

Instruções (100 points)

1. A turma será dividida livremente em grupos de no **máximo** 2 alunos.
2. O trabalho está dividido em três partes:
 - Simulação - escrito em linguagem de programação de preferência (sugestão Matlab).
 - Relatório ou apresentação - escrito em LaTeX/Word/PPT e compilado para pdf. O relatório/apresentação deve conter, os resultados de cada questão (figuras) comentados e o código fonte do programa em um apêndice.
 - Lista de Exercícios - resolução das questões à mão.
3. Entrega: **06 de março de 2025**
4. O trabalho de simulação deve ser entregue em um arquivo compactado (.zip ou .rar) com pastas nomeadas como `iti2025_equipe_0x` e devem conter uma estrutura como o seguinte, por exemplo,


```
/iti25_equipe_0x/relatorio
/iti25_equipe_0x/matlab
/iti25_equipe_0x/matlab/main – o nome do executável tem de ser este!
/iti25_equipe_0x/matlab/main/... – outras funções adicionais de suporte a função main!
```
5. O arquivo compactado deve ser entregue por email no máximo até às 23:59hs da entrega com os respectivos nomes dos participantes da equipe. O email deve seguir o seguinte formato:

To : walter@gtel.ufc.br
 Cc : walterjr@gmail.com, alunos
 Attchmnt: iti2025_equipe_0x.zip
 Subject : iti2025_equipe_0x.zip - Alunos:

Trabalho Simulação - Equipe 0x

Exercícios Teóricos(10^{pts})

1. Uma fonte tem um alfabeto de quatro letras. Abaixo apresentam-se as probabilidades das letras e dois conjuntos possíveis de palavras de código binárias. Para cada código responda às seguintes questões:
 1. O código satisfaz a condição de prefixação?
 2. O código é unicamente decodificável?
 3. Suponha que a primeira letra da palavra de código é “1”. Qual é a informação mútua que esta ocorrência fornece acerca do acontecimento “a letra da fonte é a_1 ”?
 4. Qual é a informação mútua média que a especificação da primeira letra da palavra de código fornece relativamente à letra da fonte?

Letras	Probabilidades	Código I	Código II
a_1	0,4	1	1
a_2	0,3	01	10
a_3	0,2	001	100
a_4	0,1	000	1000

Solução:

- (10^{pts}) 2. Dadas as probabilidades $p(A) = 0,2$, $p(B) = 0,3$ e $p(C) = 0,5$, determine um valor real, usando a codificação aritmética, que represente a sequência AACBCA.

Solução:

- (10^{pts}) 3. Com um alfabeto de 47 caracteres uma fonte gerou a mensagem (de onde as aspas não fazem parte)

“MUITO BEM, SÓ QUE QUEM VIU NÃO DIZ QUE VIU, DIZ QUE OUVIU ALGUÉM QUE VIU.”

Esta mensagem vai ser codificada com um codificador LZ77 com uma janela de observação de 60 caracteres dos quais 10 pertencem ao “look-ahead buffer”.

1. Quantos bits são necessários para representar cada palavra código?
2. Suponha que o início da mensagem já foi codificado, de tal modo que no corpo da janela já se encontram 34 caracteres. Indique a sequência de apontadores que se obtém à saída do codificador a partir desse momento, e calcule a quantidade de bits que representa a mensagem codificada.

Solução:

- (10^{pts}) 4. Seja o canal com apagamento descrito na Figura 1

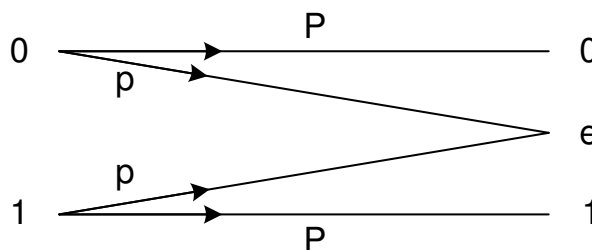


Figure 1: Canal com apagamento.

