LII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
João Pessoa - PB, 3 a 5 de novembro de 2020

ALGORITMO MEMÉTICO APLICADO AO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE FREQUÊNCIAS EM REDES CELULARES

Paulo Sérvulo dos Santos
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEP
Rua 36, 115 - Loanda, João Monlevade - MG, 35931-008
paulo.servulo@aluno.ufop.edu.br

George Henrique Godim da Fonseca
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Departamento de Computação e Sistemas - DECSI
Rua 36, 115 - Loanda, João Monlevade - MG, 35931-008
george.ufop.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma solução para o Problema de Alocação de Frequências em redes celulares utilizando o algoritmo memético. O Problema da Alocação de Frequências que será abordado nesse trabalho consiste em encontrar o menor número de frequências que devem ser usadas em uma rede para que não haja interferência. Este problema é considerado NP-difícil, sendo, em muitos casos, impraticável solucionar o mesmo por métodos exatos. Então, faz-se necessário o estudo de abordagens heurísticas para fornecer boas aproximações para o mesmo, como é o caso dos algoritmos evolutivos. Os resultados obtidos pelo algoritmo memético proposto no presente trabalho foram superiores aos das abordagens heurísticas existentes na literatura, o que indica que é uma abordagem promissora para esse problema.

PALAVRAS CHAVE. Problema de Alocação de Frequências, Algoritmo Memético, Redes Celulares.

TEL&SI – PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações
MH – Metaheurísticas

ABSTRACT

This work presents a solution to the Frequency Assignment Problem in cellular networks using the memetic algorithm. The Frequency Assignment Problem that will be addressed in this work consists in finding the smallest number of frequencies that must be used in a network so that there is no interference. This problem is proven NP-hard, so it is often impraticable to solve it by exact methods. Therefore, it is necessary to study heuristics approaches to provide good approximations for it, as is the case with evolutionary algorithms. The results obtained by the memetic algorithm proposed in the present work were superior to those of the existing heuristic approaches in the literature, which indicates that it is a promising approach to this problem.

KEYWORDS. Frequency Assignment Problem. Memetic Algorithms. Cellular Networks.

TEL&SI – OR in Telecommunications and Information Systems
MH – Metaheuristics

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

1. Introdução

As redes móveis de telefonia celular constituem um dos principais meios de comunicação da atualidade. Essa tecnologia utiliza as ondas eletromagnéticas para realizar o envio e recebimento de informações, como sinais de telefonia por voz e internet. Para tal, exitem bandas do espectro eletromagnético que são reservadas para esse tipo de comunicação.

À medida que essa tecnologia foi se popularizando e ficando cada vez mais barata, a quantidade de usuários do serviço cresceu rapidamente, e com isso, tornou-se necessária a adoção de técnicas que permitissem a utilização eficiente do espectro eletromagnético disponível [Dias, 2014]. Uma dos problemas tratados nessa área é conhecido como Problema de Alocação de Frequências (*Frequency Assignment Problem* - FAP), que avalia qual a melhor forma de alocar as melhores frequências, ou os melhores canais, em uma Estação de Rádio-Base (ERB).

O problema de alocação de frequências tem como objetivo atribuir porções do espectro eletromagnético de acordo com as demandas dos usuários da rede sem fio, de forma a minimizar ou eliminar possíveis interferências que degradam a qualidade do serviço prestado [Dias, 2014]. Além de ser um importante desafio prático, o FAP se mostra interessante para estudos teóricos, onde diversas técnicas e algoritmos são abordados. Hale [1980] demonstrou que o FAP é redutível ao problema da coloração de grafos que é um problema NP-Difícil, logo o FAP também pertence à classe dos problemas NP-Difíceis.

Um dos primeiros trabalhos publicados sobre o tema que utiliza a otimização combinatória foi publicado por Hale [1980]. Neste artigo, o autor aborda a utilização de otimização na solução do FAP. Após essa publicação, diversos pesquisadores trataram o tema com diferentes abordagens. Koster et al. [1999] utilizam um algoritmo de programação dinâmica de decomposição em árvore sobre o grafo que modela a interferência para solucionar o problema. Em Laidoui et al. [2018] os autores apresentam um algoritmo genético híbrido multiobjetivo que combina a noção principal de equilíbrio de nash da teoria dos jogos com a otimização de pareto para resolver o problema em questão. Para teste eles utilizam duas classes de instâncias e comparam os resultados com os algoritmos de otimização multiobjetivo mais referidos, como NSGA-II e SPEA2. O algoritmo proposto no artigo obteve soluções de ótima qualidade. Kiouche et al. [2020] apresentam uma hibridação do algoritmo memético multi-objetivo e do sistema imunológico artificial para o FAP. Os testes da solução apresentada por Kiouche et al. [2020] foram conduzidos usando instâncias do COST259 e apresentaram bons resultados.

