

Resolução do problema de localização de regeneradores através de algoritmos de inteligência artificial

Pedro Ferreira

Rodrigo Pessoa

Junho 2018

Trabalho realizado no âmbito da unidade curricular de Projeto Informático

Trabalho realizado sob orientação das

Professoras Anabela Moreira Bernardino e Eugénia Moreira Bernardino.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer às Professoras Anabela Moreira Bernardino e Eugénia Moreira Bernardino pelo acompanhamento no desenvolvimento do projeto. Foram verdadeiramente prestáveis e permitiram que a conclusão do projeto fosse um sucesso.

Gostaríamos também de agradecer a todos os Professores do Instituto Politécnico de Leiria pela formação de qualidade que nos prestaram ao longo do curso.

Resumo

Nas redes óticas, a força de um sinal ótico deteriora-se à medida que fica mais longe da fonte, devido a deficiências de transmissão na fibra (atenuação, dispersão, conversação). Ou seja, a distância a que um sinal ótico pode ser enviado sem perder ou deteriorar a informação é limitada. É por isso necessário regenerar os sinais periodicamente, utilizando regeneradores. Dada uma rede ótica, o problema da localização dos regeneradores (PLR) procura que o subconjunto de regeneradores seja instalado a um custo mínimo, de modo a que cada par de nós possa comunicar entre si.

foi desenvolvida

A aplicação desenvolvida é bastante dinâmica, tendo integradas diversas funcionalidades. Permite que cada problema seja resolvido individualmente, ilustrando graficamente a evolução do *fitness* da melhor solução encontrada até ao momento ao longo de um conjunto específico de iterações. Oferece também a possibilidade de resolver um conjunto específico de problemas, utilizando os parâmetros inseridos pelo utilizador. Por fim, esta aplicação permite também testar diferentes combinações de parâmetros de um só algoritmo, para um conjunto específico de problemas. Os dados resultantes dos testes são guardados automaticamente em formato texto em ficheiros *csv*.

Acrescentamos que os resultados foram analisados com auxílio do programa *RapidMiner*, de forma a conseguir obter as médias de *fitness* (que determinam a qualidade das soluções), regeneradores, nós desconectados e tempo decorrido, para os diferentes *seeds* e instâncias dos problemas.

Abstract

In optical networks, a signal strength deteriorates as it gets further away from its source. This happens due to deficiencies in the fiber (attenuation, dispersion, conversion). Therefore, we can say that the distance a signal can travel without losing or corrupting information is limited. It is necessary to regenerate the signals periodically using regenerators. Given an optical network, the regenerator location problem tries to install a subset of regenerators with the minimum possible cost, in a way that each pair of nodes can communicate with each other.

The developed program is quite dynamic and integrates various functionalities. It allows for each problem to be solved individually, illustrating graphicly the evolution of the best individual’s fitness along the various iterations. It also offers the possibility to solve a specified group of problems, using the same parameters declared by the user for each one, and applying 50 different seeds. The program is also cable of testing different combinations of parameters for a chosen algorithm. The resulting data from our tests is automatically stored as text in a csv file.

The software RapidMiner was used to help in the analysis of our data by obtaining the fitness averages, regenerators, disconnected nodes, time for the different seeds and problem instances.

Índice

[Agradecimentos v](#_Toc517782919)

[Resumo vii](#_Toc517782920)

[Abstract ix](#_Toc517782921)

[Índice xi](#_Toc517782922)

[Lista de Figuras xiii](#_Toc517782923)

[Lista de Tabelas xv](#_Toc517782924)

[Lista de Acrónimos xvii](#_Toc517782925)

[Capítulo 1 - Introdução 1](#_Toc517782926)

[1.1 Problema PLR 1](#_Toc517782927)

[1.2 Motivação 2](#_Toc517782928)

[1.3 Estrutura do Relatório 2](#_Toc517782929)

[1.4 Síntese 3](#_Toc517782930)

[Capítulo 2 - Enquadramento 5](#_Toc517782931)

[2.1 Descrição do Problema 5](#_Toc517782932)

[2.1.1 Estrutura do problema 6](#_Toc517782933)

[2.1.2 Exemplo simplificado de um problema 6](#_Toc517782934)

[2.2 Problemas de Otimização](#_Toc517782935) *[NP-Complete](#_Toc517782935)* [12](#_Toc517782935)

[2.3 Algoritmos evolutivos de inteligência artificial (algoritmos baseados em populações) 12](#_Toc517782936)

[2.4 Algoritmos de](#_Toc517782937) *[swarm intelligence](#_Toc517782937)* [13](#_Toc517782937)

[2.5 Síntese 13](#_Toc517782938)

[Capítulo 3 – Linguagens e Tecnologias 15](#_Toc517782939)

[3.1 C++/CLI 15](#_Toc517782940)

[3.1.1 A implementação com C++/CLI 15](#_Toc517782941)

[3.2 Qt 16](#_Toc517782942)

[3.3 Git e Github 17](#_Toc517782952)

[3.4](#_Toc517782953) *[RapidMiner](#_Toc517782953)* [17](#_Toc517782953)

[3.5 Síntese 17](#_Toc517782954)

[Capítulo 4 - Aplicação 19](#_Toc517782955)

[4.1 Análise de Requisitos 19](#_Toc517782956)

[4.2 Metodologia 20](#_Toc517782957)

[4.2.1 Diferentes Etapas de Desenvolvimento 20](#_Toc517782958)

[4.2.2 Metodologia de Testes 21](#_Toc517782959)

[4.3 Algoritmos Evolutivos 22](#_Toc517782960)

[4.3.1 Custom Algorithm 22](#_Toc517782961)

[4.3.2 Algoritmo Genético 24](#_Toc517782962)

[4.3.3 Bee Colony Optimization 26](#_Toc517782963)

[4.3.4 Ant Colony Optimization 28](#_Toc517782964)

[4.4 Estrutura do Programa 31](#_Toc517782966)

[4.4.1 A implementação com a framework Qt 31](#_Toc517782967)

[4.4.2 Classes 32](#_Toc517782969)

[4.5 Síntese 40](#_Toc517782970)

[Capítulo 5 - Resultados 41](#_Toc517782971)

[5.1 Obtenção de dados 41](#_Toc517782972)

[5.1.1 Obtenção de dados com a execução do programa desenvolvido 41](#_Toc517782973)

[5.1.2 Teste de parâmetros dos algoritmos 41](#_Toc517782974)

[5.1.3 Recolha de dados de execução dos algoritmos 42](#_Toc517782975)

[5.2 Tratamento dos dados obtidos 42](#_Toc517782976)

[5.2.1 Tratamento dos dados de teste de parâmetros 42](#_Toc517782977)

[5.2.2 Tratamento dos dados de execução dos algoritmos 42](#_Toc517782978)

[5.3 Resultados obtidos 43](#_Toc517782979)

[5.3.1 Resultados dos testes aos parâmetros 43](#_Toc517782980)

[5.3.2 Resultados da solução de problemas 45](#_Toc517782981)

[5.4 Comparação dos algoritmos implementados 55](#_Toc517782982)

[5.5 Síntese 56](#_Toc517782983)

[Capítulo 6 - Conclusão 57](#_Toc517782984)

[6.1 Considerações finais 57](#_Toc517782985)

[6.2 Trabalho futuro 58](#_Toc517782986)

[6.3 Síntese 59](#_Toc517782987)

[Bibliografia 61](#_Toc517782988)

[Anexos 63](#_Toc517782989)

Lista de Figuras

[Figura 1 - Exemplo de problema com 7 nós 6](#_Toc517782990)

[Figura 2 - Ficheiro de texto do problema exemplo (sem pesos) 7](#_Toc517782991)

[Figura 3 - Exemplo de ficheiro de problema (com pesos) 8](#_Toc517782992)

[Figura 4 - Vetor de pesos do problema exemplo 9](#_Toc517782993)

[Figura 5 - Exemplo de uma solução inviável 9](#_Toc517782994)

[Figura 6 - Representação da solução inviável 9](#_Toc517782995)

[Figura 7 - Exemplo de uma solução não otimizada 10](#_Toc517782996)

[Figura 8 - Representação da solução não otimizada 10](#_Toc517782997)

[Figura 9 - Exemplo de uma solução otimizada 11](#_Toc517782998)

[Figura 10 - Representação da solução otimizada 11](#_Toc517782999)

[Figura 11 - Programa em C++/CLI 16](#_Toc517783000)

[Figura 12 - Desenvolvimento Iterativo e Incremental [7] 20](#_Toc517783001)

[Figura 13 - Programa em Qt 32](#_Toc517783002)

[Figura 14 -](#_Toc517783003) *[Custom Dialog](#_Toc517783003)* [34](#_Toc517783003)

[Figura 15 -](#_Toc517783004) *[Ant Colony Test Dialog](#_Toc517783004)* [36](#_Toc517783004)

[Figura 16 -](#_Toc517783005) *[Main Window](#_Toc517783005)* [38](#_Toc517783005)

Lista de Tabelas

[Tabela 1 - Prioridade no desenvolvimento dos requisitos 19](#_Toc517783006)

[Tabela 2 – Primeiro conjunto de semanas de desenvolvimento 21](#_Toc517783007)

[Tabela 3 - Segundo conjunto de semanas de desenvolvimento 21](#_Toc517783008)

[Tabela 4 - Cinco melhores resultados do teste do](#_Toc517783009) *[Custom Algorithm](#_Toc517783009)* [43](#_Toc517783009)

[Tabela 5 - Cinco melhores resultados do teste do Algoritmo Genético 44](#_Toc517783010)

[Tabela 6 - Cinco melhores resultados do teste do](#_Toc517783011) *[Bee Colony Optimization](#_Toc517783011)* [44](#_Toc517783011)

[Tabela 7 - Cinco melhores resultados do teste do](#_Toc517783012) *[Ant Colony Optimization](#_Toc517783012)* [45](#_Toc517783012)

[Tabela 8 – Resultados dos problemas](#_Toc517783013) *[random](#_Toc517783013)* [com o](#_Toc517783013) *[Custom Algorithm](#_Toc517783013)* [45](#_Toc517783013)

[Tabela 9 – Resultados dos problemas](#_Toc517783014) *[weighted](#_Toc517783014)* [com o](#_Toc517783014) *[Custom Algorithm](#_Toc517783014)* [47](#_Toc517783014)

[Tabela 10 – Resultados dos problemas](#_Toc517783015) *[random](#_Toc517783015)* [com o Algoritmo Genético 48](#_Toc517783015)

[Tabela 11 - Resultados dos problemas](#_Toc517783016) *[weighted](#_Toc517783016)* [com o Algoritmo Genético 49](#_Toc517783016)

[Tabela 12 - Resultados dos problemas](#_Toc517783017) *[random](#_Toc517783017)* [com](#_Toc517783017) *[Bee Colony Optimization](#_Toc517783017)* [50](#_Toc517783017)

[Tabela 13 – Resultados dos problemas](#_Toc517783018) *[weighted](#_Toc517783018)* [com](#_Toc517783018) *[Bee Colony Optimization](#_Toc517783018)* [51](#_Toc517783018)

[Tabela 14 - Resultado dos problemas](#_Toc517783019) *[random](#_Toc517783019)* [com](#_Toc517783019) *[Ant Colony Optimization](#_Toc517783019)* [52](#_Toc517783019)

[Tabela 15 - Resultados dos problemas](#_Toc517783020) *[weighted](#_Toc517783020)* [com](#_Toc517783020) *[Ant Colony Optimization](#_Toc517783020)* [53](#_Toc517783020)

[Tabela 16 - Resultados dos diferentes algoritmos para os diferentes tamanhos de problemas 55](#_Toc517783021)

[Tabela 17 - Médias dos resultados dos diferentes algoritmos 55](#_Toc517783022)

[Tabela 18 - Valor de tempo vezes](#_Toc517783023) *[fitness](#_Toc517783023)* [para os diferentes algoritmos 55](#_Toc517783023)

[Tabela 19 - Resultados dos testes do Custom Algorithm 63](#_Toc517783024)

[Tabela 20 - Resultados dos testes do Algoritmo Genético 66](#_Toc517783025)

[Tabela 21 - Resultados dos testes do Bee Colony Optimization 71](#_Toc517783026)

[Tabela 22 - Resultados dos testes do Ant Colony Optimization 73](#_Toc517783027)

Lista de Acrónimos

ACO Ant Colony Optimization

AG Algoritmo Genético

BCO Bee Colony Optimization

CA Custom Algorithm

CLI Common Language Infrastructure

CSV Comma Separated Values

MOC Meta-Object Compiler

PLR Problema de Localização de Regeneradores

SI Swarm Intelligence

1. - Introdução

No âmbito da unidade curricular de Projeto Informático, do curso de Licenciatura em Engenharia Informática, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, foi elaborado o presente relatório com base no projeto: Resolução do problema de localização de regeneradores através de algoritmos de inteligência artificial.

Na unidade curricular de Projeto Informático temos de nos candidatar a algumas das propostas disponibilizadas, para que depois possam ir a concurso e ser distribuídas entre os estudantes. Discutimos entre nós quais seriam as propostas que mais nos motivavam e a que nos iriamos candidatar, tendo acordado em colocar o Problema da Localização dos Regeneradores (PLR) como principal opção.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a secção 1.1 apresenta uma breve descrição do problema resolvido neste projeto; a secção 1.2 apresenta a motivação para o desenvolvimento deste projeto; a secção 1.3 apresenta a estrutura deste relatório, e a secção 1.4 sumariza os conceitos apresentados neste capítulo.

* 1. Problema PLR

A Inteligência Artificial tem vindo a ganhar imensa notoriedade, devido às suas capacidades de permitir que máquinas aprendam e se ajustem a diferentes problemas [1]. Tem já uma grande presença no nosso dia a dia, sendo aplicada muito frequentemente em jogos de computador, automóveis, assistentes digitais (como a *Amazon Echo*), *robots*, etc. No núcleo de toda a inteligência artificial estão os seus algoritmos, pois são estes que treinam a inteligência para que esta aprenda. No caso do PLR, o requisito mínimo era a implementação de dois algoritmos de inteligência artificial para resolver o problema, tendo o nosso grupo implementado quatro.

O PLR é um problema real, pois existem, de facto, constrangimentos nas redes óticas. Quanto mais distante estiver o sinal ótico da sua fonte, mais sujeito este está a perder qualidade. Isto acontece devido a falhas na fibra. De modo a resolver este problema, existem máquinas chamadas regeneradores, cujo propósito é restaurar a qualidade do sinal. Infelizmente, estes equipamentos têm um custo bastante elevado.

O nosso objetivo é resolver o PLR, obtendo soluções com o menor custo possível, no menor tempo possível. Todo este processo foi feito recorrendo a diferentes algoritmos de Inteligência Artificial. Os algoritmos que escolhemos utilizar foram

o *Custom Algorithm* (CA), o Algoritmo Genético (AG), o *Ant Colony Optimization* (ACO) e o *Bee Colony Optimization* (BCO).

Foi feita uma comparação do desempenho dos algoritmos em termos de média de qualidade das soluções e de tempo para chegar à melhor solução encontrada.

* 1. Motivação

Com a evolução das tecnologias de comunicação, existe cada vez mais a necessidade de um serviço rápido, seguro e sem falhas. Em resposta a esta necessidade surgem as redes de fibra ótica.

Como mencionado previamente, o PLR é um problema do mundo real. Decidimos encará-lo pela sua relevância e pelo desafio de encontrar soluções, aplicando algoritmos baseados na natureza.

* 1. Estrutura do Relatório

Este relatório está estruturado da seguinte forma:

* Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo é feita a apresentação do nosso problema e trabalho, procedemos à sua contextualização e transmitimos uma ideia geral dos temas que serão tratados ao longo do relatório. Resumimos todo o projeto e explicamos as nossas motivações para este trabalho.

* Capítulo 2 – Enquadramento

No capítulo 2 analisamos em pormenor o problema em estudo, explicando-o detalhadamente e fornecendo vários conceitos importantes para a compreensão do mesmo.

* Capítulo 3 – Linguagens e tecnologias

Neste capítulo abordamos a linguagem de programação aplicada e as tecnologias que tiveram mais impacto neste projeto, como o Qt e o GitHub. Expomos também as várias dificuldades com que nos deparámos, nomeadamente a adaptação a uma linguagem de programação com que nunca tínhamos lidado.

* Capítulo 4 – Aplicação

Este é o capítulo mais extenso, onde entramos em detalhe relativamente à aplicação. Começamos por pormenorizar os requisitos impostos para este projeto, descrevendo de seguida a metodologia de trabalho aplicada. Abordamos igualmente a estrutura do nosso programa e, por fim, os algoritmos aplicados.

* Capítulo 5 – Resultados

Neste capítulo discutimos os resultados obtidos, mais concretamente o modo como foram alcançados e como foram tratados.

* Capítulo 6 - Conclusão

No capítulo 6 expomos as considerações finais e apresentamos direções para trabalho futuro.

* 1. Síntese

Neste capítulo são identificados os pontos mais importantes deste relatório, bem como de todo o projeto em si. Deixamos clara a nossa motivação para trabalhar neste projeto e definimos a estrutura de todo o relatório.