- (a) Calcular a capacidade de canal.
- (b) Qual a capacidade por unidade de tempo se a taxa de utilização do canal é $R_c = \frac{1}{T_c}$?
- (c) Considere uma fonte binária equidistribuída sem memória de taxa R_s . Qual deve ser o valor da taxa de utilização do canal para que a transmissão do conteúdo da fonte possa ser efetuada com uma probabilidade de erro tão pequena quanto desejada?
- (d) Com p e R_s fixos, imagine um dispositivo que inclua um canal de retorno não ruidoso que permita atingir o resultado de (c). Qual é a probabilidade de erro?

Solução:

- (5^{pts}) 5. Um canal binário simétrico tem uma probabilidade de erro de transição p . Qual é o valor máximo permitido de p para que haja, no mínimo, 97% de probabilidade de não haver nenhum erro na transmissão de uma palavra binária de 15 bits? Assuma os bits independentes.

Solução:

- (5^{pts}) **6.** A imagem de uma TV *Full*-HD pode ser vista como sendo composta por $(3) \times 1920 \times 1080$ elementos (pixels), cada um destes podendo ser preenchido por um entre 256 diferentes níveis de brilho (luminância) com igual probabilidade. Assuma que a taxa de transmissão é de 60 imagens/segundo e a relação sinal-ruído é de 30 dB. Usando o teorema da capacidade de Shannon, calcule a mínima largura de banda necessária para a transmissão do sinal de vídeo resultante. Discuta formas de se diminuir a largura de banda necessária para tal transmissão.

Solução:

Exercícios de Simulação

Introdução

Estudaremos um sistema de comunicação sem fio celular composto por Pontos de Acesso (AP) e Equipamentos de Usuário (UEs). Os APs são equipamentos de telecomunicações implantados pela operadora de telecomunicações, responsáveis pela transmissão e recepção de informações usando as antenas. Eles também podem ser conhecidos como Estações rádio-base (ERB). Os UEs, como o nome indica, pertencem ao usuário ou consumidor. Um exemplo típico de UE é um *smartphone*. O UE, assim como o AP, também é um rádio com capacidades de transmissão e recepção. Por outro lado, eles têm diferenças óbvias, não apenas o fato de que um é de propriedade da operadora e o outro de um usuário. Uma diferença marcante é que o AP tem que servir muitos UEs enquanto o UE está conectado a um único AP.

Estudaremos o link de comunicação de rádio dos UEs para os APs, ou seja, os UEs transmitem e os APs recebem sinais de rádio que carregam informações. Essa direção do fluxo de informações é conhecida em comunicações de rádio como “uplink”. Também existe simultaneamente o enlace (“link”) oposto (o “downlink”) no qual o AP transmite e o UE recebe. É por causa desses dois links de rádio simultâneos que você consegue falar e ouvir ao mesmo tempo ao ligar para um amigo usando seu smartphone. Para evitar interferência, o uplink e o downlink podem operar em frequências diferentes ou, alternativamente, em momentos diferentes no tempo.

APs, UEs e os enlaces de rádio correspondentes formam a chamada Rede de Acesso de Rádio (RAN). A RAN é uma parte crítica dos sistemas sem fio porque é por meio da RAN que seu smartphone se conecta à antena da operadora (ou seja, os APs) e, então, à Internet. A RAN também permite que você se mova com seu smartphone enquanto estiver conectado.

Ao estudar o uplink, nosso objetivo é prever a experiência dos usuários quando, por exemplo, transmitem um stream de vídeo ao vivo pelo Youtube ou carregando arquivos para um servidor de nuvem como o Google Drive. Buscaremos analisar como essa experiência varia com o número de APs e UEs em uma determinada área de cobertura.

A área de cobertura do nosso sistema é um quadrado de lado L . A área de cobertura pode ser considerada um plano 2D visto de cima (vista superior).

