



ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04
de dezembro 2020

Aplicação de Algoritmo Genético no Projeto de uma Rede Comunitária de Ensino e Pesquisa no Interior do Estado do Rio de Janeiro

Plínio Rodrigues Rosa Barreto
Instituto Federal Fluminense
Pedro Sant'Ana Bastos da Silva
Instituto Federal Fluminense
Aluísio Lima de Souza
Instituto Federal Fluminense
Ítalo de Oliveira Matias
Universidade Cândido Mendes

Resumo: As redes de telecomunicações facilitam a interação entre os membros das comunidades acadêmica e científica. As principais regiões metropolitanas do Brasil já dispõem de infraestrutura de rede de fibra óptica, com topologia em anel, voltada para interligação das instituições de ensino superior e de pesquisa. O objetivo deste trabalho foi encontrar o caminho de menor custo, que corresponde ao menor comprimento total de uma rede óptica, projetada para interligar 13 instituições do município de Campos dos Goytacazes, RJ. Para solução do problema proposto, foi implementado um algoritmo genético utilizando a linguagem de programação C# e o ambiente de desenvolvimento integrado *Microsoft Visual Studio*. O resultado final atendeu a função objetivo do problema, que resultou em uma rede óptica com 27,4 km de extensão.

Palavras-chave: Algoritmo genético (AG), Problema de atribuição de localidades a anéis em redes (PALAS), Problema do caixeiro viajante (PCV).

Application of Genetic Algorithm in the Design of a Community Teaching and Research Network in the Interior of the State of Rio de Janeiro

Abstract: Telecommunications networks facilitate interaction between members of the academic and scientific communities. The main metropolitan regions of Brazil already have fiber optic network infrastructure, with ring topology, aimed at interconnecting higher education and research institutions. The objective of this work was to find the path with the lowest cost, which corresponds to the shortest total length of an optical network, designed to interconnect 13 institutions in the municipality of Campos dos Goytacazes, RJ. To solve the proposed problem, a genetic algorithm was implemented using the C # programming language and the Microsoft Visual Studio integrated development environment. The final result served the objective function of the problem, which resulted in an optical network 27.4 km long.

Keywords: Genetic algorithm (AG), Problem of assigning locations to rings in networks (PALAS), Problem of traveling salesman (PCV).

1. Introdução

A interação entre os membros das comunidades acadêmica e científica, bem como entre as instituições de ensino e pesquisa é uma realidade possibilitada pelas redes de telecomunicações. Prevendo essa demanda, uma iniciativa do então Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), coordenada pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), criou o programa Redes Comunitárias de Educação e Pesquisa (Redecomep), que teve como objetivo implantar redes de alta velocidade nas regiões metropolitanas do país, a partir de 2005 (PIRES, 2010).

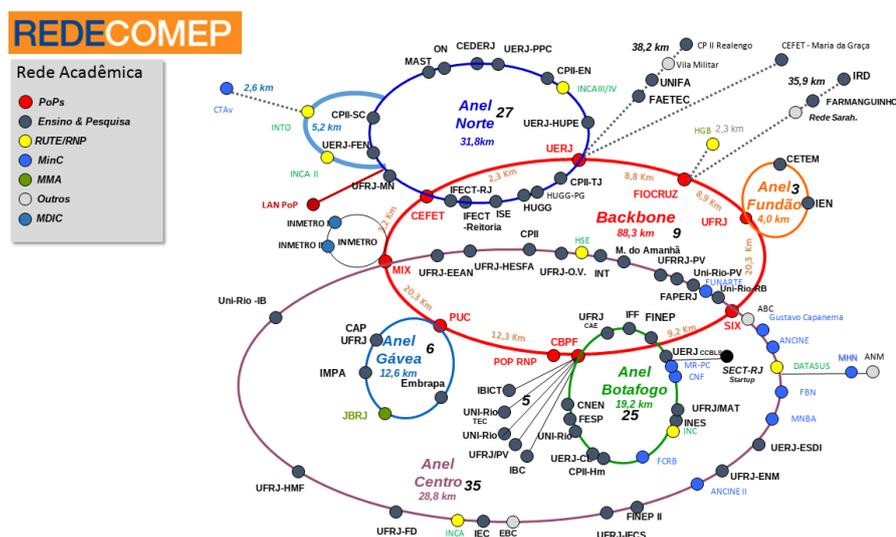
A implantação da Redecomep ocorreu em duas fases. Na primeira, foram construídas 26 redes metropolitanas nas capitais, uma no Distrito Federal e outra em Campina Grande, PB. A segunda fase, em andamento, contempla as cidades do interior do país com duas ou mais instituições federais de ensino e pesquisa (RNP, 2019).

O modelo de negócio adotado baseou-se na construção de uma infraestrutura de rede de fibra óptica própria, com topologia em anel, voltada para interligação das instituições de ensino superior e de pesquisa. Foram formados consórcios entre as instituições participantes, em cada região atendida, de forma a assegurar a operação e manutenção da rede. Por exemplo, na região metropolitana de Natal, RN, a rede Giga Metrôpole (Redecomep-Natal) interliga os campi do Instituto Federal e da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e se encontra em operação desde 2008 (MELO *et al.*, 2017).

