

Sk-Iterative: Um Algoritmo Guloso para Escalonamento Eficiente em Redes Sem Fio Densas sob o Modelo SINR

Chrystopher N. Bravos¹, Fábio Engel de Camargo²,
Flávio Assis³, Elias P. Duarte Jr.¹

¹Departamento de Informática – Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Caixa Postal 19018 – 81531-980 – Curitiba, PR

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Toledo (UTFPR)
R. Cristo Rei, 19 – 85902-490 – Toledo – PR – Brasil

³Instituto de Computação – Universidade Federal da Bahia (UFBA)
Av. Milton Santos, s/n - Campus de Ondina – 40170-110 Salvador, BA

{cnb18,elias}@inf.ufpr.br, fabioe@utfpr.edu.br, fassis@ufba.br

Resumo. *As redes sem fio, incluindo redes celulares e para Internet das Coisas, se tornaram infraestruturas críticas. Ao mesmo tempo, é possível perceber uma tendência de aumento da densidade dos dispositivos. O modelo Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) é bastante atraente, por permitir o chamado reuso espacial: transmissões simultâneas de múltiplos dispositivos na mesma área de cobertura. O modelo leva em conta as interferências cumulativas sofridas pelas transmissões concorrentes, para permitir que o escalonamento tenha o máximo de transmissões simultâneas. Como o problema do escalonamento em redes SINR é NP-difícil, o uso de heurísticas é essencial para resolvê-lo na prática. Este trabalho apresenta o algoritmo guloso Sk-Iterative para o escalonamento em redes SINR. O algoritmo escalona enlaces produzidos de acordo com a heurística conhecida como Down-to-Earth (DTE). O algoritmo foi implementado através de simulação. Resultados mostram sua eficiência em termos do tamanho dos escalonamentos produzidos, próximos do ótimo.*

1. Introdução

As aplicações críticas no contexto das redes sem fio, incluindo as redes celulares e a Internet das Coisas, têm se tornado cada vez mais relevantes [Kumar et al. 2015]. No panorama atual, percebe-se uma clara tendência no sentido de redes sem fio cada vez mais densas [Teng et al. 2019]. Como o espaço de transmissão é compartilhado, o aumento da densidade pode comprometer a confiabilidade e a eficiência destas redes, uma vez que acarreta no aumento da interferência mútua das transmissões simultâneas. Uma das maneiras utilizadas para contornar este problema é a separação das transmissões em intervalos de tempo distintos, no chamado escalonamento TDMA (*Time Division Multiple Access*). No entanto, na sua forma tradicional, o escalonamento TDMA assinala apenas uma única transmissão por intervalo de tempo [Sgora et al. 2015].

O modelo conhecido como *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR) leva em conta os efeitos físicos das transmissões para representar as interferências cumulativas [Fulber-Garcia et al. 2024]. O SINR abstrai efeitos como decaimento do sinal, ruído de fundo e interferências mútuas. Este modelo permite o denominado “reuso espacial”, onde

transmissões simultâneas podem sim coexistir em um mesmo intervalo de tempo definido pelo escalonamento, desde que não excedam certo limite de interferência pré-definido. Entretanto, o problema de escalonamento com reuso espacial sob o modelo SINR é provavelmente NP-completo [Goussevskaia et al. 2007]. Por essa razão, é necessário utilizar heurísticas a fim de calcular escalonamentos na prática.

A abordagem proposta por Engel e outros [Camargo and Duarte 2021], chamada de escalonamento *Down-to-Earth* (DTE), é uma heurística que tem por objetivo viabilizar o reuso espacial em redes sem fio. A heurística DTE produz um conjunto de enlaces conectando todos os dispositivos, de forma que todos têm oportunidade de transmitir e receber. Os enlaces produzidos pela heurística DTE são processados pelo algoritmo de escalonamento, que assinala enlaces para intervalos de tempo consecutivos. O objetivo é ter o menor número de intervalos possível, de forma a aumentar as chances de comunicação dos dispositivos. Para obter o menor escalonamento é necessário maximizar o reuso espacial.

A heurística DTE é organizada em duas etapas. Na primeira, os dispositivos comunicam sua posição no plano cartesiano e identificador para toda a rede, adotando a estratégia clássica de apenas um único dispositivo ser assinalado por intervalo de tempo. Na segunda etapa, cada dispositivo identifica seu vizinho mais próximo, e calcula a potência necessária para transmitir apenas para este vizinho, com uma folga. Devem ser acrescentados outros enlaces de forma a garantir que o grafo de transmissão que conecta os dispositivos é fortemente conectado: há um caminho direcionado de qualquer dispositivo para qualquer outro dispositivo. Os níveis de potência devem ser ajustados para todo transmissor atingir seus vizinhos. O conjunto de enlaces resultante é passado então como entrada para o algoritmo de escalonamento.

Este trabalho apresenta o algoritmo Sk-Iterative, uma heurística gulosa para escalonamento com reuso espacial sob o modelo SINR. O algoritmo Sk-Iterative recebe como entrada o conjunto de enlaces direcionados produzidos pela heurística DTE. Produz como saída um escalonamento dos enlaces: que são assinalados para intervalos de tempo consecutivos. Utilizando uma estratégia gulosa, o algoritmo inicialmente determina um conjunto de enlaces ditos “candidatos”, passíveis de serem escalonados. Em seguida mais enlaces passíveis de serem escalonados são definidos, de forma a garantir que todos os enlaces estão assinalados para pelo menos um intervalo candidato. Por fim é executado um algoritmo para o problema do *Set Covering Problem* (SCP) sobre o conjunto de intervalos candidatos, que produz o escalonamento final.