1. - Enquadramento

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a secção 2.1 apresenta a descrição do problema resolvido neste projeto; a secção 2.2 apresenta o conceito de problemas de otimização do tipo *NP-Complete*; a secção 2.3 apresenta os tipos de algoritmos que permitem a solução deste tipo de problema; a secção 2.4 apresenta o conceito de algoritmos de *swarm* *intelligence*, e a secção 2.5 sumariza os conceitos apresentados neste capítulo.

* 1. Descrição do Problema

O problema pretende garantir que numa rede de fibra ótica os sinais são regenerados de forma a manter a qualidade do sinal, que se deteriora proporcionalmente à distância que percorre na rede. Este problema pertence à categoria de problemas *NP-Complete* (ver secção 2.2) [2].

Os problemas utilizados (instâncias) no nosso projeto estão presentes no *website* do centro de computadores da universidade de Viena [3], que também abordou previamente o PLR. Estes problemas são representações simplificadas de redes de fibra ótica, contendo um conjunto de nós interligados. Para encontrar a solução deste problema é necessário descobrir uma disposição de regeneradores de sinais num conjunto de nós interligados, de forma a que todos os nós contenham ou estejam ligados a pelo menos um regenerador. Este processo terá de ser feito utilizando o menor número de regeneradores possível. No caso de problemas em que a colocação de regeneradores num nó específico tem custos diferentes, o objetivo é ter o menor custo possível.

A aplicação ao mundo real da nossa forma de resolver o problema necessitaria de uma ferramenta capaz de converter uma rede de fibra ótica real numa rede simplificada como as que foram utilizadas.

* + 1. Estrutura do problema

Os problemas utilizados estão inicialmente sob o formato de ficheiros de texto, sendo estes obtidos a partir do *site* do Centro de Computadores da Universidade de Viena [3]. A principal informação contida nestes ficheiros é uma matriz que representa as ligações entre os diferentes nós que compõem o problema. Para além da referida matriz, contêm também o número de nós e o número de ligações.

Alguns dos problemas englobam ainda um vetor com pesos, referente ao custo da colocação de um regenerador em cada nó específico.

* + 1. Exemplo simplificado de um problema

De forma a ilustrar o problema, apresentamos um exemplo dum problema com 7 nós na Figura 1.

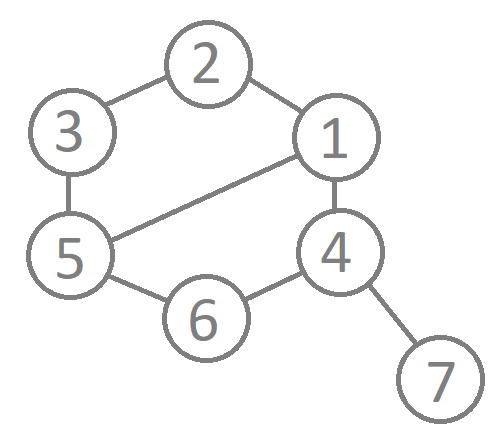


Figura 1 - Exemplo de problema com 7 nós

A Figura 2 representa o ficheiro de texto de um ficheiro sem pesos (instâncias sem pesos) correspondente a este problema.

nNodes=7;

nPairs=8;

Cost=

1 1 0 1 1 0 0

1 1 1 0 0 0 0

0 1 1 0 1 0 0

1 0 0 1 0 1 1

0 0 0 1 1 1 0

0 0 0 1 0 0 1

UnPairedArc=

1 2

1 4

1 5

2 3

3 5

4 6

4 7

5 6

Figura 2 - Ficheiro de texto do problema exemplo (sem pesos)

A Figura 3 representa o ficheiro de texto de um ficheiro com pesos correspondente a este problema.

nNodes = 7

nPairs = 8

Weight

3

2

3

4

2

3

4

Cost

1 1 0 1 1 0 0

1 1 1 0 0 0 0

0 1 1 0 1 0 0

1 0 0 1 0 1 1

0 0 0 1 1 1 0

0 0 0 1 0 0 1

NDC Pairs

<1 2>

<1 4>

<1 5>

<2 3>

<3 5>

<4 6>

<4 7>

<5 6>

Figura 3 - Exemplo de ficheiro de problema (com pesos)

Como já referido anteriormente, algumas das instâncias estudadas têm pesos. O vetor de pesos do problema exemplificado em cima está apresentado na Figura 4.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nó | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Peso | 3 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 |

Figura 4 - Vetor de pesos do problema exemplo

Todos os nós devem estar conectados a um regenerador. O regenerador pode estar no próprio nó ou num dos nós adjacentes, isto é, num dos nós ligados a esse nó.

Um exemplo de uma solução inviável pode ser encontrado na Figura 5.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nó | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Regenerador | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

Figura 5 - Exemplo de uma solução inviável

A Figura 6 ilustra a representação da solução obtida.

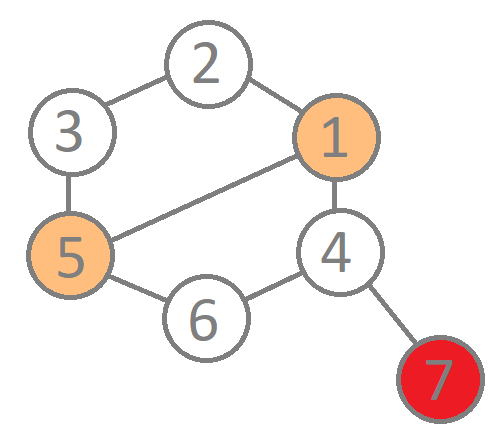


Figura 6 - Representação da solução inviável

Como se pode verificar no exemplo anterior, o nó 7 não está ligado a nenhum regenerador, logo esta solução é inviável.

Para determinar a qualidade da solução é calculado um valor de *fitness* utilizando uma das seguintes fórmulas:

1. *fitness = ND \* 500 + RU \* 100* (problemas sem pesos)

ou

1. *fitness = ND \* 500 + ∑RU Wi \* 100* (problemas com pesos)

*ND* corresponde ao número de nós desligados, *RU* ao número de regeneradores utilizados e *Wi* corresponde ao peso do regenerador *i*.

De acordo com a fórmula 2, o *fitness* da solução é calculado da seguinte forma:

|  |  |
| --- | --- |
| Nós desligados (*ND*): 1  Regeneradores utilizados (*RU*): 2  W1: 3  W5: 2 |  |

O objetivo é minimizar o valor de *fitness* e encontrar uma solução em que todos os nós estejam ligados a um regenerador. Nas instâncias sem pesos, o objetivo é apenas reduzir o número de regeneradores utilizados. Nas instâncias com pesos pretende‑se ao mesmo tempo reduzir o número de regeneradores e colocar os regeneradores nos nós com menos pesos.

Um exemplo de uma solução não otimizada pode ser encontrado na Figura 7.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nó | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Regenerador | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

Figura 7 - Exemplo de uma solução não otimizada

A Figura 8 ilustra a representação da solução obtida.

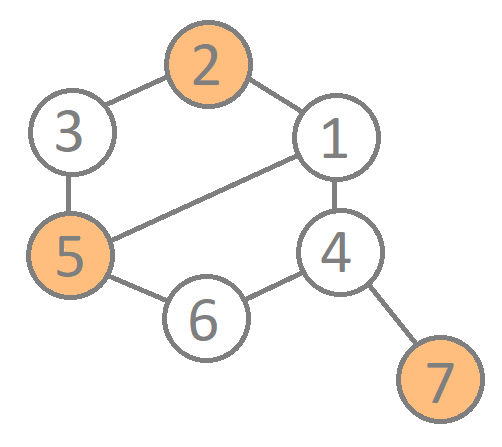


Figura 8 - Representação da solução não otimizada

De acordo com a fórmula 2, o *fitness* da solução é calculado da seguinte forma:

|  |  |
| --- | --- |
| Nós desligados (*ND*): 0  Regeneradores utilizados (*RU*): 2  W2: 2  W5: 2  W7: 4 |  |

Esta solução é válida, pois todos os nós estão ligados a pelo menos um regenerador; contudo, pode ser obtida uma solução mais otimizada.

Um exemplo de uma solução otimizada pode ser encontrado na Figura 9.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nó | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Regenerador | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Figura 9 - Exemplo de uma solução otimizada

A Figura 10 ilustra a representação da solução obtida.

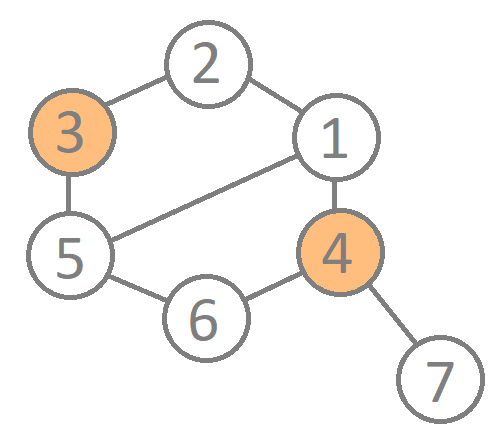


Figura 10 - Representação da solução otimizada

De acordo com a fórmula 2, o *fitness* da solução é calculado da seguinte forma:

|  |  |
| --- | --- |
| Nós desligados (*ND*): 0  Regeneradores utilizados (*RU*): 2  W3: 3  W4: 4 |  |

Esta solução é válida pois todos os nós estão ligados a pelo menos um regenerador, e é também a melhor solução para o problema, uma vez que os regeneradores estão colocados nos nós com menos pesos.

* 1. Problemas de Otimização *NP-Complete*

O problema estudado é classificado como *NP-Complete* (***N****on-deterministic* ***P****olynomial time*). Um problema é classificado *NP-Complete* se for considerado *NP-Hard*. Um problema deste tipo pode ser considerado pelo menos tão difícil quanto o problema mais difícil do tipo *NP-Hard*. Por outras palavras, qualquer algoritmo utilizado para resolver um problema do tipo *NP-Hard* em tempo polinomial pode ser posteriormente traduzido para resolver qualquer problema também *NP-Hard*. Os problemas do tipo *NP-Complete* podem ser: problemas de decisão, problemas de pesquisa ou problemas de otimização.

Para resolver este tipo de problemas podem ser utilizados algoritmos de aproximação que rapidamente encontram uma solução não necessariamente ótima, contudo dentro de um certo intervalo de erro. Em alguns casos, encontrar uma boa aproximação é o suficiente para resolver o problema, porém nem todos os problemas *NP-Complete* têm bons algoritmos de aproximação. Em muitos casos são utilizadas meta-heurísticas como os algoritmos evolutivos e os algoritmos de *swarm intelligence* que trabalham razoavelmente bem em muitos casos, encontrando boas soluções num tempo razoável.

* 1. Algoritmos evolutivos de inteligência artificial (algoritmos baseados em populações)

Os Algoritmos Evolutivos têm como objetivo trabalhar com o melhor de uma solução e melhorá-la. Esta ideia é baseada nos princípios da teoria da evolução biológica, isto é, pode-se simular o processo evolutivo da natureza de modo a encontrar soluções ótimas para os nossos problemas [4]. Deste princípio, surgiram vários algoritmos, como por exemplo o Algoritmo Genético (AG).

Por norma, todos os algoritmos evolutivos começam com uma população inicial. Desta população, cada elemento (ou indivíduo) representa uma solução para o problema. Podemos deduzir que nem todos indivíduos são ótimos, sendo necessária uma avaliação. Desta avaliação irá resultar o *fitness***,** que representa a qualidade de um indivíduo como solução para o nosso problema. O próximo passo será comparar os *fitnesses*, identificando os melhores indivíduos para que sejam preservados e passem para a próxima geração, da qual irão ser membros e na qual serão utilizados como referência para gerar novos indivíduos. Através deste processo em que se tira proveito das qualidades dos melhores indivíduos para gerar soluções melhores ao longo das várias gerações irá resultar uma solução final que, em princípio, será a ótima para o problema. Todo este processo de procura pela melhor solução repete‑se várias vezes durante um certo número de iterações (chamadas gerações) até que uma condição seja alcançada, como, por exemplo, se “um objetivo foi cumprido” ou se “foi atingido o número máximo de gerações”.

* 1. Algoritmos de *swarm intelligence*

Baseado em Jason Brownlee*, Clever Algorithms: Nature Inspired Programming Recipes*, podemos concluir que os algoritmos de SI têm por base os comportamentos coletivos de vários agentes presentes num dado ambiente [5]. Isto é, existindo um grupo de indivíduos menos inteligentes capazes de agir por si num certo ambiente, das suas interações cooperativas irá surgir esta inteligência coletiva. A inspiração para algoritmos deste tipo surge de sistemas presentes na natureza, como é o caso do *Ant Colony Optimization* (ACO), baseado na forma como as formigas usam feromonas para se influenciarem na procura de comida. Algoritmos deste tipo são considerados bastante adaptáveis e são especialmente efetivos em problemas de procura e otimização. No nosso projeto utilizamos dois algoritmos deste tipo, sendo estes o ACO e o *Bee Colony Optimization* (BCO).

* 1. Síntese

Com este capítulo explicamos detalhadamente o principal tema deste projeto, o problema da localização de regeneradores, bem como alguns conceitos pertinentes para a sua compreensão, como é o caso dos problemas *NP-Complete*, dos algoritmos evolutivos e dos algoritmos de *swam* *intelligence*.

1. – Linguagens e Tecnologias

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a secção 3.1 apresenta a linguagem de programação utilizada no desenvolvimento deste projeto; a secção 3.2 apresenta a *framework* utilizada no desenvolvimento deste projeto; a secção 3.3 apresenta a ferramenta Git e a plataforma GitHub, utilizadas para o controlo de versões no desenvolvimento deste projeto; a secção 3.4 apresenta a ferramenta de *data mining* *RapidMiner*, e a secção 3.5 sumariza os conceitos apresentados neste capítulo.

* 1. C++/CLI

Começámos por discutir a possibilidade de desenvolver o programa em C++, devido à rapidez de execução, aspeto que se revela importante na solução deste tipo de problemas. Já estávamos familiarizados com a linguagem C; contudo, foi necessário adaptarmo-nos à linguagem C++.

C++/CLI ou C++ modificado para *Common Language Infrastructure* é a integração de C++ com *Windows Forms*. No entanto, esta implementação é quase como uma outra linguagem de programação, diferente de C++. Grande parte das instruções não podem ser executadas, havendo mudanças significativas na sintaxe e diferenças nos objetos.

Inicialmente, o programa foi implementado em C++/CLI. No entanto, devido às limitações que acompanhavam esta plataforma (*software* *Visual Studio* 2017), acabámos por optar pela *framework* de C++ “Qt”.

* + 1. A implementação com C++/CLI

Com C++/CLI, foi implementada uma janela com os parâmetros do algoritmo e dois botões - um botão para ler um problema e outro para resolver o problema.

A leitura do problema é feita através da leitura de uma matriz de ligações entre nós, presente nos diferentes ficheiros de texto. Alguns ficheiros têm também pesos associados a cada um dos nós, em que cada peso representa o custo de colocar um regenerador nesse nó.

Na resolução do problema pode ser aplicado, por exemplo, o algoritmo que denominamos *Custom Algorithm* (cujos detalhes são explicados adiante, no capítulo 4). Para tal, uma nova *thread* é criada. Esta vai aplicando o algoritmo e a população vai evoluindo. A cada geração, a *thread* invoca um método do *form* que o atualiza, para que se mostrem os dados do melhor indivíduo da população atual, bem como um gráfico que retrata a evolução do *fitness* ao longo das várias iterações do algoritmo (ver Figura 11).



Figura 11 - Programa em C++/CLI

* 1. Qt

Qt é uma ferramenta de desenvolvimento para *desktop* compatível com diferentes plataformas. Não é só por si uma linguagem de programação, mas é uma *framework* escrita em C++ com características adicionais, como *signals and slots*, e o funcionamento do seu *Meta-Object Compiler* (MOC) permite converter todo o código escrito de forma a ser compilado por qualquer compilador de C++ [6].

* 1. Git e Github

Com o auxílio da ferramenta de controlo de versões *Git*, foi utilizada a plataforma *GitHub* para hospedar os repositórios utilizados durante o desenvolvimento do projeto.

À medida que eram feitos progressos no desenvolvimento da aplicação, estes eram submetidos na plataforma. Foi utilizado apenas o *branch* *Master*, pois nunca chegou a haver conflitos, uma vez que o trabalho desenvolvido foi sempre repartido de forma a evitar a sua ocorrência.

* 1. *RapidMiner*

Com o auxílio deste *software* de *data science*, foi possível partir de uma grande quantidade de dados em bruto e obter informações relevantes sobre as diferentes combinações de parâmetros para os algoritmos, bem como condensar a informação referente à execução dos algoritmos para um grande número de problemas e *seeds*.

* 1. Síntese

Neste capítulo explicamos quais as linguagens/*software* com que trabalhámos durante o desenvolvimento deste projeto, tendo referido a necessidade de adaptação a uma nova linguagem e *framework*. Apesar da não familiaridade com estes tópicos, fomos capazes de provar a nossa capacidade para adaptação, tendo no longo-prazo conseguido alcançar o sucesso deste projeto.

1. - Aplicação

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a secção 4.1 apresenta a análise de requisitos efetuada para o desenvolvimento deste projeto; a secção 4.2 apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento deste projeto; a secção 4.3 apresenta os algoritmos evolutivos desenvolvidos; a secção 4.4 apresenta a estrutura do programa desenvolvido, e a secção 4.5 sumariza os conteúdos apresentados neste capítulo.

