



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOFTWARE

FRANCISCO EUDES MENDES FILHO

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO DE CHAVES ALEATÓRIAS VICIADAS
NOS JOGOS SETTLERS OF CATAN E TERRA MYSTICA PARA GERAÇÃO DOS
TABULEIROS DE FORMA BALANCEADA**

CEARÁ

2023

FRANCISCO EUDES MENDES FILHO

APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO DE CHAVES ALEATÓRIAS VICIADAS NOS
JOGOS SETTLERS OF CATAN E TERRA MYSTICA PARA GERAÇÃO DOS TABULEIROS
DE FORMA BALANCEADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Software
do Campus Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia de Software.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Luiz Braga
Soares

CEARÁ

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M491a Mendes Filho, Francisco Eudes.

Aplicação do algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas nos jogos Settlers of Catan e Terra Mystica para geração dos tabuleiros de forma balanceada / Francisco Eudes Mendes Filho. – 2023.
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Engenharia de Software, Russas, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Pablo Luiz Braga Soares.

1. Balanceamento. 2. Settlers of Catan. 3. Terra Mystica. I. Título.

CDD 005.1

FRANCISCO EUDES MENDES FILHO

APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO DE CHAVES ALEATÓRIAS VICIADAS NOS
JOGOS SETTLERS OF CATAN E TERRA MYSTICA PARA GERAÇÃO DOS TABULEIROS
DE FORMA BALANCEADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Software
do Campus Russas da Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia de Software.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pablo Luiz Braga Soares (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Reuber Regis de Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eurinardo Rodrigues Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

O balanceamento é uma questão importante nos mais diversos tipos de jogos, sejam eles eletrônicos ou físicos, estando diretamente relacionado à qualidade do produto por ser capaz de interferir na dificuldade e jogabilidade, podendo assim impactar nas experiências dos jogadores, de forma positiva ou negativa. Contudo, realizar esse balanceamento não é uma tarefa fácil, pois está diretamente atrelada a fatores específicos que variam de jogo para jogo. Além disso, poucos são os estudos das aplicações de técnicas de balanceamento para jogos de tabuleiro. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho de um algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas (BRKGA) na geração de um melhor balanceamento dos mapas dos jogos *Settlers of Catan* e *Terra Mystica*, contribuindo com os problemas existentes de balanceamento dos tabuleiros de ambos os jogos. Além disso, expandir conteúdos de pesquisas da aplicação de IA em jogos de tabuleiro. Os testes serão realizados por meio da execução do algoritmo utilizando o maior número satisfazível de restrições de cada jogo, de modo a quebrar o menor número possível dessas restrições. No final, os resultados obtidos pelos testes serão comparados com os resultados obtidos por outro método a fim de analisar o desempenho do algoritmo no problema.

Palavras-chave: balanceamento; *Settlers of Catan*; *Terra Mystica*.

ABSTRACT

Game Balancing is an essential factor in the most diverse types of games, whether electronic or physical, being directly related to the quality of the product by being able to interfere in the difficulty and playability, thus impacting the players' experiences positively or negatively. However, achieving this balance is not easy because it is directly linked to specific factors that differ from game to game. Furthermore, there are few studies on balancing techniques for board games. In this context, this paper aims to analyze the performance of a biased random key genetic algorithm (BRKGA) in generating better map balancing for Settlers of Catan and Terra Mystica games, contributing to the existing board balancing problems of both games. Also, expand research contents on the application of AI in board games. The tests will be performed by running the algorithm using as many satisfiable constraints of each game as possible to break a few of these constraints. In the end, the results will be compared with the results of previous methods. In the end, the results obtained by the tests will be compared with the results obtained by another method in order to analyze the performance of the algorithm in the problem.

Keywords: balancing; Settlers of Catan; Terra Mystica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do <i>Biased Random-Key Genetic Algorithm</i> (BRKGA).	17
Figura 2 – Transição da geração k para a geração $k+1$ no BRKGA.	18
Figura 3 – Comparação das distribuições de iterações a uma solução alvo dos algoritmos BRKGA e <i>Random-Key Genetic Algorithm</i> (RKGA)	19
Figura 4 – Comportamento das formigas sobre caminhos de tamanho diferente	21
Figura 5 – Representação de um mapa de <i>Settlers of Catan</i> como grafo.	22
Figura 6 – Modelo para algoritmo genético de chaves aleatórias viciada com reinicialização.	23
Figura 7 – Distribuições de iterações a uma solução alvo (ótima) dos algoritmo BRKGA com reinicialização e sem reinicialização na instância stn243 do problema de recobrimento de triplas de Steiner.	24
Figura 8 – Terrenos do <i>Terra Mystica</i> (Cores).	25
Figura 9 – Terrenos do <i>Terra Mystica</i> (Símbolos).	26
Figura 10 – Mapa original do <i>Terra Mystica</i> (Cores).	26
Figura 11 – Mapa original do <i>Terra Mystica</i> (Símbolos).	27
Figura 12 – Transformação dos terrenos do <i>Terra Mystica</i>	28
Figura 13 – Terrenos do <i>Settlers of Catan</i> (Cores).	29
Figura 14 – Terrenos do <i>Settlers of Catan</i> (Símbolos).	29
Figura 15 – Exemplo de mapa balanceado para o <i>Settlers of Catan</i> (Cores), adaptação (SARAIVA <i>et al.</i> , 2020).	30
Figura 16 – Exemplo de mapa balanceado para o <i>Settlers of Catan</i> (Símbolos), adaptação (SARAIVA <i>et al.</i> , 2020).	30
Figura 17 – Exemplo de grafo para o <i>Terra Mystica</i>	33
Figura 18 – Fluxograma da implementação do BRKGA.	33
Figura 19 – Processo de cruzamento de indivíduos do <i>Terra Mystica</i> (Cores).	35
Figura 20 – Processo de cruzamento de indivíduos do <i>Terra Mystica</i> (Símbolos).	36
Figura 21 – Fluxograma da implementação do BRKGA com reinício.	37
Figura 22 – Exemplo de grafo para o <i>Settlers of Catan</i>	38
Figura 23 – Processo de cruzamento de indivíduos do <i>Settlers of Catan</i> (Cores).	39
Figura 24 – Processo de cruzamento de indivíduos do <i>Settlers of Catan</i> (Símbolos).	40

Figura 25 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA no <i>Terra Mystica</i> para uma população de 1000 indivíduos.	45
Figura 26 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA no <i>Terra Mystica</i> para uma população de 50000 indivíduos.	45
Figura 27 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA no <i>Terra Mystica</i> para populações de tamanhos diferentes.	46
Figura 28 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com reiniciar no <i>Terra Mystica</i> para uma população de 1000 indivíduos.	49
Figura 29 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com reiniciar no <i>Terra Mystica</i> para uma população de 50000 indivíduos.	49
Figura 30 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com reiniciar no <i>Terra Mystica</i> para populações de tamanhos diferentes.	50
Figura 31 – Melhor mapa <i>Terra Mystica</i> , pontuação = 22 (Cores).	50
Figura 32 – Melhor mapa <i>Terra Mystica</i> , pontuação = 22 (Símbolos).	51
Figura 33 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso no <i>Terra Mystica</i> para uma população de 1000 indivíduos.	52
Figura 34 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso no <i>Terra Mystica</i> para uma população de 50000 indivíduos.	55
Figura 35 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso no <i>Terra Mystica</i> para populações de tamanhos diferentes.	55
Figura 36 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso e reiniciar no <i>Terra Mystica</i> para uma população de 1000 indivíduos.	58
Figura 37 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso e reiniciar no <i>Terra Mystica</i> para uma população de 50000 indivíduos.	58
Figura 38 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso e reiniciar no <i>Terra Mystica</i> para populações de tamanhos diferentes.	59
Figura 39 – Melhor mapa <i>Terra Mystica</i> com peso, pontuação = 621 (Cores).	59
Figura 40 – Melhor mapa <i>Terra Mystica</i> com peso, pontuação = 621 (Símbolos).	60
Figura 41 – Gráfico de desempenho do BRKGA no <i>Settlers of Catan</i> para uma população de 1000 indivíduos.	61
Figura 42 – Gráfico de desempenho do BRKGA no <i>Settlers of Catan</i> para uma população de 50000 indivíduos.	63

