



Algoritmo de Programação Evolucionária Aplicado na Alocação de Recursos em Redes Sem Fio f-OFDM com Agregação de Portadora

Marcus Vinícius Gonzaga Ferreira, *Instituto de Informática (UFG) - Goiânia - Goiás*,
Flávio Henrique Teles Vieira, *Instituto de Informática (UFG) - Goiânia - Goiás*

Resumo—Neste artigo, propomos um esquema de alocação de recursos em redes sem fio com o objetivo de maximizar a vazão total do sistema utilizando Programação Evolucionária (EP, *Evolutionary Programming*). O desempenho do algoritmo de alocação de recursos é verificado e comparado com outros da literatura e, nestas simulações computacionais, comprovamos o desempenho superior da proposta em termos de vazão. Consideramos também nos cenários simulados as técnicas atuais e candidatas às redes da próxima geração como f-OFDM (*filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal filtrado) e agregação de portadora e mostramos que utilizando f-OFDM é possível prover taxa de transmissão 10% maior em relação às redes 4G.

Palavras-chave—EP, 5G, Agregação de Portadora, f-OFDM.

Evolutionary Programming Algorithm Applied in f-OFDM Wireless Networks Resource Allocation with Carrier Aggregation

Abstract—In this paper, we propose a wireless networks resource allocation scheme whose goal is to maximize the total data rate using the Evolutionary Programming (EP) heuristic. The resource allocation algorithm performance is verified and compared to others in the literature and, in these computational simulations, we proved the superior performance of the proposal in terms of throughput. We also consider in simulated scenarios the current and candidate techniques for next generation networks such as f-OFDM (*filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) and carrier aggregation and we show that using f-OFDM it is possible to provide 10% higher transmission rate in relation to the 4G networks.

Index Terms—EP, 5G, Carrier Aggregation, f-OFDM.

I. INTRODUÇÃO

EM um futuro próximo, diferentes tecnologias irão conectar uma imensa quantidade de máquinas, equipamentos hospitalares, monitores de saúde, carros autônomos e inúmeros outros dispositivos cujas aplicações ainda nem foram concebidas [1]. Para atender essas demandas, devem ser realizadas melhorias significativas na

arquitetura das redes celulares, e as redes sem fio de próxima geração 5G pretendem expandir a capacidade de comunicação [2].

Globalmente, a indústria celular convergiu para a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*, Evolução de Longo Prazo), incluindo o LTE-A (*LTE-Advanced*, LTE-Avançado), como interface sem fio por alavancar maiores larguras de banda para oferecer altas taxas de dados. Uma indústria que estava fragmentada em múltiplas tecnologias de rede sem fio agora possui um padrão, resultando em economia e padronização em termos de infraestrutura. Sendo assim, muitos pesquisadores da área propõem que a tecnologia 5G seja uma extensão dessa interface de comunicação [3] [1].

Com o foco em tecnologias cujo objetivo é melhorar a taxa de transmissão de dados para suportar redes sem fio da próxima geração, um dos tópicos abordados neste trabalho consiste no conceito de agregação de portadora. Este é um recurso da tecnologia LTE-A que operadores estão implantando para prover maior taxa de dados, melhor cobertura e menor latência [4].

Este trabalho também considera a tecnologia f-OFDM (*filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal filtrado), que possibilita uma operação fragmentada do espectro e a coexistência eficiente de múltiplas sub-bandas com o objetivo de melhorar a utilização do espectro [5] [6]. A escolha da tecnologia f-OFDM se justifica por melhorar a taxa de transferência do sistema em 10% ao usar as bandas livres das redes LTE, além de suportar a transmissão assíncrona de diferentes usuários e ser compatível com a tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple Output*, Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas) [7].

Há várias propostas de esquemas de alocação de recursos em redes sem fio [8] [9] [10] [11] [12]. Em [8], é proposto um algoritmo para alocação de blocos de recursos em redes LTE baseado na heurística PSO (*Particle Swarm Optimization*, Otimização por Enxame de Partículas), com o objetivo de maximizar a vazão total do sistema. Em [9], é proposto um algoritmo com o objetivo de garantir o critério de taxa mínima de transmissão requerida pelo usuário. Em [10], é proposto um algoritmo com o objetivo

de minimizar o parâmetro de retardo e atender critérios de QoS (*Quality of Service*, Qualidade de Serviço). Estes esquemas de alocação, em adição a outros não mencionados, tem o mesmo propósito de maximizar a vazão total através de heurísticas que focam em diferentes parâmetros de QoS como retardo, taxa mínima, dentre outros.

Neste artigo, propomos um esquema de alocação de blocos de recurso para redes sem fio, considerando técnicas de próxima geração, de forma atender o parâmetro de QoS de taxa mínima de transmissão. O problema de alocação de recursos é resolvido aplicando uma heurística EP (*Evolutionary Programming*, Programação Evolucionária).

O artigo está dividido da seguinte forma: na Seção II apresentamos conceitos que abordam o problema de alocação de recursos em redes sem fio; na Seção III apresentamos trabalhos relacionados à nossa proposta; na Seção IV apresentamos conceitos relacionados a forma de onda F-OFDM; na Seção V apresentamos conceitos relacionados a heurística EP; na Seção VI propomos aplicar a heurística EP para decidir quais blocos de recursos serão alocados para cada usuário, dado o requisito de taxa mínima; na Seção VII validamos o esquema de alocação proposto baseado em EP através de simulações comparativas com outros algoritmos da literatura; na Seção VIII apresentamos as considerações finais.

II. MODELO DO SISTEMA E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

CONSIDERE uma rede celular baseada em LTE-A com apenas um eNB (*evolved Node B*, nó evoluído B) consistindo de N UEs (*Users Equipments*, Equipamentos do Usuários) como $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$.

Cada usuário $\alpha_n \in \alpha$ pode possuir diferentes capacidades de CA (*Carrier Aggregation*, Agregação de Portadora) que é modelada como $\mu = \{\mu_n | \mu_n \in \{1, 2, 3, 4, 5\}\}_{1 \times N}$, onde μ_n representa o número máximo de CCs (*Component Carriers*, Portadoras Componente) que $\alpha_n \in \alpha$ pode suportar (se $\alpha_n \in \alpha$ é um usuário LTE Release 8, $\mu_n = 1$).

