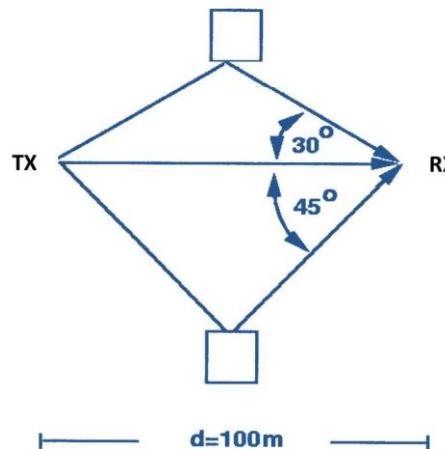
28. Vamos considerar que os efeitos da interferência intersimbólica (ISI) possam ser desprezados se o máximo atraso de propagação for inferior a 10% do intervalo de símbolo. Supondo um ambiente urbano com espalhamento de atraso RMS  $\tau = 1 \mu\text{s}$  e onde os atrasos de propagação possam ser modelados por uma distribuição de probabilidade exponencial  $p(T) = (1/\tau)\exp(-T/\tau)$ , calcule a probabilidade de ocorrência de ISI nos seguintes sistemas: (a) IS-136 TDMA com 48,6 Kbps e modulação QPSK (b) GSM TDMA com 271 kbps e modulação FSK binária.

29. Considere um sistema *wireless* cuja taxa de transmissão pretendida é 10 Mbps. O canal apresenta desvanecimento com distribuição Rayleigh na frequência de 1,8 GHz. Você viaja lentamente em um engarrafamento urbano a 6 km/h e precisa fazer o *download* de um arquivo cujos bits são divididos em pacotes de 1000 bits. Considere que a



recepção de um único pacote corrompido leva ao aborto do processo de *download*. Considere ainda os seguintes dados: (a) o sistema possui um código corrector de erro capaz de corrigir até 10% dos bits em erro por pacote (b) a modulação utilizada é BPSK (c) a sensibilidade do receptor é  $-120$  dBm e uma SNR por bit de 10 dB é necessária para a correta detecção. Pergunta-se: qual o nível de potência médio (em dBm) necessário a ser recebido para que o *download* seja bem sucedido? O que ocorreria se o sistema passasse a operar com modulação QPSK, mantendo a taxa de bits fixa?

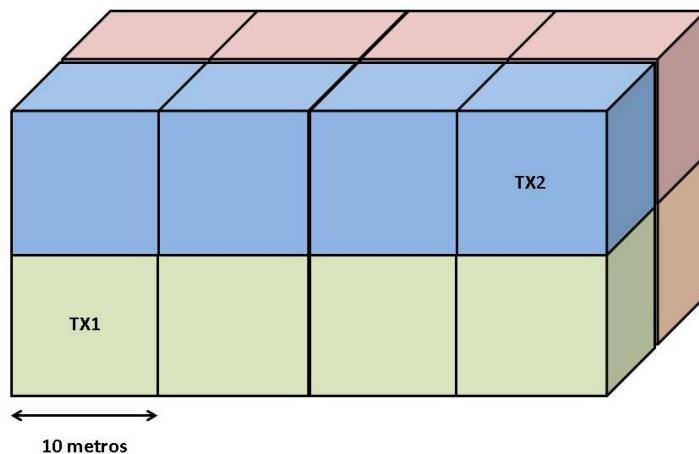
30. Seja um canal que experimenta um desvio Doppler máximo de  $f_d=100$  Hz e um espalhamento de atraso RMS de  $\tau= 10 \mu\text{s}$ . Considerando modulação BPSK, qual a máxima taxa de bits que pode ser transmitida para alcançar uma BER média inferior a  $10^{-3}$ ? Assuma um código corrector de erro capaz de corrigir até 3 bits errados em sequência. Assuma que um erro de bit ocorre quando o sinal cai abaixo da metade de seu valor médio e que o canal exibe desvanecimento Rayleigh.
31. Considere a situação de propagação com 3 raios ilustrada na figura abaixo. A propagação de onda se dá no plano azimutal no qual ocorrem reflexões em edificações no percurso entre transmissor (TX) e receptor (RX). Assumindo um limite de 10% do intervalo de símbolo para o espalhamento de atraso visando a ausência de ISI, qual a máxima taxa de transmissão (em pulsos por segundo) que pode ser utilizada neste canal? Considere um modelo para a potência de sinal recebido do tipo  $p(r)=k(d_0/d)^3$  em que  $k$  é uma constante que reflete a configuração do enlace e  $d_0 = 1$  m.