Figura 43 – Gráfico de comparação de desempenho do BRKGA no <i>Settlers of Catan</i> para populações de tamanhos diferentes.	63
Figura 44 – Melhor mapa <i>Settlers of Catan</i> , pontuação = 0 (Cores).	64
Figura 45 – Melhor mapa <i>Settlers of Catan</i> , pontuação = 0 (Símbolos).	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Numero de vezes que cada requisito para o mapa do <i>Terra Mystica</i> é violado	22
Tabela 2 – Quantidade de pás necessárias para realizar a transformação de um terreno para outro.	28
Tabela 3 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 1000 indivíduos do <i>Terra Mystica</i>	43
Tabela 4 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 50000 indivíduos do <i>Terra Mystica</i>	44
Tabela 5 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 1000 indivíduos do <i>Terra Mystica</i> com reiniciar.	47
Tabela 6 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 50000 indivíduos do <i>Terra Mystica</i> com reiniciar.	48
Tabela 7 – Numero de vezes que um requisito é violado para o melhor mapa gerado do BRKGA para o <i>Terra Mystica</i> e outros mapas oficiais.	48
Tabela 8 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 1000 indivíduos do <i>Terra Mystica</i> com peso.	53
Tabela 9 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 50000 indivíduos do <i>Terra Mystica</i> com peso.	54
Tabela 10 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 1000 indivíduos do <i>Terra Mystica</i> com peso e reiniciar.	56
Tabela 11 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 50000 indivíduos do <i>Terra Mystica</i> com peso e reiniciar.	57
Tabela 12 – Numero de vezes que um requisito é violado para o melhor mapa gerado do BRKGA para o <i>Terra Mystica</i> e outros mapas oficiais.	59
Tabela 13 – Tabela de tempo até solução ótima do BRKGA para o <i>Settlers of Catan</i> . . .	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO	<i>Ant Colony Optimization</i>
BRKGA	<i>Biased Random-Key Genetic Algorithm</i>
DDA	<i>Dynamic Difficulty Adjustment</i>
IA	Inteligência Artificial
PCG	<i>Procedural Content Generation</i>
RKGA	<i>Random-Key Genetic Algorithm</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	Balanceamento em jogos	15
3.2	Geração Procedural de Conteúdo	16
3.3	Algoritmo Genético de Chaves Aleatórias Viciadas	16
4	TRABALHOS RELACIONADOS	20
4.1	Inteligencia Artificial no Desenvolvimento de Jogos	20
4.2	Utilização do algoritmo de colônia de formigas para geração de mapas para melhorar o balanceamento dos jogos de tabuleiro <i>Terra Mystica</i> e <i>Settlers of Catan</i>	21
4.3	Introdução aos algoritmos de chaves aleatórias viciadas	23
5	METODOLOGIA	25
5.1	Compreendendo o <i>Terra Mystica</i>	25
5.2	Compreendendo o <i>Settlers of Catan</i>	28
5.3	Obtendo o balanceamento do mapa no <i>Terra Mystica</i>	31
5.4	Obtendo o balanceamento do mapa em <i>Settlers of Catan</i>	31
5.5	Implementação do BRKGA para <i>Terra Mystica</i>	32
5.6	Implementação do BRKGA para <i>Settlers of Catan</i>	38
6	AMBIENTE COMPUTACIONAL	41
7	RESULTADOS	42
7.1	Resultados para o <i>Terra Mystica</i>	42
7.2	Resultados para o <i>Settlers of Catan</i>	61
8	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

O balanceamento é a capacidade de um jogo de propor um ambiente equilibrado para jogares, seja garantindo as mesmas chances de vitória entre jogadores ou relacionando a dificuldade de desafios com a capacidade dos jogadores. Ele é uma questão importante nos mais diversos tipos de jogos, sejam eles eletrônicos ou físicos, uma vez que está diretamente relacionado à satisfação dos jogadores. Um jogo mal balanceado pode gerar frustrações ou insatisfações. Contudo, obter um balanceamento adequado não é uma tarefa fácil, pois depende de características específicas de cada jogo e, muitas vezes, são difíceis de medir sem testes intensivos e *feedback* dos jogadores.

Settlers of Catan e *Terra Mystica* são jogos de tabuleiro que sofrem com problemas de balanceamento. Ambos consistem em um tabuleiro criado pelo posicionamento de terrenos. Em *Settlers of Catan*, a geração do mapa de cada partida é feita de forma aleatória pelos jogadores, a fim de proporcionar uma maior diversidade ao jogo. No entanto, essa mesma estratégia permite a ocorrência de recursos centralizados em certos locais, proporcionando uma grande vantagem aos jogadores que estão mais próximos. Em *Terra Mystica*, os mapas não são gerados de forma aleatória, pois sua grande complexidade exige mapas mais elaborados para impedir vantagens para certos jogadores. Essa mesma complexidade dificulta a criação dos mapas, o que acaba levando os jogadores a utilizar mapas já existentes, prejudicando a diversidade.

Algumas pesquisas já foram realizadas na área para tentar solucionar os problemas existentes com o balanceamento nesses jogos a fim de produzir mapas de forma balanceada. Um exemplo desses trabalhos é a utilização do algoritmo de colônia de formigas (do inglês, *Ant Colony Optimization* (ACO)), proposto por Alexandr Grichshenko, Bonfim Amaro, Rommel Saraiva e Luiz Jonatã no trabalho de Saraiva *et al.* (2020) para tentar mapear o melhor caminho na representação gráfica dos mapas de *Terra Mystica* e *Settlers of Catan*.

Este documento expõe a utilização de um algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas para solucionar os problemas existentes no *Terra Mystica* e *Settlers of Catan*, a partir da geração de mapas de forma balanceada utilizando requisitos obtidos através de pesquisas já realizadas com a comunidade de jogadores, e, por fim, comparar os resultados obtidos com outras soluções existentes na literatura.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta os objetivos do trabalho, o Capítulo 3 contém a fundamentação teórica, o Capítulo 4 mostra alguns trabalhos relacionados, a Capítulo 5 expõe como será feita a implementação do algoritmo genético

de chaves aleatórias viciadas, o Capítulo 6 informa o ambiente computacional utilizado para o desenvolvimento do trabalho, o Capítulo 7 documenta os resultados obtidos pela implementação, e, por fim, o Capítulo 8 apresenta a conclusão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é comparar e documentar o desempenho do algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas para a geração de mapas balanceados nos jogos de tabuleiro *Settlers of Catan* e *Terra Mystica*.

2.2 Objetivos Específicos

1. Buscar melhorar a geração de mapas de forma balanceada para o jogo, proporcionando uma maior satisfação aos jogadores;
2. Expandir os estudos de Geração Procedural de Conteúdo para jogos de tabuleiro;
3. Investigar o desempenho do algoritmo com outras estratégias utilizadas na literatura.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo serão apresentados conteúdos importantes para melhor entendimento deste trabalho. A Seção 3.1 apresentará a importância do Balanceamento nos jogos; em seguida, a Seção 3.2 explicará a Geração Procedural de Conteúdo, e, por fim, a Seção 3.3 explicará o Algoritmo Genético de Chaves Aleatórias Viciadas.

3.1 Balanceamento em jogos

Um fator importante para muitos jogos, tanto atuais como antigos, é o balanceamento, que nada mais é do que o equilíbrio entre diferentes fatores de um jogo de modo a gerar uma experiência justa e/ou adequada. No entanto, obter essa característica é um dos principais desafios no desenvolvimento de jogos, uma vez que esses fatores mudam de jogo para jogo (KHALIFA; FAYEK, 2015). Um exemplo são jogos de luta, onde a capacidade da Inteligência Artificial (IA) dos adversários é um fator importante para o balanceamento, enquanto em jogos de quebra-cabeças não é tão desejado quanto a relação de dificuldade dos quebra-cabeças com o progresso do jogador.

Alguns jogos chegam a utilizar a IA para realizar o balanceamento em tempo real, em um processo chamado Dificuldade Dinâmica (do inglês *Dynamic Difficulty Adjustment* (DDA)), que processa fatores relacionados ao jogador para definir assim um nível de dificuldade adequado (ZOHAIB, 2018).

Um bom exemplo são os jogos de corrida multijogador da série Mario, como o Mario Kart 8, onde o sistema altera as chances de um jogador receber certos itens dependendo da sua posição em relação aos outros, de certa forma. Assim, um jogador que está atrás na corrida tem maiores chances de conseguir um item que o ajudará a avançar rapidamente, enquanto quem está na frente tem maiores chances de conseguir um item que o permitirá atrapalhar os outros competidores (NINTENDO, 2014).

Jogos como *Terra Mystica* e *Settlers of Catan*, entretanto, não possuem uma estrutura favorável para a aplicação do DDA, já que o balanceamento e a dificuldade dos jogos estão fortemente ligados à distribuição das peças de tabuleiro que formam os mapas. Grande parte dos estudos voltados para encontrar uma forma de balanceamento envolvem testes de jogo realizados por humanos, com pouca busca pela utilização de IA para auxiliar nesse processo (SARAIVA *et al.*, 2020).

3.2 Geração Procedural de Conteúdo

Uma técnica bastante utilizada nos jogos eletrônicos é a Geração Procedural de Conteúdo (do inglês *Procedural Content Generation* (PCG)), que consiste na utilização de um algoritmo para gerar conteúdo que normalmente seria introduzido por humanos (SMITH, 2015), como algoritmos evolucionários e meta-heurísticas de busca (TOGELIUS *et al.*, 2011).

Um grande exemplo do uso dessa tecnologia é no jogo *Minecraft*, onde os mapas são gerados a partir da análise de uma *seed*, uma sequência positiva ou negativa de números inteiros. Essa técnica permite que mapas de grande escala possam ser gerados com o mínimo de armazenamento possível, além de proporcionar uma grande variedade de mapas, dado que cada *seed* gera um mundo único (MOJANG, 2011).

Vários são os jogos que utilizaram dessa estratégia, e com o aumento da demanda por jogos com mais conteúdo, as indústrias têm investido cada vez mais em artistas e programadores para trabalhar nessa área (TOGELIUS *et al.*, 2011). Entretanto, jogos eletrônicos têm recebido muito mais atenção para o uso dessas tecnologias do que os jogos de tabuleiro (TOGELIUS *et al.*, 2010).