Este trabalho tem como objetivo utilizar um algoritmo memético para solução do problema de alocação de canais em redes celulares. Para tal, o algoritmo foi implementado e testes foram realizados com um conjunto de instâncias conhecido como *Philadelphia*. Os resultados obtidos foram animadores, uma vez que o método proposto encontrou a solução ótima em alguns casos, e nos demais encontrou soluções iguais ou melhores que os métodos heurísticos utilizados por outros autores.

A próxima seção apresenta a descrição do problema de alocação de frequências, iniciando com uma breve explicação do funcionamento das redes celulares. Na Seção 3 o critério de otimização é abordado e explicado. Na Seção 4 as instâncias utilizadas no problema são apresentadas juntamente com a classe de instâncias *Philadelphia*. A Seção 5 é reservada para uma breve explicação do funcionamento do algoritmo memético. A Seção 6 apresenta a metodologia utilizada, sendo que nessa são apresentados os operadores utilizados, juntamente com o algoritmo de busca local e os parâmetros do algoritmo. Por fim, a Seção 7 apresenta os resultados encontrados com a execução do algoritmo, e a Seção 8 apresenta as considerações finais do trabalho.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings

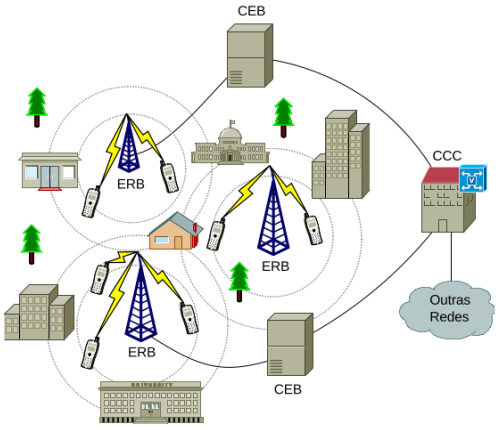
2. Descrição do Problema

Essa seção apresenta o funcionamento da estrutura de uma rede celular e, posteriormente, o problema de alocação de frequências que será abordado nesse trabalho.

2.1. Estrutura de Uma Rede de Telefonia Móvel Celular

Uma rede de telefonia móvel é composta por uma série de Estações de Rádio-Base (ERBs) que são responsáveis por fazer a comunicação sem fio entre os dispositivos móveis e o restante da rede. Cada uma das ERBs é conectada a um Controlador de Estação Base (CEB) por meio de cabos. Esses CEBs são ligados às Centrais de Comutação e Controle (CCC), que por sua vez são conectadas às redes de telefonia fixa. A estrutura de uma rede de telefonia móvel pode ser visualizada na Figura 1.

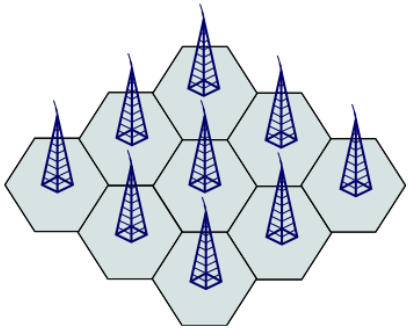
Figura 1: Estrutura de uma rede de telefonia móvel celular.



Fonte: [Dias, 2014]

A região geográfica de cobertura de uma ERB é conhecida como célula. Os sinais emitidos por uma ERB se propagam em todas as direções (omnidirecional), mas cada uma das células são representadas por um hexágono (como mostrado na Figura 2), que fornece uma boa aproximação da região atendida.

Figura 2: Representação de uma rede móvel por células hexagonais.



Fonte: [Dias, 2014]

Quando um usuário realiza uma chamada, o seu dispositivo se comunica com a ERB que está no seu alcance, sendo que cada chamada está associada a um canal da estação. Este canal

consiste de uma porção do espectro eletromagnético disponível para aquele tipo de comunicação. Uma ERB possui então um número limitado de canais, sendo que cada canal só pode atender a um dispositivo por vez para que sejam evitadas interferências. Essas interferências podem ocorrer caso os dispositivos de comunicação estejam próximos e os canais utilizados sejam vizinhos no espectro eletromagnético. Neste ponto surge o problema de alocação de frequência, que busca diminuir a interferência entre os dispositivos fazendo uma distribuição inteligente dos canais disponíveis em uma ERB.