Da mesma forma, a Rede Rio Metropolitana (Redecomep-Rio) iniciou a fase de testes, dando partida à operação do primeiro enlace da Redecomep na região metropolitana do Rio de Janeiro, em 2012, com a finalidade de interligar mais de 80 instituições acadêmicas, como mostrado na Figura 1 (FAPERJ, 2019). Atualmente os consórcios entre as organizações participantes asseguram a existência da infraestrutura de fibra óptica própria, com isso, a Redecomep, com extensão total de 3.064 km no território brasileiro, contempla 546 instituições participantes, por meio de 39 redes em operação e 24 redes em construção (RNP, 2020).

Conforme pode ser observado na Figura 1, na topologia em anel cada nó da rede é interligado a dois nós vizinhos, essa configuração possui vantagens e desvantagens em relação a outras topologias de rede.

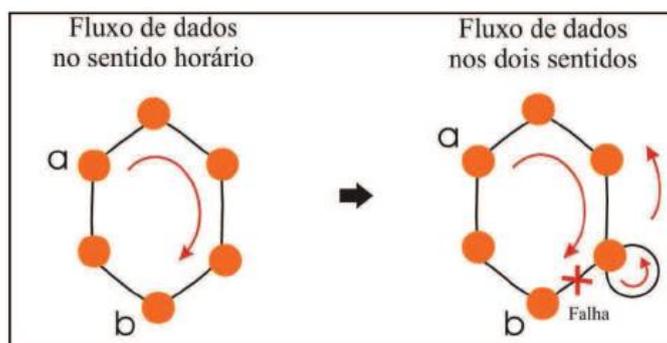
Figura 1 – Redecomep-Rio



Fonte: FAPERJ (2019)

Como vantagem, é possível destacar a sua capacidade de sobrevivência. Durante a ocorrência de uma interrupção em algum ponto da rede, o tráfego é escoado automaticamente através de um caminho alternativo, de acordo com o exemplo da Figura 2, minimizando a ocorrência de interrupções nos serviços (OLIVEIRA, 2015).

Figura 2 - Capacidade de sobrevivência com uma topologia em anel



Fonte: Adaptado de Oliveira (2015)

Por outro lado, o seu planejamento físico é uma tarefa difícil, que surgiu com o uso da tecnologia *Synchronous Optical Networking* (SONET) e *Synchronous Digital Hierarchy* (SDH). Portanto, o projeto físico de uma rede em anel é considerado com um problema de otimização combinatória, que consiste na determinação das conexões entre um conjunto de localidades, de modo a satisfazer um conjunto de restrições e minimizar os custos (PEREIRA, 2018).

Dessa forma, uma das maneiras de diminuir tais custos é optar por caminhos ótimos, pelos quais os cabos ópticos irão passar, para interligar as localidades. Isso é possível com a utilização de algoritmos capazes de determinar a menor rota em um mapa, com o objetivo de minimizar o comprimento total da rede óptica.

Esse problema é conhecido na literatura como Problema de Atribuição de Localidades a Anéis em Redes SONET/SDH (PALAS) e trata-se de um problema de otimização combinatória da classe NP-difícil. O PALAS é um problema que tem origem na fase de planejamento da rede de telecomunicações, podendo ser modelado por um grafo não-orientado $G = (V,E)$, onde V é o conjunto de n clientes e E representa o conjunto de demandas entre os clientes (OLIVEIRA, 2015).

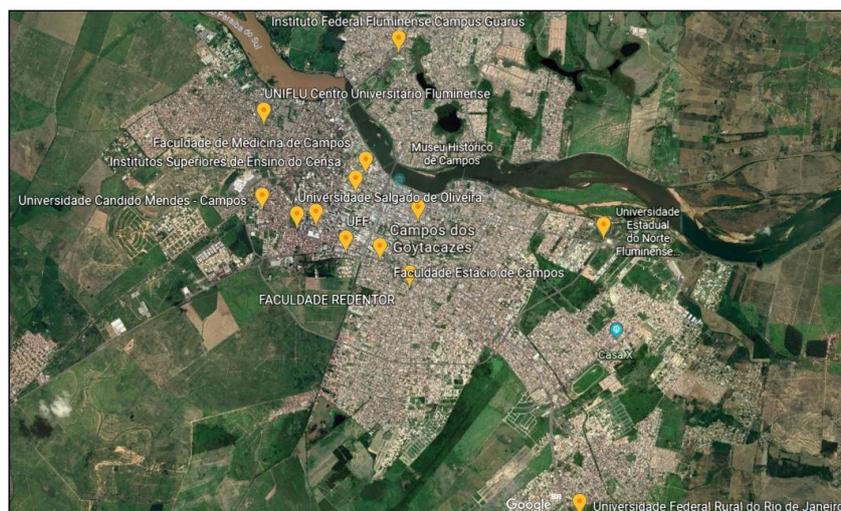
Assim, este problema pode ser relacionado ao Problema do Caixeiro Viajante (PCV), que consiste em, dado uma lista de cidades a serem visitadas, determinar o caminho mais curto a ser percorrido, começando e terminando na mesma cidade (GOLDSCHMIDT; LAUGIER; OLINICK, 2003).