3.3 Algoritmo Genético de Chaves Aleatórias Viciadas

Algoritmos genéticos aplicam os conceitos de Darwin da sobrevivência do mais forte para solucionar problemas de otimização combinatória, através da relação entre uma solução e os indivíduos de uma população (HOLLAND, 1992; GOLDBERG *et al.*, 1989).

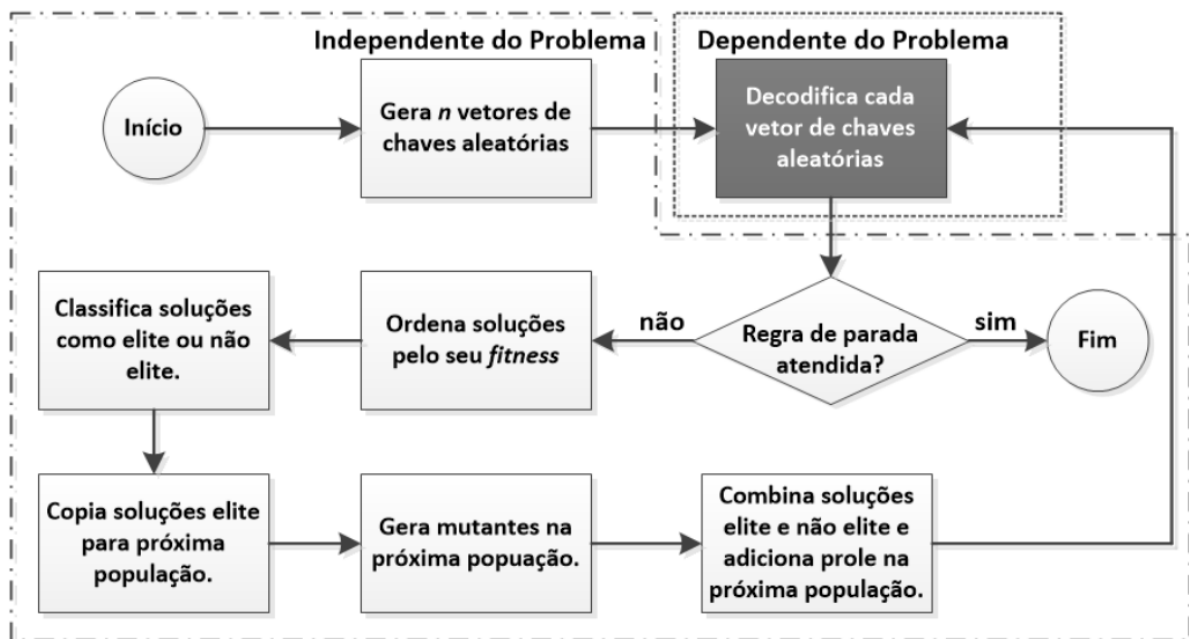
Dentre esses algoritmos, temos o algoritmo genérico de chaves aleatórias (do inglês RKGA), apresentado em 1994 por Bean, J.C., para realizar a solução de problemas de otimização combinatória que envolviam sequenciamento. Para seu funcionamento, é utilizado um algoritmo determinístico, chamado **decodificador**, o qual é responsável por tratar as entradas e comparar com uma solução possível para assim analisar sua qualidade (BEAN, 1994; GONÇALVES; RESENDE, 2011).

Esse algoritmo realiza a evolução de uma população de chaves aleatórias em interações denominadas de gerações (BEAN, 1994; GONÇALVES; RESENDE, 2011). A população inicial é composta por p vetores de chaves aleatórias. Em seguida, o decodificador analisa a qualidade de cada indivíduo, e a população é separada em dois grupos: o grupo de elite, que corresponde a uma pequena parte da população composta pelos melhores indivíduos, e o grupo

não elite, que corresponde ao restante da população. Para realizar a evolução da população, o conjunto de elite é copiado, e novos indivíduos, chamados mutantes, são adicionados à população. Esses mutantes nada mais são do que novos valores de chaves aleatórias que serão analisados pelo decodificador para verificar sua qualidade. Para finalizar a geração, são gerados indivíduos a partir do processo de cruzamento, no qual são selecionados de forma aleatória dois membros da população, utilizando a combinação uniforme parametrizada (SPEARS; JONG, 1995; RESENDE, 2011).

Originado do RKGA, o algoritmo genético de chaves aleatórias viciadas (do inglês BRKGA), realiza a seleção dos pais escolhendo um membro do conjunto elite e um membro do conjunto não elite para participarem do cruzamento, permitindo repetições. Dessa forma, um dos indivíduos sempre é escolhido do conjunto elite, possibilitando assim uma maior possibilidade dos filhos herdarem as características dos pais do conjunto elite (GONÇALVES; RESENDE, 2011; RESENDE, 2011). Para realizar a evolução, os melhores membros do conjunto elite são selecionados e copiados; após isso, uma quantidade de indivíduos mutantes aleatórios é gerada e adicionada à população, e o restante da população é preenchido através do processo de cruzamento, similar ao RKGA (RESENDE, 2011). Uma representação desse processo pode ser visualizada no fluxograma da Figura 1 e a representação da evolução da geração na Figura 2.

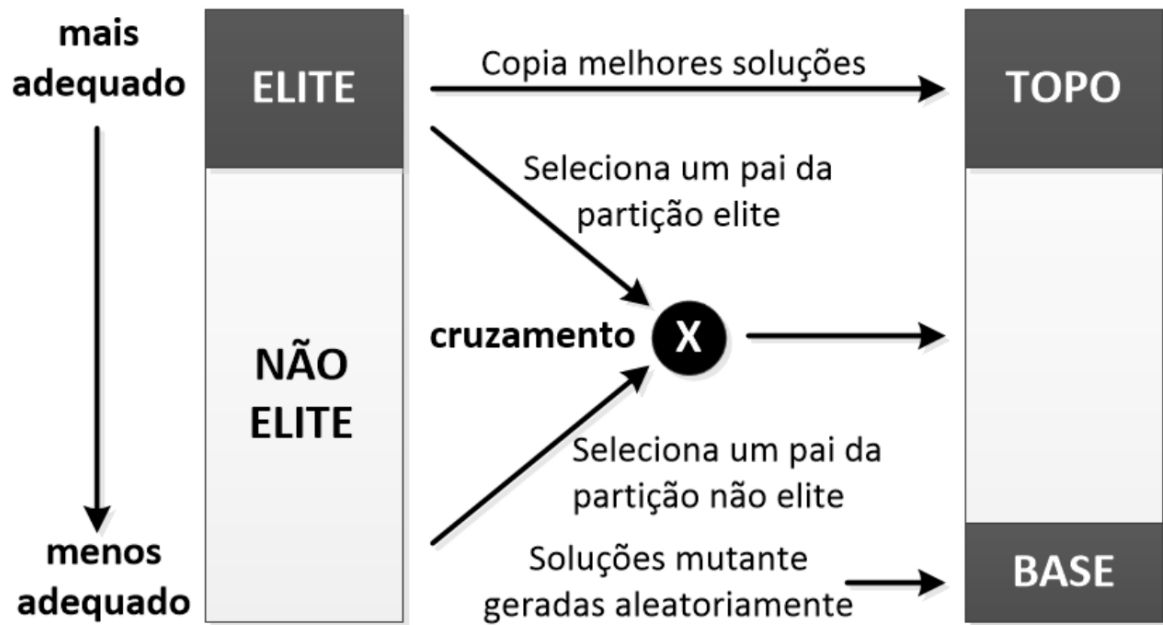
Figura 1 – Fluxograma do BRKGA.



Fonte: (GONÇALVES; RESENDE, 2011).

A escolha da utilização do BRKGA se dá ao fato de que, mesmo que as alterações

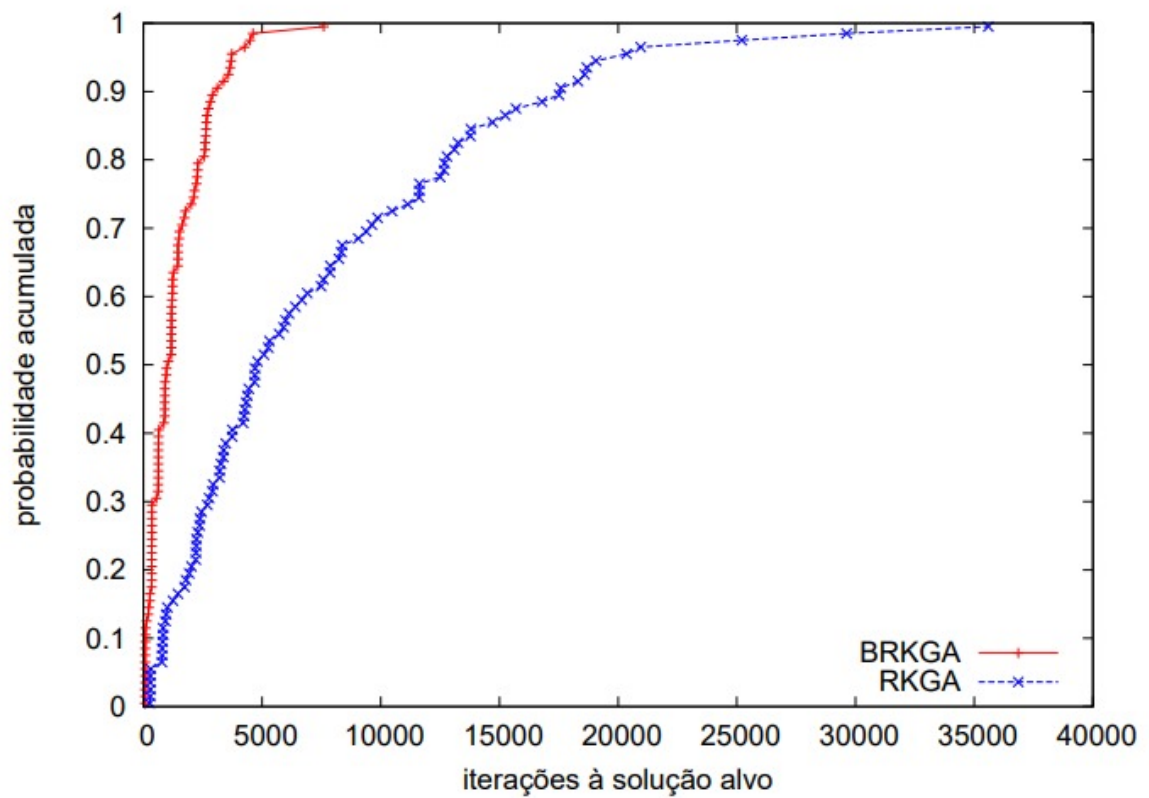
Figura 2 – Transição da geração k para a geração $k+1$ no BRKGA.