32. Um sistema de comunicação local sem fio *indoor* foi instalado em uma edificação de pequeno porte que conta com 16 salas comerciais de mesmo tamanho, modeladas como cubículos, conforme ilustra a figura abaixo. O ambiente de propagação é caracterizado pelas seguintes manifestações do canal: uma perda de percurso estimada por  $L(d,m,n)=60+30\log(d)+10m+20n$  [dB], onde  $d$  em metros é a distância linear entre



transmissor e receptor,  $m$  o número de partições verticais e  $n$  o número de partições horizontais que separam o caminho eletromagnético entre transmissor e receptor. Além desta manifestação, o ambiente é caracterizado por desvanecimento Rayleigh. Os terminais neste sistema são computadores que permanecem estáticos em postos de trabalho predeterminados (para efeito de projeto pode-se assumir que todos os terminais estão no centro de cada cubículo). O engenheiro de telecomunicações responsável pelo projeto testa a instalação do transmissor em duas posições TX1 e TX2 conforme ilustra a figura. Para efeito de projeto pode-se assumir que os transmissores estão no centro de cada cubículo e que neste cubículo não há terminal de usuário. Cada transmissor opera com potência de transmissão de 30 dBm e a potência de ruído térmico no receptor é -120 dBm. A razão sinal ruído mínima para estabelecimento de um enlace com alta vazão de dados é 20 dB. Quantos terminais em média ficarão fora do ar no primeiro teste deste sistema (posição TX1)? E no segundo teste (posição TX2)? E se ambos os transmissores fossem ativados ao mesmo tempo? Neste último caso considere que os receptores são capazes de fazer diversidade de antena com combinação por seleção.



33. Considere um sistema de telemetria metropolitano sem-fio. O canal tem um espalhamento de atraso de 1 ms e o espalhamento Doppler é 2 Hz, sendo a banda disponível para transmissão 10 KHz. Em uma aplicação de internet das coisas, deseja-se transmitir uma taxa de 100 bits/s com modulação BPSK e salto em freqüência visando obter diversidade em freqüência. Neste sentido sugira uma especificação para os transceptores utilizando salto em freqüência (largura de faixa dos canais, número de saltos e duração do *time-slot*).
34. Um sistema de transmissão de dados sem fio utiliza a técnica do entrelaçamento para espalhar rajadas de erro na recepção. Utiliza-se uma matriz 10x8 para implementar o entrelaçamento e a taxa de transmissão é 9600 bps. Pergunta-se qual a latência introduzida pelo processo de entrelaçamento ?



35. Considere um sistema de diversidade espacial por seleção ótima desbalanceado em que as potências médias  $\bar{\gamma}_1$  e  $\bar{\gamma}_2$  nos 2 ramos não são iguais. Seja  $\Delta = \bar{\gamma}_1 / \bar{\gamma}_2$  uma medida deste desbalanceamento. Seja ainda  $\gamma_S = \max_i \{\gamma_i\}$   $i=1,2$  a SNR resultante da seleção ótima. Obtenha uma expressão para a distribuição cumulativa de probabilidade da razão sinal-ruído  $\gamma_S$  na saída do combinador. Apresente gráficos para diferentes valores de  $\Delta$ . Comente sobre o comportamento da distribuição encontrada em função de  $\Delta$ .
36. Considere um sistema de diversidade por seleção ótima com  $L$ -ramos. Numa situação atípica, o sistema é limitado por interferência e não por ruído. Desta forma  $N_I$  sinais interferentes estão presentes no mesmo canal do sinal de interesse. Seja:

$$\gamma_i = \frac{s_{0,i}}{\sum_{n=1}^{N_I} s_{n,i}}$$

a relação sinal-interferência instantânea no  $i$ -ésimo ramo de diversidade na recepção, sendo  $s_0$  o sinal de interesse e  $s_{n \neq 0}$  sinal interferente. Seja  $\gamma_S = \max_{i=1 \dots L} \{\gamma_i\}$  a razão sinal interferência máxima resultante da seleção ótima em um dado instante. Obtenha uma expressão para a probabilidade de interrupção  $p(\gamma_S < \gamma_{TH})$  sendo  $\gamma_{TH}$  um limiar que define o evento de interrupção. Considere que todos os sinais sofrem desvanecimento independente e identicamente distribuído do tipo Rayleigh lento, sendo recebidos com mesma potência média.