Nesse contexto, existem diversos algoritmos que resolvem tais problemas. Normalmente, em aplicações de engenharia, transporte, logística, confecção de circuitos impressos, redes de telecomunicações, dentre outros exemplos, o Algoritmo Genético (AG) é um dos mais utilizados (LEVAY, 2013).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é utilizar um AG para encontrar o caminho de menor custo, que corresponde ao menor comprimento total de uma rede óptica em anel, projetada para interligar 13 instituições de ensino superior e pesquisa no município de Campos dos Goytacazes, RJ, conforme pode ser observado na Figura 3.

Dessa forma, o cabo óptico sairá de uma instituição de origem, percorrerá as demais instituições, passando exatamente uma vez em cada instituição e depois voltará para a origem, exatamente como o PCV.

Figura 3 - Visão geral das instituições de ensino e pesquisa a serem interligadas



Fonte: Google Maps (2019)

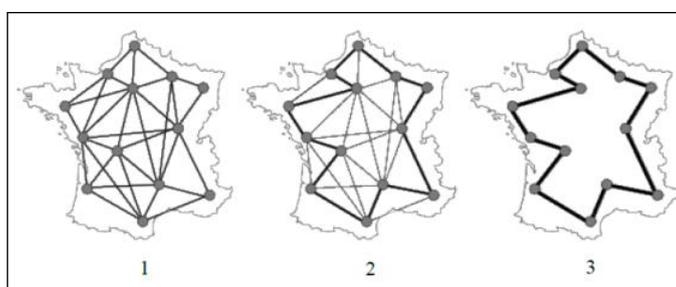
1.1 Problema do Caixeiro Viajante (PCV)

O PCV é considerado um problema do tipo NP-Hard, o que significa não existir algoritmos de tempo polinomial para sua resolução. Em termos práticos pode-se dizer que a solução ótima só é encontrada após todas as possíveis soluções existentes serem verificadas (BENEVIDES, 2011). Portanto, este problema possui complexidade fatorial, pois o incremento de novas cidades aumenta fatorialmente o tempo de execução, inviabilizando a utilização de um algoritmo ótimo. Apesar dessa aparente dificuldade, existem técnicas que resolvem o problema buscando uma solução aceitável em um tempo compatível.

1.2 Uso dos Algoritmos Genéticos para solução do PCV

Uma das heurísticas que encontram uma solução para o problema em questão utiliza AG. Esta técnica baseia-se na adaptação de processos de natureza evolutiva como mutação, cruzamento, combinação e seleção. Com isso, uma população inicial (conjunto de soluções) é gerada aleatoriamente e a cada iteração o algoritmo irá buscar uma resposta melhor que a anterior, gerada a partir das melhores soluções (AUSIELLO *et al.*, 2003). Na Figura 4, o primeiro grafo mostra todas as alternativas de caminhos possíveis. No segundo grafo, os caminhos que resultam numa distância maior são descartados. Por fim, o melhor resultado é exibido no terceiro grafo.

Figura 4 - Exemplo do problema do caixeiro viajante



Fonte: Adaptado de Levay (2013)

1.3 Aplicação dos algoritmos genéticos em projetos de redes em anel

Diversas soluções para projetos de redes de fibra óptica foram sugeridas em trabalhos anteriores. Segundo Pereira (2018), os sistemas de telecomunicações estão na fase de grandes transformações e expansões, que tornam os problemas de planejamento de redes mais complexos. Em seu trabalho, o autor propôs a utilização de AG para solução

desse problema, além de duas implementações híbridas. Como resultado, a análise dos experimentos mostrou a competitividade dos algoritmos propostos frente aos melhores resultados encontrados na literatura.

Já o trabalho de Paez *et al.* (2012), utilizou um AG para recuperação do tráfego de redes em anel, em caso de falhas. Os resultados experimentais mostraram viabilidade da abordagem proposta, conseguindo uma recuperação mais rápida e eficiente.

Para Barreto, Santos e Villamil (2011), nos problemas de planejamento de redes de telecomunicações é imprescindível à utilização de recurso computacional, já que estes são problemas de otimização combinatória. Os autores apresentaram um sistema para planejar redes através de um AG. Testes realizados para o projeto de diversas redes mostraram o desempenho satisfatório do sistema.