Fonte: (GONÇALVES; RESENDE, 2011).

em relação ao RKGA não pareçam ser significativas, ele quase sempre apresenta melhores resultados quando comparados (GONÇALVES; RESENDE, 2011; RESENDE, 2011). Como demonstrado na Figura 3, que representa o desempenho do BRKGA e RKGA em um problema de recobrimento por pares (BRESLAU *et al.*, 2011).

Figura 3 – Comparação das distribuições de iterações a uma solução alvo dos algoritmos BRKGA e RKGA



Fonte: (RESENDE, 2011).

4 TRABALHOS RELACIONADOS

Este Capítulo expõe os trabalhos existentes relevantes relacionados ao tema proposto.

4.1 Inteligência Artificial no Desenvolvimento de Jogos

O primeiro trabalho realizado na área de Inteligência Artificial, ou simplesmente IA, ocorreu em 1943, por Warren McCulloch e Walter Pitts, utilizando conceitos básicos da fisiologia e dos neurônios do cérebro, além da lógica proposicional de Russell e Whitehead e da Teoria da Computação de Turing (RUSSELL *et al.*, 2010). Após 7 anos, dois alunos de Harvard, Marvin Minsky e Dean Edmonds, construíram o primeiro computador de rede neural, batizado de SNARC, capaz de simular uma rede de 40 neurônios (RUSSELL *et al.*, 2010).

Não levou muito tempo para que novos pesquisadores surgissem e procurassem novas aplicações para os estudos na área. Um desses pesquisadores foi Arthur Samuel, que a partir de 1952 escreveu vários programas capazes de jogar damas, chegando até mesmo a se comportar como amadores de nível elevado (RUSSELL *et al.*, 2010).

Com o passar do tempo, a IA começou a ser utilizada para outros propósitos além de servir como adversários para jogadores humanos. Um exemplo foi a sua utilização para realizar testes em jogos, devido ao alto custo e tempo necessários para realizar os mesmos com jogadores humanos. Um algoritmo bastante utilizado nessa abordagem é o algoritmo de Busca em Árvore Monte-Carlo, que realizava ações aleatórias, em seguida, calculava e mapeava essas ações em uma árvore de busca (BOROVIKOV *et al.*, 2019).

Desde então, a inteligência artificial vem encontrando suas utilidades nas mais diversas áreas dos jogos. Dentre essas utilidades, alguns exemplos são: uma IA capaz de desafiar grandes mestres do Xadrez, como o *Stockfish* (STROGATZ, 2018), uma IA capaz de mudar a dificuldade do jogo utilizando análise em tempo real para medir o desempenho, habilidades e experiência do jogador, e assim mudar aspectos do jogo de forma adequada, nomeada de Dificuldade Dinâmica (ZOHAIB, 2018), e até mesmo IAs capazes de auxiliar o processo de Criação Procedural de Conteúdo (TOGELIUS *et al.*, 2010).

Entretanto, jogos eletrônicos têm recebido muito mais atenção na área do que jogos de tabuleiro (TOGELIUS *et al.*, 2010). Sendo assim, um dos objetivos desse documento é expandir essas pesquisas nessa área utilizando o problema de balanceamento de mapas do *Terra Mystica* e *Settlers of Catan*.

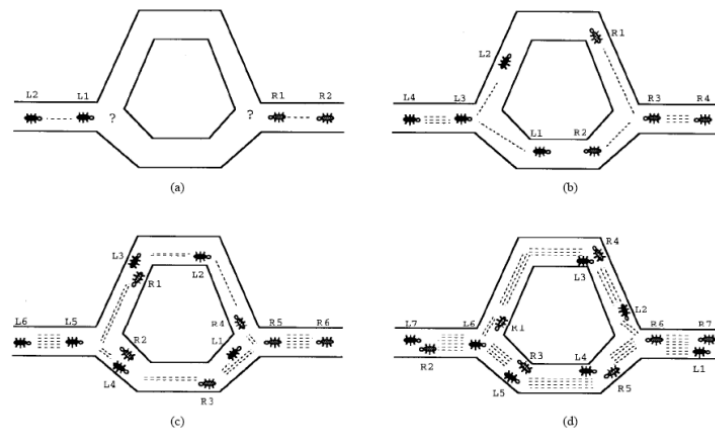
4.2 Utilização do algoritmo de colônia de formigas para geração de mapas para melhorar o balanceamento dos jogos de tabuleiro *Terra Mystica* e *Settlers of Catan*

Com vista nos atuais problemas existentes com o balanceamento nos jogos de tabuleiro *Settlers of Catan* e *Terra Mystica*, Alexandr Grichshenko, Bonfim Amaro, Rommel Saraiva e Luiz Jonatã propuseram uma forma de gerar os mapas dos jogos de forma balanceada utilizando o ACO. (SARAIVA *et al.*, 2020)

O trabalho se baseia em uma pesquisa de campo realizado com a comunidade dos jogos para obtenção dos requisitos seguida da seleção dos mais importantes, uma vez que o algoritmo não tinha condições de satisfazer todos ao mesmo tempo sem criar mapas inferiores.

A partir desses requisitos, os autores decidiram utilizar o ACO, que se baseia na imitação do comportamento de uma colônia de formigas, como pode ser visto na Figura 4. As formigas liberam um feromônio ao encontrar uma fonte de alimento e voltam para a colônia; outras formigas são atraídas pelo rastro até o alimento. O caminho mais rápido até o alimento permite que um número maior de formigas retorne antes das que escolheram o caminho mais longo, permitindo assim uma maior concentração de feromônio no caminho menor.

Figura 4 – Comportamento das formigas sobre caminhos de tamanho diferente

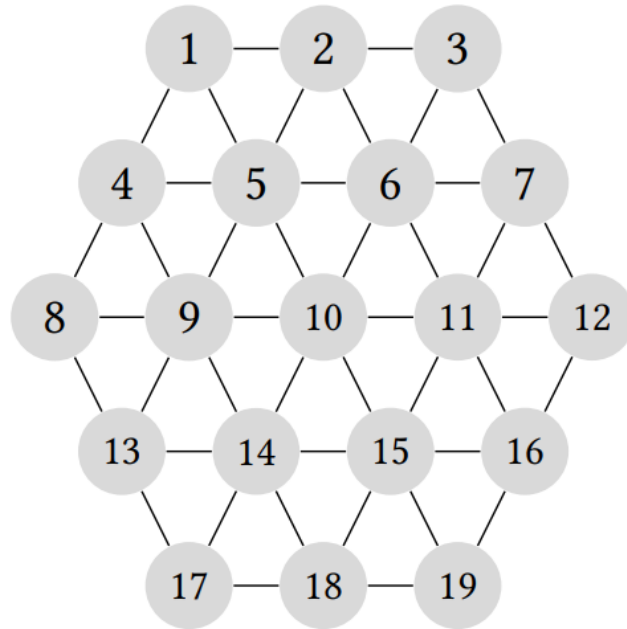


Fonte: (PEREIRA, 2010).

Para realizar a implementação do algoritmo, os autores transformaram os mapas em grafos, onde cada vértice possuía características relativas de cada jogo. Um exemplo dessa transformação para o *Settlers of Catan* pode ser visto na Figura 5, onde cada vértice representaria um terreno do tabuleiro com os valores t e n sendo t respectivo a um dos 5 terrenos disponíveis (madeira, trigo, lã, tijolo e pedra) e n um número do conjunto 2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12. Também

é criado um vértice de $n: 7$ e t : deserto para representar o terreno de deserto que sempre possui o valor 7 associado a ele.

Figura 5 – Representação de um mapa de *Settlers of Catan* como grafo.



Fonte: (SARAIVA *et al.*, 2020).

O objetivo final do algoritmo é organizar esses vértices de forma a maximizar o balanceamento utilizando a estratégia de pontuar cada solução para cada requisito violado, sendo possível obter múltiplos pontos para cada requisito. A Tabela 1 apresenta uma representação da pontuação para diferentes mapas com base no sistema de pontuação apresentado.