O algoritmo Sk-Iterative é avaliado através de simulação. Entre os experimentos realizados com redes em que os dispositivos são distribuídos de forma aleatória em uma área do plano euclidiano, o SK-Iterative foi capaz de reduzir em até 90% o tamanho do escalonamento em redes com 100 dispositivos, quando comparado ao escalonamento sem reuso espacial. Na comparação com o algoritmo ótimo mostrou obter resultados muito próximos, em média com apenas um intervalo de tempo a mais que o ótimo.

O restante do trabalho se divide da seguinte maneira. A Seção 2 descreve o modelo SINR. A Seção 3 apresenta a heurística DTE. A Seção 4 detalha o algoritmo SK-Iterative. A Seção 5 apresenta os resultados de simulação, inclusive a comparação com outros algoritmos. Por fim, a Seção 5 conclui o trabalho.

2. O Modelo SINR

Nas redes sem fio, os dispositivos se comunicam utilizando meio físico compartilhado, estando sujeitos a diversas interferências, sejam advindas do próprio ambiente ou de outras transmissões concorrentes [Halldorsson and Tonoyan 2019]. Ao contrário das redes ponto-a-ponto, em que é possível permitir que todos os processos comuniquem ao mesmo tempo [Duarte et al. 2010], nas redes sem fio para permitir a comunicação, é necessário adotar uma estratégia de controle de acesso ao meio. Uma das estratégias mais utilizadas é o TDMA, que faz escalonamento de transmissões para intervalos distintos de tempo. Na sua forma mais tradicional, apenas uma única transmissão é assinalada por intervalo.

Na busca de uma abstração que possa refletir com maior precisão o comportamento real das transmissões em redes sem fio, foi proposto o modelo de interferência física, conhecido como *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* - SINR. O modelo SINR modela os efeitos físicos sobre as transmissões, permitindo que sejam construídos algoritmos eficientes para o escalonamento. Em particular, o modelo calcula as interferências entre múltiplas possíveis transmissões, levando em conta fatores como decaimento do sinal e ruído de ambiente para permitir múltiplas transmissões simultâneas, no mesmo intervalo de tempo, o reuso espacial.

É intuitiva a noção de que um sinal emitido por uma fonte vai ficando mais fraco conforme percorre o meio. Mais precisamente, o modelo SINR considera que o decaimento da potência do sinal transmitido é inversamente proporcional à distância percorrida pela onda [Rappaport 2002]. A equação 1 mostra a relação entre potência transmitida e recebida em relação à distância, onde i e j são transmissor e receptor, respectivamente, $d(i, j)$ é a distância entre os dispositivos e P_T é a potência transmitida.

$$P_{ij} = \frac{P_T}{d(i, j)^\alpha} \quad (1)$$

A equação inclui também um valor α denominado expoente de *path-loss*. Este valor é uma constante que varia de acordo com o meio de comunicação e, através de medições empíricas, foi determinado que pode variar de 1.6 a 6 em ambientes fechados, e de 2 a 4 em ambientes urbanos [Goussevskaja 2009].

Como exemplo, considere a Figura 1. Nela, os dispositivos A e B estão a uma distância de $100m$. Considere que a transmissão é feita por uma antena isotrópica com potência de $1mW$ e o ambiente é urbano ($\alpha = 4$). Pela Equação 1 temos

$$P_{ij} = \frac{P_T}{d(i, j)^\alpha} = \frac{1e-03}{100^4} = 1e-08mW \quad (2)$$

Desta forma, pela propriedade de decaimento do sinal, uma transmissão realizada por um dispositivo com potência de $1mW$ chegará ao receptor com uma potência de $1e - 08mW$, após percorrer uma distância de 100 metros.

A sensibilidade da antena do receptor é um dos fatores cruciais para uma comunicação efetiva. A correta recepção dos dados exige que o sinal chegue com uma intensidade mínima pré-definida. Este valor, normalmente expresso em decibel miliwatt

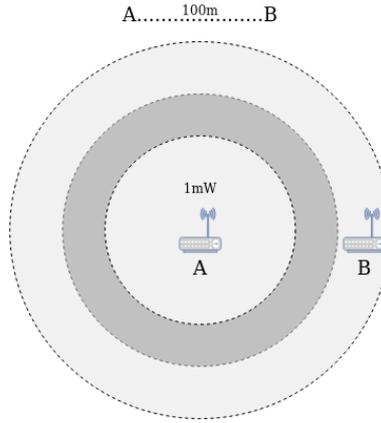


Figura 1. Exemplo de cenário de decaimento do sinal

(dBm), varia de -85dBm para o padrão 802.11g até -120dBm para receptores profissionais [Huawei 2024].

Somente exceder a sensibilidade do receptor não é suficiente. Um sinal sofre diversas variações por interferências indesejadas, que não podem ser controladas, o chamado ruído de fundo [Camargo and Duarte 2021]. Esse ruído, inerente ao ambiente, normalmente é adotado como uma constante aleatória N_0 expressa em decibéis.

Para alcançar eficiência, as comunicações devem ser coordenadas de maneira a evitar a interferência mútua que impede a correta recepção do sinal [Goussevskaia 2009]. A interferência total (I_i), é o acúmulo de todas as interferências causadas por transmissões simultâneas em um receptor i . A Equação 3 mostra como obter a interferência total para uma rede com τ dispositivos transmitindo simultaneamente, onde i e j são transmissor e receptor, respectivamente.

$$I_i = \sum_{\substack{k \in \tau, \\ k \neq i, j}} \frac{P_{T_k}}{d(k, i)^\alpha} \quad (3)$$

Como exemplo, considere a situação mostrada na Figura 2. Nela, três dispositivos, a, b e c , transmitem simultaneamente com uma potência de 1mW para seus respectivos receptores d, e e f , também em um ambiente urbano ($\alpha = 4$). A Tabela 1 mostra a interferência parcial e total obtida em cada transmissão.