2. Metodologia

Ao longo do século XX uma sólida estrutura educacional foi constituída na região Norte Fluminense, centrada na cidade de Campos dos Goytacazes, considerada o maior polo de educação superior do interior do Estado do Rio de Janeiro (PIQUET; GIVISI; OLIVEIRA, 2006). Diante desse cenário, o presente trabalho teve início com uma consulta no portal e-MEC de cadastro de instituições e cursos de educação superior, base de dados oficial de informações relativas às instituições de educação superior no Brasil. A partir da seleção do município de Campos dos Goytacazes, RJ no referido portal, foi possível encontrar o endereço das 13 instituições ofertantes de educação superior na modalidade presencial (E-MEC, 2019).

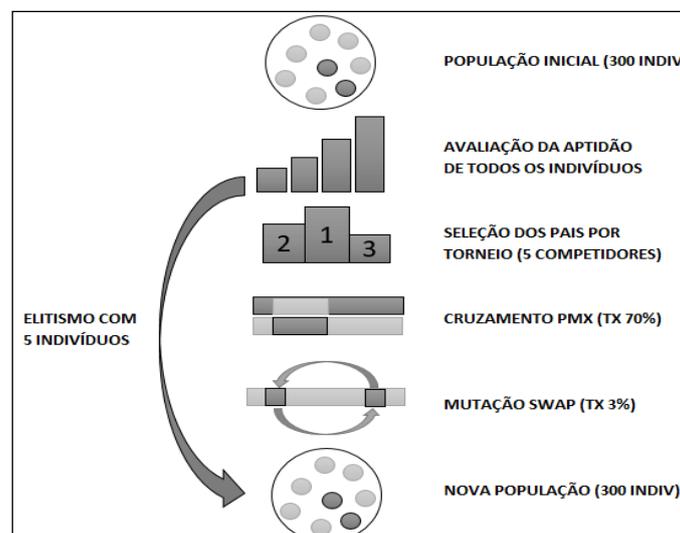
2.1 Estudo de caso

O presente estudo de caso foi tratado como um Problema de Atribuição de Localidades a Anéis em Redes SONET/SDH (PALAS), no qual foi aplicado o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), por meio de Algoritmo Genético (AG).

2.1.1 Visão geral do algoritmo

Para solução do problema proposto foi implementado um AG utilizando a linguagem de programação C# e o ambiente de desenvolvimento integrado *Microsoft Visual Studio*. O funcionamento geral do AG é apresentado, na Figura 5, na qual observa-se o passo a passo de como foi o processo compreendido entre uma geração e outra. Este procedimento se repetiu até o número de gerações desejado.

Figura 5 - Funcionamento geral do algoritmo

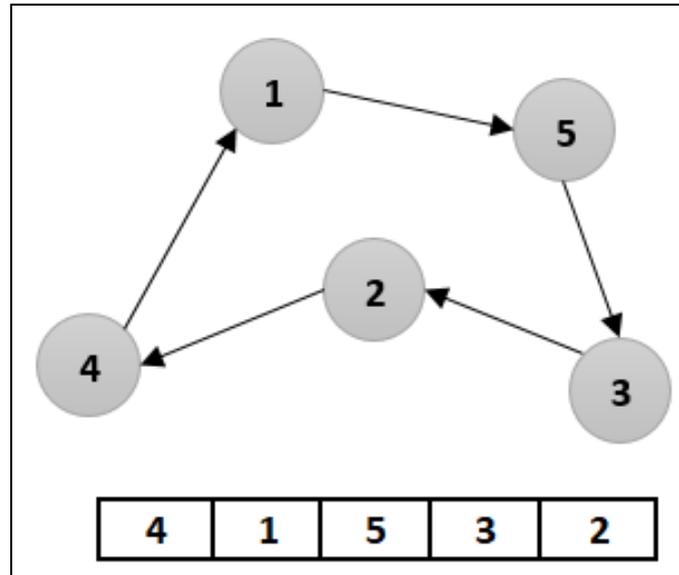


Fonte: Elaboração própria

2.1.2 População e indivíduos

A forma adotada para representação de um indivíduo foi a ordinal, onde a sequência dos genes traduz a ordem em que as instituições serão interligadas. Conseqüentemente, o tamanho do cromossomo foi o número de instituições que devem ser interligadas pela rede óptica. Na Figura 6 é possível observar um exemplo com cinco instituições, visitadas na sequência 4-1-5-3-2.

Figura 6 - Exemplo de interligação de cinco instituições



Fonte: Elaboração própria.

O conjunto de 300 indivíduos gerados de maneira aleatória deu origem à população inicial. Esta, por sua vez, sofreu os processos de cruzamento e mutação para que pudesse evoluir obtendo melhores indivíduos, que neste caso, significou um caminho de menor custo para interligar as instituições.

2.1.3 Avaliação da população

Sempre que uma população foi gerada, a aptidão de cada indivíduo foi calculada. Em outras palavras, os indivíduos melhores foram aqueles cujos caminhos foram menores, já que a função objetivo deste problema é minimizar a distância percorrida pelo cabo óptico.

Isso foi feito para verificar quais indivíduos foram utilizados no elitismo, quais foram selecionados para cruzamento, e também para determinar a menor distância percorrida, como será explicado a seguir.