Todos UEs em um dado TTI (*Transmission Time Interval*, Intervalo de Tempo de Transmissão) competem por M CCs ortogonais sem sobreposição representados por $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_M\}$ onde cada $\beta_m \in \beta$ possui diferente número de RBs (*Resource Blocks*, Blocos de Recurso) e podem ser escritos como $\gamma = \{\gamma_m | \gamma_m \in \{6, 15, 25, 50, 75, 100\}\}_{1 \times M}$, onde γ_m corresponde ao número de RBs em um dado β_m .

Assumindo que o índice MCS (*Modulation and Coding Scheme*, Esquema de Codificação e Modulação) máximo de todos UEs em diferentes RBs é modelado como [4]:

$$K = \{k_{m,p,n} | k_{m,p,n} \in \{0, 1, \dots, h\}\}_{M \times P \times N}, \quad (1)$$

onde $k_{m,p,n}$ representa o índice MCS máximo para α_n em β_m no RB p . O valor de $k_{m,p,n}$ depende do intervalo de qualidade do canal entre 0 e h . Enquanto que o valor do h para *uplink* é 22 e para *downlink* é 28 e $P = \max[\gamma]$ [4]. Também é definida uma matriz de alocação de blocos de recurso sendo uma matriz binária como segue:

$$A = \{a_{m,p,n} | a_{m,p,n} \in \{0, 1\}\}_{M \times P \times N}. \quad (2)$$

Representando o mapa de alocação de RBs onde $a_{m,p,n} = 1$ se e apenas se o RB p localizado em β_m é alocado unicamente para α_n e $a_{m,p,n} = 0$ caso contrário, ou seja, o RB não é alocado. A matriz de alocação de recursos A deve satisfazer o requisito de interferência definido na equação (3), ou seja, dois ou mais UEs não podem utilizar o mesmo RB simultaneamente [4]:

$$\sum_{n=1}^N a_{m,p,n} \leq 1 \text{ para } 1 \leq p \leq P, 1 \leq m \leq M. \quad (3)$$

É definida uma matriz de alocação de CC como uma matriz binária $M \times N$ [4] dada por:

$$E = \{e_{m,n} | e_{m,n} = 1 \leftrightarrow \sum_{p=1}^P a_{m,p,n} \geq 1\}_{M \times N}, \quad (4)$$

onde $e_{m,n}$ representa a condição se β_m é atribuído para α_n ou não. Para representar o MCS alocado para α_n em certo TTI, uma matriz de usuários é definida como segue [4]:

$$B = \{b_{m,n} | b_{m,n} \in \{0, 1, \dots, h\}\}_{M \times N}, \quad (5)$$

onde $b_{m,n}$ representa o índice MCS alocado para α_n em β_m para cada TTI. O 3GPP TS36.213 [13] especifica a taxa de transmissão correspondente para cada índice MCS.

Neste trabalho, para representar a relação entre o índice MCS e a taxa de transmissão, é usada a notação $r = R(b)$ onde R mapeia cada índice MCS para cada taxa de transmissão conforme [13]; em outras palavras, r é a taxa de transmissão obtida para cada UE em um RB com MCS b . É definida então a matriz de taxa de transmissão dos usuários como $R = \{r_{m,n} | r_{m,n} = R(b_{m,n})\}_{M \times N}$ ou seja, uma matriz $M \times N$ onde $r_{m,n}$ apresenta a taxa de transmissão por RB para α_n em β_m .

O eNB é responsável por todo procedimento de admissão, escalonamento de recursos e adaptação de *link*. Após receber o CSI (*Channel State Information*, Informação do Estado do Canal) de todos UEs, um mapa de alocação de recursos é construído e o índice MCS é determinado pelo eNB e depois enviado para cada UE através dos canais de controle. De acordo com o índice MCS, o tipo de modulação e a taxa de codificação para cada UE em cada CC atribuído podem ser determinados.

Neste artigo, o escalonador é empregado para maximizar a vazão da célula e atender a taxa mínima de transmissão requerida por usuário. Para o UE n , a função objetivo de otimização é definida como a vazão adquirida sobre o TTI t , e pode ser calculada como:

$$f^{(t)} = \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N r_{m,n}^{(t)} \times a_{m,p,n}^{(t)}, \quad (6)$$

onde $r_{m,n}^{(t)}$ e $a_{m,p,n}^{(t)}$ são $r_{m,n}$ e $a_{m,p,n}$ no TTI t respectivamente.

Este sistema está sujeito às seguintes condições:

$$\sum_{n=1}^N a_{m,p,n} \leq 1, \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^M e_{m,n} \leq \mu_n, \quad (8)$$

$$b_{m,n} \leq k_{m,p,n}, \quad (9)$$

$$r_{m,n} \geq r_{m,n}^{\min}, \quad (10)$$

para $1 \leq p \leq P$, $1 \leq m \leq M$ e $1 \leq n \leq N$. A equação (7) assegura que cada RB na rede é atribuído para no máximo um UE. A equação (8) garante que o número de CCs atribuídos para cada UE seja menor que sua capacidade de agregação. A equação (9) garante que o índice MCS para cada UE em cada CC seja menor que o índice MCS máximo suportado para cada RB atribuído em seu CC correspondente. A equação (10) garante que o escalonador atenda a taxa de transmissão mínima requerida para cada usuário.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

NO trabalho apresentado em [8], é proposto um esquema de codificação baseado na heurística PSO para mapear soluções em partículas e encontrar uma operação para discretizar a posição e a velocidade das partículas e depois estabelecer uma função *fitness* para tratamento das restrições através de uma função de penalidade. Os resultados mostram que este algoritmo possui melhor desempenho que outros algoritmos comparados em relação à vazão do sistema com garantia de QoS.

No trabalho apresentado em [9], é proposto um algoritmo, nomeado algoritmo *QoS Guaranteed*, cujo objetivo é garantir o critério de taxa de transmissão mínima requerida por usuário. Este algoritmo primeiro estima o número de blocos requeridos para cada usuário e depois aloca estes blocos para os usuários de acordo com suas prioridades. Os resultados das simulações mostram que, comparado aos esquemas convencionais, o algoritmo pode adquirir alta vazão.

