

Uma Estratégia Bioinspirada para Escalonamento em Redes Sem Fio sob o Modelo SINR

Fábio Engel de Camargo^{1,2}, Vinicius Fulber-Garcia², Elias P. Duarte Jr.²

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
R. Cristo Rei, 19 Toledo 85902-490 PR

²Departamento de Informática – Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Caixa Postal 19018 Curitiba 81531-990 PR

fabioe@utfpr.edu.br, {vfgarcia, elias}@inf.ufpr.br

Resumo. *A comunicação sem fio é hoje utilizada em larga escala. Novos avanços da tecnologia, como redes celulares 6G e Internet das coisas tendem a trazer ainda maior destaque e novos desafios, como densidades cada vez maiores. Um canal de comunicação sem fio é um meio compartilhado, que tem como um dos maiores desafios a interferência causada por transmissões simultâneas. Selecionar quais transmissões devem ocorrer simultaneamente, ou não, de maneira eficiente é conhecido como “problema do escalonamento”, um problema NP-Completo. Este trabalho apresenta uma heurística genética como solução para o problema do escalonamento em redes sem fio sob o modelo SINR. A heurística é especificada, avaliada por meio de experimentos, incluindo um teste de convergência e simulação para avaliar a sua capacidade em obter um escalonamento eficiente. Os resultados mostram que a solução proposta é capaz de produzir uma boa solução em tempo polinomial.*

1. Introdução

Atualmente existe uma grande diversidade de padrões de comunicação sem fio, cada um com características específicas ou direcionado a um tipo particular de aplicação. Os padrões costumam diferenciar-se pelas taxas de transmissão atingidas, alcance de transmissão ou espectro de frequências utilizado. Apesar das diferenças, todos compartilham a mesma tecnologia básica: a transmissão de dados utilizando ondas de radiofrequência em um meio compartilhado [White 2015]. A comunicação por um canal compartilhado possui como desvantagem a interferência causada por outras transmissões simultâneas. Em redes de comunicação sem fio, nas quais têm-se múltiplos dispositivos compartilhando o mesmo meio de transmissão e espectro de frequências, um dos grandes desafios está na forma com que se lida com a interferência mútua causada pelos dispositivos. A interferência é responsável por prejudicar a qualidade do sinal recebido, podendo impossibilitar que a mensagem seja recebida corretamente.

Como a interferência é um fenômeno inerente à comunicação sem fio, seus efeitos devem ser considerados no desenvolvimento de qualquer estratégia de comunicação para este tipo de meio. Uma das formas mais comuns de lidar com a interferência, consiste na utilização de um escalonamento das transmissões, separando-as no espaço ou no tempo [Sgora et al. 2015]. O escalonamento pode utilizar-se das propriedades do canal de comunicação, como por exemplo, do fato da potência do sinal transmitido desvanecer em

relação a distância, para escalonar transmissões simultâneas entre dispositivos que se encontram razoavelmente distantes. O nível de potência do sinal transmitido por uma fonte considerada interferente, que esteja a uma distância suficientemente grande do receptor, pode ser recebida com nível pequeno o suficiente que não impeça a correta recepção de um sinal transmitido por outra fonte mais próxima. O chamado “reuso espacial” permite a transmissão de múltiplos sinais por dispositivos que utilizam um mesmo espectro de frequência, no mesmo instante de tempo, desde que suas interferências não impeçam o correto recebimento pelos respectivos destinos. Quanto maior o número de transmissões possíveis em um mesmo instante de tempo, maior é o reuso espacial.

Adota-se neste presente trabalho o modelo SINR (*Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio*) para representação do meio de comunicação sem fio. Este modelo é conhecido por capturar com boa precisão os efeitos inerentes ao canal de comunicação sem fio, e principalmente por considerar a interferência cumulativa na recepção do sinal [Halldórsson and Mitra 2011, Halldórsson and Wattenhofer 2019]. Sob este modelo foram propostos diversos trabalhos nos quais são apresentadas estratégias de comunicação que utilizam algoritmos de escalonamento para obter maior eficiência na comunicação. [Moscibroda and Wattenhofer 2006], [Goussevskaia et al. 2010, Batta et al. 2019].

Algoritmos de escalonamento tem como objetivo assinalar demandas de comunicação sobre intervalos de tempo utilizados para transmissão. [Goussevskaia et al. 2007] mostra que realizar um escalonamento eficiente, ou simplesmente resolver o “problema do escalonamento”, é um problema NP-completo. Por este motivo, muitos trabalhos nesta área exploram algoritmos que embora não produzam a solução ótima, são capazes de obter soluções próximas ao ótimo e executam em tempo aceitável. Como exemplo, temos os algoritmos de aproximação [Blough et al. 2010, Halldórsson and Wattenhofer 2019], e as heurísticas [Brar et al. 2006, Al-dhelaan et al. 2016]. Um algoritmo de aproximação produz uma solução com “garantia de qualidade”, i.e., uma solução cujo resultado não é pior que uma fração pré-determinada da solução ótima. Em contraposição, soluções heurísticas não possuem qualquer garantia sobre a qualidade da solução. Entretanto, são algoritmos que fornecem uma solução de qualidade, normalmente em tempo adequado para a sua implementação.

Este trabalho apresenta como solução para o problema do escalonamento em redes sem fio sob o modelo SINR uma heurística genética que chamamos de *Genetic-based Transmission Scheduler* - GeTS. Heurísticas genéticas (ou apenas algoritmos genéticos) fazem parte de uma metologia em ciência da computação conhecida como computação bioinspirada. As heurísticas genéticas inspiram-se no princípio Darwiniano de seleção natural e também na genética. São algoritmos probabilísticos que possuem um mecanismo de busca paralela e adaptativa, baseado no princípio de sobrevivência dos mais apto. Esta técnica de busca não requer qualquer tipo de conhecimento inicial. A escolha deste tipo de algoritmo dá-se, portanto, pela sua capacidade em resolver problemas complexos e obter soluções próximas ao ótimo em tempo de execução adequado. O trabalho também avalia a capacidade do algoritmo GeTS em obter um escalonamento de tamanho mínimo para uma pequena quantidade de dispositivos. Além disso, é apresentado um teste de convergência com o objetivo de mostrar a viabilidade do algoritmo.