Tabela 1 – Numero de vezes que cada requisito para o mapa do *Terra Mystica* é violado

Mapa	Pontuação	Requisito 1	Requisito 2	Requisito 3	Requisito 4
Melhor mapa do ACO	0	0	0	0	0
Mapa original	9	0	3	0	6
Fire and Ice	12	0	3	0	9
Fjords	9	0	0	0	9

Fonte: (SARAIVA *et al.*, 2020).

Os resultados obtidos, embora satisfatórios, não eram capazes de atender a todos os requisitos devido a limitações do algoritmo. A partir de uma certa quantidade de requisitos, os resultados passavam a se tornar inferiores.

4.3 Introdução aos algoritmos de chaves aleatórias viciadas

O trabalho de Mauricio G. C. Resende (2011) visa apresentar os conceitos, funcionamento e demonstrar uma implementação do algoritmo de chaves aleatórias viciadas.

O autor começa fazendo uma breve apresentação sobre o , e seu funcionamento, seguido da introdução do BRKGA. São explicadas então as diferenças entre os algoritmos, e é apresentado um gráfico que pode ser visto na Figura 3, para demonstrar a superioridade da nova versão do algoritmo.

Após apresentar o funcionamento e conceitos, o autor então propõe um modelo para realizar a implementação do BRKGA, que pode ser visto na Figura 6, utilizando a técnica da reinicialização. Essa técnica consiste em reiniciar o algoritmo quando ele não é capaz de melhorar a melhor solução após um número específico de iterações. O autor apresenta que a utilização dessa técnica é favorável, utilizando o gráfico presente na Figura 7, o qual ilustra o funcionamento do BRKGA com e sem reinicializações no problema de recobrimento de triplas de Steiner (RESENDE *et al.*, 2012).

Figura 6 – Modelo para algoritmo genético de chaves aleatórias viciada com reinicialização.

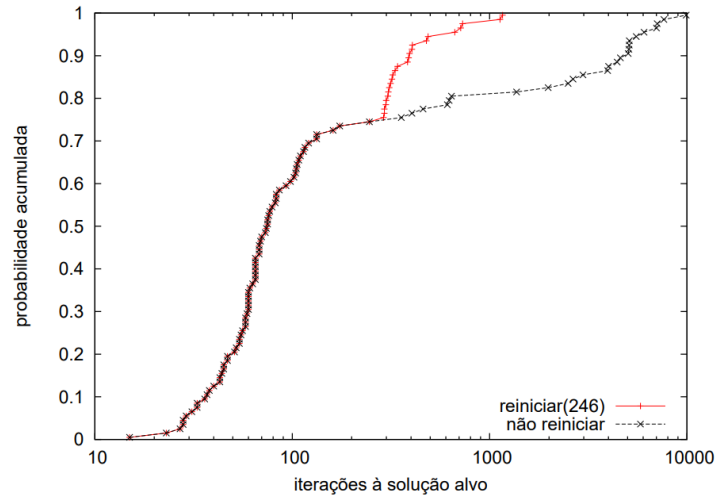
```

1 BRKGA( $|\mathcal{P}|, |\mathcal{P}_e|, |\mathcal{P}_m|, n, \rho_a$ )
2 Inicialize o valor da melhor solução encontrada:  $f^* \leftarrow \infty$ ;
3 enquanto critério de parada não for satisfeito faça
4   Gere a população  $\mathcal{P}$  com vetores de  $n$  chaves aleatórias;
5   enquanto critério de reinicialização não for satisfeito faça
6     Avalie o custo de cada solução nova em  $\mathcal{P}$ ;
7     Particione  $\mathcal{P}$  em dois conjuntos:  $\mathcal{P}_e$  e  $\mathcal{P}_m$ ;
8     Inicialize a população da próxima geração:  $\mathcal{P}^+ \leftarrow \mathcal{P}_e$ ;
9     Gere o conjunto de mutantes  $\mathcal{P}_m$ , cada mutante com  $n$ 
      chaves aleatórias ;
10    Adicione  $\mathcal{P}_m$  à população da próxima geração:
       $\mathcal{P}^+ \leftarrow \mathcal{P}^+ \cup \mathcal{P}_m$ ;
11    para todo  $i \leftarrow 1$  até  $|\mathcal{P}| - |\mathcal{P}_e| - |\mathcal{P}_m|$  faça
12      Escolha o pai  $a$  aleatoriamente de  $\mathcal{P}_e$ ;
13      Escolha o pai  $b$  aleatoriamente de  $\mathcal{P}_e$ ;
14      para todo  $j \leftarrow 1$  até  $n$  faça
15        Jogue uma moeda viciada com probabilidade
           $\rho_a > 0.5$  de dar cara;
16        se jogada der cara então  $c[j] \leftarrow a[j]$ ;
17        senão  $c[j] \leftarrow b[j]$ ;
18      fim
19      Adicione o filho  $c$  à população da próxima geração:
       $\mathcal{P}^+ \leftarrow \mathcal{P}^+ \cup \{c\}$ ;
20    fim
21    Atualize a população:  $\mathcal{P} \leftarrow \mathcal{P}^+$ ;
22    Ache a melhor solução  $\chi^+$  em  $\mathcal{P}$ :
       $\chi^+ \leftarrow \operatorname{argmin}\{f(\chi) \mid \chi \in \mathcal{P}\}$ ;
23    se  $f(\chi^+) < f^*$  então
24       $\chi^* \leftarrow \chi^+$ ;
25       $f^* \leftarrow f(\chi^+)$ ;
26    fim
27  fim
28 fim
29 retorna  $\chi^*$ 

```

Fonte: (RESENDE, 2011)

Figura 7 – Distribuições de iterações a uma solução alvo (ótima) dos algoritmo BRKGA com reinicialização e sem reinicialização na instância stn243 do problema de recobrimento de triplas de Steiner.



Fonte: (RESENDE, 2011)

O autor também apresenta como realizar as especificações do algoritmo e uma API que pode ser usada para facilitar a implementação do BRKGA.

No geral, o trabalho foca nos aspectos e funcionamento do BRKGA, enquanto este documento concentra-se nos resultados a partir da implementação do BRKGA no problema de balanceamento de mapas para os jogos *Settlers of Catan* e *Terra Mystica*.

5 METODOLOGIA

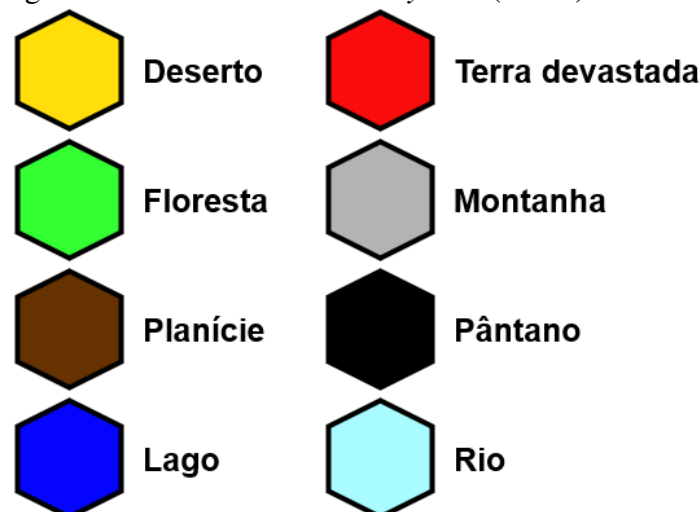
A Seção apresenta os passos realizados e as decisões tomadas para atingir os objetivos propostos. O procedimento é composto pela breve explicação do funcionamento do *Terra Mystica* e *Settlers of Catan*, seguido da análise dos requisitos necessários para obter o balanceamento e da implementação do BRKGA para ambos os cenários.

Os requisitos foram obtidos a partir de uma elicitación de dados realizada por meio de discussões com uma grande comunidade de jogadores online e com um clube de jogos de tabuleiro na *Innopolis University* (SARAIVA *et al.*, 2020).

5.1 Compreendendo o *Terra Mystica*

O *Terra Mystica* é um jogo de tabuleiro jogado por 2 a 5 pessoas. Seu tabuleiro é formado por um total de 113 hexágonos. Cada hexágono possui um tipo de terreno, sendo eles Deserto, Floresta, Planície, Lago, Terra Devastada, Montanha, Pântano ou Rio. A representação visual desses terrenos por meio de cores pode ser visualizada na Figura 8. Uma representação dos mesmos terrenos por meio de símbolos pode ser visualizada na Figura 9.