Na ilustração da Fig.1 a área de cobertura é de 1km^2 , já que $L = 1000$ metros. Existem 16 Access Points (triângulos) regularmente espaçados definindo bordas de células hipotéticas (delimitadas por linhas pontilhadas). Em cada célula há um UE (pequenos quadrados) que se comunica com seu AP por meio de um link de rádio (simbolicamente ilustrado por linhas sólidas). Os UEs são distribuídos uniformemente sobre a área de cobertura, o que significa que podem ser posicionados em qualquer lugar. Como consequência, observe as distâncias variáveis entre UEs e APs, alguns UEs mais próximos, alguns mais distantes de seu AP de serviço.

Como comentado antes, esta é uma vista de cima, vista de cima da Terra. Por enquanto, vamos nos limitar a este modelo bidimensional (2D) da área de cobertura. Esta suposição 2D é razoável para áreas relativamente grandes, mas no futuro a modelagem 3D será necessária para análises mais sofisticadas.

Modelo de propagação

Um dos modelos mais fundamentais necessários para estudar sistemas sem fio é o modelo de canal ou propagação. Este modelo relaciona a potência recebida por um AP de um UE transmissor em uma dada posição. A potência recebida é uma função da distância transmissor-receptor e é dada por:

$$p_r^{i,j}(d_{i,j}) = p_t^j \frac{k}{d_{i,j}^n}, \quad (1)$$

$$d \geq d_0. \quad (2)$$

em que $p_r^{i,j}$ é a potência recebida pelo i -ésimo AP transmitido do j -ésimo UE, $d_{i,j}$ é a distância física i -ésimo AP e o j -ésimo UE, p_t^j é a potência de transmissão do j -ésimo UE, n é um expoente de perda de

percurso que define a rapidez com que a potência recebida diminui com a distância, k é uma constante e tanto n quanto k dependem do ambiente de propagação física real.

A constante k pode ser determinada para um ambiente de propagação particular medindo a potência recebida para uma potência de transmissão conhecida a uma distância de referência fixa d_0 . Isso também significa que, para fins de modelagem, a potência recebida não é definida para $d < d_0$. O valor para d_0 é tipicamente pequeno (por exemplo, 1 metro) com relação às dimensões da área de cobertura, de modo que essa suposição não impacta significativamente os resultados. Quanto ao expoente de perda de percurso n , ele é estimado também fazendo medições para uma potência de transmissão fixa e variando distâncias de transmissão-recepção. Valores típicos de n estão no intervalo de 2 a 4.

Fatores limitantes: largura de banda, ruído e interferência

Existem dois fatores limitantes fundamentais em qualquer sistema de comunicação: ruído do receptor e interferência.

Ruído é uma perturbação física inerente a qualquer receptor de comunicações. O importante em relação ao ruído é medir sua potência para que você possa calcular a relação desejada entre potência do sinal e potência do ruído (relação sinal-ruído, ou SNR, para simplificar). A potência do ruído depende de vários fatores, mas para os propósitos do presente estudo o fator que consideraremos mais importante é a largura de banda do canal de rádio alocado para cada enlace de rádio. Sabemos por intuição que quanto maior a largura de banda de um canal, maior a capacidade do enlace de rádio correspondente usando tal canal (ou seja, seu limite de taxa de dados).

Considere que uma largura de banda total de B_T [Hertz] está disponível para todo o sistema. Essa largura de banda total pode ser dividida em N canais não sobrepostos (e, portanto, não interferentes), ou seja, $B_c = B_T/N$ em que B_c [Hertz] é a largura de banda de cada canal não sobreposto. A propriedade de não sobreposição dos N canais também significa que matematicamente esses canais são ortogonais (daí a natureza não interferente). Na prática, isso significa que cada canal tem uma frequência portadora central diferente e todas as informações transmitidas e recebidas naquele canal não interferente.