Os autores apresentam em [10] um algoritmo que considera a qualidade do canal e o valor de retardo máximo definido para cada usuário de forma a decidir sobre o escalonamento dos recursos disponíveis. São realizadas comparações com outros algoritmos da literatura através de dados estatísticos em termos de parâmetros de QoS, provando a eficiência deste algoritmo.

O algoritmo proposto neste trabalho se assemelha ao algoritmo apresentado em [8] em sua função objetivo e no conceito de função de penalidade. Entretanto, o algoritmo proposto se difere por considerar a heurística EP e a alocação dos recursos remanescentes para os usuários com melhores condições de canal.

O algoritmo proposto também se difere dos algoritmos descritos em [9] e [10] porque estes são implementações

que consideram, respectivamente, o critério de taxa de transmissão mínima e o critério de retardo, sem a definição de uma função objetivo.

IV. FORMA DE ONDA F-OFDM

PARA suportar a diversidade crescente de serviços futuros providos pelas redes 5G, é esperado que a largura de banda do sistema seja dividida em várias sub-bandas, onde a estrutura do quadro dentro de cada sub-banda possa ser configurada de acordo com o tipo individual de tráfego e a condição do canal [7] [6]. A forma de onda denominada f-OFDM possibilita tal fatiamento do espectro e permite a coexistência de múltiplas sub-bandas [6] [14].

A principal idéia da forma de onda f-OFDM é reduzir a interferência entre as sub-bandas adjacentes, e, para tal, o sinal OFDM de banda base de cada sub-banda é filtrado por um filtro de banda limitada para suprimir a emissão fora de banda. A estrutura em cada sub-banda, incluindo o espaçamento de subportadora, o tamanho do prefixo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) e o TTI, pode ser configurada para alcançar o objetivo relacionado a cada tipo de serviço. Por exemplo, a estrutura para a sub-banda da banda larga móvel aperfeiçoada (eMBB, *Enhanced Mobile Broadband*) poderia almejar alta eficiência espectral, enquanto para a comunicação de ultra-confiabilidade e baixa latência (uRLLC, *Ultra-Reliability and Low Latency Communication*) poderia almejar baixa latência com espaçamento entre subportadora mais largo e menor TTI [6].

Outra vantagem da forma de onda f-OFDM é suportar a transmissão assíncrona multi-usuário no *uplink*. Através da filtragem por UE (*User Equipment*, Equipamento do Usuário) para suprimir a perda fora da banda, a interferência entre UEs se torna negligível. No LTE, o sinal de avanço de tempo (TA, *Timing Advance*) enviado para cada UE pela estação base (BS, *Base Station*) resulta em larga sobrecarga de sinalização, especialmente quando um grande número de usuários está presente. Introduzindo a filtragem por UE para suprimir a interferência entre UE, as UEs não necessitam manter uma sincronização rigorosa com a BS para explorar a ortogonalidade do OFDM, e a sobrecarga de sinalização de avanço de tempo pode ser reduzida [7].

Entre as desvantagens da forma de onda f-OFDM, pode-se citar o fato dela requerer um par adicional de filtros de transmissão e recepção respectivamente no transmissor e no receptor em comparação com o OFDM convencional, acarretando maior custo. A interferência entre portadoras (ICI, *Inter-Carrier Interference*) também continua existindo assim como no OFDM padrão, uma vez que a filtragem não é suficiente para eliminá-la [14].

Nas especificações do LTE, 10% da largura de banda do sistema está reservada como banda de guarda em uma portadora base, para suportar a taxa de perda de canal adjacente (ACLR, *Adjacent Channel Leakage Ration*) e o requisito de espectro [6]. Aplicando f-OFDM, o sinal OFDM de banda base pode ser configurado com uma região de transição ultra estreita, e assim a banda de

guarda pode ser reutilizada para transmitir sinais de dados, resultando em uma utilização eficiente do espectro [14].

Embora o comprimento do filtro possa ultrapassar o comprimento do prefixo cíclico e causar interferência entre símbolos (ISI, *Inter-Symbol Interference*), espera-se que a perda da interferência entre símbolos para o símbolo OFDM vizinho seja desprezível pelas seguintes razões [6]:

- Uma vez que a largura de banda de ambos os filtros do transmissor e receptor é geralmente maior que o espaçamento da subportadora, o alcance da energia principal do filtro ponta a ponta no domínio do tempo é significativamente menor que o comprimento do símbolo OFDM e, dependendo do desenho do filtro, pode ser até mesmo menor que o comprimento do CP;
- Um filtro bem projetado possui uma resposta em frequência quase plana sobre toda a largura de banda da sub-banda em ambos o transmissor e receptor. Sendo assim, a maioria das subportadoras dentro da sub-banda não serão impactadas pela filtragem no transmissor e no receptor e, então, não irão apresentar espalhamento observável no domínio do tempo. A supressão do lóbulo lateral de algumas subportadoras na borda causa um menor espalhamento no domínio do tempo, muito menor que o comprimento do prefixo cíclico.

Entre as formas de onda candidatas para as redes 5G, destacam-se as seguintes: GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*, Multiplexação por Divisão de Frequência Generalizada) [15], FBMC (*Filter Bank Multi-Carrier*, Banco de Filtro de Multi-Portadora) [16] e UFMC (*Universal Filtered Multi-Carrier*, Filtro de Multi-Portadora Universal) [17]. A motivação para estas formas de onda é similar a motivação da f-OFDM, ou seja, reduzir a interferência entre as sub-bandas adjacentes e minimizar os requisitos para sincronização. Para atender o propósito, são aplicados filtros para todas estas formas de onda, porém com métodos e performances diferentes. Segue abaixo uma breve discussão comparativa entre as formas de onda citadas e a f-OFDM [14]:

- f-OFDM e GFDM: as subportadoras do GFDM são arrançadas em proximidade e não são mutuamente ortogonais. Para suprimir a interferência entre as subportadoras, são necessários filtros de ordem elevada e técnicas para encurtar o tempo do prefixo cíclico como, por exemplo, *tail-biting*. Para minimizar a interferência entre subportadoras que ainda podem existir após a filtragem, também são necessárias outras técnicas para cancelamento da interferência. Por outro lado, as subportadoras em cada sub-banda do f-OFDM são quase ortogonais, o comprimento do filtro do f-OFDM é comparavelmente curto e não são necessárias técnicas complicadas de processamento;
- f-OFDM e FBMC: o comprimento do filtro no FBMC é tipicamente alto e, portanto, consome mais recursos se comparado com os filtros do f-OFDM. Além disso, a transmissão massiva de antenas foi reconhecida como

ponto chave para as redes 5G. Portanto, a dificuldade de combinar o FBMC com a transmissão multi-antenas limitou suas aplicações. Ao contrário, o f-OFDM pode ser combinado com a transmissão multi-antenas sem necessidade de processamento especial;

- f-OFDM e UFMC: para prevenir a interferência entre símbolos OFDM, o comprimento do filtro no UFMC é tipicamente limitado pelo comprimento do prefixo cíclico usado no OFDM. Ao utilizar no f-OFDM um comprimento de filtro de até meio símbolo de duração, a ortogonalidade entre símbolos OFDM consecutivos é relevada em troca de uma baixa emissão espectral fora de banda, permitindo assim o uso mínimo da banda de guarda. Com filtros adequadamente projetados, a degradação de desempenho resultante do aumento do comprimento do filtro é quase insignificante se considerada a economia no consumo da banda de guarda.

No geral, o f-OFDM desponta como uma das formas de onda mais promissoras para as redes 5G, provendo vantagens do OFDM como multiplexação em frequência flexível, simples equalização do canal e fácil combinação com o cenário de transmissão multi-antenas, além das demais vantagens citadas anteriormente [14].

V. PROGRAMAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

A Programação Evolucionária foi primeiro desenvolvida por Lawrence Fogel, focando no uso de um processo evolucionário para o desenvolvimento de sistemas de controle usando representações de Máquina de Estados Finita (FSM) [18]. Trabalhos posteriores consideraram a aplicação da Programação Evolucionária para sistemas de controle, otimização de função e identificação de sistemas [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25].

O algoritmo de Programação Evolucionária é uma instância do campo de Computação Evolucionária, similar a outros Algoritmos Evolucionários como, por exemplo, o Algoritmo Genético [26]. A inspiração do algoritmo de Programação Evolucionária é a teoria da evolução através da seleção natural. Uma população de uma espécie reproduz e cria descendentes com pequena variação fenotípica. O descendente e os pais competem baseado em suas adequações ao meio ambiente, onde os membros geralmente mais adaptados constituem a geração subsequente e tem a oportunidade de reproduzir. Este processo se repete, melhorando o ajuste adaptativo entre as espécies e o meio ambiente [26] [25].

Para descrever a metáfora da aplicação do algoritmo, é formulado um problema de minimização global como um par (S, f) , onde $S \subseteq R^n$ é um conjunto delimitado no R^n e $f : S \rightarrow R$ é uma função n -dimensional de valor real. O problema é encontrar um ponto $x_{min} \in S$ de forma que $f(x_{min})$ seja o mínimo global em S . Mais especificamente, é necessário encontrar $x_{min} \in S$ de forma que [24]

$$\forall x \in S : f(x_{min}) \leq f(x), \quad (11)$$

onde f não precisa ser contínuo mas deve ser limitado. De acordo com o descrito em Bäck and Schwefel [27], a EP clássica é implementada como descrito no **Algoritmo 1**.

Algoritmo 1: Algoritmo clássico de Programação Evolucionária [24]

- 1 Gera a população inicial de μ indivíduos e define $k = 1$. Cada indivíduo é tomado como um par de vetores de valores reais $(x_i, \eta_i), \forall i \in \{1, \dots, \mu\}$, onde x_i 's são variáveis objetivo e η_i 's são valores de desvio padrão para mutações Gaussianas (também conhecidos como parâmetros de estratégia em algoritmos evolucionários auto adaptativos);
- 2 Avalia o valor de ajuste para cada indivíduo $(x_i, \eta_i), \forall i \in \{1, \dots, \mu\}$ da população baseado na função objetivo $f(x_i)$;
- 3 Cada pai $(x_i, \eta_i), i = 1, \dots, \mu$ cria um único descendente (x'_i, η'_i) : para $j = 1, \dots, n$

$$x'_i(j) = x_i(j) + \eta_i(j)N_i(0, 1), \quad (12)$$

$$\eta'_i(j) = \eta_i(j)exp(\tau'N(0, 1) + \tau N_j(0, 1)), \quad (13)$$

- onde $x_i(j)$, $x'_i(j)$, $\eta_i(j)$ e $\eta'_i(j)$ denota o j -ésimo componente dos vetores x_i , x'_i , η_i e η'_i , respectivamente. $N(0, 1)$ denota um número aleatório com distribuição normal de uma dimensão com média zero e desvio padrão 1. $N(0, 1)$ indica que o número aleatório é gerado outra vez para cada valor de j . Os fatores τ e τ' são comumente definidos como $(\sqrt{2\sqrt{n}})^{-1}$ e $(\sqrt{2n})^{-1}$;
- 4 Calcula o valor ajuste para cada descendente $(x'_i, \eta'_i), \forall i \in \{1, \dots, \mu\}$;
 - 5 Realiza a comparação entre o conjunto de pais (x_i, η_i) e descendentes $(x'_i, \eta'_i), \forall i \in \{1, \dots, \mu\}$. Para cada indivíduo, q oponentes são aleatoriamente e uniformemente escolhidos de todos os pais e descendentes. Para cada comparação, se o valor ajuste de cada indivíduo for maior que o valor do oponente, ele recebe uma vitória;
 - 6 Seleciona os μ indivíduos entre (x_i, η_i) e $(x'_i, \eta'_i), \forall i \in \{1, \dots, \mu\}$ com maior número de vitórias para serem os pais da próxima geração;
 - 7 Encerra o algoritmo se o critério de parada é satisfeito; caso contrário, $k = k + 1$ e retorna ao passo 3.
-