2.2. O Problema de Alocação de Frequências

O FAP pode ser descrito da seguinte maneira [Hale, 1980]: temos um conjunto de n ERBs, onde cada ERB i possui uma demanda de q_i canais que corresponde à quantidade de chamadas daquelas estação, onde o k-ésimo canal (ou k-ésima frequência) alocado na i-ésima ERB é denotado por f_{ki}. Então, para cada par de estação base (i, j), existe uma distância denominada distância de separação (d_{ij}), onde $|f_{ki} - f_{mj}| > d_{ij}$ deve ser atendida. Cada uma dessas distâncias são alocadas em uma matriz conhecida como matriz de interferências, onde $D_{m\times m} = [d_{ij}]$. Nessa matriz, os elementos que correspondem a ERBs que não se interferem são atribuídos com valor 0.

Cada uma das estações base possui um conjunto de canais que podem ser atribuídos às ligações que chegam à mesma. Este conjunto de canais é denominado domínio de frequência (F_i) que contém os possíveis canais que as chamadas da ERB i podem receber. O conjunto de todos os domínios de frequência da rede é representado por $F = F_1 \cup F_2 \cup ... \cup F_n$.

Para efetuar a atribuição dos canais disponíveis para as chamadas existentes, existem três esquemas [Dias, 2014]. O primeiro é denominado alocação fixa de canais, onde o número de chamadas destinado a cada ERB é fixo. O segundo esquema é quando não existe um número fixo de chamadas, então uma ERB inicialmente possui todos os canais disponíveis e a medida que as chamadas vão sendo recebidas, os canais são alocados. Este esquema é conhecido como alocação dinâmica de canais. Por último temos uma combinação dos dois esquemas anteriores, que é conhecida como alocação híbrida de canais. Neste cenário, cada ERB possui um conjunto de canais pré-alocados e os demais canais são alocados dinamicamente. Para este trabalho será utilizado o esquema de alocação fixa de canais.

3. Critério de Otimização

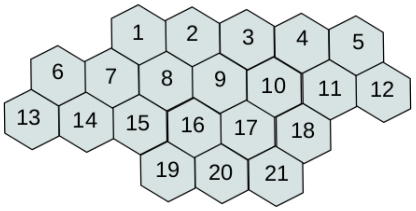
Na literatura encontramos estudos sobre três diferentes critérios de otimização que podem ser explorados no FAP [Hale, 1980]. O primeiro deles se refere à minimização da ordem, onde o parâmetro a ser minimizado é a quantidade de canais utilizados por todas as ERBs. O segundo critério é relacionado à redução da extensão entre os canais, ou seja, a extensão entre a menor e maior frequência deve se a mínima possível. Por último, temos o critério de minimização da interferência. Nos dois primeiros casos todas as restrições de distância entre as ERBs tinham que ser atendidas, nesse último, não obrigatoriamente tal fato deve ocorrer, sendo que em caso de uma quebra de restrição um peso é computado para tal. Este peso indica o nível de interferência que a quebra de uma dada restrição causa. Sendo assim, o objetivo final é minimizar a soma dos pesos computados em cada quebra de restrição de distância. Neste trabalho será utilizado o critério de minimização da ordem.

Formalmente o critério de minimização da ordem pode ser descrito como: dadas n ERBs, o vetor de demandas c e o domínio da frequência F_i de cada ERB i e a matriz de distâncias D, deseja-se alocar para cada estação base i, q_i canais de forma que as distâncias de frequências sejam satisfeitas e que a quantidade de canais usados seja a menor possível.

4. Descrição das Instâncias

Neste trabalho serão usadas instâncias de uma classe conhecida como *Philadelphia* para realizar os testes com o algoritmo memético. Essa classe é composta por uma rede baseada em células hexagonais que foram definidas de acordo com uma rede celular existente na Filadélfia, nos Estados Unidos [Anderson, 1973]. Essa classe de instâncias possui uma rede com um total de 21 células como apresentado na Figura 3. As demandas e restrições da classe *Philadelphia* são variadas formando um conjunto com várias instâncias formadas pela mesma rede. As interferências se dão por meio da distância geográfica entre as ERBs, utilizando o sistema *two-band buffering*, de forma que só haverá interferências entre células cuja distância seja 1 ou 2 e entre canais pertencentes à mesma estação base. Os valores de cada distância são dispostos em uma matriz $C_{n\times n}$, onde n é o número de células e o elemento c_{ij} é a distância de separação mínima que deve ser atendida entre todos os canais alocados para i e para j. Os elementos da matriz cujo $i = j$, representam a distância entre canais em uma mesma ERB.

Figura 3: Rede de 21 células da instância Philadelphia.