2.1.4 Elitismo

O elitismo é uma pequena alteração no módulo de população que pouco altera o tempo de processamento, mas garante que o desempenho do AG esteja sempre crescendo com o decorrer das gerações (LINDEN, 2012).

Nesse sentido, os melhores indivíduos de uma população foram alocados na população seguinte, sem que esses passassem por cruzamento ou mutação, como foi apresentado anteriormente na Figura 5. Adotou-se o número de cinco indivíduos para o elitismo, que neste caso, equivale a menos de 2% do tamanho da população.

2.1.5 Seleção por torneio

Para todos os demais 295 indivíduos que não foram selecionados pelo elitismo, a tarefa de passar seus genes para a próxima geração depende de serem selecionados ou não, e o método de seleção adotado foi o de torneio.

O torneio é o operador de seleção mais simples de ser implementado. Ele sorteia aleatoriamente dois indivíduos para cruzamento e seleciona aquele com melhor avaliação para participar de um cruzamento (BENTO; KAGAN, 2008). Portanto, este método reproduz o que acontece na natureza, onde os indivíduos mais aptos sobrevivem, e conseqüentemente passam seus genes para a próxima geração.

Adotou-se torneios reunindo cinco competidores de cada vez, que foram selecionados dentro da população ao acaso. O indivíduo que representou a menor distância dentre os cinco foi selecionado para o processo de cruzamento.

Destaca-se que, para que o tamanho da população se mantenha sempre em 300, é necessário que o procedimento de torneio seja repetido 300 vezes. Dessa forma serão selecionados 300 indivíduos, formando 150 casais, cada casal dando origem a dois filhos.

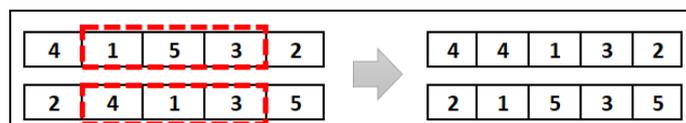
2.1.6 Crossover PMX (Partially Matched Crossover)

Com todos os casais selecionados, o próximo passo foi verificar se houve ou não a troca de genes entre indivíduos, de acordo com a taxa adotada de 70%. Para tanto, o algoritmo toma um valor aleatório entre 0 e 1, e caso este seja menor que 0,7, ocorre o cruzamento. Se não, os indivíduos passam para a próxima geração sem cruzar seus genes. Pela natureza do problema e característica dos cromossomos, foi adotado o método de cruzamento PMX.

O cruzamento de mapeamento parcial (Partially Mapped Crossover - PMX) constrói descendentes através da seleção de uma subsequência de um genitor, mantendo a ordem e a posição do maior número de genes possível do outro genitor. Esta subsequência é escolhida selecionando-se dois pontos de corte aleatoriamente (LEIRAS, 2010).

Neste método tomaram-se ao acaso as posições onde iniciou e terminou o cruzamento, fazendo-se assim a permuta entre a carga genética. Na Figura 7 observa-se um exemplo onde a troca ocorre entre o segundo e o quarto gene.

Figura 7 - Exemplo de cruzamento PMX

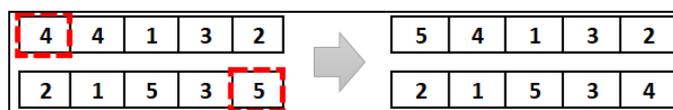


Fonte: Elaboração própria

Destaca-se ser muito comum que algum gene se repita em um indivíduo e, conseqüentemente, outro fique ausente. Ainda observando a Figura 7, tomando o primeiro filho como exemplo, a instituição 4 seria visitada duas vezes, enquanto a instituição 5 não seria visitada nenhuma vez.

Para solucionar tal efeito de caminho inviável, este método necessita de uma segunda etapa, onde deve ocorrer a troca de genes repetidos pelos genes ausentes, realizada fora da região inicialmente selecionada para permuta. A Figura 8 ilustra o procedimento, que permite o cumprimento da regra de não-repetição, e também de não-ausência de nenhum gene.

Figura 8 - Exemplo de cumprimento da regra de não-repetição e de não-ausência



Fonte: Elaboração própria

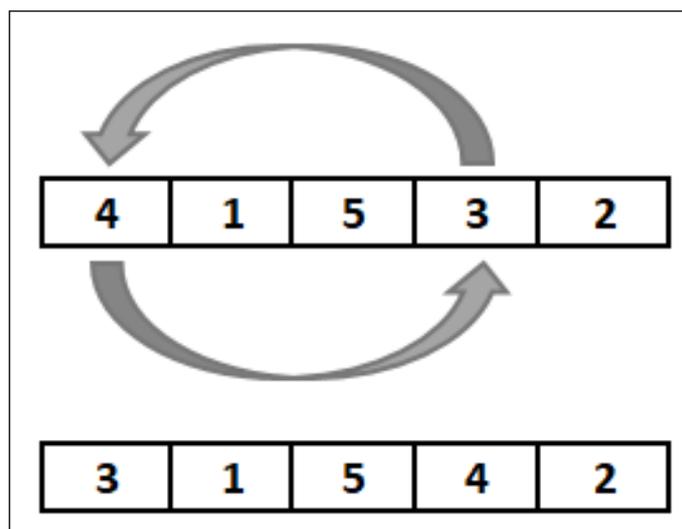
2.1.7 Mutação por troca (swap mutation)

Para evitar a convergência precoce do resultado em caminhos pouco favoráveis para interligação das instituições, realizou-se o procedimento de mutação, de acordo com a taxa adotada de 3%.