* 1. Análise de Requisitos

Os requisitos necessários para o desenvolvimento do programa foram os seguintes:

* Leitura de problemas a partir de ficheiros de texto;
* Criação de um conjunto de soluções para o problema;
* Melhoraria das soluções propostas com um algoritmo evolutivo;
* Observação da evolução das soluções em tempo real;
* Desenvolvimento de outro algoritmo evolutivo;
* Desenvolvimento de dois algoritmos de SI;
* Otimização do funcionamento dos algoritmos;
* Obtenção de combinações ideais de parâmetros para os algoritmos;
* Resolução de múltiplos problemas em simultâneo;
* Registo de dados sobre as soluções para análise.

A prioridade do desenvolvimento de cada requisito está presente na Tabela 1.

Tabela 1 - Prioridade no desenvolvimento dos requisitos



| Requisito | Prioridade |
| --- | --- |
| Leitura de problemas a partir de ficheiros de texto | Alta |
| Criação de um conjunto de soluções para o problema | Alta |
| Melhoraria das soluções propostas com um algoritmo evolutivo | Alta |
| Observação da evolução das soluções em tempo real | Alta |
| Desenvolvimento de outro algoritmo evolutivo | Média |
| Desenvolvimento de dois algoritmos de SI | Baixa |
| Otimização do funcionamento dos algoritmos | Baixa |
| Obtenção de combinações ideais de parâmetros para os algoritmos | Baixa |
| Resolução de múltiplos problemas em simultâneo | Média |
| Registo de dados sobre as soluções para análise. | Média |

* 1. Metodologia

A metodologia adotada no desenvolvimento deste projeto foi a de “desenvolvimento iterativo e incremental” (ver Figura 12). A cada etapa foram designados objetivos, depois foi feito o levantamento de requisitos, seguidos da implementação das funcionalidades e, por fim, foram aplicados os testes a cada funcionalidade nova implementada, bem como testada a sua integração com as funcionalidades existentes.



Figura 12 - Desenvolvimento Iterativo e Incremental [7]

* + 1. Diferentes Etapas de Desenvolvimento

A primeira etapa consistiu em implementar a leitura de problemas a partir de ficheiros de texto. Na segunda etapa foram criadas as classes *Individual* e *Population*, assim como a fórmula para o cálculo do *fitness* de um indivíduo. A terceira etapa consistiu na implementação do nosso primeiro algoritmo evolutivo (*Custom Algorithm*), bem como na implementação da forma de resolver os problemas utilizando o algoritmo implementado. Na quarta etapa foi implementada a forma de resolver múltiplos problemas em simultâneo em *threads* diferentes. Na quinta etapa foram implementados os recursos necessários para obter a melhor combinação de parâmetros para cada algoritmo. Na sexta e última etapa foram implementados os algoritmos evolutivos restantes.

As diferentes etapas de desenvolvimento estão representadas na Tabela 2 e na Tabela 3.

Tabela 2 – Primeiro conjunto de semanas de desenvolvimento

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Etapa | Semana 1 | Semana 2 | Semana 3 | Semana 4 | Semana 5 | Semana 6 | Semana 7 | Semana 8 |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |

Tabela 3 - Segundo conjunto de semanas de desenvolvimento

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Etapa | Semana 9 | Semana 10 | Semana 11 | Semana 12 | Semana 13 | Semana 14 | Semana 15 | Semana 16 |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6 |  |  |  |  |  |  |  |  |

* + 1. Metodologia de Testes

Foram efetuados dois tipos de testes ao *software*: testes para validar o funcionamento correto e testes de *performance*.

De forma a validar o funcionamento correto do programa foi utilizada a ferramenta de *debugging* presente no IDE utilizado (*Qt Creator*).

De forma a testar a *performance* do programa foi utilizado o primeiro algoritmo implementado como base de comparação.

* 1. Algoritmos Evolutivos

Todos os algoritmos necessitam de uma população inicial. Esta não é gerada de forma totalmente aleatória, mas sim tendo em conta os nós com mais ligações, havendo maior probabilidade de colocar um regenerador nesses nós.

Todos os algoritmos são inicializados de forma diferente, mas o seu funcionamento principal passa pela execução da função *generateNewPopulation* (ver Pseudo-código 1) até chegar à geração/iteração final introduzida nos parâmetros (condição de término).

Se a iteração atual for maior que a iteração final

Terminar

Incrementa a iteração atual

Transforma a população atual numa nova população com base no algoritmo específico

Ordena a população por fitness crescente

Devolve o melhor individuo (o primeiro)

Pseudo-código 1 - Função *generateNewPopulation*

* + 1. *Custom Algorithm*

O *Custom Algorithm* (CA) requer uma população inicial. A função de cálculo de *fitness* é aplicada a cada geração, para além de calcular o *fitness* dos indivíduos, também os ordena em ordem crescente de *fitness*.

Os parâmetros mais relevantes para este algoritmo são:

* Elitismo
* Probabilidade de mutação

O algoritmo funciona do seguinte modo, apresentado no Pseudo-código 2:

Inicialização de parâmetros

Enquanto não é atingida a condição de termino

Cria uma nova população com estes passos:

* + - Elitismo
    - Recombinação
    - Mutação
    - Recombinação 2

Calcula fitness e ordena a nova população

Fim do ciclo

Pseudo-código 2 - *Custom Algorithm*

De seguida estão explicados os passos do algoritmo:

Elitismo

O elitismo é um parâmetro de entrada que age como uma forma de seleção. Aplicamos o elitismo à população presente no início de cada iteração do algoritmo de modo a manter os seus melhores indivíduos (no nosso caso temos a população organizada de melhor para pior). Ou seja, tendo uma população de 100 indivíduos e um elitismo de 20%, irão ser mantidos os primeiros 20 indivíduos. Estes indivíduos não são alterados na iteração atual.

Recombinação

Os restantes indivíduos não selecionados pelo elitismo são completamente refeitos, através de uma combinação dos diferentes genes dos indivíduos previamente selecionados, sendo que o gene na posição *n* do indivíduo a recombinar toma o valor do gene na posição *n* de um dos indivíduos selecionados por elitismo.

Mutação

De forma a saber onde aplicar mutações, é feito o cálculo para cada gene dos indivíduos selecionados por elitismo, para averiguar se algum gene apenas tem um valor; caso seja verdade, a primeira metade dos indivíduos não selecionados, segundo a probabilidade de mutação, pode ter o gene nessa posição alterado para o valor que não existe nos indivíduos selecionados.

A segunda metade dos indivíduos não selecionados, segundo a probabilidade de mutação, pode ter qualquer gene alterado para um valor aleatório dentro dos valores considerados no problema (0 e 1).

Recombinação 2

A segunda metade dos indivíduos selecionados é completamente refeita, através de uma combinação dos diferentes genes da primeira metade dos indivíduos selecionados por elitismo, sendo que o gene na posição *n* do indivíduo a recombinar toma o valor do gene na posição *n* de um dos indivíduos da primeira metade dos indivíduos selecionados por elitismo.

* + 1. Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) requer uma população inicial. Cada indivíduo desta população é avaliado utilizando a função de avaliação, cujo resultado deverá representar a qualidade do indivíduo como solução para o problema. Através do método de seleção elitismo e torneio, iremos obter uma nova população. De seguida, são aplicados os operadores genéticos de recombinação e mutação, respetivamente, com intuito de gerar novos indivíduos. Com cada geração, avaliamos a nova população gerada. No final de todo o processo evolutivo, o algoritmo devolve o melhor indivíduo encontrado.

Os parâmetros mais relevantes para este algoritmo são:

* Probabilidade de mutação
* Probabilidade de recombinação
* Tamanho de torneio
* Elitismo

O algoritmo funciona do seguinte modo, apresentado no Pseudo-código 3:

Inicialização de parâmetros

Enquanto não é atingida a condição de termino

Cria uma nova população com estes passos:

* + - Elitismo
    - Torneio
    - Recombinação com um corte
    - Mutação

Calcula fitness e ordena a nova população

Cria nova população mantendo alguns dos melhores indivíduos da população inicial e os melhores da nova população

Calcula fitness e ordena a nova população original

Fim do ciclo

Pseudo-código 3 - Algoritmo Genético

De seguida estão explicados os passos do algoritmo:

Elitismo

O elitismo é um parâmetro de entrada que age como uma forma de seleção. Aplicamos o elitismo à população recebida no início de cada iteração do algoritmo, de modo a manter os melhores indivíduos (no nosso caso temos a população organizada de melhor para pior). Ou seja, tendo uma população de 100 indivíduos e um elitismo de 20%, irão ser mantidos os primeiros 20 indivíduos.

Os primeiros *x* indivíduos resultantes da aplicação do elitismo à população inicial passam a ser os primeiros *x* indivíduos da nova população.

Torneio

Em cada torneio, é escolhido aleatoriamente um elemento do conjunto de indivíduos inicial: este irá ser utilizado como "melhor indivíduo".

Para cada *n* iterações (sendo *n* o tamanho do torneio) é escolhido um outro indivíduo aleatoriamente do mesmo conjunto inicial, para que o seu *fitness* seja comparado com o do atual melhor indivíduo. Caso o *fitness* deste segundo indivíduo seja melhor, então este toma o lugar do anterior melhor indivíduo.

No fim do torneio, é devolvido o melhor indivíduo encontrado.

Nesta fase, teremos já alguns indivíduos na nova população graças ao elitismo e, através do torneio, serão atribuídos os restantes indivíduos a esta população.

Recombinação com um corte

Primeiramente, iremos percorrer todos os indivíduos da nova população. Em cada iteração começamos por testar se iremos recombinar (ou não) com base no parâmetro de probabilidade de recombinação; de seguida, determinamos aleatoriamente o corte a partir do número de elementos do indivíduo; por fim, iteramos o valor do corte e substituímos cada elemento com o elemento na mesma posição pertencente ao próximo indivíduo.

Ao concluir este processo, teremos a nova população recombinada.

Mutação

Primeiramente, iremos percorrer cada indivíduo da nova população. Com cada iteração, percorremos todos os elementos de cada um desses indivíduos. Para cada elemento, testamos a probabilidade de mutação para saber se iremos mutar (ou não). Caso seja para mutar, trocamos o valor desse elemento (se for 1 passa a 0, se for 0 passa a 1).

Ao concluir este processo, teremos a nova população mutada.

* + 1. *Bee Colony Optimization*

O BCO é um algoritmo proposto por Pham et al. (2005) [8]. Trata-se de um algoritmo de SI que imita o comportamento de abelhas produtoras de mel. Resumidamente, o algoritmo efetua um tipo de procura local e procura aleatória, semelhante ao reconhecimento das redondezas efetuado pelas abelhas da colónia.

O algoritmo funciona do seguinte modo, apresentado no Pseudo-código 4:

Inicialização de parâmetros

Por cada iteração

Cálculo das probabilidades

Por cada abelha selecionada

Calcular o número de tentativas de otimização com base na probabilidade

Por cada tentativa

Otimizar solução

Fim do ciclo

Fim do ciclo

Calcula fitness e ordena a nova população

Fim do ciclo

Pseudo-código 4 - *Bee Colony Optimization*

De seguida são explicados os passos do algoritmo:

Inicialização de parâmetros

Nesta etapa iniciamos os parâmetros: número de abelhas selecionadas (*selectedSize*), número de abelhas consideradas melhores (*bestSize*), valor base de tentativas de otimização para as abelhas selecionadas (*valueSelection*), valor base de tentativas de otimização para abelhas consideradas melhores (*valueBest*) e número de modificações (*changeValue*).

Inicialização de probabilidades

A cada abelha selecionada (dentro do *selectedSize*) é atribuído um valor entre 0 e 1 com base na distância do seu *fitness* ao melhor *fitness* da população.

Em cada iteração, este valor de probabilidade é multiplicado pelos parâmetros *valueBest* (melhores abelhas) e *valueSelection* (restantes abelhas dentro de *selectedsize*), de modo a obter o número de tentativas de otimização para cada indivíduo numa iteração.

Otimizar solução

Otimizar solução consiste em, para um determinado número de modificações, remover ou adicionar um regenerador até o *fitness* do indivíduo melhorar; se o *fitness* não melhorar, o indivíduo não é alterado.

A probabilidade de remover um regenerador é o dobro da probabilidade de adicionar um regenerador.

A otimização pode ser feita de duas formas: considerar qualquer regenerador livre ou ocupado como alvo de otimização ou, à medida que o número de modificações aumenta, o mesmo número de melhores e piores regeneradores são considerados para serem modificados (sendo considerados como melhores regeneradores os que estão desligados e podem ligar mais nós e, como piores, os que estão ligados e ligam menos nós).

* + 1. *Ant Colony Optimization*

O ACO é baseado na forma como as formigas comunicam e se influenciam entre si através de trilhos de feromonas [9]. Requer uma população inicial e vários parâmetros que serão referidos de seguida. O elemento mais importante é a variável “trilho de feromonas”, que contém toda a base do sistema, pois irá influenciar as outras formigas, sendo atualizado conforme a experiência do algoritmo. Acrescentamos, também, que foi utilizado um método de busca local, de modo a melhorar as soluções encontradas.

O algoritmo funciona do seguinte modo, apresentado no Pseudo-código 5:

Inicialização de parâmetros

Função de Avaliação

Inicialização do trilho de feromonas

Por cada iteração

Por cada formiga na população

Clonar a atual formiga para um individuo auxiliar

Por cada modificação pretendida

Testa probabilidade exploração

Fim do ciclo

Testa intensificação

Fim do ciclo

Busca local

Função de Avaliação

Atualiza o trilho de feromonas

Fim do ciclo

Pseudo-código 5 - *Ant Colony Optimization*

De seguida são explicados os passos do algoritmo:

Inicialização de parâmetros

Nesta etapa iniciamos os parâmetros: valor que inicia o trilho de feromonas (*Q*), probabilidade de exploração (*probability\_q*), número de modificações (*number\_mods*), evaporação do trilho de feromonas (*evaporation*) e influência do trilho de feromonas (*influence*).

Iniciamos também o trilho de feromonas em si, que consiste num vetor de 3 dimensões. A primeira dimensão contém uma posição para cada formiga, a segunda dimensão contém uma posição para cada componente da respetiva formiga e, por fim, a última dimensão contém duas posições, uma para o valor 1 e outra para o valor 0. Deste modo, temos a estrutura necessária para influenciar a qualidade do trilho que irá ser a base da interação entre as várias formigas.

Função de Avaliação

Primeiramente, é calculado o *fitness* de cada formiga, de modo a encontrar a melhor (que é depois guardada como a melhor formiga da iteração atual). Caso seja a primeira iteração ou caso o *fitness* da melhor formiga da iteração seja melhor que o *fitness* da melhor formiga já encontrada ao longo das várias iterações, então guardamos a melhor formiga, a melhor iteração e ativamos a intensificação.

Inicialização do trilho de feromonas

Aqui estabelecemos os valores do trilho de feromonas. O valor atribuído para cada trilho é o mesmo:

sendo G o melhor indivíduo encontrado.

Clonar a atual formiga para um indivíduo auxiliar

Desta forma, modificamos o clone da formiga em vez da formiga em si, testando melhoramentos sem consequências.

Testa probabilidade exploração

O algoritmo faz determinado número (indicado pelo utilizador) de modificações. Para cada uma destas, começamos por testar a probabilidade *q*. Independentemente do valor obtido, a formiga atual irá sempre interagir com o trilho de feromonas.

Testa intensificação

A intensificação é um parâmetro que é desativado quando não foi encontrada uma melhor solução naquela iteração e ativado quando é encontrada uma melhor solução. Isto permite uma exploração mais complexa. Após testar a intensificação, caso o *fitness* do indivíduo auxiliar seja melhor que o do melhor correspondente nas formigas, então o indivíduo auxiliar vai substituir o que está nas formigas.

Busca Local

De modo a melhorar os nossos resultados, implementámos uma busca local. Essencialmente, tentámos trocar o valor de um dos elementos de uma formiga e verificámos se melhora o *fitness* da solução.

Atualiza o trilho de feromonas

Os trilhos de feromonas são atualizados com as seguintes equações:

sendo G a melhor solução encontrada.

Notas:

Inicialmente, foi aplicado um sistema que contava as iterações passadas sem melhorias e que era utilizado como critério de paragem do algoritmo. Não é usado agora, dada a importância de ter o mínimo de regeneradores e de manter o mesmo critério de paragem para todos os algoritmos.

* 1. Estrutura do Programa

Com este capítulo pretende-se clarificar o modo como funciona o *software*. A utilização típica do programa consiste em selecionar um algoritmo, introduzir os parâmetros para o algoritmo e, em seguida, resolver um ou vários problemas, sendo que os resultados do problema individual são apresentados no programa, enquanto os resultados da solução de uma série de problemas podem ser consultados num ficheiro *csv*.

* + 1. A implementação com a *framework* Qt

O programa desenvolvido em Qt é a versão final do nosso projeto.

Esta versão contém uma janela principal com a opção de selecionar um dos quatro algoritmos implementados e ainda uma ferramenta extra para ordenar os resultados guardados nos ficheiros *csv*.