Fonte: [Dias, 2014]

Algumas das distâncias de separação e as demandas para cada uma das instâncias da classe *Philadelphia* são apresentados nas Tabelas 1 e 2 respectivamente. Cada linha da Tabela 1 se refere a uma matriz de demandas, por exemplo, a primeira linha se refere a matriz C^1_{21}. Nesse caso, se a distância entre duas células i e j for 1, ou 2, o valor do elemento c_{ij} será 1. Já se a distância entre duas células i e j for maior que 2, o valor do elemento c_{ij} será 0. Os elementos onde $i = j$ possuem valor igual a 7. Na Tabela 2 cada linha representa um vetor de demandas, por exemplo, a primeira linha se refere ao vetor D^1_{21} onde cada posição desse vetor indica a demanda de uma célula. Então, o vetor D^1_{21} indica que a célula 1 possui uma demanda de 8 canais, a célula 2 possui uma demanda de 25 canais, e assim por diante.

5. Algoritmo Memético

O algoritmo memético é uma hibridização do algoritmo genético, cuja diferença é a utilização de uma busca local em uma ou mais etapas do algoritmo. Então, para um melhor entendimento do funcionamento do algoritmo memético, é necessário compreender o funcionamento de um algoritmo genético.

5.1. Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) foi proposto inicialmente por Holland [1975] e é baseado na teoria da evolução de Charles Darwin. Basicamente este algoritmo utiliza o conceito de que somente os melhores indivíduos de uma população sobrevivem. Para os problemas de otimização, um indivíduo pode ser visto como um conjunto de parâmetros que formam uma solução do problema abordado. Sendo assim, a população é formada por um conjunto desses indivíduos. O conjunto de parâmetros que pertencem a um indivíduo podem ser aplicados à função objetivo do problema que irá retornar um valor que é denominado de *fitness* e representa o quão próximo ou distante da

Tabela 1: Distâncias de separação na matriz de interferências entre células para cada instância do conjunto *Philadelphia*.

Nome da Matriz	Distância entre as células i e j	Valor do elemento c_{ij}	Distância entre canais na mesma célula c_{ii}
C_{21}^1	1	1	7
	2	1	
	> 2	0	
C_{21}^2	1	2	7
	2	1	
	> 2	0	
C_{21}^3	1	1	6
	2	1	
	> 2	0	
C_{21}^4	1	2	6
	2	1	
	> 2	0	
C_{21}^5	1	1	5
	2	1	
	> 2	0	
C_{21}^6	1	2	5
	2	1	
	> 2	0	
C_{21}^7	1	1	4
	2	1	
	> 2	0	
C_{21}^8	1	2	4
	2	1	
	> 2	0	

Fonte: Adaptada de Anderson [1973]

Tabela 2: Vetores de demanda para as instâncias *Philadelphia*.

Nome do Vetor	Demandas por Célula
D_{21}^1	$8, 25, 8, 8, 8, 15, 18, 52, 77, 28, 13, 15, 31, 15, 36, 57, 28, 8, 10, 13, 8$
D_{21}^2	$5, 5, 5, 8, 12, 25, 30, 25, 30, 40, 40, 45, 20, 30, 25, 15, 15, 30, 20, 20, 25$

Fonte: Adaptada de Anderson [1973]

solução ótima aquele indivíduo se encontra. Esses indivíduos podem se reproduzir e sofrer mutação gerando assim novos indivíduos, e a cada geração, os melhores indivíduos são selecionados para a próxima geração. Após várias gerações o melhor indivíduo encontrado ao longo das gerações é escolhido como uma solução do problema. Esses passos são executados até que um critério de parada seja satisfeito.

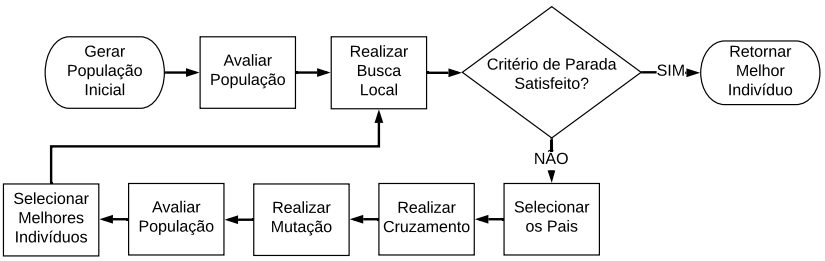
5.2. Algoritmo Memético

Proposto por Moscato et al. [1989], este algoritmo pode ser visto como uma hibridização do algoritmo genético. O algoritmo memético é um AG com busca local em uma ou mais de suas etapas. Se tratando de algoritmos genéticos, os operadores de mutação e cruzamento são utilizados como forma de diversificar a população. Os novos indivíduos gerados a partir do cruzamento e mutação podem possuir uma aptidão baixa, mas terem um grande potencial de crescimento, de modo que uma busca local possa levar este indivíduo a alcançar um melhor resultado.