Para cada indivíduo resultante do processo de cruzamento, o algoritmo gera um número aleatório entre 0 e 1, e caso este seja inferior a 0,03, inicia-se a mutação do tipo swap. A mutação por troca consiste na seleção de dois genes aleatoriamente e na troca de suas posições (LEIRAS, 2010).

Pela natureza do indivíduo, novamente deve-se adotar a regra de não-repetição de genes, e também de não-ausência de nenhum deles. Sendo assim, o método swap propõe que seja realizada uma troca de posição entre dois elementos, também de maneira aleatória. A Figura 9 ilustra o procedimento.

Figura 9 - Troca de posição entre dois elementos



Fonte: Elaboração própria

2.1.8 Novas populações

Depois de realizado o cruzamento e a mutação uma nova geração com 300 indivíduos foi formada. Cabe destacar que estes foram novamente avaliados com sua aptidão, e os cinco piores resultados foram descartados para introdução daqueles cinco indivíduos obtidos com o elitismo. O esquema geral da Figura 5, apresentada anteriormente, esclarece o que foi dito.

De posse da segunda geração, o procedimento foi repetido inúmeras vezes pelo algoritmo, dando origem às gerações futuras. O número de gerações foi suficiente para que o resultado fosse convergente. Assim, o algoritmo foi programado de modo que o usuário pudesse acrescentar mais iterações sempre que julgasse necessário a fim de convergir para o caminho de menor custo.

3. Resultados

Por meio do endereço completo das instituições de ensino superior e de pesquisa, foram determinadas as distâncias entre elas, utilizando a plataforma Google Maps. Optou-se pela pesquisa de trajetos a pé, pois este ignora o sentido do fluxo rodoviário, fornecendo as menores distâncias para o processamento da solução do problema, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Distância entre as instituições de ensino superior de Campos dos Goytacazes (km)

	UNIFLU I	UNIFLU II	FACREDENTOR	FMC	IFF CENTRO	IFF GUARUS	ISE CENSA	UFRRJ	UCAM	UNESA	UENF	UFF	UNIVERSO
UNIFLU I	0	3,3	4,4	2,1	2,8	3	2,2	9,6	2,3	3,9	6,3	4,2	2,7
UNIFLU II	3,3	0	1,2	1,5	1,9	3,8	1,4	6,1	2,9	1	3,6	0,9	2,3
FACREDENTOR	4,4	1,2	0	2,5	2,3	4,8	2,4	5,4	3,1	1	4	1	2,4
FMC	2,1	1,5	2,5	0	1,5	2,6	0,25	7,3	2,4	1,9	4,2	1,7	1,9
IFF CENTRO	2,8	1,9	2,3	1,5	0	3,7	1,3	7,2	1,2	1,4	5,3	1,8	0,45
IFF GUARUS	3	3,8	4,8	2,6	3,7	0	2,9	9,7	3,9	4,2	6,4	4	3,8
ISE CENSA	2,2	1,4	2,4	0,25	1,3	2,9	0	7,2	2	1,6	4,4	1,4	1,5
UFRRJ	9,6	6,1	5,4	7,3	7,2	9,7	7,2	0	8	5,9	5,5	6,5	7,3
UCAM	2,3	2,9	3,1	2,4	1,2	3,9	2	8	0	2,2	6,2	2,4	0,75
UNESA	3,9	1	1	1,9	1,4	4,2	1,6	5,9	2,2	0	4,3	0,35	1,5
UENF	6,3	3,6	4	4,2	5,3	6,4	4,4	5,5	6,2	4,3	0	3,4	5,6
UFF	4,2	0,9	1	1,7	1,8	4	1,4	6,5	2,4	0,35	3,4	0	1,7
UNIVERSO	2,7	2,3	2,4	1,9	0,45	3,8	1,5	7,3	0,75	1,5	5,6	1,7	0

Fonte: Google Maps (2019)

A etapa seguinte consistiu na execução do algoritmo sistemáticas vezes, variando-se os parâmetros de entrada. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de entrada que resultaram no caminho de menor custo.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada do algoritmo

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	300
Número de evoluções	999
Número de competidores do torneio	5
Número de indivíduos no elitismo	5
Taxa de cruzamento	70%
Taxa de mutação	3%

Fonte: Elaboração própria

No Quadro 1 observa-se a sequência na qual as instituições serão interligadas com cabo óptico, iniciando pela Universidade Cândido Mendes (UCAM), percorrendo as demais instituições, passando exatamente uma vez em cada instituição e depois voltando para a origem.