As consequências de escolher um valor maior ou menor para N se tornarão aparentes mais adiante. Mas, por enquanto, basta dizer que uma relação fundamental entre largura de banda do canal e potência de ruído é que a potência de ruído no receptor é diretamente proporcional à largura de banda do canal, ou seja:

$$p_n = K_0 B_c = K_0 \frac{B_T}{N}, \quad (3)$$

em que K_0 é uma constante (em unidades de potência por Hertz) a ser especificada posteriormente.

Estamos agora em posição de expressar a relação sinal-ruído (SNR) em AP i quando o sinal de o interesse vem da UE j como:

$$\gamma_{i,j} = \frac{p_r^{i,j}}{p_n}. \quad (4)$$

O segundo fator limitante fundamental em comunicações sem fio é a interferência. Existem muitos tipos de interferência, mas aqui vamos nos concentrar no caso específico de interferência co-canal ou CCI. No uplink (ou seja, os UEs transmitem e os APs recebem), CCI é a interferência que resulta quando 2 ou mais UEs compartilham o mesmo canal de frequência e transmitem ao mesmo tempo. A CCI no uplink se materializa no receptor do AP. No downlink (no qual UEs e APs trocam de papéis), CCI acontece quando 2 ou mais APs compartilham o mesmo canal de frequência e transmitem ao mesmo tempo. No downlink, CCI se materializa no receptor do UE.

O efeito dessa transmissão simultânea, em qualquer direção, é que o sinal recebido será uma mistura (soma) de dois ou mais sinais transmitidos que não foram originalmente planejados para serem misturados. Isso significa que haverá erros ao detectar o sinal recebido no AP e a capacidade do canal (e a taxa de dados real) diminuirá.

A reutilização do canal de frequência é a causa da CCI. Mas a reutilização do canal é uma parte necessária de qualquer sistema de comunicação celular porque não há espectro de rádio infinito disponível. Em outras palavras, a CCI é inevitável. Mas o nível de CCI com o qual um sistema sem fio pode lidar é

uma decisão técnica. Por exemplo, a operadora de rede pode definir que a reutilização do canal ocorrerá apenas em células diferentes. Em outras palavras, um AP não pode definir o mesmo canal para 2 ou mais UEs atendidas por ele no downlink.

Idealmente, gostaríamos de ter zero interferência co-canal, mas na prática isso não é possível. À medida que o número de UEs no sistema cresce, dada uma largura de banda total fixa, a CCI inevitavelmente aparecerá. A questão importante é qual é o número de UEs que o sistema suporta, mantendo a CCI em um nível relativamente baixo (de modo que a detecção de sinal seja possível com confiabilidade razoável). Em outras palavras, queremos medir o desempenho do sistema versus o número de UEs no sistema (ou seja, “a carga” no sistema). O desempenho, por sua vez, será afetado pelo nível de CCI que depende, entre outros fatores, dessa “carga”.

Para expressar matematicamente o nível de CCI em um enlace de rádio, também usamos uma relação de potência análoga à relação sinal-ruído. A relação, neste caso, é chamada de relação sinal-interferência (SIR).

Até agora, apresentamos dois indicadores de desempenho, SNR (quando apenas ruído está presente) e SIR (quando apenas interferência está presente). Podemos combinar as relações de potência SNR e SIR em uma única métrica para a situação em que tanto ruído quanto interferência estão presentes no sistema, o que é típico. A combinação de ambas as métricas nos leva à relação sinal-interferência mais ruído (SINR) que é dada por:

$$\gamma_{i,j} = \frac{p_r^{i,j}}{\sum_{k=1, k \neq j}^K p_r^{i,j} + p_n}. \quad (5)$$