## Capítulo 6

37.

A comunicação através de canais ruidosos está sujeita a erros. Por isso, nós podemos introduzir redundância para diminuir o efeito degradante do canal e aumentar a confiabilidade da comunicação. Nesse sentido, vamos considerar um esquema simples de codificação baseado na repetição dos símbolos a serem transmitidos. Assim, ao invés de transmitir um "0" ou um "1", nós transmitimos uma sequência com número ímpar  $n$  de "0's" ou "1's", respectivamente. Um erro acontecerá, se pelo menos  $(n + 1)/2$  símbolos são recebidos em erro. Considerando um canal simétrico binário com probabilidade de alteração de símbolo de  $p = .01$  (*crossover*), calcular a probabilidade de error  $p_e$  para  $n = 3, 5, 7$  e  $9$ .

38.

Códigos Hamming pertencem a categoria de código corretores de erro do tipo linear em bloco. Códigos em bloco recebem um bloco de  $k$  bits de informação e geram um bloco de  $n$  bits codificados. Construa um código Hamming (15, 11) usando a representação matricial de  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{G}$ . Então, determine todas as respectivas palavras código e verifique que a distância mínima vale 3. Dica: sabe-se que nos códigos Hamming a submatriz  $\mathbf{P}$  todas as linhas são diferentes e sempre apresentam mais do que um "1".



39.

Os códigos lineares em bloco podem ser decodificados através de esquemas de decisão *hard* ou *soft*. Sabe-se que a probabilidade de erro  $p_e$  de um código de bloco linear com decisão *hard* tem limitante superior dado por,  $p_e \leq (M - 1) [4p(1 - p)]^{d_{min}/2}$ , onde  $p$  é a probabilidade de erro da demodulação,  $M$  é o número de palavras código e  $d_{min}$  é a distância mínima. Por outro lado, utilizando a decisão *soft* com sinalização ortogonal, a probabilidade de erro é dada por  $p_e \leq (M - 1)Q\left[\sqrt{\frac{d_{min}R_cE_b}{N_0}}\right]$ , onde  $N_0$  é a densidade espectral de potência do ruído,  $E_b$  é a energia por bit,  $R_c$  é a taxa do código e  $Q(\cdot)$  é o complementar da CDF da distribuição normal padrão. Considerando que um código Hamming (31, 26) é usado com um esquema BPSK, compare o desempenho das estratégias de decisão *hard* e *soft* em termo da probabilidade de erro da mensagem. Gerar os gráficos correspondentes como função da relação  $E_b/N_0$ .

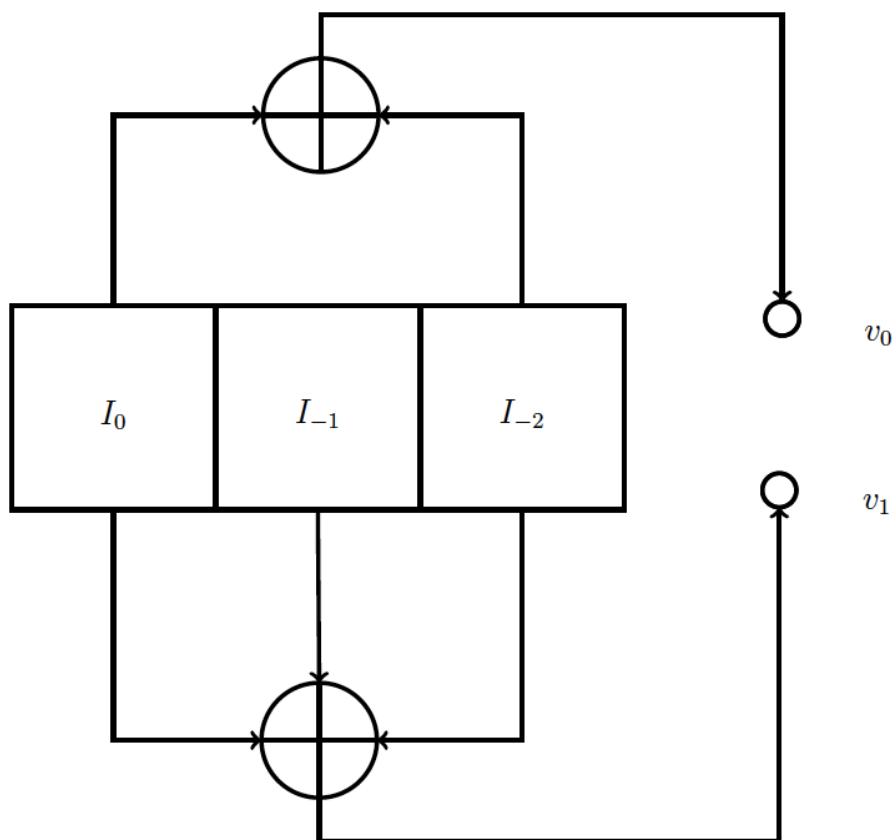
40.