Cada algoritmo tem a sua janela própria, onde temos os parâmetros requeridos pelo algoritmo em questão, um botão para resolver um problema individualmente, um botão para resolver uma série de problemas e um botão para testar combinações de parâmetros.

Na solução de um problema individual, é selecionado o ficheiro do problema; este é integrado na classe problema e, de seguida, é criada uma *thread* específica ao algoritmo selecionado, que a cada geração envia um sinal à *thread* da interface visual com a informação do melhor indivíduo da geração atual, de forma a atualizar os dados da janela e do gráfico da evolução do *fitness* ao longo das gerações.

Na solução de um conjunto de problemas, é selecionada uma pasta com diferentes problemas e criado um ficheiro *csv* onde são guardados os resultados da execução do algoritmo para cada um dos ficheiros e para cada *seed* diferente. São criadas várias *threads*, e cada uma vai resolvendo um problema diferente das restantes *threads* (ver ). Para tal, é lido o problema, criada a população e aplicado o algoritmo. Depois de obtida a solução, é enviado um sinal à *thread* original para escrever os resultados no ficheiro *csv*.

No teste de diferentes combinações de parâmetros, é selecionada uma pasta com os problemas a testar, introduzida uma combinação de valores a testar para cada parâmetro e é criado um ficheiro *csv* para os resultados da execução. São ainda criadas várias *threads*, resolvendo cada uma delas um problema diferente e aplicando ao mesmo problema as diferentes combinações de parâmetros. Sempre que a solução para um conjunto de parâmetros termina, é enviado um sinal à *thread* original para escrever os resultados no ficheiro *csv*.



Figura 13 - Programa em Qt

* + 1. Classes

As classes que compõem o programa são as seguintes:

* *AntColonyAlgorithm*
* *AntColonyDialog*
* *AntColonyMultiThread*
* *AntColonyTestDialog*
* *AntColonyTestMultiThread*
* *AntColonyThread*
* *BeeColonyAlgorithm*
* *BeeColonyDialog*
* *BeeColonyMultiThread*
* *BeeColonyTestDialog*
* *BeeColonyTestMultiThread*
* *BeeColonyThread*
* *CustomAlgorithm*
* *CustomDialog*
* *CustomMultiThread*
* *CustomTestDialog*
* *CustomTestMultiThread*
* *CustomThread*
* *GeneticAlgorithm*
* *GeneticDialog*
* *GeneticMultiThread*
* *GeneticTestDialog*
* *GeneticTestMultiThread*
* *GeneticThread*
* *Individual*
* *MainWindow*
* *Population*
* *Problem*

A razão para haver tantas classes semelhantes para algoritmos diferentes é que cada algoritmo tem diferentes parâmetros, pelo que optámos por ter uma janela distinta para cada um, ao invés de uma janela dinâmica que se altera conforme é selecionado um algoritmo específico. Por outro lado, não só não é fácil implementar o polimorfismo em C++, devido ao *splicing* de objetos, como também seria prejudicial ao desempenho dos algoritmos.

Nas próximas secções é feita a descrição das diferentes classes, tendo algumas sido agrupadas devido às semelhanças que apresentam.

*Algorithm*

As classes *Algorithm* (*AntColonyAlgorithm, BeeColonyAlgorithm, CustomAlgorithm, GeneticAlgorithm*) contêm os seguintes métodos principais:

***setUpAlgorithm*** **-** Funciona como o construtor da classe; o construtor está vazio de forma a poderem ser instanciadas sem argumentos. Com esta função, a mesma instância pode ser utilizada para uma diferente configuração de parâmetros.

***generateNewPopulation*** **-** É a função que contém o funcionamento principal do algoritmo; conforme o funcionamento deste, será gerada uma nova população (solução), com base na população anterior. No subcapítulo anterior está apresentado em detalhe o funcionamento dos diferentes algoritmos.

Para além destes métodos principais, certos algoritmos têm ainda métodos adicionais, que auxiliam o método *generateNewPopulation*.

*Dialog*

Cada *Dialog* (*AntColonyDialog*, *BeeColonyDialog*, *CustomDialog*, *GeneticDialog*) é composto por uma série de *inputs* e *labels* correspondentes aos diferentes parâmetros de que o algoritmo necessita para correr, um *drop down* com o número de *threads* a utilizar e um *drop down* com o intervalo de *seeds* a executar na solução de múltiplos problemas. Os *Dialogs* têm também 3 botões cada um com uma função diferente, tendo estes os *labels* “*Solve*”, “*Batch Solve*” e “*Test*”. Para além de *inputs* e botões, os *Dialogs* têm também *labels* para informações do problema atual, uma zona chamada *GridLayout* que contém ou um gráfico do *fitness* em relação às gerações ou um conjunto de *labels* com informação sobre as diferentes *threads* em execução e uma barra de progresso representativa da execução atual do algoritmo (exemplo na Figura 14).



Figura 14 - *Custom Dialog*

*MultiThread*

As classes *MultiThread* (*AntColonyMultiThread*, *BeeColonyMultiThread*, *CustomMultiThread*, *GeneticMultiThread*) contêm os seguintes métodos principais:

* *run*
* *newProblem*
* *problemEnded*

*run* é a função principal da *thread*; é esta que é executada quando se faz *thread*->*start*() dentro da *thread* original, atuando face a cada problema dentro da pasta selecionada. Se este for um dos problemas que esta *thread* tem de tratar, aplica o algoritmo ao mesmo problema com 10 *seeds* diferentes e envia os resultados de cada solução para a *thread* original.

*newProblem* é um sinal que é enviado à *thread* original quando a *MultiThread* começa a tratar um novo problema; é enviado o número da *thread* e o nome do problema que está a tratar, para ser mostrado no *grid layout* da janela.

*problemEnded* é um sinal que é enviado à *thread* original quando a *MultiThread* acaba de tratar uma *seed* para um problema; é enviada a *string* formatada de forma a ser escrita no ficheiro *csv* que está aberto na *thread* original.

*TestDialog*

As classes *TestDialog* (*AntColonyTestDialog*, *BeeColonyTestDialog*, *CustomTestDialog*, *GeneticTestDialog*) consistem em janelas com *labels* e *inputs* com valores de início, fim e incrementos para os diferentes parâmetros a variar; todos estes *inputs* têm *getters* a ser chamados pela janela original de forma a obter os valores introduzidos, sendo estes utilizados para construir as classes *TestMultiThread* (exemplo na Figura 15).



Figura 15 - *Ant Colony Test Dialog*

*TestMultiThread*

As classes *TestMultiThread* (*AntColonyTestMultiThread*, *BeeColonyTestMultiThread*, *CustomTestMultiThread*, *GeneticTestMultiThread*) contêm os mesmos métodos principais que as classes *MultiThread*; contudo, a sua função *run,* ao invés de aplicar diferentes *seeds* ao mesmo problema, aplica diferentes combinações de parâmetros para o algoritmo.

*Thread*

As classes *Thread* (*AntColonyThread*, *BeeColonyThread*, *CustomThread*, *GeneticThread*) existem com o intuito de a janela original poder ser atualizada à medida que um algoritmo é aplicado a um problema. Contêm os seguintes métodos principais:

* *Run*
* *dataChanged*
* *singleProblem*

*run* é a função principal da *thread* e é esta que é executada quando se faz *thread*->*start*() na *thread* original; a função instancia o problema, a população e o algoritmo, notifica a *thread* original dos dados do problema e, à medida que o algoritmo vai gerando novas populações, notifica a *thread* original com os dados do melhor indivíduo da população atual.

*dataChanged* é o sinal que é enviado a cada iteração do algoritmo, enviando todos os dados necessários para atualizar a interface (*fitness*, nós desconectados, regeneradores, geração e progresso).

*singleProblem* é o sinal que é enviado quando um novo problema é iniciado; este contém os dados do problema e da população inicial (*fitness*, nós desconectados, regeneradores, geração, total de nós e total de ligações).

*Individual*

A classe *Individual* representa uma solução do problema; o seu construtor recebe o problema e prioriza colocar regeneradores nos nós com mais ligações. A classe tem os seguintes atributos:

* *QVector<int> solution*
* *int fitness*
* *int disconnected*
* *int regenerators*

*solution* é um vetor de inteiros, com tamanho *N*, sendo *N* o número de nós no problema; cada índice do vetor toma o valor 1 ou 0 conforme esse nó tem ou não um regenerador.

*fitness* é o valor inteiro obtido do cálculo do *fitness* do indivíduo.

*disconnected* é o valor inteiro do número de nós desconectados na solução.

*regenerators* é o valor inteiro do total de regeneradores na solução.

A classe *Individual* tem os seguintes métodos principais:

* *calculateFitness*
* *clone*

*calculateFitness* é uma função que verifica cada ligação do problema conforme a solução apresentada; por cada nó desconectado são somados 500 ao valor do *fitness*, por cada regenerador utilizado são somados 100 ao valor do *fitness*, ou 100 vezes o peso do nó para os problemas com pesos.

*clone* é uma função que cria uma nova instância da classe *Individual*, mas com novas referências de memória.

*MainWindow*

A classe *main window* (Figura 16) apenas contém quatro botões que iniciam uma nova janela com o algoritmo selecionado e uma ferramenta que aplica a função *sort*, cuja finalidade é ler um ficheiro de resultados gerados pelo programa e ordená-los de forma a criar um ficheiro de mais fácil interpretação.



Figura 16 - *Main Window*

*Population*

O principal atributo da classe *Population* é *QVector<Individual> individuals*, um vetor de indivíduos.

Os principais métodos da classe *Population* são:

* *setUpPopulation*
* *calculateFitnesses*
* *getBestIndividual*

*setUpPopulation* permite criar uma nova população sem ter de criar uma nova instância da classe, permitindo ainda instanciar a classe sem saber inicialmente os parâmetros.

*calculateFitnesses* funciona da mesma forma que a função *calculateFitness* da classe *Individual*. Contudo, a utilização desta função torna-se mais rápida do que executar individualmente para cada indivíduo e apresenta ainda a vantagem de ordenar os indivíduos por ordem de *fitness*, pelo que acaba por ser mais usada que a anterior.

*getBestIndividual* é uma função que só deve ser chamada depois de os *fitnesses* terem sido calculados e ordenados, pois esta retorna o primeiro *Individual* da variável *individuals*.

*Problem*

Os atributos da classe *Problem* são os seguintes:

* *QVector<QVector<int>> nodes*
* *QVector<int> weights*
* *QVector<float> connectionsWeight*
* *int hasWeight*
* *int total*
* *int connections*

*nodes* é uma matriz de inteiros que contém as ligações entre os nós do problema, ou seja, sendo a coluna *x* e a linha *y*, se o elemento da matriz na posição *x*, *y* tiver o valor 1, significa que o nó no índice *x* está ligado ao nó no índice *y*; como tal, é uma matriz simétrica.

*weights* é um vetor de inteiros em que, caso o problema tenha pesos, cada índice contém o peso de colocar um regenerador no nó desse índice.

*connectionsWeight* é um vetor que toma valores entre 0 e 1, sendo 0 um nó que não tem ligações e 1 o nó com mais ligações.

*hasWeight* é um inteiro que toma o valor 1 quando o problema tem pesos.

*total* é o número de nós do problema.

*connections* é o número de ligações entre nós.

O principal método da classe *Problem* é *setUpProblem*, que permite criar um novo problema sem ter de criar uma nova instância da classe, e que permite que o objeto seja instanciado sem saber o argumento necessário. Este método recebe o caminho para o ficheiro do problema a ler, e desse ficheiro obtém o tamanho do problema, o número de ligações, os pesos dos nós (se existirem) e a matriz de ligações entre nós.

* 1. Síntese

A metodologia utilizada foi a que considerámos mais apropriada para o tamanho da nossa equipa e para os requisitos levantados. Cada algoritmo permite obter soluções para os problemas; todos eles têm semelhanças, como a utilização de populações, mas acabam por otimizar as populações de forma diferente. O programa tem uma utilização intuitiva e um funcionamento otimizado para a solução do PLR.

1. - Resultados

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a secção 5.1 apresenta a forma como foram obtidos os dados para análise; a secção 5.2 apresenta a forma como foi feito o tratamento dos dados obtidos; a secção 5.3 apresenta os resultados obtidos; a secção 5.4 apresenta a comparação dos algoritmos implementados; a secção 5.5 apresenta a escolha dos melhores algoritmos, e a secção 5.6 sumariza os conteúdos apresentados neste capítulo.

* 1. Obtenção de dados

Esta secção apresenta as etapas por que passámos de forma a obter os resultados prontos a serem tratados. Iremos explicar como obtivemos os dados das soluções e as combinações de parâmetros ideais, através de testes e do *software* *RapidMiner*.

* + 1. Obtenção de dados com a execução do programa desenvolvido

Os dados utilizados para analisar os algoritmos foram obtidos através da execução do programa, sempre com 500 iterações/gerações, com um processador *Intel* i5-8600k a correr com a frequência de 4.6GHz.

Os dados obtidos são apresentados posteriormente neste capítulo (da Tabela 4 à Tabela 15); os dados completos dos testes constam em anexo.

* + 1. Teste de parâmetros dos algoritmos

Para cada algoritmo foram testadas diferentes combinações de parâmetros para o funcionamento do algoritmo. Estas diferentes combinações foram aplicadas a 36 problemas e os resultados da execução foram escritos para ficheiros *csv*. Os dados escritos nos ficheiros consistem no valor dos parâmetros escolhidos, o tempo que o algoritmo demorou a obter a melhor solução, a geração/iteração em que o algoritmo chegou à melhor solução, o número de regeneradores da melhor solução e o número de nós desligados na melhor solução. Foi também criado um ficheiro de texto com os parâmetros do algoritmo que são constantes a todas as execuções dos testes do algoritmo.

* + 1. Recolha de dados de execução dos algoritmos

Para cada algoritmo foram testada 480 diferentes instâncias de problemas, cada uma com 50 *seeds* diferentes. Os resultados destas execuções foram escritos para ficheiros *csv*. Os dados escritos nos ficheiros consistem no tamanho do problema, o número do problema, a instância do problema, o tempo que o algoritmo demorou a obter a melhor solução, a geração/iteração em que o algoritmo chegou à melhor solução, o *fitness* da melhor solução, o número de regeneradores da melhor solução e o número de nós desligados na melhor solução. Foram também criados ficheiros de texto com os parâmetros utilizados na execução dos algoritmos.

* 1. Tratamento dos dados obtidos

Os dados obtidos foram importados para a ferramenta *RapidMiner*, onde foram aplicadas funções de agregação, de forma a condensar milhares de linhas de dados em poucas linhas de informação relevante.

* + 1. Tratamento dos dados de teste de parâmetros

Após a importação dos dados para a ferramenta *RapidMiner*, foi aplicada a função de agregação, em que os dados são agrupados pelos diferentes atributos que foram variados durante os testes, sendo calculadas as médias dos atributos, tempo, gerações, regeneradores e nós desligados. As médias obtidas são ordenadas por nós desligados de forma crescente, número de regeneradores de forma crescente e tempo de forma crescente.Assim, a primeira linha do *dataset* obtido contém a melhor combinação de atributos para o algoritmo testado (ver Tabela 4).

* + 1. Tratamento dos dados de execução dos algoritmos

Após a importação dos dados para a ferramenta *RapidMiner*, foi aplicada a função de agregação, em que os dados são agrupados pelos atributos: número do problema e tamanho do problema, são filtradas as entradas em que o problema não ficou resolvido (entradas com nós desligados) e são calculadas as médias dos atributos, tempo, gerações, *fitness*, regeneradores e nós desligados.

Assim, os dados dos diferentes *seeds* e das diferentes instâncias de cada problema ficam agrupados, de forma a obter um sumário da execução do algoritmo para cada um dos problemas.

* 1. Resultados obtidos

Os resultados obtidos são apresentados sob a forma de tabelas. Para os resultados de testes, apenas são apresentadas as cinco melhores combinações de parâmetros; contudo, em anexo estão as tabelas com todos os parâmetros testados (páginas 61 a 71).

* + 1. Resultados dos testes aos parâmetros

Nesta secção são apresentados os resultados das melhores combinações de parâmetros para os vários algoritmos implementados.

Com base em observações preliminares foram determinados os melhores intervalos para cada parâmetro de entrada para cada algoritmo. E com base nesses intervalos foram executados vários testes automatizados que variavam esses valores. O objetivo era determinar a melhor combinação de parâmetros para depois efetuar os testes finais e comparar a performance dos vários algoritmos.

*Custom Algorithm*

Para a obtenção dos melhores parâmetros do CA, foram variados os seguintes parâmetros:

* Elitismo: de 5% a 50% com incrementos de 5%
* Mutação: de 1% a 10% com incrementos de 1%

Na Tabela 4 estão presentes as cinco melhores combinações de parâmetros para o CA.

Tabela 4 - Cinco melhores resultados do teste do *Custom Algorithm*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Elitism | Mutation | Time(ms) | Regenerators | Disconnected |
| 20 | 5 | 320.8889 | 4.666666667 | 0 |
| 30 | 7 | 410.1389 | 4.666666667 | 0 |
| 20 | 9 | 180.25 | 4.694444444 | 0 |
| 30 | 6 | 217.9722 | 4.694444444 | 0 |
| 25 | 4 | 228.8056 | 4.694444444 | 0 |

Algoritmo Genético

Para a obtenção dos melhores parâmetros do AG, foram variados os seguintes parâmetros:

* Elitismo: de 5% a 20% com incrementos de 5%
* Mutação: de 20% a 40% com incrementos de 10%
* Recombinação: de 40% a 80% com incrementos de 20%
* Torneio: de 2 a 10 com incrementos de 2

Na Tabela 5 estão presentes as cinco melhores combinações de parâmetros para o AG.