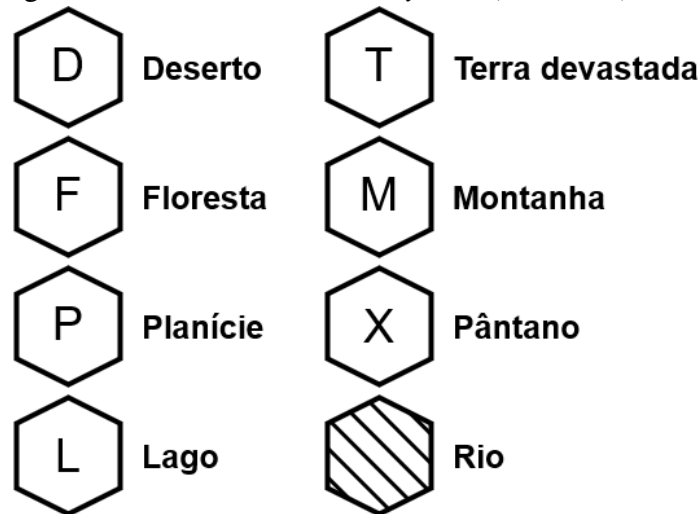
Figura 8 – Terrenos do *Terra Mystica* (Cores).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

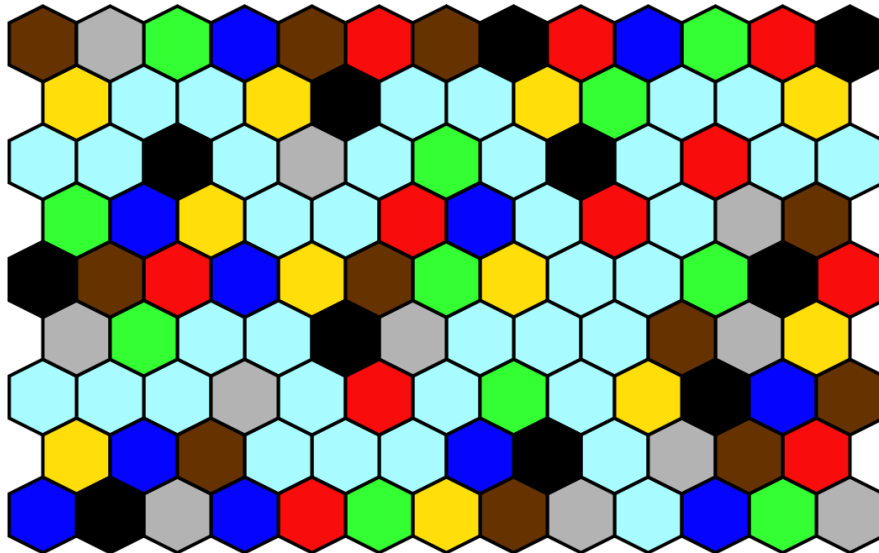
A combinação desses terrenos forma o mapa do jogo. Uma representação do mapa original do jogo por meio de cores pode ser vista na Figura 10. Uma representação do mesmo mapa utilizando símbolos pode ser vista na Figura 11. É importante destacar que os mapas não possuem terrenos adjacentes iguais, com exceção do rio. Esse aspecto é essencial para uma das mecânicas presentes no jogo, que será vista mais à frente.

Figura 9 – Terrenos do *Terra Mystica* (Símbolos).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 10 – Mapa original do *Terra Mystica* (Cores).

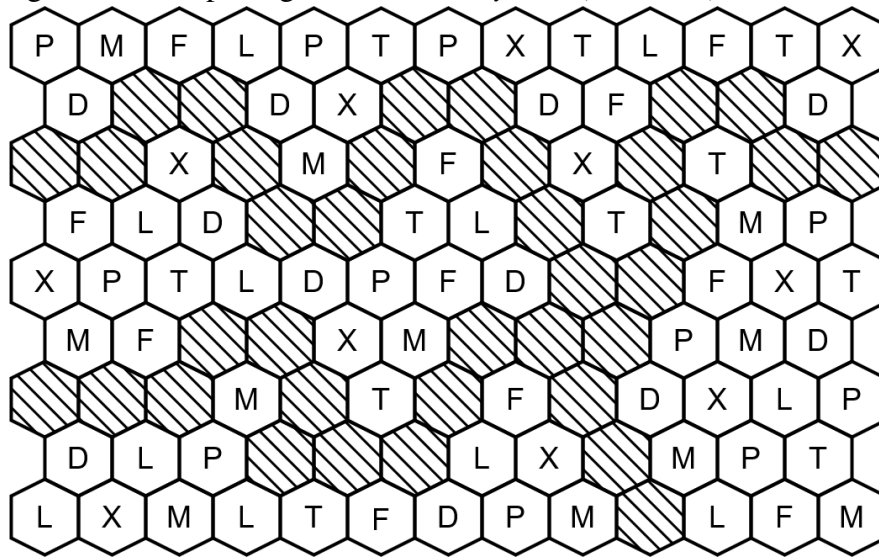


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O objetivo geral do jogador é desenvolver sua facção e expandir sua presença no mapa para ganhar pontos de vitória. O jogo tem um total de 6 rodadas, com cada jogador tendo um turno durante cada rodada, no qual devem utilizar pontos de ação para realizar diferentes ações dentro do jogo. Cada jogador pode realizar uma ação múltiplas vezes, porém apenas uma ação por turno. Caso o jogador não tenha pontos de ação ou não queira realizar uma ação, seu turno é encerrado, e começa o turno do próximo jogador. Quando o último jogador finaliza seu turno, a rodada é encerrada. Ao final das 6 rodadas, o jogador com mais pontos de vitória vence o jogo.

No início do jogo, cada jogador escolhe uma das facções disponíveis, cada uma contendo um terreno lar (Deserto, Floresta, Planície, Lago, Terra Devastada, Montanha ou

Figura 11 – Mapa original do *Terra Mystica* (Símbolos).

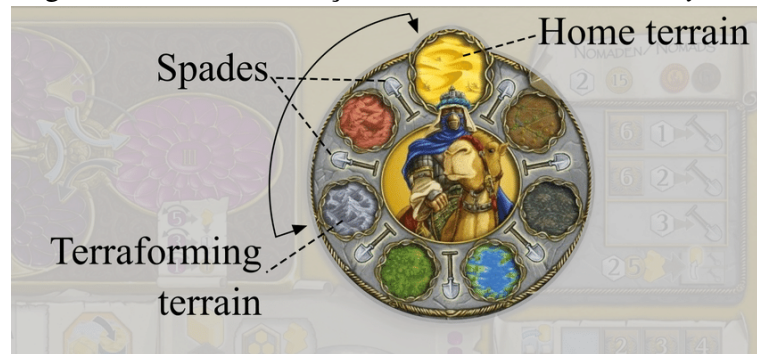


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Pântano), uma habilidade única e seus próprios custos de ações. Após escolher uma facção, os jogadores devem selecionar um hexágono vazio no mapa que possua um terreno igual ao terreno lar de sua facção para colocar sua construção inicial.

Uma das mecânicas presentes no jogo de grande importância para o balanceamento do mapa é a ação de construção. Nessa ação, o jogador deve escolher um hexágono adjacente a uma de suas construções que possua terreno igual ao terreno lar de sua facção. Uma característica dos mapas do jogo é que não existem hexágonos adjacentes de mesmo terreno, o que faz com que os jogadores precisem recorrer à mecânica de transformação de terrenos para expandir seus territórios. Para transformar um terreno no qual se deseja construir, os jogadores precisam gastar um certo número de pás (recurso obtido durante o jogo), dependendo do seu terreno lar e do terreno a ser transformado. Rios não podem ter seus terrenos alterados. A Figura 12 mostra o círculo de transformação de terrenos presente na ficha de cada facção, nele é possível ver o terreno lar, posicionado no topo do círculo, e o número de pás necessárias para transformar um terreno. Para cada terreno pulado em qualquer direção, o número de pás necessárias aumenta em 1, até o máximo de 3. A Tabela 2 mostra os custos de transformação de cada terreno lar até o terreno desejado. O jogador não é obrigado a construir no terreno no mesmo turno em que ele é transformado, porém outros jogadores podem transformar o terreno novamente caso não possua nenhuma estrutura.

As demais facções, ações e mecânicas presentes no jogo não serão listadas neste documento, pois não têm relevância para o problema de geração balanceada dos mapas.

Figura 12 – Transformação dos terrenos do *Terra Mystica*.

Fonte: (SARAIVA *et al.*, 2020)

Tabela 2 – Quantidade de pás necessárias para realizar a transformação de um terreno para outro.

Terreno	Deserto	Planície	Pântano	Lago	Floresta	Montanha	Terra Devastada
Deserto	0	1	2	3	3	2	1
Planície	1	0	1	2	3	3	2
Pântano	2	1	0	1	2	3	3
Lago	3	2	1	0	1	2	3
Floresta	3	3	2	1	0	1	2
Montanha	2	3	3	2	1	0	1
Terra Devastada	1	2	3	3	2	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

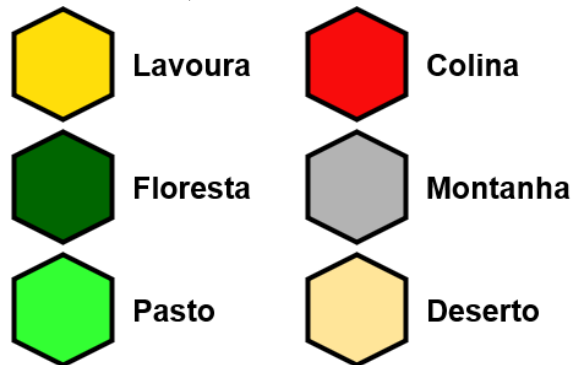
5.2 Compreendendo o *Settlers of Catan*

O *Settlers of Catan* é um jogo de tabuleiro para 2 a 4 jogadores. Seu tabuleiro é formado pela combinação de 19 peças hexagonais e 18 placas numéricas e uma peça de ladrão. Cada peça hexagonal possui 1 entre 6 tipos de terrenos, sendo eles Lavoura, Floresta, Pasto, Colina, Montanha e Deserto. As placas numéricas correspondem aos valores possíveis nos rolamentos de 2 dados de 6 lados, com exceção do valor 7, que está relacionado a peça de ladrão. Os números 2 e 12 tem apenas uma placa cada, os números 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 e 11 tem 2 placas cada. Uma representação dos terrenos em cores pode ser vista na Figura 13. Os mesmos terrenos em símbolos podem ser vistos na Figura 14.