Tabela 1. Interferências obtidas para o exemplo da figura 2.

	P_{I_a}	P_{I_b}	P_{I_c}	P_I
$a \rightarrow d$	-	$\cong 2.4e-08mW$	$\cong 3.9e-07mW$	$\cong 4.1e-07mW$
$b \rightarrow e$	$1e-08mW$	-	$1.6e-07mW$	$\cong 1.7e-07mW$
$c \rightarrow f$	$\cong 1.5e-08mW$	$\cong 2.4e-08mW$	-	$\cong 3.9e-08mW$

Como pode-se observar, a distância entre os dispositivos é um dos principais fatores para determinar o nível de interferência. Ou seja, quanto mais próximos os dispositivos, maior o nível do distúrbio causado. A potência utilizada também é fator crucial na comunicação, por isso deve ser escolhida uma potência que seja tanto suficiente para a

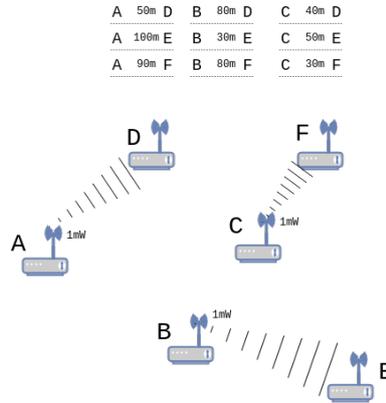


Figura 2. Exemplo de cenário de comunicação paralela.

comunicação com o receptor, tanto quanto para atingir um nível aceitável de transmissões paralelas.

O modelo SINR leva em conta as três propriedades dos sinais citadas acima (decaimento, ruído de fundo e interferência mútua) para determinar se uma comunicação terá ou não sucesso. A Equação 4 mostra como obter o valor SINR para uma comunicação entre um transmissor i e um receptor j para τ transmissões simultâneas.

$$SINR(i, j) = \frac{\frac{P_{T_i}}{d(i, j)^\alpha}}{N_0 + \left(\sum_{\substack{k \in \tau, \\ k \neq i}} \frac{P_{T_k}}{d(k, i)^\alpha} \right)} \quad (4)$$

Este valor deve ser menor que o chamado limite SINR para a comunicação entre i e j ter sucesso. O limite SINR (*SINR threshold*) é representado por γ e expresso em decibéis (dB). Dessa forma, uma transmissão ocorre sem erros se o valor SINR for pelo menos igual a γ . O limite SINR difere para cada dispositivo, uma vez que depende de fatores como capacidade da antena e poder de processamento, valores atrelados à tecnologia utilizada. Dessa forma, uma comunicação bem sucedida, segundo o modelo SINR, obedece à Inequação 5.

$$SINR(i, j) \geq \gamma \quad (5)$$

Quanto ao assinalamento de potência de transmissão, o escalonamento pode ser de duas classes: com controle de potência e com assinalamento de potência *oblivious*. A potência assinalada da maneira *oblivious* é mais utilizada, uma vez que realiza a atribuição de potências antes de qualquer processamento [Sgora et al. 2015]. Esta classe de assinalamento de potência também pode vir em três variações. A atribuição uniforme é a mais simples e direta e consiste em atribuir uma mesma potência para todos os dispositivos. A atribuição linear baseia-se no decaimento do sinal da transmissão para definir a potência necessária. Por fim, a atribuição de raiz quadrada (*square root assignment*) calcula uma potência proporcional à raiz quadrada do decaimento.

Para mostrar o impacto da escolha de potência nos valores do SINR, assim como na capacidade de transmissão paralela, considere novamente o exemplo acima. Nela, foi escolhido um valor aleatório e atribuído de maneira uniforme aos dispositivos. Desta vez, será aplicada uma atribuição linear de potência, ou seja, o valor utilizado será proporcional ao *path-loss* entre os pares de transmissores e receptores.

$$P_T = \gamma \cdot N_0 \cdot d(i, j)^\alpha \quad (6)$$

Na Equação 6, a potência de transmissão (P_T) é obtida através da derivação da Equação 5, onde se atinge força suficiente para atender o limite SINR (γ), o ruído de fundo (N_0) e o decaimento ($d(i, j)^\alpha$), caracterizando uma atribuição linear. No entanto, o valor obtido não considera nenhuma transmissão simultânea, ou seja, qualquer interferência será suficiente para impedir comunicações concorrentes.

Por esta razão, é adicionado um valor de folga (β) à expressão, suficiente para aumentar a potência a níveis que permitam interferências. A expressão obtida está apresentada pela Equação 7.

$$P_T = \gamma \cdot N_0 \cdot (d(i, j) + \beta)^\alpha \quad (7)$$

Aplicando a equação de assinalamento linear ao exemplo, e considerando um limite SINR de 1dB e uma folga de 10 metros ($\beta = 10$), os novos valores de potência transmitida, potência recebida, interferência total e SINR estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de SINR obtidos com atribuição linear de potência.

	P_T	P_R	P_I	$SINR$
$a \rightarrow d$	$\cong 1.6e-02mW$	$\cong 2.56e-09mW$	$\cong 1.33e-09mW$	$\cong 0.40dB$
$b \rightarrow e$	$\cong 3.2e-03mW$	$\cong 3.95e-09mW$	$\cong 6.72e-10mW$	$\cong 3.73dB$
$c \rightarrow f$	$\cong 3.2e-03mW$	$\cong 3.95e-09mW$	$\cong 3.2e-10mW$	$\cong 4.76dB$

Os valores de potência apresentados na tabela, demonstram as vantagens em utilizar uma atribuição linear. Como é possível visualizar, o valor SINR para as três transmissões está mais próximo do que anteriormente obtidos, permitindo que o limite SINR seja mais facilmente definido.