**Tabela 5 - Cinco melhores resultados do teste do Algoritmo Genético**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Elitism | Mutation | Recombination | Tournament | Time(ms) | Regenerators | Disconnected |
| 10 | 30 | 60 | 10 | 2540.639 | 4.888888889 | 0 |
| 10 | 30 | 80 | 10 | 2544.917 | 4.888888889 | 0 |
| 20 | 20 | 40 | 10 | 4128.361 | 4.888888889 | 0 |
| 15 | 30 | 60 | 10 | 2995.306 | 4.916666667 | 0 |
| 15 | 30 | 80 | 10 | 2578.472 | 4.916666667 | 0 |

*Bee Colony Optimization*

Para a obtenção dos melhores parâmetros do BCO, foram variados os seguintes parâmetros:

* *Selected Value*: de 20 a 50 com incrementos de 10
* *Best Value*: de 30 a 60 com incrementos de 10
* *Change Value*: de 3 a 7 com incrementos de 1

Na Tabela 6 estão presentes as cinco melhores combinações de parâmetros para o BCO.

Tabela 6 - Cinco melhores resultados do teste do *Bee Colony Optimization*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Select | Best | Change | Time(ms) | Regenerators | Disconnected |
| 30 | 50 | 5 | 3001.944 | 4.666666667 | 0 |
| 50 | 60 | 4 | 5773.667 | 4.666666667 | 0 |
| 40 | 50 | 5 | 5588.444 | 4.666666667 | 0 |
| 50 | 50 | 7 | 1860.083 | 4.694444444 | 0 |
| 30 | 60 | 6 | 1979.583 | 4.694444444 | 0 |

*Ant Colony Optimization*

Para a obtenção dos melhores parâmetros do ACO, foram variados os seguintes parâmetros:

* *Q probability*: de 60% a 100% com incrementos de 20%
* Modificações: de 5 a 7 com incrementos de 1
* Evaporação: de 30% a 70% com incrementos de 20%
* Influência: de 60% a 100% com incrementos de 20%

Na Tabela 7 estão presentes as cinco melhores combinações de parâmetros para o ACO.

Tabela 7 - Cinco melhores resultados do teste do *Ant Colony Optimization*

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Q probability | Modifications | Evaporation | Influence | Time(ms) | Regenerators | Disconnected |
| 80 | 5 | 50 | 60 | 733.3889 | 4.861111111 | 0 |
| 60 | 5 | 50 | 80 | 1997.361 | 4.861111111 | 0 |
| 60 | 5 | 50 | 100 | 1999.028 | 4.861111111 | 0 |
| 80 | 5 | 50 | 80 | 1225.833 | 4.888888889 | 0 |
| 80 | 5 | 50 | 100 | 1230.194 | 4.888888889 | 0 |

* + 1. Resultados da solução de problemas

Nesta secção estão presentes os resultados das soluções das 480 instâncias de problemas com 50 *seeds* diferentes:

Custom Algorithm – Problemas *Random*

Os parâmetros utilizados para a solução das 280 instâncias de problemas *random* com o CA foram os seguintes:

* População: 500
* Gerações: 500
* Elitismo: 20%
* Mutação: 5%
* *Seeds*: todos os valores pares entre 2 e 100

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 8 – Resultados dos problemas *random* com o *Custom Algorithm*

| Size | Problem | Time(ms) | Generations | Fitness | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 1 | 113.332 | 17.288 | 1108.8 | 11.088 | 0 |
| 40 | 2 | 101.448 | 15.248 | 605.2 | 6.052 | 0 |
| 40 | 3 | 110.356 | 16.142 | 453.6 | 4.536 | 0 |
| 40 | 4 | 63.992 | 8.864 | 382.4 | 3.824 | 0 |
| 40 | 5 | 50.788 | 6.944 | 300 | 3 | 0 |
| 40 | 6 | 29.972 | 3.64 | 300 | 3 | 0 |
| 40 | 7 | 39.914 | 5.6 | 200 | 2 | 0 |
| 40 | 8 | 25.04 | 3.768 | 200 | 2 | 0 |
| 40 | 9 | 21.204 | 3.178 | 200 | 2 | 0 |
| 60 | 1 | 457.618 | 56.584 | 1165.6 | 11.656 | 0 |
| 60 | 2 | 221.812 | 25.188 | 713.6 | 7.136 | 0 |
| 60 | 3 | 248.096 | 27.294 | 505.8 | 5.058 | 0 |
| 60 | 4 | 150.444 | 15.872 | 400 | 4 | 0 |
| 60 | 5 | 392.52 | 41.18 | 322.4 | 3.224 | 0 |
| 60 | 6 | 58.684 | 6.704 | 300 | 3 | 0 |
| 60 | 7 | 195.374 | 21.828 | 210 | 2.1 | 0 |
| 60 | 8 | 45.36 | 5.804 | 200 | 2 | 0 |
| 60 | 9 | 37.19 | 4.926 | 200 | 2 | 0 |
| 80 | 1 | 536.952 | 49.894 | 1296.4 | 12.964 | 0 |
| 80 | 2 | 504.532 | 45.428 | 755.6 | 7.556 | 0 |
| 80 | 3 | 489.296 | 39.956 | 550.2 | 5.502 | 0 |
| 80 | 4 | 699.364 | 51.908 | 445.2 | 4.452 | 0 |
| 80 | 5 | 370.012 | 27.17 | 383.4 | 3.834 | 0 |
| 80 | 6 | 125.912 | 10.816 | 300 | 3 | 0 |
| 80 | 7 | 204.66 | 17.306 | 281 | 2.81 | 0 |
| 80 | 8 | 74.444 | 7.76 | 200 | 2 | 0 |
| 80 | 9 | 58.12851 | 6.52409639 | 200 | 2 | 0 |
| 100 | 1 | 731.042 | 52.76 | 1339.2 | 13.392 | 0 |
| 100 | 2 | 948.032 | 61.856 | 811.6 | 8.116 | 0 |
| 100 | 3 | 1344.022 | 80.47 | 600.6 | 6.006 | 0 |
| 100 | 4 | 875.756 | 50.232 | 475.2 | 4.752 | 0 |
| 100 | 5 | 279.988 | 17.302 | 400 | 4 | 0 |
| 100 | 6 | 327.02 | 20.292 | 300 | 3 | 0 |
| 100 | 7 | 488.938 | 30.432 | 271.2 | 2.712 | 0 |
| 100 | 8 | 131.076 | 10.524 | 200 | 2 | 0 |
| 100 | 9 | 89.948 | 7.908 | 200 | 2 | 0 |

*Custom Algorithm* – Problemas *Weighted*

Os parâmetros utilizados para a solução das 200 instâncias de problemas *weighted* com o CA foram os seguintes:

* População: 500
* Gerações: 500
* Elitismo: 20%
* Mutação: 5%
* *Seeds*: todos os valores pares entre 2 e 100

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 9 – Resultados dos problemas *weighted* com o *Custom Algorithm*

| Size | Problem | Time(ms) | Generations | Fitness | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 1 | 183.334 | 31.958 | 3054.2 | 11.322 | 0 |
| 40 | 3 | 57.872 | 8.784 | 1062.4 | 4.782 | 0 |
| 40 | 5 | 113.016 | 18.88 | 684.2 | 3.21 | 0 |
| 40 | 7 | 59.022 | 9.51 | 471.6 | 2.206 | 0 |
| 40 | 9 | 24.504 | 3.768 | 400 | 2 | 0 |
| 60 | 1 | 600.048 | 78.248 | 3033.6 | 12.026 | 0 |
| 60 | 3 | 270.76 | 30.478 | 1184.8 | 5.422 | 0 |
| 60 | 5 | 128.686 | 14.774 | 763 | 3.758 | 0 |
| 60 | 7 | 247.088 | 27.194 | 523.8 | 2.438 | 0 |
| 60 | 9 | 43.6 | 5.67 | 400 | 2 | 0 |
| 80 | 1 | 698.264 | 66.208 | 3351 | 13.598 | 0 |
| 80 | 3 | 574.44 | 47.42 | 1295.2 | 6.138 | 0 |
| 80 | 5 | 177.306 | 14.98 | 799.4 | 3.982 | 0 |
| 80 | 7 | 78.818 | 7.916 | 600 | 3 | 0 |
| 80 | 9 | 63.11647 | 7.09638554 | 400 | 2 | 0 |
| 100 | 1 | 900.5 | 67.85 | 3414.6 | 14.196 | 0 |
| 100 | 3 | 748.334 | 50.846 | 1366.8 | 6.66 | 0 |
| 100 | 5 | 519.838 | 33.052 | 807.6 | 4.008 | 0 |
| 100 | 7 | 230.66 | 17.218 | 594.4 | 2.944 | 0 |
| 100 | 9 | 92.172 | 8.706 | 400 | 2 | 0 |

Algoritmo Genético – Problemas *Random*

Os parâmetros utilizados para a solução das 280 instâncias de problemas *random* com o AG foram os seguintes:

* População: 500
* Gerações: 500
* Elitismo: 10%
* Mutação: 30%
* Recombinação: 60%
* Torneio: 10
* *Seeds*: todos os valores pares entre 2 e 100

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 10 – Resultados dos problemas *random* com o Algoritmo Genético

| Size | Problem | Time(ms) | Generations | Fitness | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 1 | 240.146 | 22.276 | 1105.8 | 11.058 | 0 |
| 40 | 2 | 259.036 | 23.312 | 638.8 | 6.388 | 0 |
| 40 | 3 | 339.088 | 29.766 | 473.8 | 4.738 | 0 |
| 40 | 4 | 189.632 | 17.172 | 393.6 | 3.936 | 0 |
| 40 | 5 | 411.502 | 36.744 | 306.2 | 3.062 | 0 |
| 40 | 6 | 88.432 | 8.324 | 300 | 3 | 0 |
| 40 | 7 | 550.324 | 51.722 | 201.4 | 2.014 | 0 |
| 40 | 8 | 95.728 | 10.128 | 200 | 2 | 0 |
| 40 | 9 | 74.926 | 8.238 | 200 | 2 | 0 |
| 60 | 1 | 836.478 | 61.056 | 1194.2 | 11.942 | 0 |
| 60 | 2 | 906.56 | 62.712 | 751.2 | 7.512 | 0 |
| 60 | 3 | 848.412 | 55.336 | 551.4 | 5.514 | 0 |
| 60 | 4 | 1201.948 | 75.144 | 435.6 | 4.356 | 0 |
| 60 | 5 | 718.66 | 45.142 | 377.2 | 3.772 | 0 |
| 60 | 6 | 412.124 | 28.56 | 300 | 3 | 0 |
| 60 | 7 | 963.758 | 67.4 | 257.4 | 2.574 | 0 |
| 60 | 8 | 271.768 | 23.368 | 200 | 2 | 0 |
| 60 | 9 | 166.498 | 16.092 | 200 | 2 | 0 |
| 80 | 1 | 1718.846 | 93.532 | 1370.2 | 13.702 | 0 |
| 80 | 2 | 1769.452 | 75.208 | 838.4 | 8.384 | 0 |
| 80 | 3 | 1802.14 | 80.454 | 620 | 6.2 | 0 |
| 80 | 4 | 1110.968 | 53.028 | 495.2 | 4.952 | 0 |
| 80 | 5 | 1174.76 | 55.122 | 398 | 3.98 | 0 |
| 80 | 6 | 1910.516 | 97.052 | 311.2 | 3.112 | 0 |
| 80 | 7 | 470.1 | 30.616 | 297.6 | 2.976 | 0 |
| 80 | 8 | 823.284 | 55.3 | 201.6 | 2.016 | 0 |
| 80 | 9 | 330.4056 | 27.815261 | 200 | 2 | 0 |
| 100 | 1 | 2631.874 | 112.894 | 1472 | 14.72 | 0 |
| 100 | 2 | 2353.244 | 98.912 | 916 | 9.16 | 0 |
| 100 | 3 | 2213.058 | 87.024 | 684 | 6.84 | 0 |
| 100 | 4 | 3102.552 | 111.308 | 525.6 | 5.256 | 0 |
| 100 | 5 | 2698.68 | 99.108 | 423.6 | 4.236 | 0 |
| 100 | 6 | 2335.768 | 96.252 | 360.4 | 3.604 | 0 |
| 100 | 7 | 1072.41 | 55.81 | 298 | 2.98 | 0 |
| 100 | 8 | 2260.832 | 121.32 | 224.8 | 2.248 | 0 |
| 100 | 9 | 681.67 | 49.454 | 200 | 2 | 0 |

Algoritmo Genético – Problemas *Weighted*

Os parâmetros utilizados para a solução das 200 instâncias de problemas *weighted* com o AG foram os seguintes:

* População: 500
* Gerações: 500
* Elitismo: 10%
* Mutação: 30%
* Recombinação: 60%
* Torneio: 10
* *Seeds*: todos os valores pares entre 2 e 100

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 11 - Resultados dos problemas *weighted* com o Algoritmo Genético

| Size | Problem | Time(ms) | Generations | Fitness | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 1 | 465.298 | 40.046 | 3034.2 | 11.35 | 0 |
| 40 | 3 | 513.378 | 42.92 | 1103.6 | 4.902 | 0 |
| 40 | 5 | 547.866 | 46.724 | 718.6 | 3.376 | 0 |
| 40 | 7 | 519.13 | 44.08 | 498.4 | 2.376 | 0 |
| 40 | 9 | 99.73 | 9.79 | 400 | 2 | 0 |
| 60 | 1 | 1303.688 | 85.666 | 3088.2 | 12.14 | 0 |
| 60 | 3 | 1348.474 | 76.266 | 1266.2 | 5.694 | 0 |
| 60 | 5 | 822.144 | 46.568 | 794.8 | 3.882 | 0 |
| 60 | 7 | 712.496 | 45.976 | 563.2 | 2.748 | 0 |
| 60 | 9 | 219.132 | 19.136 | 400 | 2 | 0 |
| 80 | 1 | 2169.326 | 118.024 | 3472.8 | 13.938 | 0 |
| 80 | 3 | 2094.072 | 97.162 | 1409 | 6.444 | 0 |
| 80 | 5 | 2107.706 | 97.132 | 838.2 | 4.058 | 0 |
| 80 | 7 | 701.002 | 43.216 | 600.2 | 3 | 0 |
| 80 | 9 | 398.6245 | 32.62851406 | 400 | 2 | 0 |
| 100 | 1 | 4490.504 | 173.892 | 3598.8 | 14.932 | 0 |
| 100 | 3 | 3711.526 | 132.232 | 1503 | 7.04 | 0 |
| 100 | 5 | 3518.2 | 122.434 | 911.6 | 4.406 | 0 |
| 100 | 7 | 1915.04 | 86.842 | 603.8 | 3.002 | 0 |
| 100 | 9 | 883.972 | 58.1 | 400 | 2 | 0 |

Bee Colony Optimization – Problemas *Random*

Os parâmetros utilizados para a solução das 280 instâncias de problemas *random* com o BCO foram os seguintes:

* População: 40
* Iterações: 500
* *Select Size*: 20
* *Best Size*: 10
* *Select Value*: 30
* *Best Value*: 50
* *Change Value*: 5
* *Seeds*: todos os valores pares entre 2 e 100

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 12 - Resultados dos problemas *random* com *Bee Colony Optimization*

| Size | Problem | Time(ms) | Generations | Fitness | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 1 | 2623.128 | 27.122 | 1081 | 10.81 | 0 |
| 40 | 2 | 1466.244 | 15.036 | 602.8 | 6.028 | 0 |
| 40 | 3 | 381.772 | 3.944 | 450.2 | 4.502 | 0 |
| 40 | 4 | 167.908 | 1.848 | 380 | 3.8 | 0 |
| 40 | 5 | 83.19 | 1.052 | 300 | 3 | 0 |
| 40 | 6 | 74.468 | 1 | 300 | 3 | 0 |
| 40 | 7 | 68.824 | 1.008 | 200 | 2 | 0 |
| 40 | 8 | 64.652 | 1 | 200 | 2 | 0 |
| 40 | 9 | 63.036 | 1 | 200 | 2 | 0 |
| 60 | 1 | 10748.53 | 70.568 | 1139.6 | 11.396 | 0 |
| 60 | 2 | 3159.484 | 20.528 | 701.6 | 7.016 | 0 |
| 60 | 3 | 747.09 | 4.858 | 500 | 5 | 0 |
| 60 | 4 | 283.144 | 2.04 | 400 | 4 | 0 |
| 60 | 5 | 3650.714 | 20.79 | 314.4 | 3.144 | 0 |
| 60 | 6 | 90.18 | 1.004 | 300 | 3 | 0 |
| 60 | 7 | 378.57 | 2.772 | 210 | 2.1 | 0 |
| 60 | 8 | 74.18 | 1 | 200 | 2 | 0 |
| 60 | 9 | 73.254 | 1 | 200 | 2 | 0 |
| 80 | 1 | 26429.82 | 125.854 | 1282.8 | 12.828 | 0 |
| 80 | 2 | 17422.69 | 78.468 | 737.6 | 7.376 | 0 |
| 80 | 3 | 9921.9 | 41.246 | 525.4 | 5.254 | 0 |
| 80 | 4 | 8733.152 | 33.144 | 408.4 | 4.084 | 0 |
| 80 | 5 | 8692.816 | 32.054 | 352.2 | 3.522 | 0 |
| 80 | 6 | 118.148 | 1.092 | 300 | 3 | 0 |
| 80 | 7 | 230.792 | 1.572 | 280 | 2.8 | 0 |
| 80 | 8 | 83.828 | 1.004 | 200 | 2 | 0 |
| 80 | 9 | 75.30924 | 1 | 200 | 2 | 0 |
| 100 | 1 | 39227.02 | 139.752 | 1353 | 13.53 | 0 |
| 100 | 2 | 19045.99 | 65.872 | 784 | 7.84 | 0 |
| 100 | 3 | 7832.966 | 24.726 | 590.6 | 5.906 | 0 |
| 100 | 4 | 11006.81 | 32.14 | 454.8 | 4.548 | 0 |
| 100 | 5 | 235.316 | 1.536 | 400 | 4 | 0 |
| 100 | 6 | 290.66 | 1.78 | 300 | 3 | 0 |
| 100 | 7 | 1053.738 | 4.066 | 270.2 | 2.702 | 0 |
| 100 | 8 | 196.108 | 1.544 | 200 | 2 | 0 |
| 100 | 9 | 80.628 | 1.016 | 200 | 2 | 0 |