O restante do trabalho está organizado da seguinte maneira. Nas Seções 2 e 3 são

descritos, respectivamente, o modelo SINR e o problema do escalonamento sob o modelo SINR. Na Seção 4 é apresentado o *Genetic-based Transmission Scheduler*. Na Seção 5 são mostrados os resultados de dois experimentos realizados para avaliação do GeTS. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 6.

2. O Modelo SINR

A modelagem dos efeitos que impactam a comunicação sem fio representa um papel fundamental para o entendimento sobre as comunicações neste meio e para a criação de algoritmos e protocolos de rede eficientes. O modelo SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*), também conhecido como modelo de interferência física ou modelo físico, é um modelo para redes sem fio que considera os efeitos da interferência cumulativa na recepção do sinal, bem como os efeitos da perda de percurso da potência do sinal transmitido. Estudos experimentais, como em [Son et al. 2006] e [Maheshwari et al. 2008], mostram que o modelo SINR possui uma boa aproximação dos ambientes reais de comunicação sem fio.

O modelo SINR provém da relação sinal ruído mais interferência, que é uma métrica utilizada para mensurar a qualidade dos enlaces de comunicação sem fio. A partir desta métrica é construído um critério para estabelecer se uma transmissão pode ocorrer, baseado no chamado limite SINR, que é especificado na Equação 1 e descrito nos próximos parágrafos. Assim, se calcula se um sinal transmitido por um dispositivo i pode ser recebido e corretamente decodificado por um dispositivo j . Este critério baseia-se em três importantes propriedades observadas na comunicação sem fio. A primeira delas é a propagação do sinal, ou perda de percurso. A perda de percurso é responsável pela representação do decaimento do nível de potência do sinal transmitido. O nível de potência de transmissão P_{T_i} , utilizado pelo dispositivo i , decai à medida que percorre o livre espaço. Isto faz com que o nível de potência do mesmo sinal recebido pelo dispositivo j seja diferente daquele transmitido. O modelo SINR pode acomodar diferentes modelos para representação da propagação (ganho) do sinal. O modelo utilizado neste trabalho estabelece que os dispositivos encontram-se no plano euclidiano, e que a potência do sinal transmitido decai proporcionalmente ao inverso da distância entre o transmissor i e o receptor j , representado por $d(i, j)$, elevado a um expoente denominado de *path loss* (perda de percurso), α . A utilização deste modelo de propagação do sinal faz com que alguns autores denominem, ou classifiquem, este modelo SINR como modelo SINR geométrico [Goussevskaia et al. 2010, Lam et al. 2015].

As outras duas propriedades correspondem a presença de ruído e à interferência entre os sinais. Ruídos são sinais elétricos indesejados, os quais normalmente não são passíveis de controle e que podem interferir com os sinais desejados (aqueles sinais transmitidos com mensagens). O circuito receptor e mesmo as antenas podem ser fontes de ruído, prejudicando a recepção. Para incluir os efeitos do ruído proveniente de diversas fontes é comum a utilização de uma constante N_0 que sintetiza os ruídos em um único ruído de fundo. Já a interferência é a superposição de ondas no espaço, um efeito com enorme relevância na caracterização de um modelo de comunicação sem fio. Este efeito se manifesta em um sistema de comunicação sem fio quando transmissões simultâneas acontecem. Transmissões simultâneas são realizadas por múltiplos transmissores que encontram-se próximos uns aos outros, e que utilizam o mesmo espectro de frequências. Quando transmissões simultâneas ocorrem, o que o dispositivo receptor recebe é uma

composição de sinais provenientes de todos os transmissores próximos. Exceto quando são utilizadas tecnologias para a recepção de sinais de múltiplos transmissores ao mesmo instante, assim como o CDMA (*Code Division Multiple Access*), MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e códigos espaço-tempo (*space-time codes*), o receptor dedica-se a decodificar somente um sinal. Normalmente, o sinal a ser decodificado é o de maior nível de potência, todos os demais são considerados, portanto, sinais interferentes [Lv et al. 2010].

No modelo SINR, a transmissão é considerada bem sucedida apenas se a potência do sinal recebido, em razão da soma das potências dos τ sinais interferentes mais a potência do ruído, for maior ou igual ao limiar γ , definido como SINR *threshold* ou limite SINR, expresso em decibéis (dB). A Equação 1 especifica o limite SINR. O limite SINR (γ) depende de uma série de fatores intrínsecos à tecnologia de comunicação, como por exemplo, o poder de processamento do dispositivo receptor e o esquema de codificação utilizado. Portanto, o limite SINR difere de acordo com o sistema de comunicação.

$$\frac{\frac{P_{T_i}}{d(i,j)^\alpha}}{N_0 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{\tau} \frac{P_{T_k}}{d(k,j)^\alpha}} \geq \gamma \quad (1)$$

O modelo SINR torna evidente que não é quantidade de transmissões interferentes que impede a correta recepção de um sinal, mas sim, a potência cumulativa de todos os sinais considerados interferentes recebidos. Assim, é possível afirmar que transmissões simultâneas entre dispositivos que compartilham um mesmo espectro de frequências podem ocorrer, com os respectivos sinais sendo recebidos corretamente, desde que o nível de interferência acumulativo não eleve a SINR a um ponto que impossibilite a recepção. Entretanto, para que isso seja possível é necessário haver algum tipo de coordenação entre as transmissões. A maneira mais comum é através da utilização de algoritmos de escalonamento. A próxima seção dedica-se a explicar como algoritmos de escalonamento podem ser utilizados sob o modelo SINR.