Medindo o Desempenho: Capacidade do Canal

Pode-se listar como um indicador-chave de desempenho (KPI) é a SINR (observe que as métricas SNR e SIR são casos particulares do SINR). No entanto, esse KPI não é significativo para o usuário, ou seja, ele não informa ao usuário qual é a capacidade do enlace de rádio usado como canal de comunicação. O mapeamento do SINR para a capacidade do canal pode ser abordado usando uma equação famosa da teoria da informação que permite uma aproximação da capacidade dos canais prejudicados pelo ruído. Esta é a equação da capacidade de Shannon e, para nossos propósitos, pode ser escrita como:

$$C_{i,j} = B_c \log_2(1 + \gamma_{i,j}), \quad (6)$$

em que $C_{i,j}$ [bits por segundo] é a capacidade de canal esperada do enlace de rádio da transmissão do UE j para o receptor AP i usando um canal de largura de banda B_c ; $\gamma_{i,j}$ é a SINR conforme definido anteriormente. Essa equação como uma forma prática de mapear o SINR em um KPI significativo que seja compreensível por qualquer pessoa que use um *smartphone*.

Metodologia de simulação

Dado o modelo de sistema da seção anterior, a próxima pergunta óbvia é como criar uma simulação de computador de todo o sistema. Com tal simulador, estaríamos equipados para abordar questões relacionadas ao design e dimensionamento da rede de acesso de rádio, por exemplo, estimando QoS para uma dada população de clientes na área de cobertura. Para ajudar a responder a essa pergunta, recorremos a uma famosa metodologia de simulação de computador conhecida como simulação de Monte Carlo.

Como você começará a usar simulações de computador, antes de prosseguir, você deve se acostumar com uma linguagem de programação de computador. Eu sugiro que você aprenda o básico do Matlab (ou sua versão freeware Octave). O Matlab é uma linguagem de alto nível, um ambiente de programação e simulação. Ele tem muitas funções internas que são úteis em estudos de engenharia e tornam bastante simples manipular vetores e matrizes, por exemplo. Ele também é bom para criar tabelas e gráficos para mostrar seus resultados. Há muito treinamento online sobre o Matlab (por exemplo, no Youtube) e você pode encontrar documentação e exemplos de uso em seu site oficial: www.mathworks.com. Outras linguagens de programação que você pode usar para desenvolver nossas simulações de sistema são

Python e C++. Elas podem exigir um pouco mais de habilidades de programação, mas, por outro lado, geralmente executam simulações muito mais rápido do que Matlab. Se você gosta de programação de computadores, pode considerar usar uma dessas duas linguagens.

A associação AP-UE é uma questão muito importante e tecnicamente chamamos essa decisão de procedimento de acesso inicial. Acontece quando você liga seu smartphone ou quando você o “acorda” após um longo tempo sem usá-lo. Nesse momento, seu telefone procurará um AP próximo e solicitará a conexão. Para que isso aconteça, cada AP transmite continuamente um sinal especial chamado “piloto” em um canal específico chamado canal de controle. Esse canal de controle é apenas para fins de controle, como o próprio nome indica, e nenhum dado do usuário é transportado por ele. Esse sinal especial de “piloto” é análogo a um forte feixe de luz que um farol emite da costa para guiar navios no oceano.

Cada UE é capaz de detectar pilotos vindos de vários APs em sua vizinhança e medir a potência de cada sinal piloto recebido. Então, o UE escolhe o AP com o sinal mais forte e pede para ele se conectar. Se tudo estiver bem (por exemplo, se você pagou sua conta telefônica), o AP permitirá que a UE se conecte e inicie a comunicação de dados úteis.

Uma configuração de sistema é especificada escolhendo o tripleto (M, K, N) , em que N é o número de APs, K é o número de UEs e N o número de canais ortogonais. Para avaliar o desempenho de uma configuração específica, você tem que gerar e repetir muitos cenários possíveis (ou “snapshots”) do sistema (ou seja, uma “fotografia” estática) posicionando aleatoriamente os UEs na área de cobertura e então calculando e armazenando os KPIs. Sugerimos que você repita as execuções de Monte Carlo para cada configuração pelo menos 400 vezes antes de apresentar os KPIs e chegar a conclusões para essa configuração. Depois de executar diferentes configurações, você pode buscar conclusões sobre como o desempenho do sistema é afetado pelas diferentes escolhas de (M, K, N) .