O processo de busca local pode ser inserido em diversos locais do AG, por exemplo, após a geração da população inicial, após o processo de cruzamento ou após o processo de mutação. Neste

trabalho, a busca será inserida antes do processo de avaliação dos indivíduos como apresentado no fluxograma da Figura 4.

Figura 4: Fluxograma do algoritmo memético.



6. Metodologia

Para minimizar a quantidade de canais que devem ser utilizados pela rede, um algoritmo baseado no algoritmo memético foi implementado. Como visto anteriormente, este algoritmo possui alguns operadores, onde os mesmos devem ser implementados de acordo com o problema abordado. Além dos operadores de seleção, mutação e cruzamento, uma população inicial aleatória deve ser gerada e um algoritmo de busca local deve ser utilizado. Nesta seção serão apresentados como estes operadores foram implementados e quais parâmetros foram usados.

6.1. Geração da População Inicial

A população inicial é formada por um conjunto de indivíduos que são possíveis soluções do problema. No caso do problema de alocação de frequências, podemos definir que as ERBs são enumeradas de 1 a n, onde n é o número de estações base. Um indivíduo pode ser representado por um vetor aleatório onde seus elementos variam de 1 a n e cada elemento representa uma das estações base. Um mesmo elemento pode aparecer mais de uma vez no vetor levando em consideração as demandas de cada ERB. Por exemplo, se a demanda de uma ERB é igual a 3, então o elemento deve aparecer três vezes no vetor. A ordem em que as ERBs aparecem neste vetor indica que a próxima frequência não atribuída, e que não quebre nenhuma restrição, dever ser alocada ao canal. Como exemplo, dado um vetor de demandas $D = [1, 1, 1, 3]$, um possível indivíduo é $[3, 1, 4, 2, 4, 4]$.

6.2. Função Objetivo

O método utilizado para calcular o valor da função objetivo é baseado no algoritmo descrito por Chakraborty [2001], onde o autor utiliza uma matriz cuja quantidade de colunas é dada pelo número de células e o número de linhas é sempre maior que o número de colunas. As linhas representam cada uma das frequências que serão atribuídas, já as colunas representam as ERBs. Cada elemento da matriz é atribuído da seguinte forma: 0 caso a frequência ainda não tenha sido atribuída à ERB i, $+1$ caso a frequência tenha sido atribuída à ERB i, -1 caso a frequência não possa ser atribuída à ERB i e $+9$ caso a frequência não tenha sido utilizada. Observe a matriz de distâncias e o vetor de demandas abaixo:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 5 & 4 & 0 & 0 \\ 4 & 5 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 5 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 5 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

Sabendo que o indivíduo possui a seguinte sequência de ERBs, $[3, 1, 4, 2, 4, 4]$, (observe que, como a demanda das ERBs $1, 2$ e 3 são iguais a 1, estes aparecem somente uma vez no vetor,

já a demanda da ERB 4 é igual a 3, então ela aparece três vezes no vetor) a Tabela 3 mostra como ficaria a alocação para tal configuração. Ao alocarmos a primeira frequência para a ERB 3, as próximas 4 frequências abaixo recebem -1, indicando que estas não podem ser alocadas para a estação 3. Da mesma forma, a ERB 4 não pode ser alocada nas duas próximas frequências.

Tabela 3: Exemplo de indivíduo do problema.

Frequência	Célula			
	1	**2**	**3**	**4**
f_1	+1	-1	+1	-1
f_2	-1	-1	-1	-1
f_3	-1	-1	-1	+1
f_4	-1	-1	-1	-1
f_5	-1	+1	-1	-1
f_6	-1	-1	+0	-1
f_7	-1	-1	-1	-1
f_8	-1	-1	-1	+1
f_9	+0	-1	-1	-1
f_{10}	+0	+0	+0	-1
f_{11}	+0	+0	+0	-1
f_{12}	+0	+0	-1	-1
f_{13}	+0	-1	-1	+1
f_{14}	+9	+0	-1	-1
f_{15}	+9	+0	+0	-1

Fonte: [Chakraborty, 2001]

O calculo da função objetivo é feito contando a quantidade de frequências utilizadas pela rede. Sendo assim, tomando como exemplo da Tabela 3, para obter o resultado podemos contar a quantidade de linhas da tabela que não possui $+9$, uma vez que o $+9$ indica que a frequência não foi utilizada. Sendo assim, o valor da função objetivo para esse exemplo é 13.