3. Escalonamento no Modelo SINR

As redes de comunicação sem fio, independente do padrão utilizado, compartilham da mesma tecnologia básica: a transmissão de dados utilizando ondas de radiofrequência. As transmissões neste tipo de rede ocorrem pelo ar, um meio de comunicação compartilhado. Isto faz com que seja necessário a existência de mecanismos ou protocolos de acesso ao meio. Protocolos de acesso ao meio são responsáveis por definir como o canal físico (meio de transmissão) pode ser acessado para transmissões, ou seja, coordenam múltiplos dispositivos que buscam comunicar-se. Em geral, estes protocolos podem ser classificados em duas grandes categorias: baseados em contenção e livres de contenção. A primeira categoria não possui uma ordem de acesso, por este motivo, transmissões simultâneas podem ocorrer, levando a colisões e conseqüentemente à impossibilidade de receber corretamente uma transmissão. Já os protocolos livres de contenção buscam evitar que colisões ocorram, ou no caso de ocorrerem, que seu impacto seja desprezível. Um protocolo livre de contenção amplamente utilizado é o *Time Division Multiple Access* (TDMA) [Ergen and Varaiya 2010].

O TDMA permite que vários dispositivos compartilhem o mesmo canal de frequência, dividindo o sinal em diferentes intervalos de tempo. O fluxo de dados neste

esquema é dividido em *frames*. Cada *frame*, por sua vez, é dividido em uma sequência de *time slots*. A quantidade de *time slots* contida em cada *frame* TDMA é chamada de comprimento de *frame* (*frame length*). Cada *time slot* possui a quantidade de tempo necessária para que um pacote seja transmitido entre dispositivos adjacentes. A eficiência deste mecanismo pode ser melhorada, tanto em termos de garantia de atraso, quanto em alcançar maiores taxas de transmissão, ao permitir que um mesmo *time slot* seja utilizado para transmissão por múltiplos dispositivos que estão geograficamente separados no espaço. Isto é conhecido como reuso espacial (*spatial reuse*). A combinação entre TDMA e reuso espacial da origem ao termo *spatial-TDMA* ou apenas STDMA [Nelson and Kleinrock 1985].

Para que o STDMA seja utilizado como mecanismo de controle de acesso, e reuso espacial seja obtido, um algoritmo de escalonamento deve ser utilizado a fim de garantir que as transmissões possam ser recebidas corretamente. Algoritmos de escalonamento sob o modelo SINR tem sido alvo de pesquisa da comunidade acadêmica desde o trabalho seminal de [Moscibroda and Wattenhofer 2006]. A complexidade na obtenção de um escalonamento eficiente levou à criação de uma classe de problemas nesta área conhecida como “problema do escalonamento de enlace” (*link scheduling problem*). Este problema tem por objetivo assinalar enlaces (*links*) de comunicação sobre os intervalos (*slots*) de tempo. Neste contexto, um *link* $\ell = (i, j)$ representa uma demanda de comunicação, sendo i o dispositivo transmissor e j o receptor. O comprimento do *link* é a distância $d(i, j)$ do transmissor ao receptor.

O problema do escalonamento é descrito em torno a três dimensões principais: ganho – descreve o quanto a potência decai, ou aumenta, durante o caminho percorrido pelo sinal; controle de potência – estratégia para definição do nível de potência do sinal transmitido; e objetivo – principal propósito a ser atingido pelo algoritmo [Halldórsson and Wattenhofer 2019]. Diferentes objetivos fazem com que o problema principal do escalonamento seja encontrado na literatura em três versões diferentes: *One-Slot Scheduling Problem* - OSSP, *Weighted One-Slot Scheduling Problem* - WOSSP, e *Multi-slot Scheduling Problem* - MSSP. Para o *One-Slot Scheduling Problem*, a entrada é um conjunto de *links* e o objetivo é maximizar o número de *links* escalonados de maneira simultânea em um único *slot*, de modo que todas as mensagens sejam recebidas. Em outras palavras, busca-se usar um *slot* em sua total capacidade. O *Weighted One-Slot Scheduling Problem* é uma versão ponderada do problema anterior. A entrada é o conjunto de *links*, no qual para cada *link* é atribuído um peso. O peso deve representar, por exemplo, a prioridade relativa a comunicação. O objetivo do problema é selecionar um subconjunto de *links* ponderados, tal que o peso total, ou valor associado, seja maximizado e o nível da SINR de cada receptor escalonado seja no mínimo o limite SINR. O *Multi-slot Scheduling Problem* possui como objetivo escalonar todos os *links* na menor quantidade de *slots* possíveis, garantindo que todas as mensagens sejam entregues corretamente.

Em [Goussevskaia et al. 2007] é provado que o problema do escalonamento de *links* para o modelo SINR é NP-Completo. Afirmar que o problema é NP-Completo quer dizer que não existe um algoritmo que execute em tempo polinomial capaz de encontrar uma solução ótima. Por este motivo, muitos trabalhos como [Goussevskaia et al. 2007, Andrews and Dinitz 2009, Halldórsson and Mitra 2011] utili-

zam algoritmos de aproximação como solução para o problema do escalonamento. Um algoritmo de aproximação produz, em tempo polinomial, soluções que estão dentro de um certo fator da solução ótima. Embora estes algoritmos possuam grande valor teórico, como afirma [Saad 2015], eles possuem baixa aplicabilidade prática. Isso nos motivou a utilizar uma abordagem alternativa para resolver o problema do escalonamento. A abordagem escolhida reside em na computação bioinspirada, que inspira-se em fenômenos encontrados na natureza, como a evolução e o trabalho em equipe de algumas espécies, para resolver problemas computacionais. Fazem parte da computação bioinspirada, entre outras, as heurísticas genéticas [Kar 2016]. Heurísticas genéticas têm a capacidade de obter soluções ótimas globais executando em tempo computacional aceitável. Elas já foram aplicadas com sucesso, por exemplo, para o diagnóstico de falhas [Duarte Jr et al. 2010, Nassu et al. 2005]. Além disso, podem ser paralelizadas para melhorar a otimização do algoritmo. A seção a seguir apresenta a proposta de uma heurística genética aplicada para o problema do escalonamento.

4. Escalonamento Bioinspirado

A solução proposta baseia-se em uma heurística genética para resolver o problema de escalonamento de dispositivos para comunicação em redes sem fio sob o modelo SINR¹. Dá-se para esta heurística o nome de *Genetic-based Transmission Scheduler*, ou GeTS. O principal objetivo consiste em fornecer uma solução flexível e fortemente parametrizável, que permita ao usuário definir uma série de parâmetros, sejam eles relacionados diretamente ao modelo SINR ou ao algoritmo genético implementado em si. Os parâmetros relacionados ao SINR são: coeficiente de *path loss*, coeficiente de ruído de fundo, limites admitidos de interferência e tamanho máximo do *time slot* SINR. Já os parâmetros relacionados à estratégia genética são: taxa de mutação e cruzamento, tamanho da população e número de gerações. A solução foi implementada utilizando a linguagem Python 3.