VI. ALGORITMO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO EVOLUCIONÁRIA

O problema de otimização descrito em (6) pode ser resolvido utilizando a EP clássica, porém, com algumas considerações. Em vista dos resultados obtidos em simulação, neste trabalho propomos relacionar a função de penalidade com a taxa mínima estipulada para cada usuário. A restrição de taxa mínima de transmissão se torna uma função de penalidade, como descrito pela equação (14). Quando a taxa mínima requerida para todos os

usuários é satisfeita, a função de penalidade é igual a zero, ou seja, a restrição é satisfeita.

$$F = \sum_{n=1}^N f_n^{(t)} - [\max(r_{m,n}^{min})]^2 \sum_{n=1}^N \left[\min \left(0, \frac{r_{m,n} - r_{m,n}^{min}}{r_{m,n}^{min}} \right) \right]^2. \quad (14)$$

A otimização no algoritmo EP é implementada avaliando o custo de cada solução através da função objetivo, como descrito no **Algoritmo 2**. Neste artigo, o vetor solução do problema proposto é um vetor dos índices inteiros dos usuários alocados aos blocos de recursos. Para implementar tal solução, propomos o arredondamento dos valores que representam os indivíduos (x_i, η_i) para o número inteiro mais próximo. A restrição da quantidade de recursos disponíveis é tratada através da definição de um limite superior na implementação da heurística EP.

Os menores custos são memorizados e utilizados no algoritmo, ou seja, os blocos de recursos são alocados aos usuários. Caso ainda existam blocos de recursos disponíveis, estes são alocados para os usuários com melhores condições de canal.

Algoritmo 2: Algoritmo de Alocação de Recursos Utilizando Programação Evolucionária

- 1 Recebe os parâmetros de rede do sistema;
 - 2 Inicializa os parâmetros do algoritmo;
 - 3 Avalia o custo de cada solução através da função objetiva (14) usando algoritmo EP descrito no **Algoritmo 1**;
 - 4 Salva o menor custo e aloca os blocos de recursos conforme vetor solução de menor custo;
 - 5 Aloca os blocos remanescentes para os usuários com melhores condições de canal;
 - 6 Calcula a taxa de bits dos usuários.
-

VII. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

NESTA seção são apresentados os resultados das simulações do algoritmo proposto de alocação de blocos de recurso em comparação a outros algoritmos da literatura, implementados através do software MATLAB versão R2015a.

As condições de canal para cada usuário e RBs em termos de SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*, Relação Sinal Ruído mais Interferência) foram geradas para cada TTI conforme os parâmetros comumente utilizados na literatura e apresentados na Tabela I.

As simulações foram desenvolvidas considerando os parâmetros para um cenário de transmissão *downlink* apresentado na Tabela II. A taxa de bit e o índice MCS associado ao SINR são definidos com CQI (*Channel Quality Indicator*, Indicador de Qualidade de Canal) de 4 bits conforme mostrado na Tabela III.

Os valores apresentados nas Tabelas I, II e III são parâmetros comumente utilizados na literatura [8] [9] [10] [28] [29] [30] [31] e que buscam aproximar o cenário

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO PARA MODELAGEM DE CANAL [28] [29] [30]

Modelo multipercorso	Rayleigh
Perfil de atraso multipercorso	ETU (<i>Extended Typical Urban</i> , Urbano Típico Estendido)
Modelo de perda de percurso	$L = 128.1 + 37.6 \log_{10}(R)$, R em quilômetro
Sombreamento lognormal	Média 0 e desvio padrão 10dB
Distância entre UE e eNB	1 km
Densidade de potência do ruído branco	-174 dBm/Hz
Potência máxima de transmissão do eNB	46 dBm
Ganho da antena do eNB após perda do cabo	15 dBi
Ganho da antena do UE	0 dBi
Figura de ruído do UE	9 dB
Margem de interferência do UE	4 dB
Velocidade do UE	3 km/h

de simulação com o cenário real de transmissão de um canal de comunicação. A mudança dos parâmetros tem pouca influência nos resultados das simulações, ou seja, os resultados são os mesmos independente dos parâmetros utilizados.

As simulações da heurística PSO foram desenvolvidas utilizando 30 indivíduos e 100 iterações como critério de parada, conforme [8], enquanto na heurística EP foram utilizados também 100 iterações, porém um número variado de indivíduos, a fim de testar o desempenho.

TABELA II
CENÁRIO DE SIMULAÇÃO DA TRANSMISSÃO DOWNLINK

Largura de banda por componente (MHz)	[5 10 10 20 20]
Taxa de transmissão mínima requerida por usuário (Mbits/s)	0.768
Tamanho do <i>subframe</i> (ms)	1
Número de TTIs simulados	10000
Forma de onda	OFDM e f-OFDM

As simulações foram desenvolvidas comparando os resultados do algoritmo proposto baseado em EP com os seguintes algoritmos de alocação de recursos: algoritmo baseado em PSO [8], algoritmo *QoS guaranteed* [9] e algoritmo de minimização de retardo, denominado *Min-delay* [10]. Os valores médios apresentados nos resultados podem ser confirmados com forte certeza, uma vez que correspondem à média de 10000 realizações dos algoritmos, onde podem ser facilmente inseridos os intervalos de confiança para as curvas.

Foram simulados cenários de alocação de recursos uti-

TABELA III
CQI E RESPECTIVOS ESQUEMAS DE MODULAÇÃO E TAXA DE CODIFICAÇÃO [31]

CQI	Modulação	Taxa de Codificação (1/1024)	Bits de informação por símbolo
0	-	0	0.00
1	QPSK	78	0.15
2	QPSK	120	0.23
3	QPSK	193	0.38
4	QPSK	308	0.60
5	QPSK	440	0.88
6	QPSK	602	1.18
7	16-QAM	378	1.48
8	16-QAM	490	1.91
9	16-QAM	616	2.41
10	64-QAM	466	2.73
11	64-QAM	567	3.32
12	64-QAM	666	3.90
13	64-QAM	772	4.52
14	64-QAM	873	5.12
15	64-QAM	948	5.55

lizando diferente número de indivíduos na implementação da EP, como mostrado na Figura 1. É verificada uma diferença estatisticamente insignificante entre os valores de vazão total quando considerado mais de 15 indivíduos na simulação. Portanto, a partir daqui, todas as simulações do algoritmo EP foram implementadas considerando um número fixo de 15 indivíduos.