Cenário principal de simulação.

- Área de cobertura de 1000x1000m (1 km²).
- Largura de banda total disponível: $B_T = 100$ MHz.
- Potência de transmissão da UE (a mesma para todas as UEs): $p_t = 1$ W.
- Constantes para o modelo de propagação: $k = 10^{-4}$; $n = 4$; $d_0 = 1$ metro.
- Constante para a potência do ruído: $K_0 = 10^{-17}$ mWatts/Hz.
- Meta de QoS: 100 Mbps por UE na borda da célula (ou seja, 100 Mbps no 10^o percentil da capacidade do canal CDF).

(10^{pts}) 7. Desenhe um diagrama de blocos do seu futuro simulador antes de começar a construí-lo e discuta-o com o membro da sua equipe. Em seguida, escreva um algoritmo passo a passo que represente seu diagrama de blocos. Você também pode pensar sobre a organização geral do programa de computador para sua simulação antes de realmente começar a escrevê-lo.

(40^{pts}) 8. Agora é hora de testar a capacidade da RAN. Suponha que a demanda por serviços de dados na área de cobertura seja agora $K = 13$ UEs. Os dois graus de liberdade que o engenheiro de telecomunicações tem para atingir a meta de QoS são, como no Experimento anterior: a densidade de AP (M) e o número de canais ortogonais (N). Teste todos os valores possíveis de M dentro do conjunto $\{1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64\}$ APs. Quanto ao número de canais ortogonais N , testar $N = 1, 2, \dots, 5$ é o suficiente para você entender a tendência envolvida no aumento do número de canais. Observe como o QoS se comporta para diferentes combinações de M e N . Lembre-se de que quando 2 ou mais UEs estão transmitindo usando canais diferentes, eles não interferem.

É possível atingir a meta de QoS para $K = 13$? Para quais combinações de M e N ? Analise as compensações envolvidas no fornecimento de capacidade para a RAN. Neste ponto, pare, mostre e discuta os resultados com seu colega.

E se a demanda aumentar ainda mais, por exemplo, para $K = 14$? Ainda é possível satisfazer a meta de QoS sob as condições fornecidas no Experimento 2 acima? Se não, quais são as opções de engenharia para fazer isso? Discuta alternativas de aumento de capacidade com colega. Para um dado valor de M :

- a) as CDFs da SINR para todos os valores testados de N ;
- b) para um dado valor de M , as CDFs da capacidade do canal para todos os valores testados de N ;
- c) para um dado valor de N , as CDFs do SINR para todos os valores testados de M ;
- d) para um dado valor de N , os CDFs da capacidade do canal para todos os valores testados de M ;
- e) para um dado valor de M , plote o 10^o percentil dos CDFs do SINR como uma função de N ;
- f) para um dado valor de M , plote o 10^o percentil dos CDFs da capacidade do canal versus N ;
- g) para um dado valor de N , plote o 10^o percentil dos CDFs do SINR como uma função de M ;
- h) para um dado valor de N , plote o 10^o percentil dos CDFs da capacidade do canal versus M .

Neste ponto, você deve ter avaliado várias configurações de sistema diferentes usando seu simulador. Você tem muitos dados para analisar. Agora é o momento de organizar seus resultados e criar gráficos e tabelas significativos para resumir suas principais descobertas. Prepare uma apresentação de slides incluindo gráficos mostrando os resultados numéricos que você obteve. Não se esqueça de explicar a metodologia que você empregou em alguns detalhes (por exemplo, inclua o diagrama de blocos do seu simulador).

Os CDFs em gráficos para cada um dos itens a) a d) devem ser plotados em um único gráfico para facilitar a comparação com valores variáveis de M e N .

Declare suas conclusões finais sobre a análise de cobertura e a análise de capacidade com base nos resultados obtidos.