Conforme mencionado acima, o *Time Division Multiple Access* (TDMA) é um esquema de escalonamento que assinala transmissões para intervalos de tempo. Tendo em vista a importância do escalonamento, que pode ser visto como a base para todos os demais serviços a serem disponibilizados na infraestrutura, diversas estratégias mais eficientes que o TDMA simples têm sido propostas. Ele é base, por exemplo, para o roteamento [Duarte Jr et al. 2004], a detecção de falhas [Duarte Jr et al. 2023] e a difusão confiável [Jeanneau et al. 2017]. Uma variação do modelo que permite a realização de múltiplas transmissões em um mesmo intervalo é denominada *Spatial Reuse TDMA* (STDMA) [Cai et al. 2003]. O STDMA, deve levar em conta as interferências entre os dispositivos de um mesmo intervalo. O objetivo do escalonamento STDMA é minimizar o número total de intervalos para permitir que todos os dispositivos se comuniquem, o que é equivalente a maximizar o reuso espacial.

O problema de escalonamento sob o modelo SINR é provavelmente NP-Completo, ou seja, não existe um algoritmo com tempo polinomial de execução para encontrar um escalonamento ótimo [Goussevskaja et al. 2007]. Como se trata de um problema NP-completo, diversos algoritmos de aproximação foram propostos, sendo alguns deles utilizando a abordagem de grafos e aplicando o modelo SINR.

Os algoritmos de escalonamento podem ser classificados de diversas maneiras. Primeiramente quanto a topologia, os algoritmos podem ser dependentes ou independentes da topologia, ou seja, dependem das informações topológicas da rede ou não dependem. Também podem ser classificados quanto ao processamento das informações, entre algoritmos distribuídos, aqueles cujo processamento é realizado por todos os dispositivos, e centralizados, onde o processamento é feito por uma unidade central que comunica o restante da rede. Por fim, também podem ser definidos pela entidade alvo do escalonamento: algoritmos de escalonamento de nodos são aqueles nas quais todas as transmissões de um dispositivo devem ocorrer em conjunto, e escalonamentos de enlaces são aqueles nas quais transmissões individuais (representadas por enlaces) são escalonadas.

Para todas as classificações acima apresentadas, o algoritmo proposto no presente trabalho pode ser classificado como distribuído e dependente da topologia para o escalonamento de enlaces, uma vez que o cômputo do escalonamento deverá ser realizado por todos os dispositivos, que por sua vez irão necessitar das informações topológicas da rede para realizar os cálculos do escalonamento.

3. A Heurística Down-To-Earth

A heurística *Down-to-Earth* (DTE) é executada antes do escalonamento propriamente dito, definindo o conjunto de enlaces a serem escalonados, bem como a potência de transmissão de cada dispositivo. A experiência obtida com a realização de diversos experimentos com algoritmos de escalonamento SINR da literatura [Camargo and Duarte 2021], leva à conclusão de que os desafios para o escalonamento em redes densas com reuso espacial são imensos. A heurística DTE surgiu como forma de lidar com os desafios do problema, viabilizando o reuso espacial. Neste sentido, a DTE determina que, a princípio, *cada dispositivo se comunica diretamente apenas com o vizinho mais próximo*. O objetivo é melhorar a chance de haver reuso espacial, diminuindo a interferência entre as possíveis transmissões simultâneas.

Além disso, mas também com o objetivo de diminuir ao máximo a interferência entre as transmissões, *a potência de transmissão de cada dispositivo é configurada para o nível mínimo exigido para o correto recebimento pelo vizinho mais próximo, mais uma folga*. Esta folga justamente permite que haja outras transmissões simultâneas. Com a “folga” as interferências não “destroem” o sinal, garantindo (em certos casos) o reuso espacial. Este cálculo de potência foi descrito na seção anterior.

O conjunto de enlaces definidos pela heurística DTE forma o grafo de transmissão. Além da inclusão das arestas de cada dispositivo para o vizinho mais próximo, deve ser garantido que todos os dispositivos podem tanto transmitir como receber mensagens. Além disso, o grafo de transmissão deve ser fortemente conexo, isto é, deve haver um caminho direcionado de qualquer dispositivo para qualquer outro. Assim, pode ser necessária a inclusão de mais arestas no grafo, além daquelas de cada dispositivo para o vizinho mais próximo.

A heurística DTE recebe como entrada uma rede que consiste de um conjunto de dispositivos distribuídos no plano euclidiano. Assume-se que a rede é do tipo *1-hop*, isto é, todos os dispositivos estão dentro das áreas de cobertura uns dos outros. Sendo assim, cada dispositivo consegue se comunicar diretamente com qualquer outro dispositivo. A princípio, os dispositivos conhecem apenas seus próprios identificadores e posições no espaço. Podem ser identificados dois passos na heurística DTE. O objetivo do primeiro passo é fazer com que cada dispositivo tome conhecimento das posições de todos os demais dispositivos. Neste passo, cada dispositivo transmite seu identificador e localização para o restante da rede. É importante frisar que o modelo de sistema adotado é estático, ou seja, a composição do sistema não muda ao longo do tempo e estes não se movem. Caso a rede fosse dinâmica, outras estratégias para descoberta de topologia [Nassu et al. 2007] e monitoramento [Duarte Jr and Weber 2003, Duarte et al. 2011] seriam necessárias. Mas sendo uma rede estática, para a descoberta da topologia basta adotar o escalonamento TDMA clássico, ou seja, cada dispositivo comunica em um intervalo de tempo individual. Em seguida, os dispositivos devem definir os vizinhos com o quais vai se comunicar e regular suas potências.