Os parâmetros relacionados ao modelo SINR foram especificados em detalhes nas Seções 2 e 3. Nesta seção, cada um dos parâmetros relacionados à heurística genética serão apresentados. Além disso, serão evidenciados como tais parâmetros se incorporam e operam na estratégia proposta no contexto do escalonamento SINR.

Algoritmos genéticos são heurísticas estocásticas baseadas nos princípios Darwinianos de evolução das espécies [Fulber-Garcia et al. 2020]. Através da sistematização dos processos comuns relacionados à evolução das espécies, esta classe de algoritmos podem resolver uma série de problema, como simulação, otimização e agrupamento.

Em nosso contexto, o algoritmo genético é utilizado como um meio de definição otimizada de escalonamentos de transmissão para dispositivos em um sistema SINR STDMA. O principal objetivo da solução proposta é determinar escalonamentos com o menor número de *time slots* possíveis. Em outras palavras, a função de otimização consiste na minimização do número total de *time slots* em um escalonamento completo, maximizando o reuso espacial.

Em suma, algoritmos genéticos analisam gerações de indivíduos, onde cada indivíduo representa uma possível solução para o problema proposto. Sendo assim, cada indivíduo carrega informações relacionadas a solução do problema em seu cromossoma.

¹Disponível em <https://github.com/ViniGarcia/GeTS>

O cromossoma de um dado indivíduo, por sua vez, é formado por múltiplos alelos, os quais representam soluções de partes específicas do problema como um todo. O conjunto de indivíduos em um momento específico da execução de um algoritmo genético é chamado de população. No caso da solução proposta, um escalonamento válido reflete um indivíduo, escalonamento (vetor de *time slots* de um indivíduo) é seu cromossoma, e cada sub-vetor de *time slots* em particular é um alelo.

A primeira população em um algoritmo genético é chamada população inicial. Esta população é determinada a partir de um mecanismo específico. Esse mecanismo deve criar uma população de tamanho predefinido contendo apenas indivíduos válidos, ou seja, que sejam candidatos à solução do problema abordado. Na solução proposta, o gerador propõe um conjunto inicial de escalonamentos. Para isso, o gerador desenvolve alelos (*time slots*) únicos e aleatorizados com o tamanho máximo permitido. Em seguida, cada alelo é avaliado quanto a possibilidade dos dispositivos contidos no mesmo realizarem transmissões em simultâneo. Em caso afirmativo, o alelo é aceito e passa a fazer parte do cromossoma de um determinado indivíduo. Caso contrário, um dispositivo é retirado do alelo e uma nova verificação é realizada. No pior caso, um cromossoma contendo o mesmo número de alelos em relação ao número de dispositivos na rede é criado, sendo este sempre aceito como um indivíduo válido.

Uma das formas de evolução em algoritmos genéticos é o cruzamento de indivíduos. Nesse caso, indivíduos presentes em uma determinada geração são utilizados para criar novos indivíduos que pertencerão a uma geração seguinte. Um cruzamento entre indivíduos acontece considerando uma taxa de cruzamento, representada pela probabilidade de dois ou mais indivíduos selecionados gerem novos indivíduos. A solução proposta adota um mecanismo de cruzamento binário, onde dois novos indivíduos são gerados a partir de dois indivíduos. No caso, a estratégia adotada no cruzamento é misturar os indivíduos de forma a utilizar metade dos alelos de um junto a metade do outro. Como os dispositivos não podem se repetir dentro dos alelos de um mesmo indivíduo, eventuais modificações de alelos são necessárias durante o processo de cruzamento. O cruzamento, neste cenário, não tem como objetivo final criar cromossomas com menos alelos, mas sim aprimorar a variabilidade da população seguinte em relação a anterior.

A seleção de indivíduos para passarem pelo processo de cruzamento foi implementada como um torneio binário. Operadores de torneio binário escolhem dois indivíduos aleatórios da geração populacional atual, selecionando aquele dentre os dois que apresente o melhor resultado em relação a função objetivo adotado. Assim, em nosso contexto particular, a seleção é feita pelo indivíduo com menor cromossoma dentre dois aleatoriamente escolhidos.

A mutação é a segunda forma de evolução em algoritmos genéticos. Nesse processo, indivíduos em particular sofrem alterações em seus cromossomas e alelos de acordo com uma estratégia específica. A mutação também ocorre respeitando uma taxa de mutação, similar ao que acontece no cruzamento. Em nosso cenário, a estratégia de mutação consiste na tentativa de eliminação de um alelo através da sua integração a outro alelo, ambos escolhidos de forma aleatória. Após realizada a integração entre os alelos, um teste de validade é realizado. Caso a integração seja válida (os dispositivos são capazes de transmitir ao mesmo tempo), ela é estabelecida no indivíduo e o mesmo é retornado. Caso a mutação seja inválida, ela é descartada e o indivíduo retornado sem

mutação. Na solução proposta, a mutação tem como objetivo específico reduzir o tamanho do cromossoma ao integrar alelos.

Como o modelo de otimização proposto na solução de escalonamento aborda uma otimização externa (ao reorganizar cromossomas no cruzamento) e interna (ao integrar alelos na mutação), ambas as taxas de cruzamento e mutação são tipicamente elevadas. Esse comportamento sai do padrão tradicional dos algoritmos genéticos, que normalmente contemplam uma taxa de cruzamento elevada e uma taxa de mutação reduzida. Porém, ambas as características e a modelagem do problema de escalonamento no modelo SINR STDMA necessitam uma configuração especial da solução para se obter processos de exploração (*exploration*) e aprofundamento (*exploiting*) satisfatórios, convergindo para ótimos locais cada vez melhores e, até mesmo, para o ótimo global.

Finalmente, cabe ressaltar que a heurística genética desenvolvida é elitista: os 10% melhores indivíduos são mantidos de uma geração para a outra. Esse processo permite a realização de explorações mais incisivas, pois haverá garantia de não perda daqueles indivíduos previamente aprofundados e com melhores valores de *fitness* (*i.e.*, melhores resultados considerando a função objetivo).