***Bee Colony Optimization* – Problemas *Weighted***

Os parâmetros utilizados para a solução das 200 instâncias de problemas *weighted* com o BCO foram os seguintes:

* População: 40
* Iterações: 500
* *Select Size*: 20
* *Best Size*: 10
* *Select Value*: 30
* *Best Value*: 50
* *Change Value*: 5
* *Seeds*: todos os valores pares entre 2 e 100

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 13 – Resultados dos problemas *weighted* com *Bee Colony Optimization*

| Size | Problem | Time(ms) | Generations | Fitness | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 1 | 2640.256 | 36.396 | 2984.4 | 11.094 | 0 |
| 40 | 3 | 468.35 | 6.146 | 1060 | 4.714 | 0 |
| 40 | 5 | 319.794 | 4.21 | 670 | 3.022 | 0 |
| 40 | 7 | 63.806 | 1.16 | 470 | 2.132 | 0 |
| 40 | 9 | 46.198 | 1.004 | 400 | 2 | 0 |
| 60 | 1 | 12428.27 | 105.646 | 2936.4 | 11.756 | 0 |
| 60 | 3 | 9988.838 | 74.946 | 1141.6 | 5.202 | 0 |
| 60 | 5 | 973.772 | 7.702 | 741.2 | 3.502 | 0 |
| 60 | 7 | 351.09 | 3.044 | 520 | 2.376 | 0 |
| 60 | 9 | 63.964 | 1.076 | 400 | 2 | 0 |
| 80 | 1 | 26007.45 | 163.724 | 3275 | 13.256 | 0 |
| 80 | 3 | 16247.17 | 90.898 | 1274.8 | 5.896 | 0 |
| 80 | 5 | 2714.716 | 14.65 | 782.2 | 3.822 | 0 |
| 80 | 7 | 234.65 | 2.072 | 600 | 2.986 | 0 |
| 80 | 9 | 75.51807 | 1.15662651 | 400 | 2 | 0 |
| 100 | 1 | 43405.91 | 195.014 | 3382.8 | 13.958 | 0 |
| 100 | 3 | 22089.21 | 87.392 | 1337 | 6.17 | 0 |
| 100 | 5 | 8551.19 | 30.878 | 803 | 4 | 0 |
| 100 | 7 | 431.136 | 2.822 | 590 | 2.9 | 0 |
| 100 | 9 | 183.85 | 1.806 | 400 | 2 | 0 |

*Ant Colony Optimization* – Problemas *Random*

Os parâmetros utilizados para a solução das 280 instâncias de problemas *random* com o ACO foram os seguintes:

* População: 50
* Iterações: 500
* *Q probability*: 80%
* *Q*: 35
* Modificações: 5
* Evaporação: 50%
* Influência: 60%
* *Seeds*: todos os valores pares entre 2 e 100

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 14 - Resultado dos problemas *random* com *Ant Colony Optimization*

| Size | Problem | Time(ms) | Fitness | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 1 | 333.744 | 1086.6 | 10.866 | 0 |
| 40 | 2 | 281.076 | 609.6 | 6.096 | 0 |
| 40 | 3 | 185.372 | 462.2 | 4.622 | 0 |
| 40 | 4 | 144.216 | 388.4 | 3.884 | 0 |
| 40 | 5 | 161.458 | 305.8 | 3.058 | 0 |
| 40 | 6 | 30.084 | 300 | 3 | 0 |
| 40 | 7 | 167.38 | 223 | 2.23 | 0 |
| 40 | 8 | 29.3 | 200 | 2 | 0 |
| 40 | 9 | 29.818 | 200 | 2 | 0 |
| 60 | 1 | 3084.79 | 1148.4 | 11.484 | 0 |
| 60 | 2 | 1875.224 | 723.2 | 7.232 | 0 |
| 60 | 3 | 2544.218 | 517 | 5.17 | 0 |
| 60 | 4 | 1773.312 | 420.4 | 4.204 | 0 |
| 60 | 5 | 615.534 | 389.8 | 3.898 | 0 |
| 60 | 6 | 480.096 | 300 | 3 | 0 |
| 60 | 7 | 456.34 | 270.2 | 2.702 | 0 |
| 60 | 8 | 81.824 | 200 | 2 | 0 |
| 60 | 9 | 69.808 | 200 | 2 | 0 |
| 80 | 1 | 12194 | 1305.4 | 13.054 | 0 |
| 80 | 2 | 8363.872 | 794.8 | 7.948 | 0 |
| 80 | 3 | 5766.328 | 587 | 5.87 | 0 |
| 80 | 4 | 1081.952 | 488.4 | 4.884 | 0 |
| 80 | 5 | 761.77 | 398.8 | 3.988 | 0 |
| 80 | 6 | 2385.32 | 310 | 3.1 | 0 |
| 80 | 7 | 209.47 | 298.4 | 2.984 | 0 |
| 80 | 8 | 416.756 | 202.8 | 2.028 | 0 |
| 80 | 9 | 141.3273 | 200 | 2 | 0 |
| 100 | 1 | 24488.22 | 1406.4 | 14.064 | 0 |
| 100 | 2 | 22391.71 | 880.4 | 8.804 | 0 |
| 100 | 3 | 15933.47 | 656.8 | 6.568 | 0 |
| 100 | 4 | 15057.92 | 506 | 5.06 | 0 |
| 100 | 5 | 4741.38 | 409 | 4.09 | 0 |
| 100 | 6 | 4150.104 | 347.6 | 3.476 | 0 |
| 100 | 7 | 373.662 | 299.4 | 2.994 | 0 |
| 100 | 8 | 1423.48 | 252 | 2.52 | 0 |
| 100 | 9 | 265.686 | 200 | 2 | 0 |

*Ant Colony Optimization* – Problemas *Weighted*

Os parâmetros utilizados para a solução das 200 instâncias de problemas *weighted* com o ACO foram os seguintes:

* População: 50
* Iterações: 500
* *Q probability*: 80%
* *Q*: 35
* Modificações: 5
* Evaporação: 50%
* Influência: 60%
* *Seeds*: todos os valores pares entre 2 e 100

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 15 - Resultados dos problemas *weighted* com *Ant Colony Optimization*

| Size | Problem | Time(ms) | Fitness | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 40 | 1 | 1682.534 | 3012.4 | 11.132 | 0 |
| 40 | 3 | 683.708 | 1083 | 4.708 | 0 |
| 40 | 5 | 970.106 | 781 | 3.384 | 0 |
| 40 | 7 | 259.832 | 544 | 2.532 | 0 |
| 40 | 9 | 147.856 | 406.2 | 2 | 0 |
| 60 | 1 | 8609.668 | 3055.2 | 11.77 | 0 |
| 60 | 3 | 7654.778 | 1281.4 | 5.46 | 0 |
| 60 | 5 | 6795.852 | 882.6 | 3.938 | 0 |
| 60 | 7 | 3320.496 | 603.2 | 2.86 | 0 |
| 60 | 9 | 1522.784 | 422.2 | 2 | 0 |
| 80 | 1 | 19679.34 | 3640.8 | 13.646 | 0 |
| 80 | 3 | 23094.08 | 1468.6 | 6.074 | 0 |
| 80 | 5 | 15789.94 | 939 | 4.034 | 0 |
| 80 | 7 | 5147.544 | 650.6 | 3 | 0 |
| 80 | 9 | 1583.245 | 435.94 | 2 | 0 |
| 100 | 1 | 40550.72 | 3911.1 | 14.66003976 | 0 |
| 100 | 3 | 55088.56 | 1655.8 | 6.702 | 0 |
| 100 | 5 | 30588.99 | 1042.4 | 4.232 | 0 |
| 100 | 7 | 9464.18 | 678.6 | 3.002 | 0 |
| 100 | 9 | 1140.922 | 421.8 | 2 | 0 |

* 1. Comparação dos algoritmos implementados

As comparações entre os diferentes algoritmos podem ser observadas na Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18.

Tabela 16 - Resultados dos diferentes algoritmos para os diferentes tamanhos de problemas

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Custom Algorithm | | Genetic Algorithm | | Bee Colony Optimization | | Ant Colony Optimization | |
| Size | Time(ms) | Fitness | Time(ms) | Fitness | Time(ms) | Fitness | Time(ms) | Fitness |
| 40 | **70.99** | 673.03 | 313.87 | 683.89 | 609.40 | **664.17** | 364.75 | 685.87 |
| 60 | **221.23** | 708.76 | 766.58 | 741.39 | 3072.22 | **693.20** | 2777.48 | 743.83 |
| 80 | **332.52** | 775.53 | 1327.23 | 818.03 | 8356.28 | **758.46** | 6901.07 | 837.18 |
| 100 | **550.52** | 798.66 | 2419.24 | 865.83 | 10973.61 | **790.39** | 16118.50 | 904.81 |

Tabela 17 - Médias dos resultados dos diferentes algoritmos

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Algoritmo | Time(ms) | Generations | Fitness | Regenerators |
| Bee Colony Optimization | 5752.878 | 28.5210469 | **726.554** | **4.820928571** |
| Custom Algorithm | **293.8151** | **25.4490443** | 738.993 | 4.918928571 |
| Ant Colony Optimization | 6540.449 | 53.3997277 | 792.923 | 5.071643567 |
| Algoritmo Genético | 1206.73 | 61.8131388 | 777.282 | 5.187857143 |

Tabela 18 - Valor de tempo vezes *fitness* para os diferentes algoritmos

|  |  |
| --- | --- |
| Algoritmo | Tempo \* Fitness |
| Custom Algorithm | **2.17E+05** |
| Genetic Algorithm | 9.38E+05 |
| Bee Colony Optimization | 4.18E+06 |
| Ant Colony Optimization | 5.19E+06 |

O algoritmo que apresenta os melhores resultados em termos de qualidade da solução obtida é o algoritmo *Bee Colony Optimization*. O algoritmo que apresenta resultados no menor espaço de tempo é o *Custom Algorithm*. O algoritmo que apresenta resultados com o melhor valor é o *Custom Algorithm*.

Nem todos os algoritmos são apropriados para a solução do PLR. O BCO obtém os melhores resultados, mas para problemas de grande dimensão o tempo de execução é excessivo. Aconselhamos neste caso a utilização do CA, pois permite obter boas soluções num tempo bastante razoável.

Com mais otimização (melhores adaptações ao código e aos algoritmos) pensamos que será possível melhorar os resultados obtidos e também reduzir o tempo de execução. Podemos também referir que o AG e o ACO não produziam bons resultados na sua forma básica, pelo que foram combinados com algoritmos de busca local que estão adaptados ao problema. Estes algoritmos de busca local permitem obter melhores soluções mais rapidamente, mas por outro lado influenciam o tempo de execução dos algoritmos. Pensamos que com pequenas alterações nestes algoritmos de busca local ainda se podem obter melhores resultados.

Com a utilização de mais iterações será também possível obter melhores soluções, pois nem sempre é encontrada a solução ótima no número de iterações especificado.

* 1. Síntese

Com a ferramenta *RapidMiner*, foi possível concentrar a informação obtida da execução de problemas no programa desenvolvido, de forma a ser mais fácil tirar conclusões dos dados alcançados. A grande quantidade de dados em bruto recolhida permitiu, após o seu tratamento, obter informação importante sobre o desempenho dos diferentes algoritmos.

1. - Conclusão

Este capítulo apresenta uma conclusão do trabalho desenvolvido (secção 6.1) e aponta futuras direções para trabalho futuro (secção 6.2).

* 1. Considerações finais

Este projeto focou-se na resolução do problema de localização de regeneradores. Foram utilizados vários algoritmos de inteligência artificial: dois algoritmos evolutivos (CA e AG) e dois algoritmos de *swarm intellligence* (ACO e BCO).

Os resultados mostram que o melhor algoritmo depende dos critérios em que baseamos a nossa análise (tempo e qualidade das soluções). Contudo, o melhor em termos de *fitness* e consequentemente menos uso de regeneradores é o BCO. Os restantes algoritmos também se provaram eficientes no alcance de boas soluções, mas nenhum demonstra tão bons resultados em termos de qualidade de soluções. Em termos de tempo e alcance da melhor solução em menor tempo, o melhor algoritmo é o CA. Ao longo de todo este projeto corremos vários testes que apoiam estas afirmações, estando estes presentes neste relatório.

Durante este projeto trabalhámos pela primeira vez com algoritmos de *swarm intelligence*, que são bastante mais complexos e difíceis de implementar quando comparados com os restantes algoritmos implementados (ambos evolutivos). De início, sentimos dificuldades com as implementações do ACO e do BCO, tendo sido necessário um extenso estudo do seu funcionamento. No entanto, o esforço e a persistência permitiram-nos compreender o funcionamento destes algoritmos, o que levou ao sucesso das suas implementações e, consequentemente, ao sucesso deste projeto. Destacamos que o BCO foi o que permitiu obter os melhores resultados.

Este trabalho foi um desafio para nós, pois durante a nossa licenciatura em Engenharia Informática não tinha ainda surgido a oportunidade de lidarmos com determinados aspetos importantes para este projeto. Com efeito, este foi o nosso primeiro contacto com algoritmos do tipo *Swarm Intelligence* mas, não obstante, conseguimos aplicá-los com sucesso e alcançar bons resultados. Ao longo do nosso percurso académico não tínhamos ainda abordado C++, pelo que tivemos de aprender a linguagem para este projeto, de modo a alcançar a melhor *performance* possível. Também não estávamos familiarizados com a plataforma *Qt*, que foi a base do nosso trabalho.

A unidade curricular de Projeto Informático foi, por isso, essencial para a nossa formação académica e para a aprendizagem de competências técnicas, teóricas e práticas, de gestão de projeto e colaboração em equipa.

Finalizado o projeto e o presente relatório, que aborda todo o processo prático de desenvolvimento da atividade, bem como os conhecimentos teóricos que lhe serviram de base, podemos concluir que, apesar dos constrangimentos mencionados, o projeto foi um êxito, dado que fomos capazes de cumprir todos os requisitos, obtendo boas soluções e implementando com sucesso os vários algoritmos de inteligência artificial. Tendo em conta todo o processo de elaboração do trabalho desenvolvido nesta unidade curricular, consideramos essencial destacar alguns aspetos mais relevantes para a nossa formação, nomeadamente a importância da aplicação prática dos conhecimentos previamente adquiridos, a aprendizagem de novos conhecimentos e ainda o desenvolvimento de competências de relacionamento interpessoal e colaborativo, que garantiram uma gestão eficaz do projeto.

* 1. Trabalho futuro

Devido ao êxito deste trabalho, é equacionada a possibilidade da sua continuação. Um possível futuro projeto seria a criação de uma aplicação que mapeasse redes de fibra ótica do mundo real para o formato aceite pela nossa aplicação, possibilitando, deste modo, a utilização do nosso programa em problemas do mundo real. Poderíamos também fazer evoluir a nossa aplicação para que se torne apta a resolver mais problemas, em menos tempo, com mais algoritmos, com a obtenção do *hardware* necessário.

O uso ideal da nossa aplicação seria ao nível do planeamento da rede de fibra ótica, antes mesmo de esta ser instalada. Ou seja, o engenheiro responsável por determinar o mapeamento no mundo real leria o seu planeamento com o nosso *software*. Deste modo, poderá estimar de forma realista os custos, evitando gastos inesperados resultantes de queixas de clientes do serviço por falta de qualidade.

Dado o tempo que nos foi disponibilizado para concluir este projeto, não foi possível fazer estudos comparativos com resoluções do PLR já existentes na literatura. De modo a complementar o trabalho já implementado por nós teríamos de realizar este estudo comparativo, pois iria fornecer uma base para a avaliação da qualidade da nossa resolução e poderia até mesmo possibilitar o melhoramento da nossa implementação.