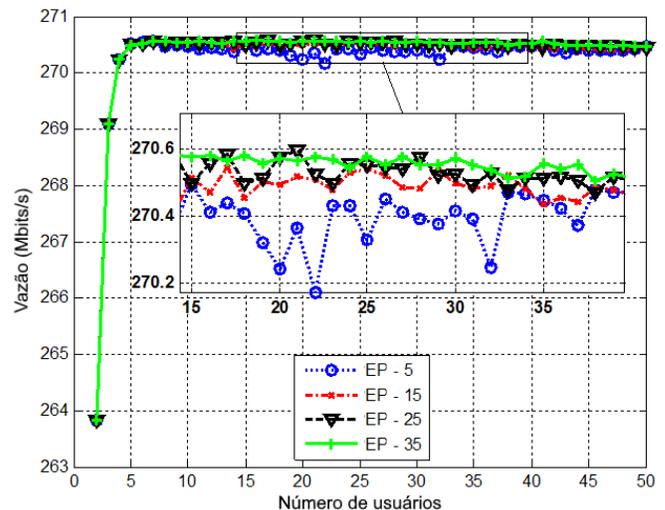


Fig. 1. Vazão total utilizando f-OFDM para 5, 15, 25 e 35 indivíduos considerados na EP

A Figura 2 mostra os resultados comparativos do algoritmo EP utilizando OFDM e f-OFDM. É verificado que quando se utiliza f-OFDM no algoritmo de alocação, a performance em termos de vazão melhor consideravelmente em relação ao OFDM, aproximadamente 10%. O

resultado se justifica pelo maior número de blocos de recursos utilizáveis para transmissão de dados ao utilizar a banda livre das redes LTE.

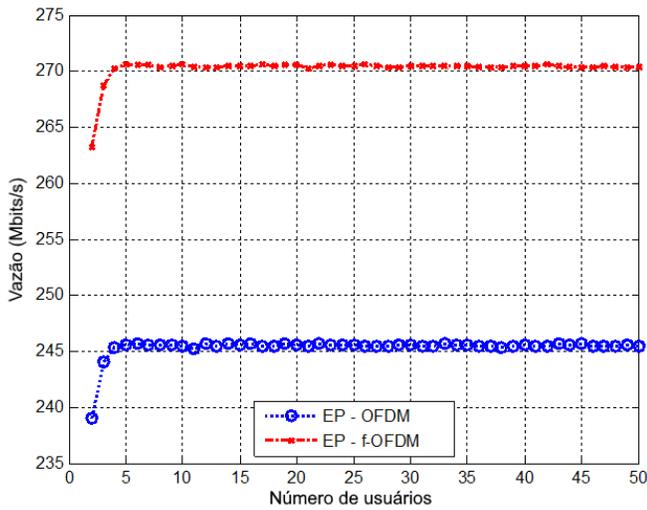


Fig. 2. Vazão total utilizando OFDM e f-OFDM

O algoritmo EP proposto apresenta os maiores valores de vazão total em todos os cenários com diferente número de usuários considerados na alocação, como pode ser visto na Figura 3. Este resultado se explica pelo fato de que o algoritmo proposto prioriza os usuários com melhores condições de canal na alocação dos recursos, consequentemente, garantindo maiores valores de vazão. Os algoritmos *QoS guaranteed* e *Min delay* apresentam valores similares, maiores que o algoritmo PSO quando considerado mais de 10 usuários.

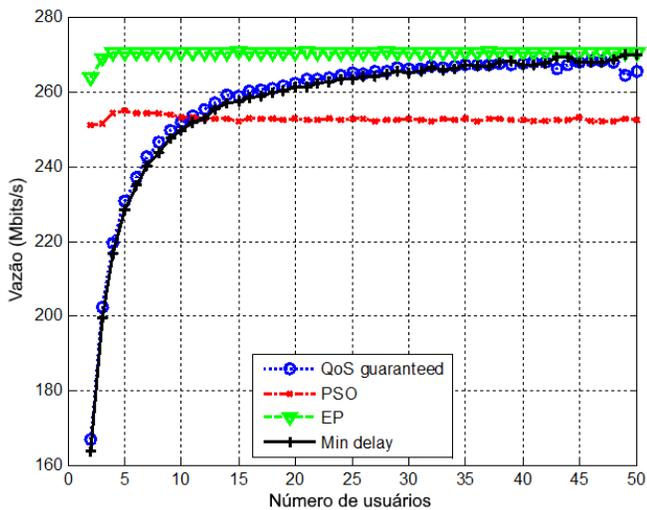


Fig. 3. Vazão total utilizando f-OFDM

A Figura 4 mostra que os algoritmos EP e PSO apresentam valores similares em termos de vazão média se considerado menos de 10 usuários na simulação. Considerando mais de 10 usuários, os algoritmos estudados apresentam valores similares. A vazão média é calculada através da

média simples da vazão total em função do número de usuários considerados em simulação.

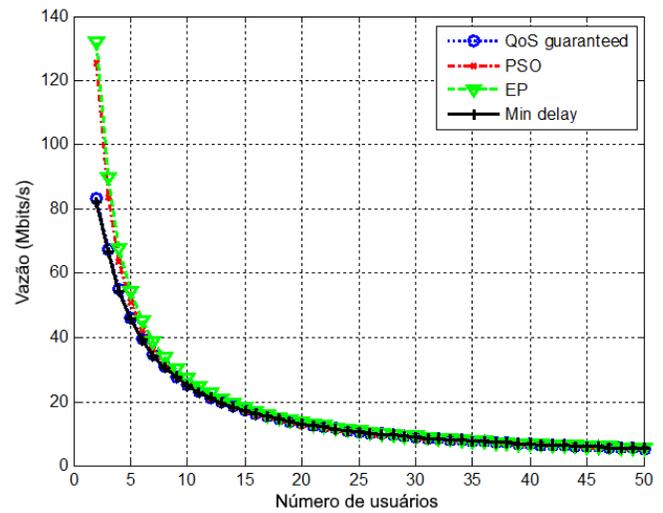


Fig. 4. Vazão média utilizando f-OFDM

O índice *fairness* é uma métrica importante na área de engenharia de redes cujo objetivo é determinar se os usuários ou as aplicações recebem uma distribuição justa dos recursos do sistema. Em termos deste índice, calculado conforme [32], os algoritmos *QoS guaranteed* e *Min delay* apresentam valores similares, em geral maiores que os demais algoritmos. O algoritmo EP apresenta os menores valores, como pode ser visto na Figura 5. A baixa performance do algoritmo proposto em termos de índice *fairness* se deve ao fato de prover maior prioridade de alocação aos usuários com melhores condições de canal.