Quadro 1 - Sequência de interligação das instituições com cabo de fibra óptica

Sequência	Nome da Instituição	Sigla de Instituição
1º	Universidade Cândido Mendes	UCAM
2º	Universidade Salgado de Oliveira	UNIVERSO
3º	Instituto Federal Fluminense Campus Campos Centro	IFF CENTRO
4º	Universidade Federal Fluminense	UFF
5º	Universidade Estácio de Sá	UNESA

6º	Faculdade Redentor	FACREDENTOR
7º	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro	UFRRJ
8º	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro	UENF
9º	Centro Universitário Fluminense Campus I	UNIFLU I
10º	Instituto Superior de Educação do CENSA	ISECENSA
11º	Faculdade de Medicina de Campos	FMC
12º	Instituto Federal Fluminense Campus Campos Guarus	IFF GUARUS
13º	Centro Universitário Fluminense Campus II	UNIFLU II

Fonte: Elaboração própria

Na Figura 10 é possível visualizar a sequência de interligação das instituições, conforme mencionado acima. O polígono em amarelo foi incorporado apenas para auxiliar no entendimento do resultado, uma vez que a ligação das instituições será feita com cabo óptico instalado nos postes, passando pelas ruas, conforme será mostrado adiante.

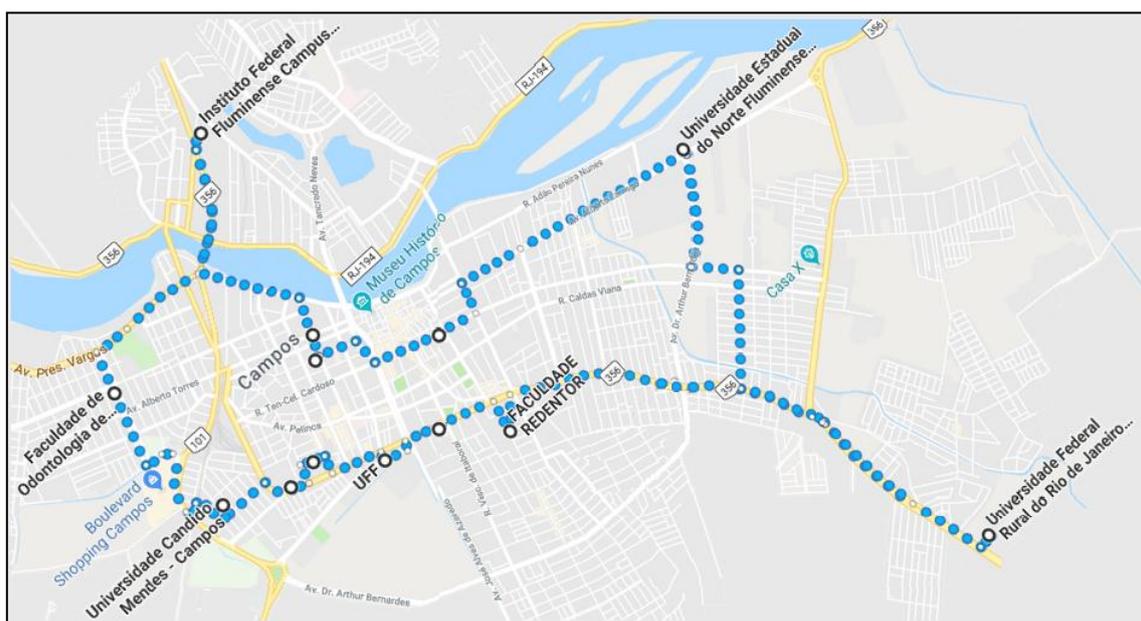
Figura 10 - Visualização da sequência de interligação das instituições



Fonte: Google Maps (2019), adaptado pelo autor

A Figura 11 é apresentada com o objetivo de destacar o resultado obtido. Ao observarmos a imagem sob uma perspectiva lógico-visual, é possível perceber que a sequência de interligação das instituições está alinhada com a função objetivo do problema, que foi minimizar a distância total percorrida pelo cabo óptico, instalado nos postes, passando pelas ruas, que nesse caso resultou em uma distância de 27,4 km.

Figura 11 - Caminho de menor custo para interligação das instituições



Fonte: Google Maps

Conclusão

O objetivo deste trabalho foi utilizar um algoritmo genético para encontrar o caminho de menor custo, que corresponde ao menor comprimento total de uma rede óptica em anel, projetada para interligar 13 instituições de ensino superior e de pesquisa do município de Campos dos Goytacazes, RJ.

Este estudo de caso foi tratado como um Problema de Atribuição de Localidades a Anéis em Redes SONET/SDH (PALAS), no qual foi aplicado o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) por meio de Algoritmo Genético (AG).

Para solução do problema proposto, foi implementado um AG utilizando a linguagem de programação C# e o ambiente de desenvolvimento integrado *Microsoft Visual Studio*. O resultado final atendeu a função objetivo do problema, que foi minimizar a distância total percorrida pelo cabo óptico, perfazendo uma distância 27,4 km.