Os códigos cíclicos são código de blocos lineares bastante populares. Sabe-se que um deslocamento de qualquer palavra código resultará em outra palavra código válida, mas observa-se que apenas  $n - 1$  palavras códigos são geradas a partir de deslocamentos cíclicos. Outra característica é que códigos cíclicos podem ser representados algebricamente através de polinômios. Considere o código cíclico (7, 4) com polinômio gerador dado por  $g(x) = 1 + x^2 + x^3$ , *i*) verifique se as seguintes palavras código são válidas  $\mathbf{v}_1 = [1101010]$ ,  $\mathbf{v}_2 = [1011011]$  e  $\mathbf{v}_3 = [1011001]$ ; *ii*) determine a representação matricial equivalente.

41.

Considerando o codificador mostrado na figura abaixo e a sequência de entrada “110101”: (a) determine a sequência na saída do codificador; (b) esboce o diagrama de estados; (c) esboce o diagrama de árvore; (d) esboce o diagrama de treliça; (e) implemente a decodificação de Viterbi para a sequência obtida no item (a).





## Capítulo 7

42. A largura de banda de um sinal, a ser espalhado por sequência direta, é de 50 kHz. Após o espalhamento a banda do sinal espalhado passa a ser 50 MHz. Calcule o ganho de processamento. Qual o significado dele? Existe ganho de processamento quando não há interferência no sistema?



43.

Considere um sistema CDMA com 3 usuários A, B e C que querem se comunicar com a estação rádio base. Considere que os códigos dos usuários são  $c_A = \{1, -1, -1, 1, -1, 1\}$ ,  $c_B = \{1, 1, -1, -1, 1, 1\}$ , e  $c_C = \{1, 1, -1, 1, 1, -1\}$ , os quais são conhecidos por seus respectivos usuários e pela estação rádio base. Suponha que cada usuário deseje transmitir a mensagem “1 1 0 1”. Quais as mensagens codificadas por cada um dos usuários que será transmitida no enlace reverso?

Considere o problema anterior. O receptor da estação rádio base deve decodificar os padrões de chips recebidos. No exemplo desse problema, se o receptor  $R$  recebe o padrão de chip  $d = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6\}$ , e o receptor deseja se comunicar com um usuário  $k$ , cujo código é conhecido pelo receptor e é dado por  $c_k = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6\}$ , o receptor deve realizar eletronicamente a seguinte função de decodificação:  $S_k(d) = \sum_{i=1}^6 d_i \cdot c_i$ . O subscrito  $k$  na variável  $S$  simplesmente indica que  $k$  é o usuário de interesse. Neste problema, se  $S_k = +6$ , dizemos que o receptor recebeu o bit 1 do usuário  $k$ ; se  $S_k = -6$ , dizemos que o bit 0 foi recebido; caso contrário, se obtivermos qualquer outro valor  $-6 < S_k < +6$ , assumimos que outro usuário diferente de  $k$  enviou a informação ou que houve um erro. Mostre através dos cálculos dos valores  $S_k$ , se o receptor na estação rádio base é capaz de decodificar ou não um bit 1 transmitido pelos usuários nas seguintes condições:

- (a) Usuário A realizou a transmissão e o receptor tenta recuperar o dado transmitido utilizando o código do usuário A.
- (b) Usuário B realizou a transmissão e o receptor tenta recuperar o dado transmitido utilizando o código do usuário A.
- (c) Usuário C realizou a transmissão e o receptor tenta recuperar o dado transmitido utilizando o código do usuário B.
- (d) Usuários B e C realizaram suas transmissões e o receptor tenta recuperar o dado transmitido utilizando o código do usuário B aplicado ao sinal combinado de B e C.