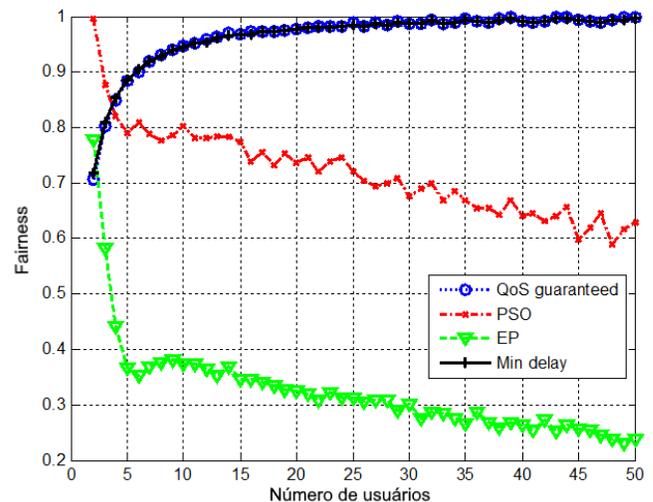


Fig. 5. Índice *fairness* utilizando f-OFDM

A Figura 6 apresenta o tempo de processamento (em milissegundos) da simulação dos algoritmos, considerando que as simulações foram desenvolvidas utilizando um microcomputador com a seguinte configuração: Processador Intel Core I5-3570 3.40GHz, 8Gb RAM, HD SATA III 7200

RPM, Windows 10 64 bits. Os algoritmos *QoS guaranteed* e *Min delay* apresentam os menores valores de tempo de processamento. Este fato era esperado, uma vez que os algoritmos EP e PSO são heurísticas que objetivam maximizar a vazão, às custas de maior complexidade. O algoritmo proposto EP alcança valores consideravelmente menores quando comparado ao algoritmo PSO, devido ao número reduzido de indivíduos considerados em simulação, 15, enquanto o algoritmo PSO considera 30 indivíduos. Espera-se então com este resultado que o algoritmo de escalonamento proposto apresente menor complexidade computacional, tornando seu uso viável em cenários reais de transmissão onde a decisão acerca da alocação dos recursos é realizada em um curto intervalo de tempo de 1 ms.

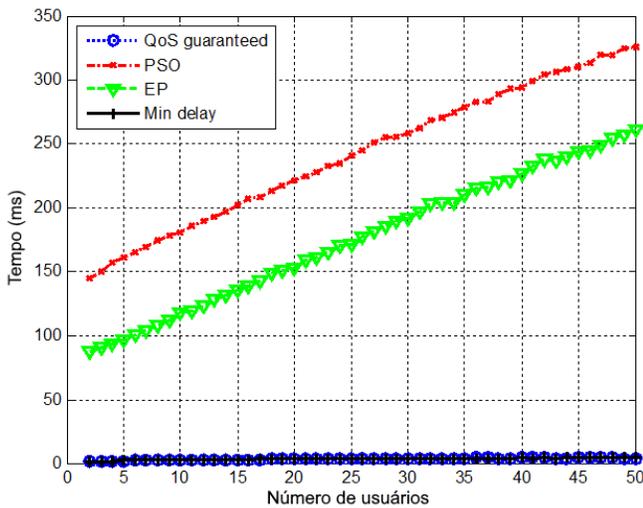


Fig. 6. Tempo de processamento utilizando f-OFDM

VIII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

APRESENTAMOS neste artigo, um esquema de alocação de blocos de recursos para redes sem fio da próxima geração. Para tal, propomos a aplicação do algoritmo de Programação Evolucionária para resolver o problema de alocação definido pela maximização da vazão total do sistema sujeito a restrição da taxa mínima de transmissão.

Os resultados apresentados nas simulações mostram que ao se utilizar f-OFDM no esquema de alocação, o desempenho do algoritmo proposto em termos de vazão melhora consideravelmente em relação ao OFDM. Os valores apresentados são em média 10% superiores.

Os resultados das simulações mostram que o algoritmo EP proposto apresenta maiores valores de vazão total e vazão média em relação aos algoritmos PSO, *QoS guaranteed* e *Min delay*, considerando todos os cenários com diferente número de usuários, às custas de maior tempo de processamento e menor índice *fairness*. Este fato se justifica pela característica do algoritmo proposto de prover maior prioridade na alocação de recursos para os usuários com melhores condições de canal. É importante observar

que o algoritmo EP apresenta melhores resultados em geral que os resultados apresentados pelo algoritmo PSO, mesmo considerando metade do número de indivíduos na simulação.

Espera-se com os resultados obtidos que o algoritmo EP proposto seja comercialmente viável para cenários reais de transmissão em termos de complexidade computacional e atendimento aos requisitos de transmissão dos usuários, tornando assim seu uso um diferencial positivo no mercado em vista da proposta de maximização da taxa de vazão.