* 1. Síntese

Todo este projeto foi um grande, mas bem-sucedido desafio. Apesar de, inicialmente, desconhecermos a linguagem e alguns aspetos importantes, conseguimos superar essas dificuldades. Foi, na totalidade, uma experiência muito positiva, pois tivemos não só a oportunidade de lidar com um problema real e atual, como ainda foi possível trabalhar na área de Inteligência Artificial, pela qual ambos temos interesse. Sentimos que contribuímos positivamente para a resolução do PLR e que nos desenvolvemos como estudantes de informática, tendo expandido o nosso conhecimento e as nossas competências na área da Inteligência Artificial.

# Bibliografia

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | L. Columbus, “10 charts that will change your perspective on artificial intelligence's growth,” 12 Jan 2018. [Online]. Available: https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2018/01/12/10-charts-that-will-change-your-perspective-on-artificial-intelligences-growth/#4fe383f94758. |
| [2] | Si Chen, Ivana Ljubic e S. Raghvan, “The regenerator location problem,” *Networks 55(3),* pp. 205-220, 2010. |
| [3] | S. Chen, I. Ljubic e S. Raghvan, “The regenerator location problem,” [Online]. Available: http://homepage.univie.ac.at/ivana.ljubic/research/rlp/. |
| [4] | T. Bäck, Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms, Oxford University Press, 1996. |
| [5] | J. Brownlee, Clever Algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes, 2011. |
| [6] | T. Q. Company, “Qt Documentation,” [Online]. Available: http://doc.qt.io/. |
| [7] | Boynux, “Iterative and Flow model what to choose,” 06 May 2015. [Online]. Available: https://www.boynux.com/iterative-and-flow-model-what-to-choose/. |
| [8] | A. M. Bernardino, “Algoritmos Heurísticos para Equilibrio de Carga en Anillos Bidireccionales (Heuristic algortihms for load balancing in bidirectional rings),” 2012. |
| [9] | M. Dorigo, “Ant Colony Optimization,” [Online]. Available: http://www.aco-metaheuristic.org/index.html. |
| [10] | P. DT, G. A, K. E, O. S, R. S e Z. M, “The Bees Algorithm,” pp. Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK, 2005. |







Anexos

Resultados dos testes

Tabela 19 - Resultados dos testes do Custom Algorithm

| Elitism | Mutation | Time(ms) | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 20 | 5 | 320.8889 | 4.666666667 | 0 |
| 30 | 7 | 410.1389 | 4.666666667 | 0 |
| 20 | 9 | 180.25 | 4.694444444 | 0 |
| 30 | 6 | 217.9722 | 4.694444444 | 0 |
| 25 | 4 | 228.8056 | 4.694444444 | 0 |
| 35 | 6 | 291.0556 | 4.694444444 | 0 |
| 45 | 8 | 318.6389 | 4.694444444 | 0 |
| 50 | 6 | 398.6111 | 4.694444444 | 0 |
| 45 | 6 | 428.7222 | 4.694444444 | 0 |
| 45 | 5 | 406.5556 | 4.694444444 | 0 |
| 45 | 9 | 421.9167 | 4.694444444 | 0 |
| 15 | 4 | 137.9722 | 4.722222222 | 0 |
| 10 | 8 | 190.5556 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 5 | 223.9722 | 4.722222222 | 0 |
| 25 | 8 | 238.3611 | 4.722222222 | 0 |
| 15 | 10 | 298.2778 | 4.722222222 | 0 |
| 35 | 9 | 275.9167 | 4.722222222 | 0 |
| 25 | 9 | 305 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 1 | 284.0833 | 4.722222222 | 0 |
| 15 | 6 | 298.6389 | 4.722222222 | 0 |
| 45 | 3 | 318.3611 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 10 | 323.5833 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 8 | 333.6667 | 4.722222222 | 0 |
| 35 | 2 | 318.8889 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 3 | 361.25 | 4.722222222 | 0 |
| 45 | 10 | 346.3333 | 4.722222222 | 0 |
| 25 | 3 | 333.7778 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 8 | 379.5278 | 4.722222222 | 0 |
| 45 | 4 | 386.5833 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 4 | 411.0556 | 4.722222222 | 0 |
| 25 | 1 | 414.5833 | 4.722222222 | 0 |
| 15 | 7 | 408.0833 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 9 | 432.9167 | 4.722222222 | 0 |
| 45 | 2 | 341.1667 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 10 | 423.25 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 10 | 441.3333 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 5 | 482.6389 | 4.722222222 | 0 |
| 10 | 2 | 106.8889 | 4.75 | 0 |
| 10 | 1 | 189.7778 | 4.75 | 0 |
| 10 | 5 | 185 | 4.75 | 0 |
| 20 | 4 | 196.6389 | 4.75 | 0 |
| 30 | 2 | 183.6111 | 4.75 | 0 |
| 15 | 8 | 196 | 4.75 | 0 |
| 15 | 5 | 230.9444 | 4.75 | 0 |
| 35 | 5 | 212.3333 | 4.75 | 0 |
| 15 | 2 | 205.3611 | 4.75 | 0 |
| 25 | 10 | 232.3056 | 4.75 | 0 |
| 35 | 3 | 229.2778 | 4.75 | 0 |
| 5 | 5 | 274.7778 | 4.75 | 0 |
| 40 | 2 | 248.5833 | 4.75 | 0 |
| 50 | 5 | 240.25 | 4.75 | 0 |
| 50 | 2 | 247.4444 | 4.75 | 0 |
| 50 | 4 | 272.3333 | 4.75 | 0 |
| 40 | 9 | 281.75 | 4.75 | 0 |
| 35 | 1 | 292.1389 | 4.75 | 0 |
| 35 | 4 | 273.5 | 4.75 | 0 |
| 20 | 3 | 303.3333 | 4.75 | 0 |
| 30 | 3 | 340.25 | 4.75 | 0 |
| 40 | 7 | 309.6111 | 4.75 | 0 |
| 20 | 7 | 345.5278 | 4.75 | 0 |
| 45 | 1 | 320.3889 | 4.75 | 0 |
| 40 | 6 | 404.1111 | 4.75 | 0 |
| 40 | 3 | 419.8611 | 4.75 | 0 |
| 50 | 8 | 425.8056 | 4.75 | 0 |
| 45 | 7 | 429.3611 | 4.75 | 0 |
| 50 | 7 | 480.0833 | 4.75 | 0 |
| 5 | 2 | 150.6389 | 4.777777778 | 0 |
| 25 | 2 | 163.7222 | 4.777777778 | 0 |
| 30 | 1 | 173.6111 | 4.777777778 | 0 |
| 30 | 4 | 183.1667 | 4.777777778 | 0 |
| 5 | 3 | 226.6667 | 4.777777778 | 0 |
| 20 | 6 | 201.1944 | 4.777777778 | 0 |
| 10 | 9 | 215.6389 | 4.777777778 | 0 |
| 20 | 1 | 222.6389 | 4.777777778 | 0 |
| 20 | 8 | 241.1111 | 4.777777778 | 0 |
| 5 | 6 | 267.5556 | 4.777777778 | 0 |
| 25 | 7 | 233.7222 | 4.777777778 | 0 |
| 20 | 10 | 240.3611 | 4.777777778 | 0 |
| 5 | 4 | 271.6667 | 4.777777778 | 0 |
| 50 | 9 | 279.8611 | 4.777777778 | 0 |
| 35 | 7 | 316.1111 | 4.777777778 | 0 |
| 40 | 1 | 345.0556 | 4.777777778 | 0 |
| 35 | 10 | 363.1389 | 4.777777778 | 0 |
| 10 | 6 | 396.4722 | 4.777777778 | 0 |
| 10 | 10 | 426.2222 | 4.777777778 | 0 |
| 20 | 2 | 141.5278 | 4.805555556 | 0 |
| 15 | 1 | 137.75 | 4.805555556 | 0 |
| 5 | 7 | 149.9167 | 4.805555556 | 0 |
| 10 | 7 | 192.9444 | 4.805555556 | 0 |
| 15 | 9 | 216.2222 | 4.805555556 | 0 |
| 25 | 5 | 213.9722 | 4.805555556 | 0 |
| 10 | 4 | 241.3056 | 4.805555556 | 0 |
| 25 | 6 | 247.0278 | 4.805555556 | 0 |
| 15 | 3 | 228.3056 | 4.805555556 | 0 |
| 35 | 8 | 339.8056 | 4.805555556 | 0 |
| 5 | 9 | 387.5556 | 4.805555556 | 0 |
| 5 | 1 | 106.2222 | 4.833333333 | 0 |
| 10 | 3 | 108.5 | 4.833333333 | 0 |
| 5 | 8 | 284.7222 | 4.833333333 | 0 |
| 5 | 10 | 228.9167 | 4.861111111 | 0 |

Tabela 20 - Resultados dos testes do Algoritmo Genético

| Elitism | Mutation | Recombination | Tournament | Time(ms) | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 10 | 30 | 60 | 10 | 2540.639 | 4.888888889 | 0 |
| 10 | 30 | 80 | 10 | 2544.917 | 4.888888889 | 0 |
| 20 | 20 | 40 | 10 | 4128.361 | 4.888888889 | 0 |
| 15 | 30 | 60 | 10 | 2995.306 | 4.916666667 | 0 |
| 15 | 30 | 80 | 10 | 2578.472 | 4.916666667 | 0 |
| 20 | 30 | 60 | 6 | 2646.944 | 4.916666667 | 0 |
| 20 | 30 | 80 | 6 | 2636.361 | 4.916666667 | 0 |
| 20 | 30 | 60 | 8 | 3364.694 | 4.916666667 | 0 |
| 20 | 30 | 80 | 8 | 3297.611 | 4.916666667 | 0 |
| 15 | 20 | 40 | 6 | 4313.833 | 4.916666667 | 0 |
| 15 | 20 | 40 | 4 | 5665.083 | 4.916666667 | 0 |
| 15 | 30 | 60 | 8 | 2599.361 | 4.944444444 | 0 |
| 15 | 30 | 80 | 8 | 2739.611 | 4.944444444 | 0 |
| 15 | 30 | 60 | 6 | 2973.083 | 4.944444444 | 0 |
| 15 | 30 | 80 | 6 | 2821.778 | 4.944444444 | 0 |
| 20 | 20 | 40 | 8 | 4170.75 | 4.944444444 | 0 |
| 20 | 20 | 60 | 10 | 4557.5 | 4.944444444 | 0 |
| 20 | 20 | 80 | 10 | 4548.111 | 4.944444444 | 0 |
| 10 | 20 | 60 | 4 | 5386.75 | 4.944444444 | 0 |
| 10 | 20 | 80 | 4 | 5270.306 | 4.944444444 | 0 |
| 15 | 30 | 40 | 6 | 1713.722 | 4.972222222 | 0 |
| 20 | 40 | 40 | 10 | 1536 | 4.972222222 | 0 |
| 10 | 30 | 40 | 8 | 1965.194 | 4.972222222 | 0 |
| 10 | 30 | 60 | 4 | 2354.806 | 4.972222222 | 0 |
| 10 | 30 | 80 | 4 | 2387.556 | 4.972222222 | 0 |
| 10 | 20 | 40 | 10 | 4016.167 | 4.972222222 | 0 |
| 15 | 30 | 60 | 4 | 3557.417 | 4.972222222 | 0 |
| 15 | 30 | 80 | 4 | 4284.722 | 4.972222222 | 0 |
| 5 | 30 | 40 | 8 | 3816.083 | 4.972222222 | 0 |
| 20 | 20 | 60 | 8 | 4259.889 | 4.972222222 | 0 |
| 20 | 20 | 80 | 8 | 4310.75 | 4.972222222 | 0 |
| 20 | 30 | 40 | 10 | 1728.167 | 5 | 0 |
| 15 | 30 | 40 | 10 | 2030.083 | 5 | 0 |
| 20 | 30 | 60 | 4 | 2155.028 | 5 | 0 |
| 20 | 30 | 80 | 4 | 2156.167 | 5 | 0 |
| 20 | 40 | 40 | 8 | 2356.111 | 5 | 0 |
| 20 | 40 | 40 | 4 | 2112.472 | 5 | 0 |
| 15 | 30 | 40 | 8 | 3214.167 | 5 | 0 |
| 20 | 30 | 40 | 6 | 2491.222 | 5 | 0 |
| 20 | 30 | 60 | 2 | 2494.056 | 5 | 0 |
| 20 | 30 | 80 | 2 | 2500.083 | 5 | 0 |
| 5 | 30 | 60 | 4 | 2538.917 | 5 | 0 |
| 5 | 30 | 80 | 4 | 2631.083 | 5 | 0 |
| 20 | 30 | 40 | 4 | 3178.028 | 5 | 0 |
| 10 | 40 | 60 | 2 | 3024.639 | 5 | 0 |
| 10 | 40 | 80 | 2 | 3140.083 | 5 | 0 |
| 15 | 20 | 60 | 8 | 2929.278 | 5 | 0 |
| 15 | 20 | 80 | 8 | 3017.028 | 5 | 0 |
| 10 | 20 | 40 | 8 | 3893.139 | 5 | 0 |
| 10 | 20 | 60 | 6 | 3676.917 | 5 | 0 |
| 10 | 20 | 80 | 6 | 3509.5 | 5 | 0 |
| 20 | 20 | 60 | 6 | 3899.861 | 5 | 0 |
| 20 | 20 | 80 | 6 | 4010.056 | 5 | 0 |
| 10 | 30 | 40 | 2 | 3312.583 | 5 | 0 |
| 10 | 20 | 60 | 10 | 4010.667 | 5 | 0 |
| 10 | 20 | 80 | 10 | 3969.417 | 5 | 0 |
| 10 | 20 | 40 | 6 | 4326.889 | 5 | 0 |
| 20 | 30 | 40 | 2 | 3799.083 | 5 | 0 |
| 15 | 20 | 60 | 4 | 4499.722 | 5 | 0 |
| 15 | 20 | 80 | 4 | 4413.028 | 5 | 0 |
| 20 | 20 | 40 | 4 | 4680.5 | 5 | 0 |
| 20 | 20 | 40 | 2 | 6056.278 | 5 | 0 |
| 10 | 40 | 40 | 8 | 1546.944 | 5.027777778 | 0 |
| 10 | 40 | 60 | 8 | 2238.528 | 5.027777778 | 0 |
| 10 | 40 | 80 | 8 | 2328.083 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 30 | 40 | 8 | 2190.889 | 5.027777778 | 0 |
| 10 | 40 | 60 | 6 | 2168.111 | 5.027777778 | 0 |
| 10 | 40 | 80 | 6 | 2262.861 | 5.027777778 | 0 |
| 10 | 30 | 60 | 8 | 1964.167 | 5.027777778 | 0 |
| 10 | 30 | 80 | 8 | 1941.861 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 40 | 40 | 6 | 2478.25 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 40 | 40 | 6 | 2143.667 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 40 | 60 | 8 | 2621.389 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 40 | 80 | 8 | 2661.944 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 40 | 60 | 2 | 2274.611 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 40 | 80 | 2 | 2222.306 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 20 | 40 | 10 | 3126.278 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 20 | 60 | 10 | 2900.944 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 20 | 80 | 10 | 2931.25 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 40 | 40 | 2 | 2694.083 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 40 | 60 | 4 | 2774 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 40 | 80 | 4 | 2743.556 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 20 | 60 | 6 | 3793.25 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 20 | 80 | 6 | 3938.722 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 20 | 40 | 6 | 4181.194 | 5.027777778 | 0 |
| 15 | 20 | 40 | 8 | 4576.972 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 20 | 60 | 2 | 5745.167 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 20 | 80 | 2 | 5829.694 | 5.027777778 | 0 |
| 20 | 40 | 60 | 6 | 1832.25 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 40 | 80 | 6 | 1678.056 | 5.055555556 | 0 |
| 10 | 40 | 60 | 10 | 1759.833 | 5.055555556 | 0 |
| 10 | 40 | 80 | 10 | 1815.972 | 5.055555556 | 0 |
| 5 | 30 | 40 | 10 | 1696.167 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 30 | 60 | 10 | 1585 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 30 | 80 | 10 | 1581.889 | 5.055555556 | 0 |
| 5 | 40 | 40 | 8 | 1940.75 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 40 | 60 | 8 | 2025.528 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 40 | 80 | 8 | 1956.667 | 5.055555556 | 0 |
| 5 | 30 | 60 | 8 | 1785.806 | 5.055555556 | 0 |
| 5 | 30 | 80 | 8 | 2088.833 | 5.055555556 | 0 |
| 10 | 40 | 40 | 4 | 1875.472 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 40 | 60 | 10 | 2166.861 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 40 | 80 | 10 | 2078.528 | 5.055555556 | 0 |
| 15 | 40 | 60 | 2 | 2017.75 | 5.055555556 | 0 |
| 15 | 40 | 80 | 2 | 2037.556 | 5.055555556 | 0 |
| 10 | 30 | 40 | 4 | 2511.194 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 20 | 60 | 4 | 4410.528 | 5.055555556 | 0 |
| 20 | 20 | 80 | 4 | 4446.333 | 5.055555556 | 0 |
| 10 | 20 | 40 | 4 | 4681.917 | 5.055555556 | 0 |
| 10 | 20 | 40 | 2 | 5435.278 | 5.055555556 | 0 |
| 10 | 20 | 60 | 2 | 5673.333 | 5.055555556 | 0 |
| 10 | 20 | 80 | 2 | 5380.611 | 5.055555556 | 0 |
| 15 | 20 | 60 | 2 | 5545.806 | 5.055555556 | 0 |
| 15 | 20 | 80 | 2 | 5654.806 | 5.055555556 | 0 |
| 5 | 40 | 40 | 10 | 1694.194 | 5.083333333 | 0 |
| 15 | 40 | 60 | 4 | 1749.528 | 5.083333333 | 0 |
| 15 | 40 | 80 | 4 | 1809.667 | 5.083333333 | 0 |
| 10 | 40 | 60 | 4 | 2297.722 | 5.083333333 | 0 |
| 10 | 40 | 80 | 4 | 2063.861 | 5.083333333 | 0 |
| 15 | 30 | 40 | 4 | 2150.028 | 5.083333333 | 0 |
| 10 | 40 | 40 | 6 | 2280.583 | 5.083333333 | 0 |
| 15 | 30 | 60 | 2 | 2383.472 | 5.083333333 | 0 |
| 15 | 30 | 80 | 2 | 2664.111 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 40 | 60 | 8 | 2947.278 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 40 | 80 | 8 | 2802.194 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 30 | 60 | 6 | 2994.028 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 30 | 80 | 6 | 3094.972 | 5.083333333 | 0 |
| 10 | 30 | 60 | 2 | 2744.889 | 5.083333333 | 0 |
| 10 | 30 | 80 | 2 | 2738.167 | 5.083333333 | 0 |
| 10 | 40 | 40 | 2 | 2951.889 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 30 | 60 | 2 | 2920.833 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 30 | 80 | 2 | 2884.278 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 20 | 60 | 10 | 3732.583 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 20 | 80 | 10 | 3765.611 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 20 | 40 | 6 | 4188.444 | 5.083333333 | 0 |
| 5 | 40 | 60 | 10 | 1508.417 | 5.111111111 | 0 |
| 5 | 40 | 80 | 10 | 1495.667 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 40 | 40 | 4 | 1334.944 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 40 | 60 | 10 | 1967 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 40 | 80 | 10 | 1932.222 | 5.111111111 | 0 |
| 10 | 30 | 40 | 10 | 1474.056 | 5.111111111 | 0 |
| 10 | 40 | 40 | 10 | 1700.944 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 40 | 60 | 6 | 1540 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 40 | 80 | 6 | 1553.361 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 40 | 40 | 8 | 2247.111 | 5.111111111 | 0 |
| 5 | 30 | 40 | 6 | 2759.611 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 30 | 40 | 2 | 2466.028 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 20 | 40 | 2 | 5764.028 | 5.111111111 | 0 |
| 15 | 40 | 40 | 10 | 1423.528 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 40 | 40 | 4 | 1663.417 | 5.138888889 | 0 |
| 10 | 30 | 40 | 6 | 1973.306 | 5.138888889 | 0 |
| 15 | 40 | 40 | 2 | 2129.417 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 30 | 60 | 10 | 2351.083 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 30 | 80 | 10 | 2368.889 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 40 | 40 | 6 | 3095.472 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 30 | 40 | 4 | 3272.222 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 20 | 60 | 6 | 3956.306 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 20 | 80 | 6 | 4381.472 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 20 | 40 | 8 | 4077.417 | 5.138888889 | 0 |
| 5 | 20 | 40 | 4 | 4947.944 | 5.138888889 | 0 |
| 10 | 30 | 60 | 6 | 1978.25 | 5.166666667 | 0 |
| 10 | 30 | 80 | 6 | 1955.944 | 5.166666667 | 0 |
| 10 | 20 | 60 | 8 | 2820.417 | 5.166666667 | 0 |
| 10 | 20 | 80 | 8 | 2731.75 | 5.166666667 | 0 |
| 5 | 40 | 60 | 6 | 1891.778 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 40 | 80 | 6 | 2073.028 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 40 | 60 | 2 | 1903.056 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 40 | 80 | 2 | 2176.333 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 40 | 60 | 4 | 2443.333 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 40 | 80 | 4 | 2696.694 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 20 | 40 | 10 | 2915.417 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 20 | 60 | 8 | 3899 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 20 | 80 | 8 | 4260.25 | 5.194444444 | 0 |
| 5 | 20 | 60 | 4 | 3666.611 | 5.222222222 | 0 |
| 5 | 20 | 80 | 4 | 4346.278 | 5.222222222 | 0 |
| 5 | 20 | 40 | 2 | 5482.861 | 5.25 | 0 |
| 5 | 30 | 40 | 2 | 3642.833 | 5.277777778 | 0 |
| 5 | 20 | 60 | 2 | 5146.75 | 5.305555556 | 0 |
| 5 | 20 | 80 | 2 | 6178.25 | 5.305555556 | 0 |
| 5 | 40 | 40 | 2 | 3169.194 | 5.333333333 | 0 |