5. Experimentos

Esta seção tem como objetivo descrever os experimentos realizados para avaliação do algoritmo GeTS, apresentado na Seção 4. O primeiro experimento consiste em um teste de convergência do algoritmo. O segundo experimento avalia a capacidade do algoritmo em produzir um escalonamento de tamanho mínimo, realizado por meio de uma simulação. Ambos são descritos a seguir.

O objetivo do teste de convergência é verificar a viabilidade do algoritmo proposto ao determinar se o mesmo é capaz de evoluir indivíduos e convergir para um resultado (mesmo que seja um ótimo local) ao decorrer de gerações. Para o teste em questão, permitimos que o algoritmo genético crie por um número indeterminado de gerações, sendo o critério de parada a não modificação da média da função objetivo (tamanho do *schedule*) dos indivíduos pertencentes a uma geração em relação aos indivíduos pertencentes a 100 gerações anteriores, assim indicando a convergência dos resultados.

Para o teste de convergência foi utilizada uma rede com 50 dispositivos, sendo os parâmetros SINR aqueles previamente descritos. O algoritmo genético foi configurado para trabalhar com uma população de 30 indivíduos, um tamanho máximo de *slot* de 15 e uma taxa de mutação e cruzamento de 0.7. Os resultados são apresentados na Figura 1, onde cada ponto indica a média do tamanho dos *schedules* criados em uma dada geração e as barras de erro indicam o tamanho do pior (maior) e melhor (menor) *schedule* encontrado na mesma geração. Como é possível observar no gráfico, o primeiro conjunto de 100 gerações gerou *schedules* com média de tamanho igual a 28,93, sendo estes depurados por cruzamentos e mutações até alcançar a média tamanho de 13,33 na geração de número 3400, sendo a convergência atestada, segundo nossos critérios, na geração número 3500. As flutuações (aumentos e diminuições) da média do tamanho do *schedule* no decorrer das gerações explicitam as ações de exploração e aprofundamento do espaço de busca por parte da heurística genética. Sendo assim, para o teste realizado, o comportamento de convergência e os resultados da solução proposta foram considerados adequados e satisfatórios.

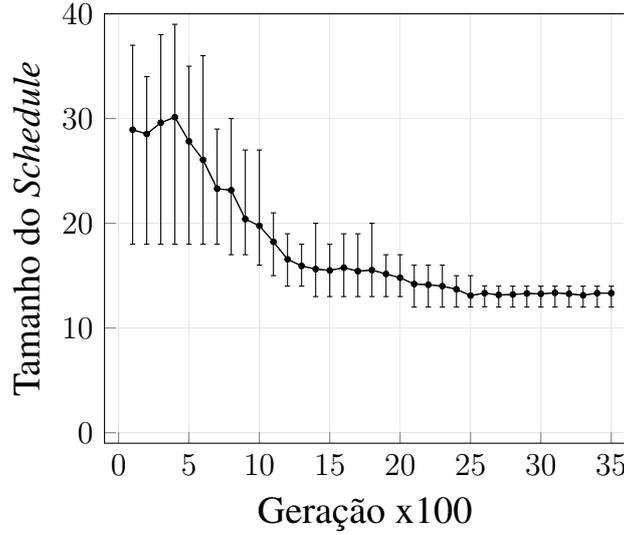


Figura 1. Convergência GeTS

O experimento descrito a seguir busca mostrar a eficiência do algoritmo GeTS, em particular, a sua capacidade em produzir um escalonamento de tamanho próximo ou igual ao ótimo em tempo polinomial. O algoritmo que produz o escalonamento ótimo, de tamanho mínimo, resulta no menor número de *slots* possíveis para comunicação em um dado cenário. Para que a simulação seja construída, é necessário antes definir um cenário para implementação dos algoritmos GeTS e ótimo. Foi utilizado o cenário definido em [De Camargo and Duarte 2021], no qual foi proposto o algoritmo aqui denominado “*Down-to-Earth*”, descrito a seguir. O algoritmo ótimo foi construído com base no algoritmo *Down-to-Earth*.

O algoritmo *Down-to-Earth* assume que cada dispositivo do conjunto D , de n dispositivos do sistema, conhece sua localização no plano euclidiano. Os *links* são definidos de maneira arbitrária, baseados em uma heurística projetada para melhorar o reuso espacial. Esta heurística garante que cada dispositivo em D realiza uma transmissão. A transmissão tem como objetivo alcançar o dispositivo mais próximo do transmissor, ou seja, para o *link* $\ell = (i, j)$, j é o dispositivo que encontra-se mais próximo a i . A atribuição de potência de transmissão depende da distância do *link*, i.e, a distância entre i e j . Após uma etapa inicial, na qual os dispositivos comunicam uns aos outros as suas respectivas localizações, eles podem estimar a interferência mútua causada por uma eventual transmissão simultânea. Assim, para cada $\ell = (i, j)$ são computados quais dispositivos transmissores podem transmitir simultaneamente a i , sem impedir que j receba o sinal de i . Este cômputo é feito com base na inequação que define a relação SINR (Equação 1). Para que isto seja possível, substituímos o somatório das potências interferentes por P_Φ , ao qual chamaremos de potência de interferência aceitável, e reescrevemos a inequação em função de P_Φ . Deste modo, para que o *link* $\ell = (i, j)$ seja factível, a potência de interferência aceitável suportada por j deve satisfazer a inequação $P_\Phi \leq \frac{P_{T_i}}{d(i,j)^\alpha} - N_0$. Portanto, para que um dispositivo transmissor k transmita em simultâneo a $\ell = (i, j)$, é necessário que a potência recebida em j , do sinal de k , seja inferior ou igual a P_Φ .