Como propostas de trabalho futuro, pretendemos estudar outras formas de definição de prioridade de alocação e outras heurísticas a fim de melhorar o desempenho do algoritmo em termos de índice *fairness* e tempo de processamento e utilizar, através de processamento paralelo, o algoritmo proposto neste trabalho para estimar a quantidade de blocos de recursos para os usuários.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio para realização do projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Rysavy, *LTE and 5G Innovation: Igniting Mobile Broadband*. Rysavy Research/4G Americas, 2015.
- [2] A. Gupta e R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies”, *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015, ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [3] T. O. Olwal, K. Djouani e A. M. Kurien, “A Survey of Resource Management Toward 5G Radio Access Networks”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, n.º 3, pp. 1656–1686, thirdquarter de 2016, ISSN: 1553-877X. DOI: 10.1109/COMST.2016.2550765.
- [4] S. Rostami, K. Arshad e P. Rapajic, “A joint resource allocation and link adaptation algorithm with carrier aggregation for 5G LTE-Advanced network”, em *2015 22nd International Conference on Telecommunications (ICT)*, abr. de 2015, pp. 102–106. DOI: 10.1109/ICT.2015.7124665.
- [5] M. Bi, W. Jia, L. Li, X. Miao e W. Hu, “Investigation of F-OFDM in 5G fronthaul networks for seamless carrier-aggregation and asynchronous transmission”, em *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, mar. de 2017, pp. 1–3.
- [6] D. Wu, X. Zhang, J. Qiu, L. Gu, Y. Saito, A. Benjebbour e Y. Kishiyama, “A Field Trial of f-OFDM toward 5G”, em *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, dez. de 2016, pp. 1–6.
- [7] J. Abdoli, M. Jia e J. Ma, “Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems”, em *2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, jun. de 2015, pp. 66–70. DOI: 10.1109/SPAWC.2015.7227001.

- [8] L. Su, P. Wang e F. Liu, “Particle swarm optimization based resource block allocation algorithm for downlink LTE systems”, em *2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, out. de 2012, pp. 970–974. DOI: 10.1109/APCC.2012.6388227.
- [9] N. Guan, Y. Zhou, L. Tian, G. Sun e J. Shi, “QoS guaranteed resource block allocation algorithm for LTE systems”, em *2011 IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, out. de 2011, pp. 307–312.
- [10] M. V. G. Ferreira, F. H. T. Vieira e D. C. Abrahão, “Minimizing delay in resource block allocation algorithm of LTE downlink”, em *2015 International Workshop on Telecommunications (IWT)*, jun. de 2015, pp. 1–7. DOI: 10.1109/IWT.2015.7224550.
- [11] M. Alasti, B. Neekzad, J. Hui e R. Vannithamby, “Quality of service in WiMAX and LTE networks [Topics in Wireless Communications]”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, n.º 5, pp. 104–111, mai. de 2010, ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5458370.
- [12] R. Kausar, Y. Chen e K. K. Chai, “QoS aware Packet Scheduling with adaptive resource allocation for OFDMA based LTE-advanced networks”, em *IET International Conference on Communication Technology and Application (ICCTA 2011)*, out. de 2011, pp. 207–212. DOI: 10.1049/cp.2011.0660.
- [13] 3GPP, “3GPP TS 36.213 version 10.4.0 Release 10. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures”, em, 2012.
- [14] X. Zhang, M. Jia, L. Chen, J. Ma e J. Qiu, “Filtered-OFDM - Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks”, em *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, dez. de 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOM.2015.7417854.
- [15] G. Fettweis, M. Krondorf e S. Bittner, “GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing”, em *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, abr. de 2009, pp. 1–4. DOI: 10.1109/VETECS.2009.5073571.
- [16] F. Schaich, “Filterbank based multi carrier transmission (FBMC) - evolving OFDM: FBMC in the context of WiMAX”, em *2010 European Wireless Conference (EW)*, abr. de 2010, pp. 1051–1058. DOI: 10.1109/EW.2010.5483518.
- [17] F. Schaich e T. Wild, “Waveform contenders for 5G - OFDM vs. FBMC vs. UFMC”, em *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, mai. de 2014, pp. 457–460. DOI: 10.1109/ISCCSP.2014.6877912.
- [18] L. J. Fogel, em *Autonomous automata*, Industrial Research, 1962, 4:14–19.
- [19] A. V. Sebalde e D. B. Fogel, “Design of SLAYR neural networks using evolutionary programming”, em *Proceedings of the 24th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1990, pp. 1020–1024.
- [20] D. B. Fogel, em *System Identification Through Simulated Evolution: A Machine Learning Approach to Modeling*, Needham Heights, 1991.
- [21] —, “Evolving artificial intelligence”, em *PhD thesis, University of California, San Diego, CA, USA*, 1992.
- [22] L. J. Fogel, “chapter Evolutionary Programming in Perspective: the Top-down View”, em *Computational Intelligence: Imitating Life*, IEEE Press, 1994, pp. 135–146.
- [23] V. W. Porto, “chapter 10: Evolutionary Programming”, em *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operations*, IoP Press, 2000, pp. 89–102.
- [24] X. Yao, Y. Liu e G. Lin, “Evolutionary programming made faster”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, n.º 2, pp. 82–102, jul. de 1999, ISSN: 1089-778X. DOI: 10.1109/4235.771163.
- [25] R. Linden, *Algoritmos Genéticos (2a edição)*. BRASPORT, ISBN: 9788574523736. endereço: <https://books.google.com.br/books?id=it0kv6UsEMEC>.
- [26] J. Brownlee, *Clever Algorithms: Nature-inspired Programming Recipes*. Lulu.com, 2011, ISBN: 9781446785065. endereço: <https://books.google.com.br/books?id=SESWXQphCUkC>.
- [27] T. Back e H. P. Schwefel, “An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization”, *Evolutionary Computation*, vol. 1, n.º 1, pp. 1–23, mar. de 1993, ISSN: 1063-6560. DOI: 10.1162/evco.1993.1.1.1.
- [28] M. Ni, X. Xu e R. Mathar, “A channel feedback model with robust SINR prediction for LTE systems”, em *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, abr. de 2013, pp. 1866–1870.
- [29] 3GPP, “3GPP TS 36.104 version 8.3.0 Release 8. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception”, em, 2008.
- [30] —, “3GPP TR 36.931 version 9.0.0 Release 9. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) requirements for LTE Pico Node B”, em, 2011.
- [31] M. Kawser, N. Imtiaz Bin Hamid, M. Nayeemul Hasan, M. Shah Alam e M. Musfiqur Rahman, “Downlink SNR to CQI Mapping for Different Multiple Antenna Techniques in LTE”, vol. 2, pp. 756–760, set. de 2012.
- [32] R. Jain, D.-M. Chiu e W. Hawe, “A Quantitative Measure Of Fairness And Discrimination For Resource Allocation In Shared Computer Systems”, *CoRR*, vol. cs.NI/9809099, 1998. endereço: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/corr/corr9809.html#cs-NI-9809099>.