A intuição da heurística DTE é garantir que cada dispositivo i se comunique apenas com o vizinho j que é o que está mais próximo no plano. Idealmente é incluída apenas uma nova aresta direcionada (i, j) , partindo de i , no grafo de transmissões. Entretanto, a inclusão apenas destas arestas pode acarretar em algum dispositivo ter ficado sem aresta de saída (transmissão) ou entrada (recepção). Nestes casos, o dispositivo não conseguiria transmitir ou receber mensagens. Além disso, é necessário que o grafo resultante seja fortemente conexo, isto é: deve haver um caminho direcionado de qualquer vértice para qualquer outro vértice do grafo de transmissão.

Para garantir que o grafo de transmissão seja fortemente conectado, é executado um algoritmo de Árvore Geradora Mínima (MST - *Minimum Spanning Tree*). Uma MST é uma estrutura conectada e essencial para diversos protocolos distribuídos, em especial aqueles voltados para o envio de informação para toda a rede, como nos *broadcasts*, uma vez que permite a disseminação de mensagens com custo mínimo de comunicação. A MST consiste de uma árvore que conecta todos os vértices do grafo, além disso considera que as arestas têm pesos, onde o custo total da soma dos pesos das arestas é o menor possível. Com a premissa de que todos dispositivos possuem conhecimento da topologia global da rede, é possível aplicar diversos algoritmos eficientes para encontrar a MST de um grafo. Na implementação deste trabalho optou-se por utilizar o algoritmo de Kruskal para esta tarefa.

Recapitulando, a heurística DTE determina inicialmente o conjunto de enlaces que são usados para comunicação. Estes enlaces permitem que todos os dispositivos (i) façam pelo menos uma transmissão e (ii) recebam transmissões de pelo menos um vizinho. O conjunto de enlaces forma um grafo de transmissão fortemente conectado. Em seguida, cada transmissor ajusta a potência de transmissão. Essa abordagem tira proveito do fato de que cada dispositivo conhece a posição de cada vizinho para o qual transmite. A abordagem é do tipo *oblivious power assignment* com atribuição linear de potência.

Como o trabalho aqui proposto utiliza uma árvore geradora mínima, ao menos um vértice irá possuir dois receptores: todos os vértices que não são folha (na árvore) obrigatoriamente possuem pelo menos duas arestas de saída, representando dois recepto-

res. Para assinalar a potência de um dispositivo, é utilizada uma estratégia simplificada. Para cada dispositivo, é primeiro identificado seu enlace de maior tamanho, ou seja, seu receptor mais distante. Em seguida, estes dispositivos são assinalados com uma potência linearmente proporcional ao receptor mais distante. Desse modo, ao assinalar a potência conforme definido pela Equação 8, é possível garantir que todos enlaces de transmissão tenham potência o bastante para uma correta comunicação, utilizando um único assinalamento e uma única potência para cada dispositivo.

A partir da distância do transmissor para receptor, é definido um nível de potência mínimo suficiente para que a recepção seja correta no receptor mais uma folga, conforme a Equação 8. A expressão é obtida através da derivação da Equação 5, com a adição da folga. A constante adicionada para o acréscimo, denominada γ_{spare} , é necessária para garantir que o valor obtido não seja exatamente igual ao limite, ou seja, é esse “valor de folga” é que permite o reuso espacial.

$$P_T = (\gamma + \gamma_{spare}) \cdot N_0 \cdot d(i, j)^\alpha \quad (8)$$

O passo seguinte consiste no escalonamento dos enlaces definidos para o grafo de transmissão. Um conjunto de enlaces pode ser atribuído para cada intervalo de testes caso suas interferências mútuas não se destruam. Cada enlace deve ser atribuído para um intervalo. O escalonamento é executado sequencial e infinitamente, de forma que todos os dispositivos podem se comunicar. Deve-se observar que a estratégia demanda roteamento de mensagens, para que mensagens de qualquer dispositivo chegue em qualquer outro dispositivo. Em um algoritmo ótimo, todas as combinações possíveis são examinadas sob o modelo SINR. A complexidade do algoritmo ótimo é exponencial, o que torna inviável sua aplicação para valores moderados de n , o número de dispositivos. O algoritmo SK-Iterative apresentado na próxima seção é uma heurística eficiente para resolver este problema.

4. O Algoritmo Sk-Iterative

Nesta seção é apresentado o algoritmo Sk-Iterative (*Stochastic k Iterative*), para escalonamento em redes densas sob o modelo SINR, que faz o assinalamento de transmissões para intervalos de tempo. Assume-se uma rede sem fio, em que os dispositivos estão distribuídos em uma determinada área do plano euclidiano. O conjunto de transmissões a serem escalonadas consiste do conjunto de enlaces direcionados produzidos pela heurística DTE. O escalonamento deve assinalar cada um dos enlaces para pelo menos um intervalo de tempo. Seja t o número de intervalos de tempo necessário para permitir todas as transmissões. O reuso espacial permite que mais de um enlace seja assinalado para um determinado intervalo. O objetivo é minimizar t , o que pode ser conseguido pela maximização do reuso espacial. A aplicação do escalonamento consiste em permitir que os enlaces correspondentes transmitam em cada intervalo de tempo. Após a passagem dos t intervalos de tempo, todos os transmissores tiveram oportunidade de comunicar. O escalonamento é então executado novamente e assim por diante *ad infinitum*.

O algoritmo Sk-Iterative recebe como entrada um conjunto L de enlaces que devem ser escalonados. O algoritmo recebe o parâmetro k , que define o número máximo de transmissões simultâneas em um único intervalo. Foi realizado um número representativo

de testes empíricos com o algoritmo ótimo para determinar k . Os resultados permitem concluir que o número máximo de enlaces que podem ser assinalados para um único intervalo varia entre 10% e 20% do número total de enlaces a serem escalonados. Desta forma, o valor de k adotado para este trabalho é de 20% de $|L|$ (número total de enlaces).