Referências

AUSIELLO, G. *et al.* **Complexity and approximation: combinatorial optimization problems and their approximability properties**. 2. ed. Berlin: Springer, 2003.

BARRETO, M.; SANTOS, J. V. C. dos; VILLAMIL, M. B. Sistema computacional baseado em algoritmo genético para planejamento e recomposição de redes de telecomunicações. *In: XLIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2011. PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações* [...]. Ubatuba: SBPO, 2011. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2011/autores/b.htm>. Acesso em: 19 set. 2019.

BENEVIDES, P. F. **Aplicação de heurísticas e metaheurísticas para o problema do caixeiro viajante em um problema real de roteirização de veículos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/26793>. Acesso em: 17 set. 2019.

BENTO, E. P.; KAGAN, N. Algoritmos genéticos e variantes na solução de problemas de configuração de redes de distribuição. **Revista Controle & Automação**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 302–315, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592008000300006&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 19 set. 2019.

E-MEC. 2019. **Cadastro nacional de cursos e instituições de educação superior**. Disponível em: <http://emec.mec.gov.br/>. Acesso em: 19 set. 2019.

FAPERJ. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro. 2019. **Projeto redes comunitárias de educação e pesquisa**. Disponível em: <http://www.rederio.br/pagina/redecomep-rio>. Acesso em: 17 set. 2019.

GOLDSCHMIDT, O.; LAUGIER, A.; OLINICK, E. V. SONET/SDH ring assignment with capacity constraints. **Discrete Applied Mathematics**, Amsterdam, v. 129, n. 1, p. 99–128, jun. 2003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166218X02002366>. Acesso em: 17 set. 2019.

GOOGLE MAPS. 2019. **Imagem de satélite da cidade de Campos dos Goytacazes, RJ**. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-21.7609966,-41.3318147,4086m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 17 set. 2019.

LEIRAS, A. Otimização de parâmetros de um algoritmo genético. **Revista de Inteligência Computacional Aplicada**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 6, p. 8, 2010. Disponível em: <http://rica.ele.puc-rio.br/>. Acesso em: 13 set. 2019.

LEVAY, L. S. **Ferramenta para projeto de redes ópticas passivas (PON)**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade

de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em:
https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13401/1/2013_LeonardoSilveiraLevay.pdf. Acesso em:
13 set. 2019.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 3. ed. São Paulo: Ciência Moderna, 2012.

MELO, E. *et al.* Problemas para a inserção das tecnologias digitais de comunicação e informação nas escolas públicas da grande natal: um levantamento entre professores de matemática. *In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO*, 27 out. 2017. **Anais dos Workshops do VI Congresso Brasileiro de Informática na Educação (WCBIE 2017)** [...]. Recife: CBIE, 27 out. 2017. p. 834–843. Disponível em:
<http://www.br-ie.org/pub/index.php/wcbie/article/view/7469>. Acesso em: 17 set. 2019.

OLIVEIRA, T. H. F. de. **Algoritmos híbridos para o problema de atribuição de localidades a anéis em redes SONET/SDH**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Mossoró, 2015. Disponível em: <https://ppgcc.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/42/2014/09/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Thiago-Henrique1.pdf>. Acesso em: 13 set. 2019.

PAEZ, J. V. *et al.* Optimal selection of p-cycles on WDM optical networks with shared risk link group independent restorability using genetic algorithm. **IEEE Latin America Transactions**, Middlesex, v. 10, n. 1, p. 1385–1390, jan. 2012. Disponível em:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6142488/>. Acesso em: 19 set. 2019.

PEREIRA, J. Q. **Uma abordagem via metaheurística híbrida para o problema de atribuição de localidade a anéis SONET/SDH**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Mossoró, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/859>. Acesso em: 17 set. 2019.

PIQUET, R.; GIVISI, G. H. N.; OLIVEIRA, E. L. de. A nova centralidade de Campos dos Goytacazes: o velho e o novo no contexto regional. **Revista Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 18, p. 39–57, 2006. Disponível em:
http://www.forumrio.uerj.br/documentos/revista_18-19/Cap-2-Piquet_Givisiez_Oliveira.pdf. Acesso em: 13 set. 2019.

PIRES, H. F. Planejamento urbano do ciberespaço: a formação territorial de redes comunitárias acadêmicas no Brasil. **Scripta nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales**, Barcelona, v. 14, n. 331, p. 19, 12 set. 2010. Disponível em:
<https://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/1670>. Acesso em: 17 set. 2019.

RNP. Rede Nacional de Ensino e Pesquisa. 2019. **O Programa Redecomep**. Disponível em: <https://www.rnp.br/sistema-rnp/redecomep>. Acesso em: 17 set. 2019.

RNP. Rede Nacional de Ensino e Pesquisa. 2020. **Redecomep no Brasil**. Disponível em: <https://www.rnp.br/sistema-rnp/redecomep>. Acesso em: 17 set. 2019.