O método descrito no parágrafo anterior permite que sejam conhecidos quais dis-

positivos podem transmitir unicamente em simultâneo a um *link*. Mais ainda, é possível verificar se a combinação de dois ou mais destes dispositivos produz um nível de interferência cumulativo maior do que a potência de interferência aceitável. Realizando a verificação de todas as combinações possíveis, o algoritmo *Down-to-Earth* produz uma lista de conjuntos chamada δ . Esta lista contém conjuntos de elementos, na qual cada elemento representa um dispositivo transmissor. A existência de um conjunto em δ implica que todos os seus elementos podem transmitir em simultâneo com garantia de que o dispositivo de interesse de cada elemento receba corretamente o seu sinal. Em outras palavras, cada conjunto em δ contém dispositivos que podem ser escalonados para transmitir em um mesmo *time slot*.

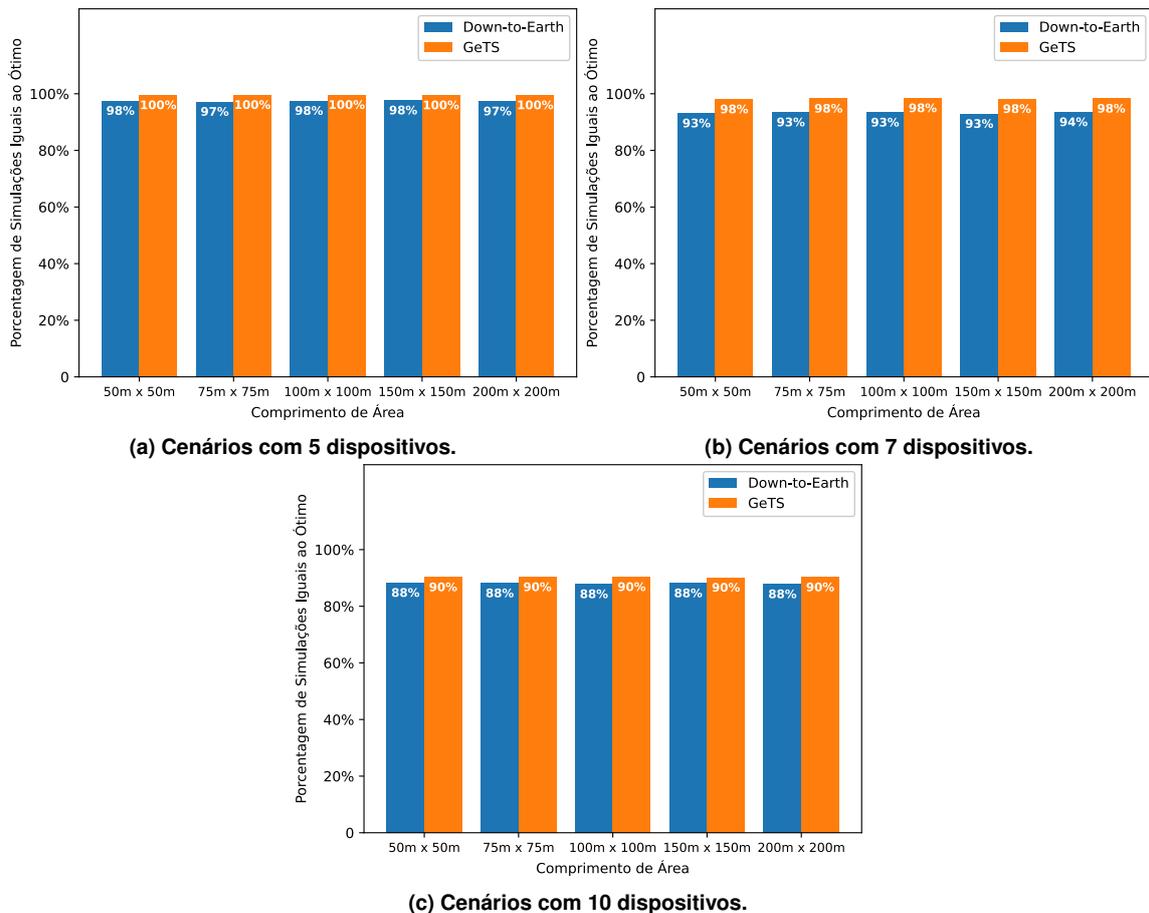


Figura 2. Comparação em relação ao algoritmo ótimo.

É importante destacar que um mesmo dispositivo pode fazer parte de diversos conjuntos em δ , porém, deve ser selecionado para transmissão uma única vez. Portanto, para que o escalonamento seja obtido, é necessário realizar uma seleção criteriosa destes conjuntos. Isto é, devem ser selecionados alguns conjuntos em δ de tal modo que estes não possuam dispositivos em comum. Para cada conjunto selecionado é atribuído um *slot* de transmissão único. Todos os demais dispositivos que devem transmitir em exclusivo ou que não estão inclusos nos conjuntos selecionados devem ser escalonados unicamente em um *slot* cada. Assim, como critério de seleção dos conjuntos, o algoritmo *Down-to-Earth* utiliza um grafo $G_\delta = (V, E)$, no qual cada vértice $v \in V$ representa um conjunto de δ . Em G existe uma aresta $(u, v) \in E$ apenas se ambos, u e v , possuírem um elemento

(dispositivo) em comum. Aplica-se então um algoritmo para obter o maior conjunto independente de vértices (*Largest Independent Set - LIS*). Deste modo, há garantia de que um dispositivo não esteja em múltiplos conjuntos selecionados e que um escalonamento com reuso espacial seja obtido.

Como dito anteriormente, o algoritmo para obtenção do escalonamento ótimo é construído com base no algoritmo *Down-to-Earth*. Diferente deste, o algoritmo, ao qual será referido como algoritmo ótimo, utiliza um critério diferente de seleção dos conjuntos de δ . O algoritmo ótimo tem maior custo computacional, sendo exponencial, verificando todas as combinações de conjuntos em δ que não possuem elementos em comum. Busca-se dentre todas estas combinações aquela(s) que produz o escalonamento de menor tamanho. Em outras palavras, o algoritmo ótimo avalia todas as possibilidades de transmissão em simultâneo e seleciona como solução um escalonamento de tamanho mínimo.