O algoritmo Sk-Iterative consiste de duas fases. Na primeira fase são definidos conjuntos de até k enlaces que podem ser assinalados para um único intervalo. Cada um destes conjuntos é denominado K_{set} e representa um assinalamento dito “candidato”, que pode ser escolhido com um dos intervalos do escalonamento final produzido. Na segunda fase do algoritmo, é executado um algoritmo que resolve o problema de cobertura de conjuntos (SCP - *Set Covering Problem*) sobre o conjunto de assinalamentos candidatos.

Na primeira fase do algoritmo Sk-Iterative, os enlaces são então selecionados de forma aleatória como candidatos para serem assinalados para cada intervalo, como descrito a seguir. Inicialmente são selecionados k enlaces aleatórios de L . O primeiro enlace é assinalado sem restrições. A partir do segundo, cada enlace só pode ser assinalado para o intervalo se a transmissão tiver sucesso levando em conta as interferências com o conjunto de enlaces já assinalados ao intervalo. As interferências são calculadas de acordo com o modelo SINR. Se o enlace não puder ser assinalado, um próximo é testado. Finalmente, após todos os k enlaces terem sido testados (sendo assinalados ou não) o intervalo fica definido e um novo intervalo é iniciado. Este processo se repete por λ iterações. Em outras palavras, λ intervalos candidatos são gerados.

Para ilustrar o processo de criação de intervalos candidatos na primeira fase do algoritmo Sk-Iterative, considere a rede exemplo da Figura 3. Esta rede consiste de 8 dispositivos distribuídos em uma área de 100x100 metros quadrados. São utilizados os seguintes parâmetros: *threshold* SINR (γ) igual a 20dB, *threshold spare* (γ_{spare}) igual a 50dB, um ruído de fundo (N_0) igual $-90dBm$ e $\alpha = 4$. Os intervalos candidatos gerados pelo algoritmo Sk-Iterative com $\lambda = 30$, ou seja, 30 iterações na primeira fase, são os seguintes: $\{0 \rightarrow 5, 0 \rightarrow 3\}$, $\{3 \rightarrow 1, 4 \rightarrow 6\}$, $\{5 \rightarrow 2, 5 \rightarrow 0\}$, $\{5 \rightarrow 0, 5 \rightarrow 2\}$, $\{5 \rightarrow 2, 4 \rightarrow 6\}$, $\{5 \rightarrow 0, 5 \rightarrow 6\}$, $\{3 \rightarrow 0, 3 \rightarrow 1\}$, $\{0 \rightarrow 5, 0 \rightarrow 3\}$, $\{6 \rightarrow 4, 6 \rightarrow 5\}$. É possível perceber que o algoritmo gera um bom número de combinações distintas mesmo com uma rede diminuta.

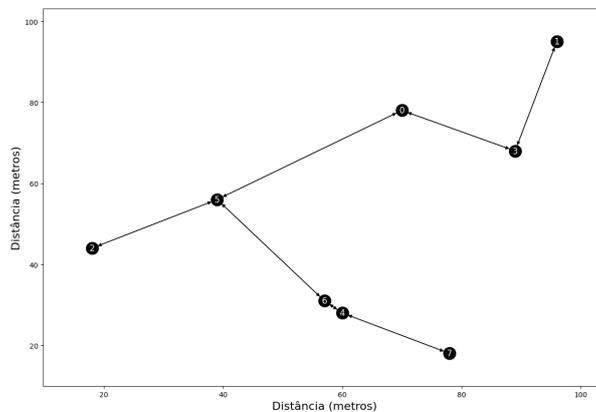


Figura 3. Rede exemplo com 8 dispositivos.

Durante todas as λ iterações, todos os enlaces de L são considerados como can-

didatos para assinalamento em todos os intervalos. Após λ iterações, inicia-se uma fase em que é executado um algoritmo baseado na estratégia denominada Stochastic k-Greedy (Sk-Greedy) [Fulber-Garcia et al. 2022]. Nesta fase continuam sendo definidos novos intervalos candidatos para o escalonamento final. A principal diferença desta fase é que cada enlace é assinalado para um único intervalo candidato, sendo removido de L assim que o intervalo que o contém é definido. O objetivo desta fase é justamente garantir que todos os enlaces sejam assinalados para um intervalo.

A versão utilizada do algoritmo Sk-Greedy na segunda fase do algoritmo Sk-Iterative é como segue. O primeiro enlace é assinalado sem restrições. A partir do segundo, cada enlace só pode ser assinalado para o intervalo se a transmissão tiver sucesso levando em conta as interferências com o conjunto de enlaces já assinalados ao intervalo. Se o enlace não puder ser assinalado, um próximo é testado. Finalmente, após todos os k enlaces terem sido testados (sendo assinalados ou não) o intervalo é fechado e um novo intervalo é iniciado. Os enlaces que foram assinalados não são considerados para a definição dos próximos intervalos candidatos. Tal processo se repete até que o escalonamento assinale todos os enlaces para algum intervalo candidato.

Ao final do processo de definição de intervalos candidatos, o Sk-Iterative produz o escalonamento. É utilizado um algoritmo que resolve o *Set Covering Problem* (SCP) sobre o conjunto de intervalos candidatos produzidos. O SCP é formalmente definido da seguinte maneira. Seja um conjunto $U = \{u_i, \dots, u_m\}$ o universo de elementos e $S = \{s_i, \dots, s_n\}$ um conjunto de subconjuntos tal que $s_i \subset U$ e $\cup s_i = U$; deve-se encontrar o menor subconjunto $X \subset S$ tal que $X = U$. Como o SCP é um problema da classe NP-difícil, a opção para implementação foi por adotar um algoritmo heurístico para sua resolução. Foi adota a estratégia gulosa de Grossman [Grossman and Wool 1997]. O algoritmo guloso é simples: iterativamente, escolhe-se o conjunto que cobre o maior número de itens não cobertos e adiciona-se a uma lista; esse processo é repetido até que todos os itens estejam cobertos. Desta forma o escalonamento final inclui todos os enlaces definidos originalmente.