O objetivo do jogo é coletar recursos para construir e aprimorar construções, para acumular pontos de vitória. Assentamentos concedem 1 ponto de vitória cada, cidades concedem 2 pontos, e outras cartas presentes no jogo podem conceder pontos de vitória adicionais. Caso um jogador tenha 10 ou mais pontos de vitória durante o seu turno, ele vence. Se ele conseguir 10 ou mais pontos durante o turno de outro jogador, ele deve esperar o seu turno para declarar vitória.

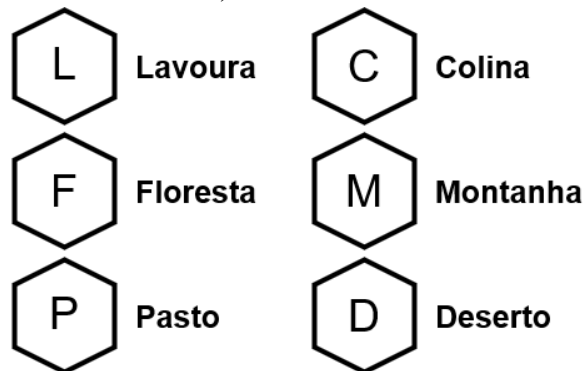
No início do jogo, as peças de terreno e as placas numéricas são distribuídas aleato-

Figura 13 – Terrenos do *Settlers of Catan* (Cores).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 14 – Terrenos do *Settlers of Catan* (Símbolos).



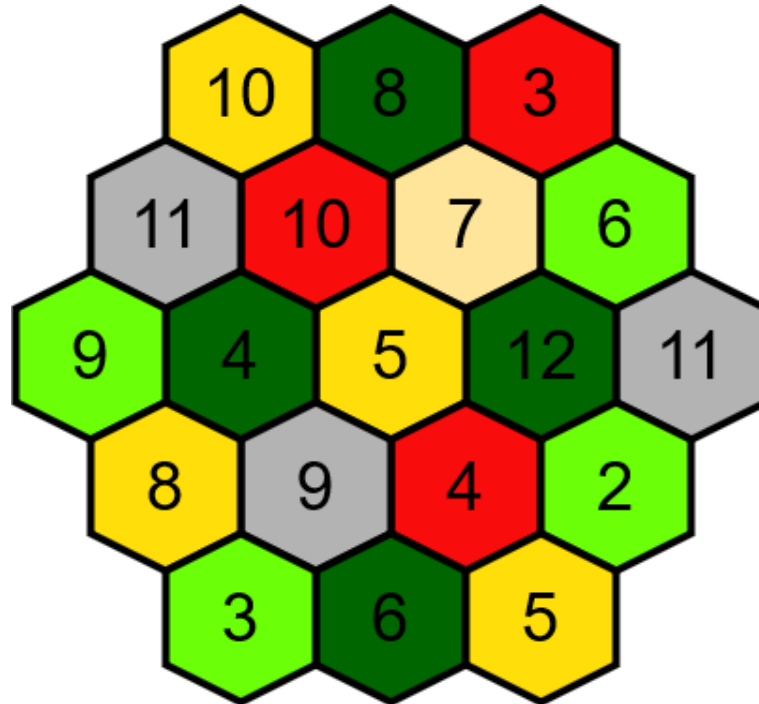
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

riamente pelo mapa. Nenhuma placa numérica deve ser colocada sobre o terreno de Deserto; em seu lugar, é colocada a peça do ladrão. A Figura 15 mostra como seria a distribuição das peças do mapa de forma balanceada por meio de cores. Uma representação similar por meio de símbolos pode ser vista na Figura 16.

Após a criação do mapa, cada jogador recebe 4 cidades, 5 assentamentos e 15 estradas. Os jogadores devem, então, colocar 2 assentamentos e 2 estradas no mapa. Assentamentos devem ser colocados nos vértices de cada hexágono, cidades são construídas aprimorando assentamentos já presentes no mapa, e estradas precisam ser colocadas de forma que se conectem a outros assentamentos, cidades ou estradas do jogador.

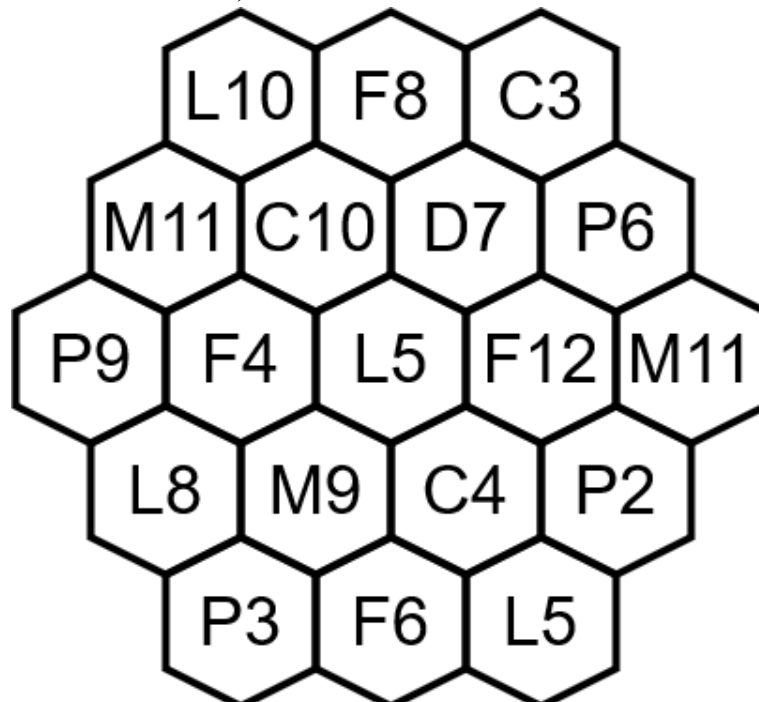
Cada jogador possui um turno, o qual é dividido em 3 fases. Na primeira etapa, a fase de distribuição, o jogador do turno deve lançar 2 dados de 6 lados; a soma dos resultados indicará um ou mais hexágonos no mapa. Todos os jogadores com assentamentos ou cidades nos vértices desse hexágono ganham recursos do tipo do terreno do assentamento/cidade. Assentamentos concedem 1 recurso cada, e cidades 2 recursos cada. Se o resultado do lançamento for 7, os jogadores com mais de 7 recursos perdem metade dos seus recursos atuais, e a peça de ladrão é

Figura 15 – Exemplo de mapa balanceado para o *Settlers of Catan* (Cores), adaptação (SARAIVA *et al.*, 2020).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 16 – Exemplo de mapa balanceado para o *Settlers of Catan* (Símbolos), adaptação (SARAIVA *et al.*, 2020).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

movida para um hexágono escolhido pelo jogador do turno. Após mover a peça, o jogador do turno pode roubar 1 carta de recurso de um jogador com um assentamento ou cidade nos vértices

do hexágono. Terrenos com a peça de ladrão não produzem recursos. A segunda fase é a fase de troca, onde o jogador do turno pode trocar recursos com outros jogadores fazendo ofertas ou trocando 4 recursos por 1 recurso de sua escolha da pilha de recursos. A terceira fase é a fase de construção, onde o jogador pode gastar recursos para colocar estruturas no mapa.

As cartas de desenvolvimento e outras condições especiais do jogo não serão listadas neste documento, pois não têm relevância para o problema de geração balanceada dos mapas.

5.3 Obtendo o balanceamento do mapa no *Terra Mystica*

O balanceamento do *Terra Mystica* está relacionado à forma como os terrenos, vistos na Figura 8, são organizados no mapa. Para obter o balanceamento do mapa, os terrenos devem ser posicionados de forma a obedecer a uma certa quantidade de requisitos; quanto mais requisitos forem satisfeitos, maior a qualidade do mapa. Para o problema do *Terra Mystica* em questão, trataremos 4 requisitos:

1. Não devem haver terrenos iguais adjacentes, para impedir vantagens no início do jogo. Esse requisito é de extrema importância tanto para o balanceamento a fim de impedir certos jogadores de não precisarem gastar pás no início do jogo, além de manter a fidelidade com os mapas originais;
2. Os rios devem ter entre 1 e 3 rios adjacentes, para impedir a geração de lagos que impedem o desenvolvimento de algumas facções dentro do jogo;
3. Os rios devem formar um único componente conectado. Este requisito, juntamente com o requisito número 2, é considerado essencial para manter a semelhança entre mapas gerados e os mapas originais do jogo;
4. Os terrenos devem ter pelo menos um vizinho que possa ser transformado gastando apenas uma pá. Esse requisito ajuda a promover o balanceamento ao facilitar o desenvolvimento de todos os jogadores nos estágios iniciais do jogo.