6.2.1. Operador de Cruzamento

O operador de cruzamento utilizado neste trabalho é baseado no Operador OX. Neste operador, os filhos são gerados a partir da escolha de uma sequência parcial de genes de um dos pais e preservando a ordem relativa dos genes do segundo pai [Silva e Oliveira, 2006]. Sendo assim, dados dois pais p_1 e p_2, são determinados dois pontos de corte em ambos. O subconjunto contido entre os dois pontos de corte de cada um dos pais são copiados para os filhos, f_1 e f_2. Os filhos são completados a partir do segundo ponto de corte com os genes do outro pai que não estão no intervalo de corte do filho [Vital et al., 2016]. O que difere o operador utilizado do operador OX é que um indivíduo pode ter mais de uma mesma ERB, uma vez que a demanda de canais para aquela ERB seja maior que 1. Sendo assim, deve-se levar em conta a quantidade de vezes que o índice de uma ERB deve aparecer no vetor de solução.

Para ilustrar, a Figura 5 mostra um exemplo de cruzamento utilizando o operador descrito. Observe que, o filho f_1 herda os genes 3 e 2, que estão contidos entre os dois pontos de corte do pai p_1, e o filho f_2 herda os genes 2 e 3 do pai p_2. O restante do filho f_1 é completado com os genes contidos a partir do segundo ponto de corte do pai p_2 que não estão no intervalo de corte do filho f_1. Já o filho f_2 é completado com os genes contidos a partir do segundo ponto de corte do pai p_1 que não estão no intervalo de corte do filho f_1. Ao completar os filhos com a sequência do segundo pai, deve-se levar em conta a demanda de cada elemento dos filhos.

6.3. Operador de Mutação

O operador de mutação utilizado é bastante simples, onde o mesmo consiste em escolher duas ERBs aleatoriamente no vetor e troca-las de lugares.

Figura 5: Exemplo de aplicação do operador de cruzamento.



6.4. Operador de Seleção

Para a seleção dos pais para a realização do cruzamento foi utilizado o método da roleta. Neste método os indivíduos são selecionados de acordo com sua aptidão. Então, um indivíduo que possui uma melhor aptidão tem uma maior probabilidade de ser escolhido.

Vamos ver um exemplo. Supondo que nossa população é formada por 4 indivíduos quaisquer, cujo valor da função objetivo pode ser visto na Tabela 4. A aptidão de cada indivíduo é inversamente proporcional ao valor da função objetivo, então para calcular a aptidão foi utilizado a soma total dos *fitness* dividido pelo *fitness* de cada indivíduo. Por exemplo, o indivíduo 1 possui um *fitness* de 320. Como a soma total dos *fitness* é 1260, a aptidão do indivíduo 1 é $1260/320 = 3.94$. Com isso podemos calcular a $\%$ de cada aptidão sobre a soma de todas as aptidões. Essa $\%$ pode então ser usada como a probabilidade do indivíduo ser escolhido.

Tabela 4: Valores calculados para o método de seleção por roleta.

Indivíduo	Fitness	Aptidão	% do Total
1	320	3.94	23.92
2	250	5.04	30.60
3	290	4.34	26.35
4	400	3.15	19.13
Total	**1260**	**16.47**	**100**

Depois de gerar os filhos, a população fica maior que a população inicial. Então, se de uma população de tamanho n foram gerados m filhos, teremos agora uma população de tamanho $n + m$. Para que possamos ter novamente apenas n indivíduos na população, também é realizada uma seleção onde dentre os $n + m$ indivíduos apenas os n indivíduos com melhores *fitness* são selecionados para fazer parte da próxima geração.

6.5. Busca Local: Método de Descida Randômica

O método de descida randômico é um algoritmo de busca local baseado na geração de vizinhos aleatórios a partir de uma solução inicial. Caso o vizinho gerado seja uma solução melhor que a solução corrente, o mesmo é aceito e passa a ser a solução, caso contrário outro vizinho é gerado aleatoriamente. Para gerar um vizinho, dois elementos da solução são escolhidos aleatoriamente e os mesmos tem as suas posições trocadas. O algoritmo se encerra quando atinge um número fixo de iterações sem melhora, como pode ser observado no Algoritmo 1.

6.6. Parâmetros dos Algoritmos

Os parâmetros utilizados no algoritmo memético e na busca local são apresentados nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

7. Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados na execução do algoritmo utilizando as instâncias composta pelas matrizes de distâncias e vetores de demandas apresentados nas Tabelas 1 e 2 respectivamente, pertencentes à classe de instâncias *Philadelphia*. Os experimentos foram executados em um notebook Dell Inspiron 14-7460, equipado com um processador Intel Core i7-7500U de sétima geração e 8 GB de memória RAM, rodando o sistema operacional Ubuntu 18.04. Os códigos foram implementados na linguagem Python, versão 3.6.9. Para facilitar

Algoritmo 1: Algoritmo do método de descida randômica

Entrada: f(.),N(.),IterMax,s
Saída: s
início
  $Iter \leftarrow 0$;
  enquanto $Iter < IterMax$ **faça**
    $Iter \leftarrow Iter + 1$;
    Selecione Aleatoriamente $s' \in N(s)$;
    se $f(s') < f(s)$ **então**
      $Iter \leftarrow 0$;
      $s \leftarrow s'$;
    fim
  fim
fim

Tabela 5: Parâmetros do algoritmo memético.