44.

Suponha que numa área altamente urbanizada o fator de interferência de “outras células”, definida como a razão entre as interferências externa  $I_{\text{ext}}$  (proveniente de outras células) e interna  $I_{\text{int}}$  (proveniente da mesma célula) percebidas pelo receptor da ERB, seja  $i = I_{\text{ext}}/I_{\text{int}} = 0,6$ . Considerando o enlace reverso, compare a capacidade da célula nesse caso com o de uma área rural onde o fator de interferência é  $i = 1,8$ . Como a interferência afetaria o projeto do sistema? Suponha o uso de antenas omnidirecionais.

45.

No problema anterior, suponha que as ERBs tenham sido melhoradas com a instalação de antenas tri-setorizadas. Como essa diferença afetaria a interferência interna e externa à célula?

46.

Considere uma rede WCDMA que provê um serviço de voz com requisito  $E_b/N_t$  (razão da energia de bit do sinal para densidade espectral de potência do ruído total) de 4,5 dB. Assuma um cenário macrocelular com células omnidirecionais. Calcule a vazão de dados total da célula no enlace reverso para o caso de elevação de ruído de 3 dB.

47.

Considere uma rede WCDMA que provê um serviço de dados (transferência de arquivos) com requisito  $E_b/N_t$  (razão da energia de bit do sinal para densidade espectral de potência do ruído total) de 5,3 dB em um cenário macrocelular com células tri-setorizadas. Assuma o modelo de propagação de canal como sendo o ITU Pedestrian A (fator de ortogonalidade médio  $\bar{\alpha} = 0,9$ ). Calcule a capacidade de pôlo do sistema no enlace direto considerando uma *BLER* de 5%.



## Capítulo 10

48.

Empregando-se o modelo de *Jakes*, para um total de 16 osciladores, simule e observe um sinal com desvanecimento com distribuição de *Rayleigh* ao longo de um intervalo de tempo de 1 s. Sugere-se obter 20 000 amostras do desvanecimento igualmente espaçadas no tempo dentro desse intervalo. O movimento uniforme do usuário a uma velocidade  $v$  é inserido nesse modelo por meio do deslocamento *Doppler*,  $f_D$ . Considere dois diferentes valores para o deslocamento *Doppler* e compare os efeitos sobre os desvanecimentos simulados:

- (a)  $f_D = 20$  Hz;
- (b)  $f_D = 100$  Hz.

49.

Reutilize o *script* ‘sBPSKMRC.m’ de modo a, primeiramente, reproduzir os gráficos da Figura 10.6. Em seguida, realize nova simulação com vários valores de  $E_b/N_0$  entre  $-5$  e  $45$  dB. Provavelmente você perceberá que os valores para BER serão extremamente baixos. Desse modo, sugere-se limitar inferiormente a visualização da BER no gráfico a  $10^{-7}$ . Nesse caso, escolha um número de iterações que considerar adequado, e justifique essa escolha.

50.

Ainda em relação ao *script* ‘sBPSKMRC.m’, note que o modelo para o canal *Rayleigh* é simplificado. Substitua-o pelo modelo de *Jakes* e repita as simulações apresentadas na Figura 10.7, mas agora tendo controle sobre a velocidade de deslocamento do usuário: 3 km/h (pedestre) e 60 km/h (veículo). Considere uma frequência de portadora de 1,9 GHz.

51.

A última seção do capítulo traz um estudo de caso em que a simulação sistêmica é implementada com base em uma interface enlace-a-sistema. Um conjunto de *scripts* encontra-se disponível no sítio do livro na Internet, o qual possibilita a obtenção dos resultados apresentados na seção 10.7. Reutilize esses *scripts* de modo a realizar campanhas adicionais de simulações para uma nova carga (12 usuários por ERB) e dois novos raios de cobertura da ERB (300 m e 1,5 km). Observe os resultados adicionais de vazão média dos usuários e compare-os àqueles já apresentados na Figura 10.24.



52.