5. Avaliação: Resultados de Simulação

A estratégia Sk-Iterative foi avaliada através de simulação. Nesta seção são apresentados os resultados obtidos em relação ao tamanho do escalonamento resultante, comparando a outras abordagens apresentadas.

Em primeiro lugar é avaliado o impacto do número de iterações (λ) no tamanho do escalonamento resultante. O algoritmo foi executado em redes com 30, 50 e 100 dispositivos, variando o número de iterações de 0.5 até 5 vezes o número de enlaces que devem ser escalonados, realizando incrementos de 0.5 vezes. A execução assume novamente $\gamma = 20dB$, $\gamma_{spare} = 50dB$, $N_0 = -90dBm$ e $\alpha = 4$, utilizando a abordagem gulosa para a resolução do SCP.

Os resultados são apresentados na Figura 4. Fica claro o forte impacto do aumento do valor de λ de 0.5 para 1.0 vez o número de enlaces a serem escalonados. A partir dos próximos incrementos, a curva suaviza, e a partir de λ igual a 3.0 vezes o número de enlaces a serem escalonados, a curva fica quase reta, com irrisória inclinação. Desta forma, para os demais experimentos foi sempre usado no trabalho $\lambda = 3$ vezes o número de enlaces a serem escalonados.

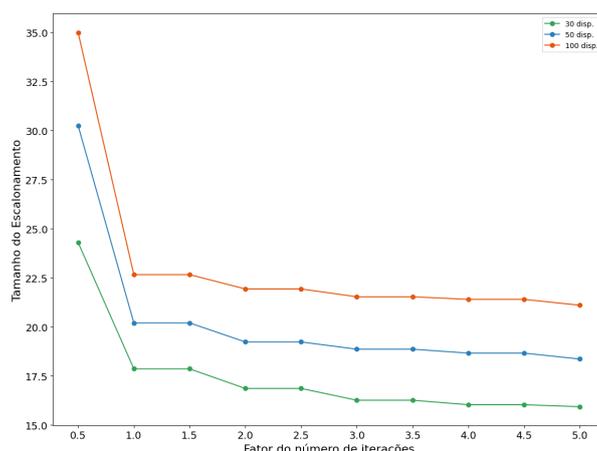


Figura 4. Tamanho médio do escalonamento obtido com o algoritmo Sk-Iterative para diferentes números de iterações (λ).

Em seguida são apresentados resultados comparando o algoritmo Sk-Iterative com o algoritmo ótimo e a estratégia baseada no algoritmo Sk-Greedy. Como é computacionalmente custoso calcular um escalonamento ótimo para redes com tamanhos elevados, só é possível fazê-lo para redes pouco densas. Por essa razão, os experimentos de comparação foram realizados separadamente (um conjunto de experimentos comparando com o ótimo e outro conjunto comparando com a versão do Sk-Greedy). Nas duas comparações foi utilizada a heurística DTE para obter o conjunto de enlaces a serem escalonados, com os mesmos parâmetros anteriormente utilizados: $\gamma = 20dB$, $\gamma_{spare} = 50dB$ e $\alpha = 4$. As redes foram criadas de forma aleatória, considerando um espaço plano com dimensões de 100x100 metros quadrados.

No primeiro experimento, o Sk-Iterative é comparado com o algoritmo ótimo, assumindo um tamanho de rede único e igual a 8, que resultou em um conjunto com (em média) 14 enlaces DTE. Os resultados obtidos para 30 amostras geradas são mostrados na Figura 5. É possível observar o bom desempenho do algoritmo Sk-Iterative, que se aproxima fortemente do ótimo. Em média, a diferença dos tamanhos de escalonamentos produzidos por ambos foi de apenas 1 único intervalo de tempo.

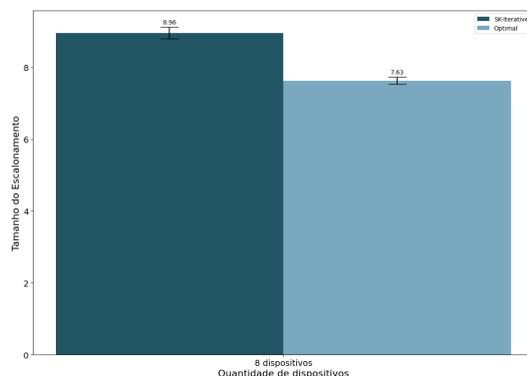


Figura 5. Tamanho médio dos escalonamentos produzidos pelos algoritmos SK-Iterative e ótimo.

Em seguida o algoritmo Sk-Iterative foi comparado com a versão do algoritmo

Sk-Greedy. Neste experimento foi possível utilizar testes com redes mais densas. A Figura 6 mostra os resultados para redes geradas de forma aleatória com 50, 75 e 100 dispositivos. Para cada tamanho foram geradas 30 amostras distintas. A aplicação da heurística DTE produziu conjuntos de enlaces para o escalonamento com tamanhos 98, 148 e 198, respectivamente. Os resultados da Figura 6 permitem concluir que, na maioria dos casos, os escalonamentos produzidos pela versão do algoritmo Sk-Greedy são 40% maiores que aqueles produzidos pelo algoritmo Sk-Iterative.