Tabela 21 - Resultados dos testes do Bee Colony Optimization

| Select | Best | Change | Time(ms) | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 30 | 50 | 5 | 3001.944 | 4.666666667 | 0 |
| 50 | 60 | 4 | 5773.667 | 4.666666667 | 0 |
| 40 | 50 | 5 | 5588.444 | 4.666666667 | 0 |
| 50 | 50 | 7 | 1860.083 | 4.694444444 | 0 |
| 30 | 60 | 6 | 1979.583 | 4.694444444 | 0 |
| 30 | 60 | 5 | 1464.861 | 4.694444444 | 0 |
| 30 | 60 | 7 | 3348.444 | 4.694444444 | 0 |
| 40 | 50 | 7 | 4141.361 | 4.694444444 | 0 |
| 40 | 40 | 7 | 3995.278 | 4.694444444 | 0 |
| 30 | 30 | 7 | 3807.472 | 4.694444444 | 0 |
| 20 | 50 | 5 | 2951.278 | 4.694444444 | 0 |
| 50 | 60 | 3 | 2696.028 | 4.694444444 | 0 |
| 20 | 50 | 4 | 2402.417 | 4.694444444 | 0 |
| 20 | 40 | 7 | 4162.917 | 4.694444444 | 0 |
| 50 | 50 | 6 | 7591.389 | 4.694444444 | 0 |
| 40 | 60 | 7 | 10289.81 | 4.694444444 | 0 |
| 30 | 40 | 3 | 2696 | 4.694444444 | 0 |
| 20 | 30 | 6 | 4722.583 | 4.694444444 | 0 |
| 50 | 40 | 6 | 8962.917 | 4.694444444 | 0 |
| 50 | 60 | 6 | 1481.194 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 60 | 5 | 1728.25 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 40 | 5 | 1372.389 | 4.722222222 | 0 |
| 20 | 60 | 5 | 1169.333 | 4.722222222 | 0 |
| 20 | 50 | 7 | 1787.694 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 50 | 5 | 1805.139 | 4.722222222 | 0 |
| 20 | 40 | 6 | 1430.611 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 50 | 4 | 1633.556 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 30 | 6 | 1972.889 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 40 | 3 | 1597.5 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 50 | 7 | 3887.694 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 50 | 6 | 3345.722 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 60 | 3 | 1650.611 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 30 | 4 | 1729.194 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 60 | 4 | 2543.028 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 40 | 7 | 3500.139 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 40 | 7 | 5211.333 | 4.722222222 | 0 |
| 20 | 60 | 6 | 3803.222 | 4.722222222 | 0 |
| 50 | 50 | 3 | 2337.806 | 4.722222222 | 0 |
| 20 | 30 | 5 | 2004.472 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 30 | 4 | 2062.139 | 4.722222222 | 0 |
| 30 | 30 | 5 | 2808.667 | 4.722222222 | 0 |
| 20 | 40 | 5 | 3211.972 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 60 | 6 | 9054.583 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 40 | 4 | 3307.167 | 4.722222222 | 0 |
| 40 | 30 | 7 | 626.9167 | 4.75 | 0 |
| 40 | 30 | 6 | 704.6111 | 4.75 | 0 |
| 50 | 30 | 6 | 1293.167 | 4.75 | 0 |
| 40 | 60 | 5 | 1198.25 | 4.75 | 0 |
| 20 | 60 | 7 | 1785.944 | 4.75 | 0 |
| 20 | 30 | 7 | 1244.222 | 4.75 | 0 |
| 50 | 30 | 3 | 901.5 | 4.75 | 0 |
| 40 | 40 | 3 | 1050 | 4.75 | 0 |
| 40 | 40 | 6 | 2600.972 | 4.75 | 0 |
| 30 | 50 | 6 | 2107.722 | 4.75 | 0 |
| 40 | 30 | 3 | 796.4167 | 4.75 | 0 |
| 20 | 50 | 6 | 1878.972 | 4.75 | 0 |
| 20 | 60 | 4 | 1402.722 | 4.75 | 0 |
| 40 | 40 | 5 | 1966.611 | 4.75 | 0 |
| 50 | 30 | 5 | 2263.083 | 4.75 | 0 |
| 20 | 40 | 3 | 825.0833 | 4.75 | 0 |
| 50 | 50 | 4 | 2438 | 4.75 | 0 |
| 50 | 60 | 7 | 4007.278 | 4.75 | 0 |
| 30 | 60 | 3 | 1226.833 | 4.75 | 0 |
| 20 | 60 | 3 | 1260.944 | 4.75 | 0 |
| 30 | 40 | 6 | 3481.222 | 4.75 | 0 |
| 30 | 40 | 5 | 2415.472 | 4.75 | 0 |
| 50 | 30 | 7 | 5058.556 | 4.75 | 0 |
| 40 | 60 | 4 | 2819.639 | 4.75 | 0 |
| 40 | 30 | 5 | 2837.25 | 4.75 | 0 |
| 30 | 40 | 4 | 2636.667 | 4.75 | 0 |
| 30 | 50 | 3 | 2039.139 | 4.75 | 0 |
| 20 | 30 | 4 | 2159.167 | 4.75 | 0 |
| 30 | 50 | 4 | 3914.444 | 4.75 | 0 |
| 30 | 30 | 3 | 795.6667 | 4.777777778 | 0 |
| 20 | 50 | 3 | 1008.222 | 4.777777778 | 0 |
| 40 | 50 | 3 | 1389.944 | 4.777777778 | 0 |
| 50 | 40 | 4 | 2287.472 | 4.777777778 | 0 |
| 20 | 30 | 3 | 1015.306 | 4.777777778 | 0 |
| 20 | 40 | 4 | 367.4722 | 4.805555556 | 0 |
| 50 | 30 | 4 | 1170.417 | 4.805555556 | 0 |

Tabela 22 - Resultados dos testes do Ant Colony Optimization

| Q probability | Modifications | Evaporation | Influence | Time(ms) | Regenerators | Disconnected |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 80 | 5 | 50 | 60 | 733.3889 | 4.861111111 | 0 |
| 60 | 5 | 50 | 80 | 1997.361 | 4.861111111 | 0 |
| 60 | 5 | 50 | 100 | 1999.028 | 4.861111111 | 0 |
| 80 | 5 | 50 | 80 | 1225.833 | 4.888888889 | 0 |
| 80 | 5 | 50 | 100 | 1230.194 | 4.888888889 | 0 |
| 60 | 5 | 50 | 60 | 2028.5 | 4.888888889 | 0 |
| 100 | 6 | 70 | 80 | 726.5833 | 4.916666667 | 0 |
| 100 | 6 | 70 | 60 | 728.4444 | 4.916666667 | 0 |
| 100 | 6 | 70 | 100 | 728.9167 | 4.916666667 | 0 |
| 100 | 5 | 50 | 60 | 939.7222 | 4.916666667 | 0 |
| 80 | 7 | 70 | 100 | 960.4444 | 4.916666667 | 0 |
| 60 | 5 | 30 | 60 | 1291.25 | 4.916666667 | 0 |
| 60 | 5 | 30 | 80 | 1294.222 | 4.916666667 | 0 |
| 60 | 5 | 30 | 100 | 1320.806 | 4.916666667 | 0 |
| 80 | 6 | 50 | 60 | 1759.639 | 4.916666667 | 0 |
| 80 | 6 | 50 | 80 | 1791.278 | 4.916666667 | 0 |
| 80 | 7 | 50 | 100 | 2139.083 | 4.916666667 | 0 |
| 80 | 5 | 30 | 100 | 728.1389 | 4.944444444 | 0 |
| 80 | 5 | 30 | 60 | 733.1389 | 4.944444444 | 0 |
| 80 | 5 | 30 | 80 | 741.1111 | 4.944444444 | 0 |
| 100 | 5 | 50 | 80 | 954.25 | 4.944444444 | 0 |
| 80 | 7 | 70 | 80 | 959.6389 | 4.944444444 | 0 |
| 100 | 5 | 50 | 100 | 961.0833 | 4.944444444 | 0 |
| 80 | 7 | 70 | 60 | 961.8889 | 4.944444444 | 0 |
| 60 | 6 | 50 | 100 | 1557.278 | 4.944444444 | 0 |
| 60 | 6 | 50 | 80 | 1568.861 | 4.944444444 | 0 |
| 60 | 6 | 50 | 60 | 1583.167 | 4.944444444 | 0 |
| 80 | 6 | 50 | 100 | 1798.306 | 4.944444444 | 0 |
| 80 | 7 | 50 | 80 | 2154.611 | 4.944444444 | 0 |
| 80 | 6 | 70 | 80 | 1036.139 | 4.972222222 | 0 |
| 80 | 6 | 70 | 100 | 1036.194 | 4.972222222 | 0 |
| 80 | 6 | 70 | 60 | 1046.861 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 70 | 100 | 1176.444 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 50 | 100 | 1176.5 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 30 | 60 | 1177.333 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 30 | 80 | 1177.611 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 30 | 100 | 1184 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 50 | 60 | 1187.194 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 70 | 80 | 1188.556 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 70 | 60 | 1190.528 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 7 | 50 | 80 | 1206.083 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 5 | 70 | 60 | 1329.861 | 4.972222222 | 0 |
| 100 | 6 | 50 | 60 | 1495.667 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 6 | 70 | 60 | 1499.722 | 4.972222222 | 0 |
| 100 | 7 | 50 | 100 | 1580.278 | 4.972222222 | 0 |
| 100 | 7 | 50 | 80 | 1624.361 | 4.972222222 | 0 |
| 80 | 7 | 50 | 60 | 2149.5 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 6 | 30 | 100 | 3834.361 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 6 | 30 | 60 | 3870.306 | 4.972222222 | 0 |
| 60 | 6 | 30 | 80 | 3898.5 | 4.972222222 | 0 |
| 80 | 7 | 30 | 80 | 953.4444 | 5 | 0 |
| 80 | 7 | 30 | 60 | 962.4167 | 5 | 0 |
| 80 | 7 | 30 | 100 | 970.0278 | 5 | 0 |
| 100 | 6 | 30 | 100 | 1201.861 | 5 | 0 |
| 100 | 6 | 30 | 60 | 1206 | 5 | 0 |
| 100 | 6 | 30 | 80 | 1219.528 | 5 | 0 |
| 60 | 6 | 70 | 100 | 1493.889 | 5 | 0 |
| 60 | 6 | 70 | 80 | 1504.194 | 5 | 0 |
| 100 | 6 | 50 | 100 | 1508.167 | 5 | 0 |
| 100 | 6 | 50 | 80 | 1515.222 | 5 | 0 |
| 100 | 7 | 50 | 60 | 1587 | 5 | 0 |
| 80 | 6 | 30 | 100 | 1589.722 | 5 | 0 |
| 80 | 6 | 30 | 80 | 1601.5 | 5 | 0 |
| 80 | 6 | 30 | 60 | 1601.667 | 5 | 0 |
| 60 | 5 | 70 | 80 | 1231.583 | 5.027777778 | 0 |
| 60 | 5 | 70 | 100 | 1345.25 | 5.027777778 | 0 |
| 100 | 5 | 30 | 60 | 1742.028 | 5.027777778 | 0 |
| 100 | 5 | 30 | 80 | 1750 | 5.027777778 | 0 |
| 100 | 5 | 30 | 100 | 1761.25 | 5.027777778 | 0 |
| 100 | 5 | 70 | 100 | 953.0556 | 5.055555556 | 0 |
| 100 | 5 | 70 | 60 | 958.4444 | 5.055555556 | 0 |
| 100 | 5 | 70 | 80 | 966.1111 | 5.055555556 | 0 |
| 100 | 7 | 70 | 100 | 1875.056 | 5.055555556 | 0 |
| 100 | 7 | 70 | 80 | 1892.139 | 5.055555556 | 0 |
| 100 | 7 | 70 | 60 | 1908.306 | 5.055555556 | 0 |
| 80 | 5 | 70 | 60 | 733.0833 | 5.083333333 | 0 |
| 100 | 7 | 30 | 60 | 2260 | 5.083333333 | 0 |
| 100 | 7 | 30 | 80 | 2268 | 5.083333333 | 0 |
| 100 | 7 | 30 | 100 | 2295.639 | 5.083333333 | 0 |
| 80 | 5 | 70 | 80 | 729.7778 | 5.111111111 | 0 |
| 80 | 5 | 70 | 100 | 737.1389 | 5.111111111 | 0 |