Trabalho computacional sobre transferência de chamadas (*handover*). Com base no conceito de simulação de Monte Carlo, avalie cada um dos algoritmos de *handover* elencados a seguir para um grande número de chamadas realizadas, de modo que as estatísticas requeridas sejam representativas. Os algoritmos de *handover* a serem avaliados são:

- (a) *Algoritmo Best Server*: permite que o TM selecione a ERB com maior força de sinal a cada oportunidade de execução de *handover*.
- (b) *Algoritmo Limiar*: dispara o processo de *handover* apenas se a intensidade de sinal for igual ou menor que o limiar de iniciação, dado por  $P_0 + \Delta$  dBm. Estime o parâmetro  $\Delta$  levando em consideração a velocidade de deslocamento do usuário. O *handover* somente deve ser realizado se o sinal da ERB alternativa for maior que o sinal da ERB com a qual o TM mantém conexão.
- (c) *Algoritmo Soft-handover*: ao atingir o limiar de iniciação (o mesmo do item acima), o TM passa a se comunicar com as duas ERBs ao mesmo tempo e a potência recebida no TM será a soma das potências enlaces provenientes de ERB1 e ERB2; essa situação perdura até que uma das ERBs volte a ficar acima do limiar de iniciação quando então o TM volta a se comunicar apenas com a ERB de sinal mais forte.



(continuação questão 52)

Para programar sua ferramenta de simulação, considere o seguinte cenário:

- (a) Considere um trecho de uma rodovia retilínea no qual existem duas estações rádio-bases – ERB1 e ERB2 – separadas por 3 100 m entre si. As ERBs possuem antenas omnidirecionais. Neste trecho um usuário se desloca à velocidade constante de 72 km/h. O usuário inicia uma chamada quando se encontra 50 m após ter passado a ERB1 em direção à ERB2. A chamada termina quando o TM encontra-se 50 m antes de chegar na ERB2.
- (b) Neste sistema, o procedimento de *handover* é assistido pelo TM que é capaz de coletar estatísticas de potência de sinal e realizar um *handover* a cada 1 segundo. Assuma que há canais disponíveis para receber a chamada em andamento na nova ERB.
- (c) A simulação deve monitorar a chamada em andamento para verificar se a mesma termina adequadamente ou cai devido à insuficiência de sinal. A chamada cairá se em qualquer instante, a potência recebida no TM seja menor que o nível mínimo de sinal  $P_0$  para manutenção do enlace.
- (d) A potência  $EIRP = 27 \text{ dBm}$  tanto para ERB1 quanto para ERB2; despreze demais ganhos e perdas de transmissão e recepção; o nível de sinal mínimo a qualquer instante tem que ser mantido maior ou igual a  $P_0 = -110 \text{ dBm}$ . Utilize um modelo simplificado de perda de percurso, considerando como referência uma perda de 70 dB a uma distância de 50 m.
- (e) Desvanecimento de larga escala: a potência de recepção é afetada por uma variação log normal devido ao efeito de sombreamento; considere que o sombreamento é descorrelacionado no espaço a cada 40 m; em escala logarítmica, o desvio padrão do sombreamento na região é estimado em 8 dB.

Seguindo o método de Monte Carlo, execute um grande número de chamadas independentes. Ao longo desta campanha de simulação, cole os seguintes indicadores:

- (a) Cada evento de queda de chamada deve ser registrado para efeito de cálculo da taxa de queda de chamada ( $TQ = \text{total de chamadas que caíram dividido pelo total de chamadas simuladas}$ ).
- (b) Número médio de eventos de *handover* por chamada (NH). Este indicador é obtido dividindo o número total de eventos de *handover* registrados em toda a campanha de simulação dividido pelo número de chamadas simuladas.

Para o algoritmo do limiar você pode testar diferentes valores de  $\Delta$ . Apresente gráficos que ilustram os resultados obtidos tais como: variação de TQ e NH em função de  $\Delta$ ; gráfico de barras comparando os algoritmos em termos de TQ e NH; exemplo de como o sinal recebido pelo TM varia ao longo de uma chamada; nível de sinal recebido com indicação de pontos de *handover* ao longo da trajetória do TM.



(continuação da questão 52)

Conclua dissertando sobre quais os compromissos envolvidos na escolha de cada algoritmo.

Observação: uma maneira de inferir se a quantidade de simulações independentes é suficiente para gerar indicadores com boa precisão consiste em monitorar a evolução cumulativa de TQ e NH ao longo da campanha de simulação. Uma vez definida uma precisão alvo (por exemplo, TQ com duas casas decimais), a simulação pode ser encerrada quando não mais se observar alteração no indicador ou apenas alterações pouco significativas.