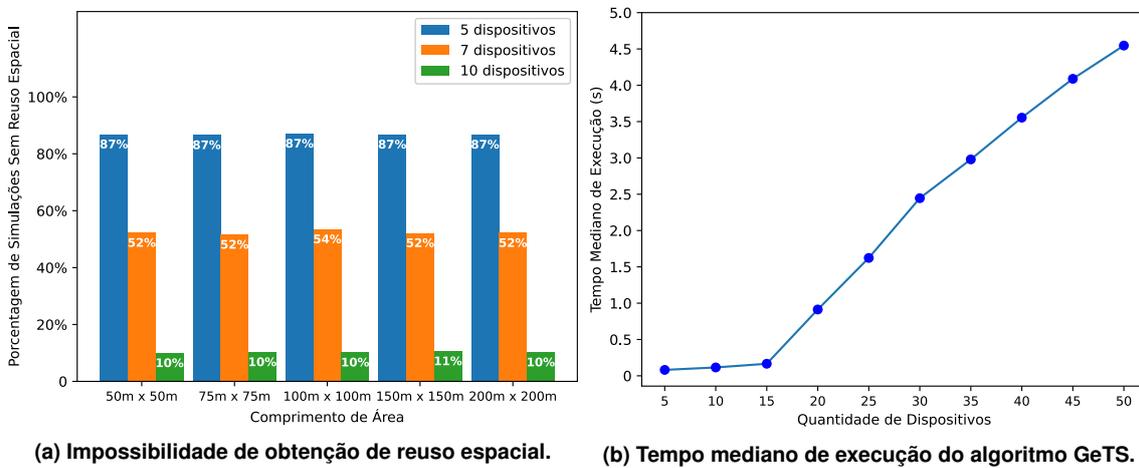


Figura 3. Resultados das simulações.

Havendo uma maneira de obter o escalonamento de menor tamanho, é possível agora avaliar a capacidade do algoritmo GeTS em conseguir um escalonamento de tamanho mínimo. Para isto, uma simulação foi implementada para realizar as comparações. Nesta simulação foram consideradas três diferentes quantidade de dispositivos. Foram avaliados sistemas com 5, 7 e 10 dispositivos. Destaca-se a impossibilidade de executar o algoritmo ótimo em tempo viável para número de dispositivos acima de 10. Em todas as simulações os dispositivos foram distribuídos no plano de acordo com uma função aleatória que tem como entrada as limitações do comprimento de área utilizado. Para cada comprimento de área considerado, foram gerados 10000 conjuntos de posicionamentos distintos para os dispositivos. A cada dispositivo foi atribuída uma potência de transmissão de acordo com a distância em que seu receptor encontra-se, do mesmo em que é feito em [De Camargo and Duarte 2021]. Adicionalmente ao algoritmo GeTS e ao algoritmo ótimo, foi também executado, considerando as mesma condições, o algoritmo *Down-to-Earth*. As comparações dos algoritmos GeTS e *Down-to-Earth* com o algoritmo ótimo, levando em consideração áreas de diferentes comprimento, são apresentadas na Figura 2. A Figura 2.a mostra o resultado quando são considerados 5 dispositivos, e as Figuras 2.b e 2.c quando são considerados 7 e 10 dispositivos, respectivamente. Em todos os gráfico, o eixo vertical indica a porcentagem em relação aos 10000 conjuntos de posicionamentos em que o algoritmo em questão obteve um escalonamento de tamanho

igual ao do algoritmo ótimo.

A comparação entre os algoritmos mostra que, independente da quantidade de dispositivos considerada, o algoritmo GeTS apresenta desempenho muito próximo ao ótimo, igual ou superior a 90% em todos os cenários simulados. Isto quer dizer que dentre o vasto espaço de soluções possíveis, o algoritmo consegue encontrar com eficiência a melhor solução na maiorias das vezes. Observa-se que o algoritmo GeTS é mais eficiente na tarefa de obter o escalonamento de menor tamanho do que o algoritmo *Down-to-Earth*.

Os três gráficos da Figura 2 mostram ainda que a porcentagem de soluções iguais ao ótimo decaí ao aumentar a quantidade de dispositivos. Para corroborar com esta afirmação, foi gerado o gráfico exibido pela Figura 3.a. Esta figura relaciona a porcentagem de conjuntos de posicionamentos nos quais não são possíveis obter qualquer reuso espacial. Isto é, apresenta a porcentagem de cenários em que não existe a possibilidade de qualquer par de dispositivos transmitirem ao mesmo tempo. Neste caso, o tamanho do escalonamento é igual a quantidade de dispositivos no sistema, pois, cada dispositivo deve transmitir em um *slot* único. A Figura 3.a mostra que o reuso espacial, dadas as condições de transmissão consideradas, aumenta conforme o sistema admite um maior número de dispositivos. O aumento do reuso espacial, i.e, de transmissões simultâneas, significa também o aumento na quantidade de combinações possíveis de dispositivos transmissores que podem ser escalonados para o mesmo *slot*. No contexto do algoritmo descrito neste experimento, quer dizer que o tamanho de δ aumenta e para o algoritmo GeTS que o espaço de busca de solução é ampliado.

O aumento do tamanho da lista δ amplia o número de diferentes escalonamentos possíveis. Para o algoritmo ótimo isso significa um maior número de verificações a serem feitas. Afinal, o algoritmo ótimo precisa selecionar apenas uma parte dos conjuntos em δ que produza um escalonamento de tamanho mínimo, de modo que entre os conjuntos selecionados cada dispositivo apareça uma única vez. Este problema é semelhante ao problema NP-Completo conhecido como “problema de cobertura de conjuntos” (*Set Covering Problem* - SCP) [Caprara et al. 2000]. Uma vez que trata-se de um problema desta categoria, o aumento do tamanho da entrada, neste caso a quantidade de dispositivos (consequentemente o tamanho de δ), aumenta exponencialmente os cálculos necessários para a obtenção do escalonamento de tamanho mínimo. Este motivo justifica o alto tempo necessário para execução do algoritmo ótimo, inviável para sistemas com mais de 10 dispositivos. Isto reforça a necessidade de algoritmos, como o GeTS, que obtém um escalonamento próximo ou igual ao ótimo em tempo polinomial. A Figura 3.b mostra que o algoritmo GeTS consegue obter um escalonamento para entradas pequenas, como 5 dispositivos, e entradas maiores, como 50 dispositivos em tempo polinomial. Esta figura apresenta o cálculo da mediana do tempo de execução de 10000 conjuntos de posicionamentos distintos. O tempo foi obtido a partir de uma implementação na linguagem de programação Python. Resultados ainda melhores podem ser obtidos em uma linguagem de programação compilada e com o emprego de computação paralela.