Parâmetro	Valor
Tamanho da População	30
Quantidade de Gerações	50
Probabilidade de Cruzamento	0.9
Probabilidade de Mutação	0.1

Tabela 6: Parâmatros da busca local do algoritmo memético.

Parâmetro	Valor
Quantidade Máxima de Iterações Sem Melhora	10

o acesso a essa pesquisa para trabalhos futuros, o código fonte bem como as instâncias utilizadas foram disponibilizadas online[1].

Para obtenção dos resultados, o algoritmo foi executado 10 vezes utilizando a mesma combinação de parâmetros e os resultados encontrados estão dispostos na Tabela 7. Nessa mesma tabela os resultados ótimos obtidos pelo algoritmo foram ressaltados em negrito. A Tabela 8 apresenta uma comparação entre os resultado encontrados neste trabalho e os resultados obtidos nos trabalhos de Dias [2014], Chakraborty [2001], Kendall e Mohamad [2004] e Audhya et al. [2012].

Através da Tabela 7 podemos observar que o algoritmo proposto foi capaz de encontrar a solução ótima para 11 de 16 instâncias. O algoritmo também se mostrou robusto nos experimentos realizados, obtendo valores nulos ou muito baixos para o desvio padrão. Com relação ao tempo de execução, para todas as instâncias esse variou entre 182 e 705 segundos, o que é um tempo perfeitamente viável para essa tomada de decisão.

Como podemos ver pela Tabela 8, os resultados encontrados pelo algoritmo memético para o problema de alocação de frequências foram superiores com relação às outras abordagens heurísticas da literatura: o método obteve resultados melhores que os demais em 5 das 16 instâncias abordadas (ressaltadas em negrito) e empatou com os demais métodos em todas as instâncias restantes. O método exato, apresentado em Dias [2014], apresentou resultados melhores que o do algoritmo proposto para 4 das 16 instâncias, porém a abordagem exata se utiliza de um software proprietário, ademais, o tempo de execução da abordagem exata foi consideravelmente maior para algumas das instâncias avaliadas.

[1] https://github.com/PauloServulo/fap-memetico

Tabela 7: Resultado da execução do algoritmo memético para as instâncias da classe *Philadelphia*.

Matriz de Interferências	Vetor de Demandas	Limite Inferior	Melhor Solução	Solução Média	Pior Solução	Desvio Padrão	Tempo Médio (s)
C_{21}^{1}	D_{21}^{1}	533	**533**	533	533	0,00	257,61
C_{21}^{1}	D_{21}^{2}	309	**309**	309	309	0,00	211,58
C_{21}^{2}	D_{21}^{1}	533	**533**	533	533	0,00	501,68
C_{21}^{2}	D_{21}^{2}	309	**309**	309	309	0,00	387,95
C_{21}^{3}	D_{21}^{1}	457	**457**	457	457	0,00	238,51
C_{21}^{3}	D_{21}^{2}	265	**265**	265	265	0,00	195,70
C_{21}^{4}	D_{21}^{1}	457	**457**	457	457	0,00	558,20
C_{21}^{4}	D_{21}^{2}	265	**265**	265,5	266	0,50	402,88
C_{21}^{5}	D_{21}^{1}	381	**381**	381	381	0,00	229,55
C_{21}^{5}	D_{21}^{2}	221	**221**	221	221	0,00	185,28
C_{21}^{6}	D_{21}^{1}	381	432	434,1	437	1,58	590,17
C_{21}^{6}	D_{21}^{2}	221	260	262,2	264	1,17	384,90
C_{21}^{7}	D_{21}^{1}	305	**305**	305	305	0,00	223,55
C_{21}^{7}	D_{21}^{2}	177	180	180,1	181	0,30	182,65
C_{21}^{8}	D_{21}^{1}	305	433	436,2	438	1,40	705,20
C_{21}^{8}	D_{21}^{2}	177	261	263,9	265	1,37	468,60

Tabela 8: Comparação entre resultados encontrados na literatura e o resultado do trabalho.