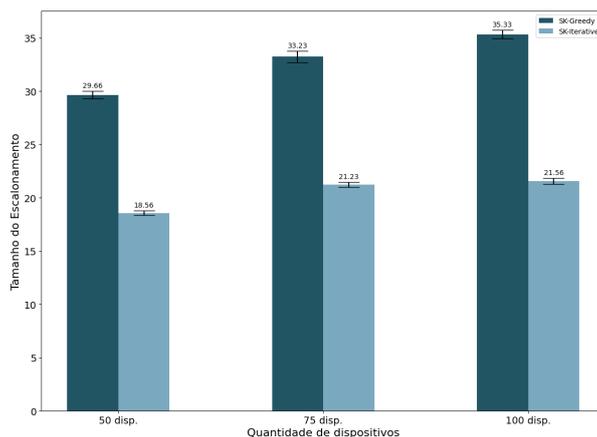


Figura 6. Tamanho médio dos escalonamentos obtidos pelos algoritmos SK-Iterative e SK-Greedy.

6. Conclusão

Este trabalho propôs o algoritmo Sk-Iterative, uma estratégia heurística para a resolução do problema de escalonamento de enlaces de redes sem fio com reuso espacial, sob o modelo SINR. Utilizando o conjunto de enlaces gerados pela heurística DTE, que formam uma topologia fortemente conectada, o Sk-Iterative é baseado em uma estratégia gulosa e iterativa de geração de assinalamentos candidatos, sobre a qual é aplicado um algoritmo que calcula o SCP (*Set Covering Problem*). O algoritmo SK-Iterative foi implementado através de simulação e resultados são apresentados, em particular mostrando que os escalonamentos são muito próximos daqueles obtidos com o algoritmo ótimo. Para trabalhos futuros, está prevista a investigação do uso do algoritmo SK-Iterative como suporte para a execução de estratégias eficientes de roteamento, bem como algoritmos distribuídos em redes sem fio sob o modelo SINR

Referências

- Cai, Z., Lu, M., and Georgiades, C. (2003). Topology-transparent time division multiple access broadcast scheduling in multihop packet radio networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 52(4):970–984.
- Camargo, F. E. D. and Duarte, E. P. (2021). A down-to-earth scheduling strategy for dense SINR wireless networks. In *10th Latin-American Symp. Dep. Computing (LADC)*.
- Duarte, E., Garrett, T., Bona, L., et al. (2010). Finding stable cliques of planetlab nodes. In *IEEE/IFIP Int. Conf. Dependable Systems & Networks (DSN)*, pages 317–322.

- Duarte, E. P., Weber, A., and Fonseca, K. V. (2011). Distributed diagnosis of dynamic events in partitionable arbitrary topology networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 23(8):1415–1426.
- Duarte Jr, E. P., Rodrigues, L. A., Camargo, E. T., and Turchetti, R. C. (2023). The missing piece: a distributed system-level diagnosis model for the implementation of unreliable failure detectors. *Computing*, 105(12):2821–2845.
- Duarte Jr, E. P., Santini, R., and Cohen, J. (2004). Delivering packets during the routing convergence latency interval through highly connected detours. In *International Conference on Dependable Systems and Networks, 2004*, pages 495–504. IEEE.
- Duarte Jr, E. P. and Weber, A. (2003). A distributed network connectivity algorithm. In *The Sixth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, 2003. ISADS 2003.*, pages 285–292. IEEE.
- Fulber-Garcia, V., de Camargo, F. E., and Duarte, E. P. (2022). Sk-greedy: A heuristic scheduling algorithm for wireless networks under the sinr model. In *2022 11th Latin-American Symposium on Dependable Computing (LADC)*. ACM.
- Fulber-Garcia, V., Engel, F., and Duarte, E. P. (2024). A genetic scheduling strategy with spatial reuse for dense wireless networks. *International Journal of Hybrid Intelligent Systems*, 20(1):41–55.
- Goussevskaia, O. (2009). Efficiency of wireless networks: Approximation algorithms for the physical interference model. *Foundations and Trends in Networking*, 4(3):313–420.
- Goussevskaia, O., Oswald, Y. A., and Wattenhofer, R. (2007). Complexity in geometric SINR. In *MobiHoc '07*. ACM Press.
- Grossman, T. and Wool, A. (1997). Computational experience with approximation algorithms for the set covering problem. *European Journal of Operational Research*, 101(1):81–92.
- Halldorsson, M. M. and Tonoyan, T. (2019). Plain SINR is enough! In *Proceedings of the 2019 ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, pages 127–136.
- Huawei (2024). Receiver sensitivity. <https://support.huawei.com/enterprise/br/doc/EDOC1000077015/bc2e25db/receiver-sensitivity>. Acessado em 20/03/2024.
- Jeanneau, D. et al. (2017). An autonomic hierarchical reliable broadcast protocol for asynchronous distributed systems with failure detection. *JBCS*, 23:1–14.
- Kumar, N., Pathan, A.-S. K., Duarte, E. P., and Shaikh, R. A. (2015). Critical applications in vehicular ad hoc/sensor networks. *Telecommunication Systems*, 58:275–277.
- Nassu, B. T., Nanya, T., et al. (2007). Topology discovery in dynamic and decentralized networks with mobile agents and swarm intelligence. In *ISDA*, pages 685–690.
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: principles and practice*. Prent. Hall.
- Sgora, A., Vergados, D. J., and Vergados, D. D. (2015). A survey of TDMA scheduling schemes in wireless multihop networks. *ACM Computing Surveys*, 47(3):1–39.
- Teng, Y. et al. (2019). Resource allocation for ultra-dense networks: A survey, some research issues and challenges. *IEEE Comm. Surveys Tutorials*, 21(3):2134–2168.