6. Conclusão

O presente trabalho tem como motivação a crescente importância das redes de comunicação sem fio, com aumento sem precedentes do número de dispositivos conectados às redes de computadores sem fio, bem como sua densidade. Estes fatores elevam as

preocupações em torno da interferência mútua causada pelos próprios dispositivos. Neste contexto, algoritmos que resolvam o problema do escalonamento sobre o modelo SINR adquirem especial importância. O problema é do tipo NP-completo. Este trabalho apresenta uma solução bioinspirada para o problema do escalonamento em redes sem fio sob o modelo SINR que consegue resolver o problema em tempo polinomial.

A solução proposta, GeTS, é avaliada em termos de convergência e capacidade em produzir uma boa solução para o problema. Em ambas, a solução mostrou-se satisfatória. Simulações considerando uma grande diversidade de posicionamento dos dispositivos foram realizadas a fim de verificar a qualidade da solução gerada pelo algoritmo. As comparações entre os resultados obtidos pelos algoritmos GeTS e ótimo, mostram que o GeTS produz uma saída próxima ao ótimo para uma quantidade pequena de dispositivos. O alto custo computacional do algoritmo ótimo impede que comparações com um maior número de dispositivos sejam realizadas. Entretanto, espera-se que o algoritmo GeTS continue a prover bons resultados para entradas maiores, executando em tempo polinomial.

Referências

- Al-dhelaan, F., Wan, P., and Yuan, H. (2016). A new paradigm for shortest link scheduling in wireless networks: Theory and applications. In *Wireless Algorithms, Systems, and Applications*.
- Andrews, M. and Dinitz, M. (2009). Maximizing capacity in arbitrary wireless networks in the sinr model: Complexity and game theory. In *INFOCOM*, pages 1332–1340.
- Batta, M. S., Harous, S., Louail, L., and Aliouat, Z. (2019). A distributed tdma scheduling algorithm for latency minimization in internet of things. In *2019 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, pages 108–113.
- Blough, D. M., Resta, G., and Santi, P. (2010). Approximation algorithms for wireless link scheduling with sinr-based interference. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 18(6):1701–1712.
- Brar, G., Blough, D. M., and Santi, P. (2006). Computationally efficient scheduling with the physical interference model for throughput improvement in wireless mesh networks. In *MobiCom*, page 2–13. ACM.
- Caprara, A., Toth, P., and Fischetti, M. (2000). Algorithms for the set covering problem. *Annals of Operations Research*, 98(1):353–371.
- De Camargo, F. E. and Duarte, E. P. (2021). A down-to-earth scheduling strategy for dense sinr wireless networks. In *2021 10th Latin-American Symposium on Dependable Computing (LADC)*, pages 1–6.
- Duarte Jr, E. P., Pozo, A. T., and Nassu, B. T. (2010). Fault diagnosis of multiprocessor systems based on genetic and estimation of distribution algorithms: a performance evaluation. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 19(01):1–18.
- Ergen, S. C. and Varaiya, P. (2010). Tdma scheduling algorithms for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 16(4):985–997.

- Fulber-Garcia, V., dos Santos, C. R. P., Spinosa, E. J., and Duarte Jr, E. P. (2020). Mapeamento customizado de serviços de rede em múltiplos domínios baseado em heurísticas genéticas. In *SBRC*, pages 491–504. SBC.
- Goussevskaia, O., Oswald, Y. A., and Wattenhofer, R. (2007). Complexity in geometric sinr. In *Proceedings of the 8th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc '07*, pages 100–109, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Goussevskaia, O., Pignolet, Y.-A., and Wattenhofer, R. (2010). *Efficiency of Wireless Networks: Approximation Algorithms for the Physical Interference Model*. Now Foundations and Trends.
- Halldórsson, M. M. and Mitra, P. (2011). Wireless capacity with oblivious power in general metrics. In *SODA, SODA '11*, pages 1538–1548. SIAM.
- Halldórsson, M. M. and Wattenhofer, R. (2019). *Wireless Network Algorithmics*, pages 141–160. Springer International Publishing, Cham.
- Kar, A. K. (2016). Bio inspired computing – a review of algorithms and scope of applications. *Expert Systems with Applications*, 59:20–32.
- Lam, N. X., Tran, T., An, M. K., and Huynh, D. T. (2015). A note on the complexity of minimum latency data aggregation scheduling with uniform power in physical interference model. *Theoretical Computer Science*, 569:70–73.
- Lv, S., Wang, X., and Zhou, X. (2010). Scheduling under sinr model in ad hoc networks with successive interference cancellation. In *2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM 2010*, pages 1–5.
- Maheshwari, R., Jain, S., and Das, S. R. (2008). A measurement study of interference modeling and scheduling in low-power wireless networks. In *The 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, SenSys'08*, pages 141–154.
- Moscibroda, T. and Wattenhofer, R. (2006). The complexity of connectivity in wireless networks. In *INFOCOM: 25th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Barcelona, Spain*.
- Nassu, B. T., Duarte Jr, E. P., and Ramirez Pozo, A. T. (2005). A comparison of evolutionary algorithms for system-level diagnosis. In *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation*, pages 2053–2060.
- Nelson, R. and Kleinrock, L. (1985). Spatial tdma: A collision-free multihop channel access protocol. *IEEE Transactions on Communications*, 33(9):934–944.
- Saad, M. (2015). Wireless capacity maximization: A constrained genetic approach. In *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 3855–3860.
- Sgora, A., Vergados, D. J., and Vergados, D. D. (2015). A survey of tdma scheduling schemes in wireless multihop networks. *ACM Comput. Surv.*, 47(3).
- Son, D., Krishnamachari, B., and Heidemann, J. (2006). Experimental study of concurrent transmission in wireless sensor networks. In *SenSys*, pages 237–250. ACM.
- White, C. M. (2015). *Data Communications and Computer Networks: A Business User's Approach*. Cengage, 8 edition.