Matriz de Int.	Vetor de Dem.	Limite Inferior	Memético	[Chakraborty, 2001]	[Kendall e Mohamaddall, 2004]	[Audhya et al., 2012]	[Dias, 2014]	
							SA	B&C via CPLEX
C_{21}^{1}	D_{21}^{1}	533	533	533	533	534	533	533
C_{21}^{1}	D_{21}^{2}	309	309	309	309	309	309	309
C_{21}^{2}	D_{21}^{1}	533	533	533	533	535	533	533
C_{21}^{2}	D_{21}^{2}	309	309	309	309	312	309	309
C_{21}^{3}	D_{21}^{1}	457	457	457	457	-	457	457
C_{21}^{3}	D_{21}^{2}	265	265	265	265	-	265	265
C_{21}^{4}	D_{21}^{1}	457	457	457	457	-	457	457
C_{21}^{4}	D_{21}^{2}	265	265	280	273	-	265	265
C_{21}^{5}	D_{21}^{1}	381	381	381	381	382	381	381
C_{21}^{5}	D_{21}^{2}	221	221	221	221	222	221	221
C_{21}^{6}	D_{21}^{1}	381	**432**	463	435	449	440	427
C_{21}^{6}	D_{21}^{2}	221	**260**	273	268	268	264	253
C_{21}^{7}	D_{21}^{1}	305	305	305	305	-	305	305
C_{21}^{7}	D_{21}^{2}	177	**180**	197	185	-	182	180
C_{21}^{8}	D_{21}^{1}	305	**433**	465	444	-	442	427
C_{21}^{8}	D_{21}^{2}	177	**261**	278	271	-	270	253

8. Considerações Finais

Este trabalho apresentou um estudo sobre a utilização de algoritmos meméticos para solucionar o problema da alocação de frequências em redes de comunicação sem fio. Para tal, instâncias do conjunto de dados *Philadelphia* foram utilizadas para realizar os experimentos computacionais. Os resultados obtidos pelo algorimo memético proposto foram superiores aos das demais abordagens heurísticas existentes na literatura que abordaram essa mesma base de dados.

Como trabalhos futuros pretende-se implementar outros algoritmos de otimização, como o clonal, otimização por enxame de partículas e o colônia de formigas. Tais algoritmos são bastante utilizados na literatura para resolver diversos tipos de problemas e são candidatos a terem bons resultados no problema de alocação de frequências. Adicionalmente, pretende-se estender o presente trabalho para abordar outras bases de dados também adotadas na literatura.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG e à UFOP pelo apoio ao desenvolvimento deste projeto.

Referências

Anderson, L. (1973). A simulation study of some dynamic channel assignment algorithms in a high capacity mobile telecommunications system. *IEEE Transactions on Communications*, 21(11): 1294–1301.

Audhya, G. K., Sinha, K., Mandal, K., Dattagupta, R., Ghosh, S. C., e Sinha, B. P. (2012). A new approach to fast near-optimal channel assignment in cellular mobile networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 12(9):1814–1827.

Chakraborty, G. (2001). An efficient heuristic algorithm for channel assignment problem in cellular radio networks. *IEEE transactions on vehicular technology*, 50(6):1528–1539.

Dias, B. R. C. (2014). Modelos teóricos e algoritmos para a otimização da alocação de canais em redes móveis sem fio.

Hale, W. K. (1980). Frequency assignment: Theory and applications. *Proceedings of the IEEE*, 68 (12):1497–1514. ISSN 1558-2256.

Holland, J. (1975). Adaptation in natural and artificial systems, univ. of mich. press. *Ann Arbor*.

Kendall, G. e Mohamad, M. (2004). Solving the fixed channel assignment problem in cellular communications using an adaptive local search. In *the 5th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT2004), Pittsburgh, USA*, p. 219–231.

Kiouche, A. E., Bessedik, M., Benbouzid-SiTayeb, F., e Keddar, M. R. (2020). An efficient hybrid multi-objective memetic algorithm for the frequency assignment problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87:103265.

Koster, A. M., van Hoesel, S. P., e Kolen, A. W. (1999). Solving frequency assignment problems via tree-decomposition1. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 3:102–105.

Laidoui, F., Bessedik, M., Si-Tayeb, F. B., Bengherbia, N., e Khelil, M. Y. (2018). Nash-pareto genetic algorithm for the frequency assignment problem. *Procedia Computer Science*, 126:282–291.

Moscato, P. et al. (1989). On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms. *Caltech concurrent computation program, C3P Report*, 826:1989.

Silva, A. F. e Oliveira, A. d. (2006). Algoritmos genéticos: alguns experimentos com os operadores de cruzamento ("crossover") para o problema do caixeiro viajante assimétrico. *Anais do XXVI ENEGEP–Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Fortaleza*.

Vital, S. A. M., Moreira, F. B., e Lima, R. L. (2016). Algoritmos genéticos: Aplicação e medição da eficiência do operador de crossover ox para o problema do caixeiro viajante simétrico.

Galoá { Este trabalho foi publicado utilizando o **Galoá** proceedings