5.4 Obtendo o balanceamento do mapa em *Settlers of Catan*

O balanceamento do *Settlers of Catan* depende do posicionamento de seus terrenos, representados na Figura 13, e dos valores associada aos recursos presentes em cada um deles. Os requisitos estabelecidos para obtenção do balanceamento do tabuleiro são:

1. Não devem haver terrenos iguais adjacentes, para evitar monopólios de recursos pelos

jogadores.

2. A probabilidade de se obter um determinado recurso deve ser proporcional à quantidade de terrenos com aquele recurso no mapa, ou seja, a probabilidade de se obter recursos de dentro de um grupo deve ser aproximadamente igual. Lavoura, Floresta e Pasto possuem 4 terrenos e formam um grupo, Colina e Montanha possuem 3 terrenos e formam outro grupo.
3. Terrenos que obtiveram os rolamentos de 8 e 6 não devem estar situados próximos um ao outro, já que são ambos os rolamentos de maior probabilidade, e sua proximidade acarreta em uma região desbalanceada no mapa.

5.5 Implementação do BRKGA para *Terra Mystica*

Para o problema em questão foi realizada a transformação do mapa em um grafo, como pode ser visto na Figura 17. Cada grafo é referente a uma possível solução, ou mapa, logo, um membro da população. Cada vértice do grafo representa um hexágono do mapa, como o visto na Figuras 10 e 11. Cada vértice irá conter o tipo de terreno que o representa e as informações de suas arestas para descobrir os terrenos vizinhos. Dado essas informações o decodificador irá tratar de verificar quão bem cada solução satisfaz os problemas de balanceamento com base nos requisitos descritos na Seção 5.3 e o algoritmo realizara o processo do BRKGA explicado na Seção 3.3.

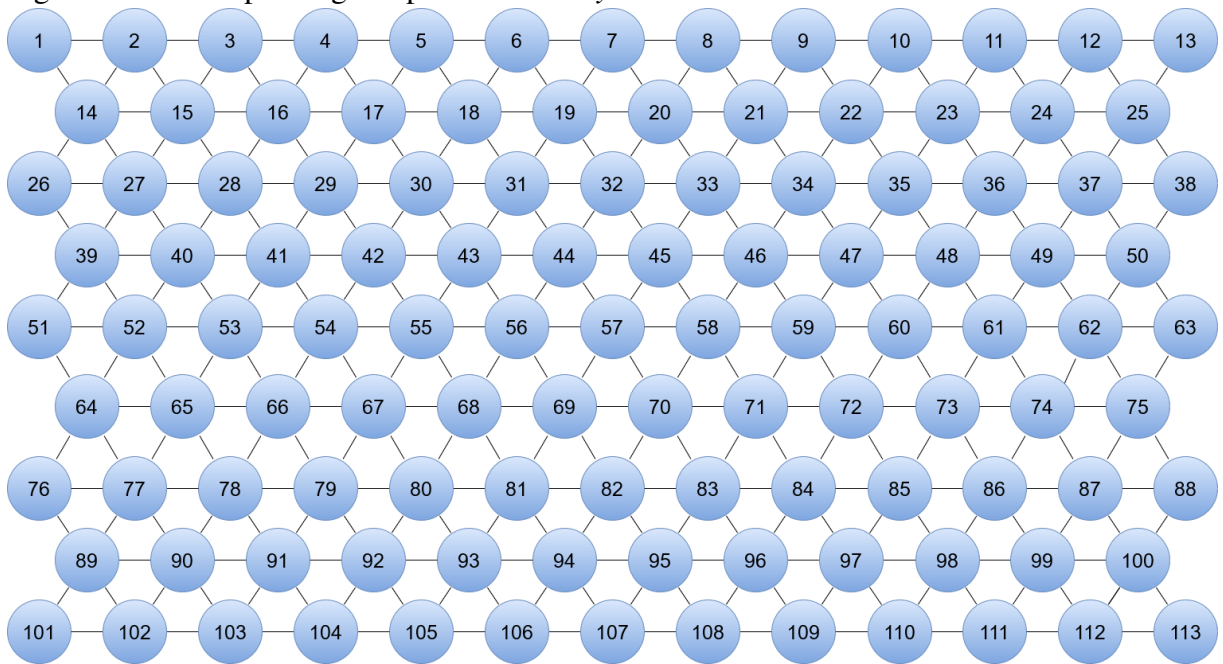
Para implementação do BRKGA foi utilizado um número de indivíduos p variante entre 1000 e 50000. A elite e a quantidade de mutantes para ambas as populações será de 10% da população original. A sequencia de passos realizada pelo algoritmo pode ser vista Figura 18.

Para dar início ao algoritmo, foi dada uma chave que possui todos os possíveis terrenos do mapa. Após receber essa chave, o algoritmo a embaralha e envia a chave atual para o decodificador analisar a sequência e atribuir um valor de satisfação a ela. Após receber o valor, o algoritmo armazena esse valor junto com a chave em um vetor que será chamado de população. Esse processo se repete até que o tamanho do vetor seja igual ao tamanho proposto da população.

Quando o decodificador é acionado ele recolhe a chave informada pelo algoritmo e a distribui pelo grafo, visível na Figura 17. Após a distribuição irá retornar o valor da chave após verificar a satisfação dos requisitos.

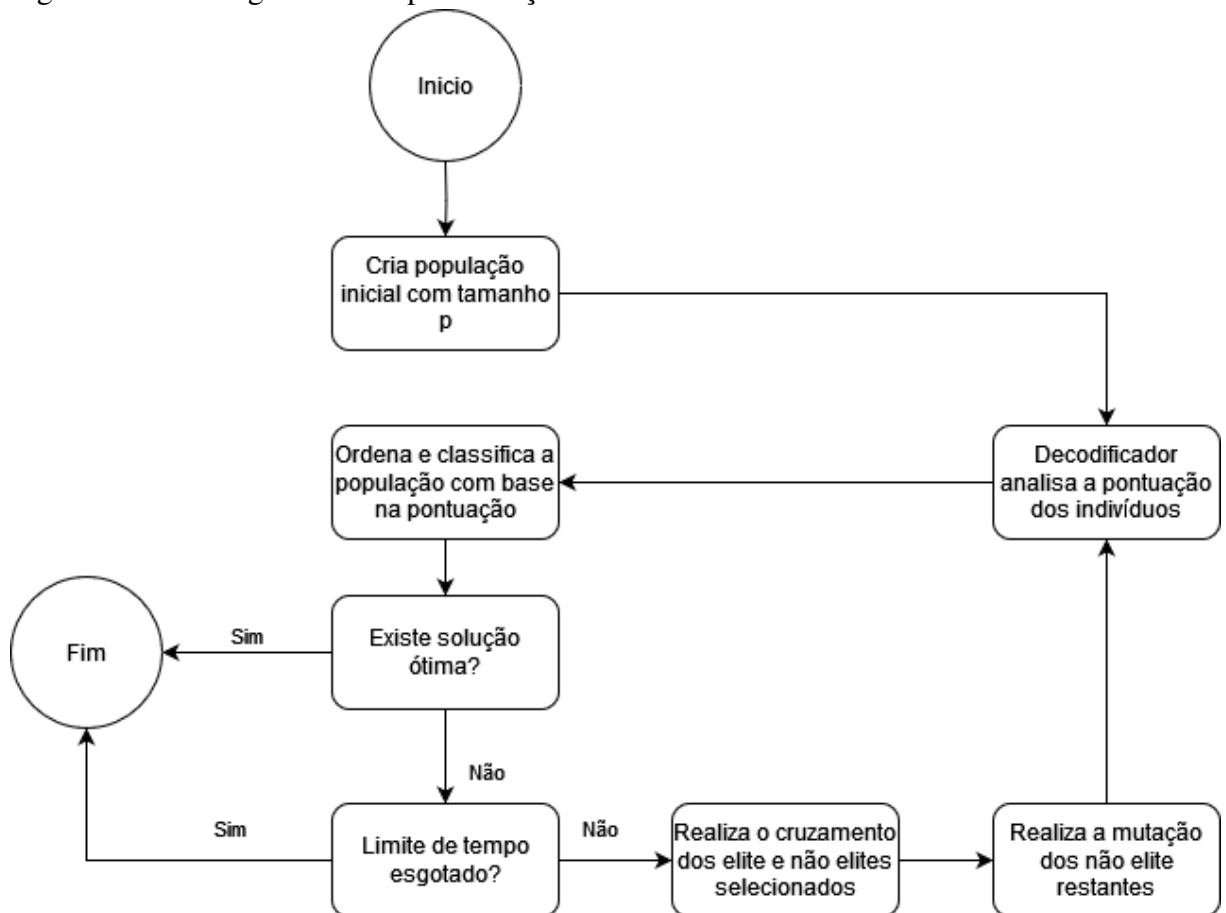
Para a verificação dos requisitos 1, 2 e 4, o decodificador percorre o grafo, analisando as propriedades do vértice atual e de seus vizinhos. Se o terreno do vértice atual não for um

Figura 17 – Exemplo de grafo para o *Terra Mystica*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 18 – Fluxograma da implementação do BRKGA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

rio e algum de seus vizinhos possuir um terreno de mesmo valor, o Requisito 1 é violado. Se o terreno do vértice atual não for um rio e nenhum de seus vizinhos possuir um terreno que possa ser transformado gastando apenas uma pá, o Requisito 4 é violado. Se o terreno do vértice atual for um rio e o número de rios vizinhos for maior que 3, o Requisito 2 é violado.

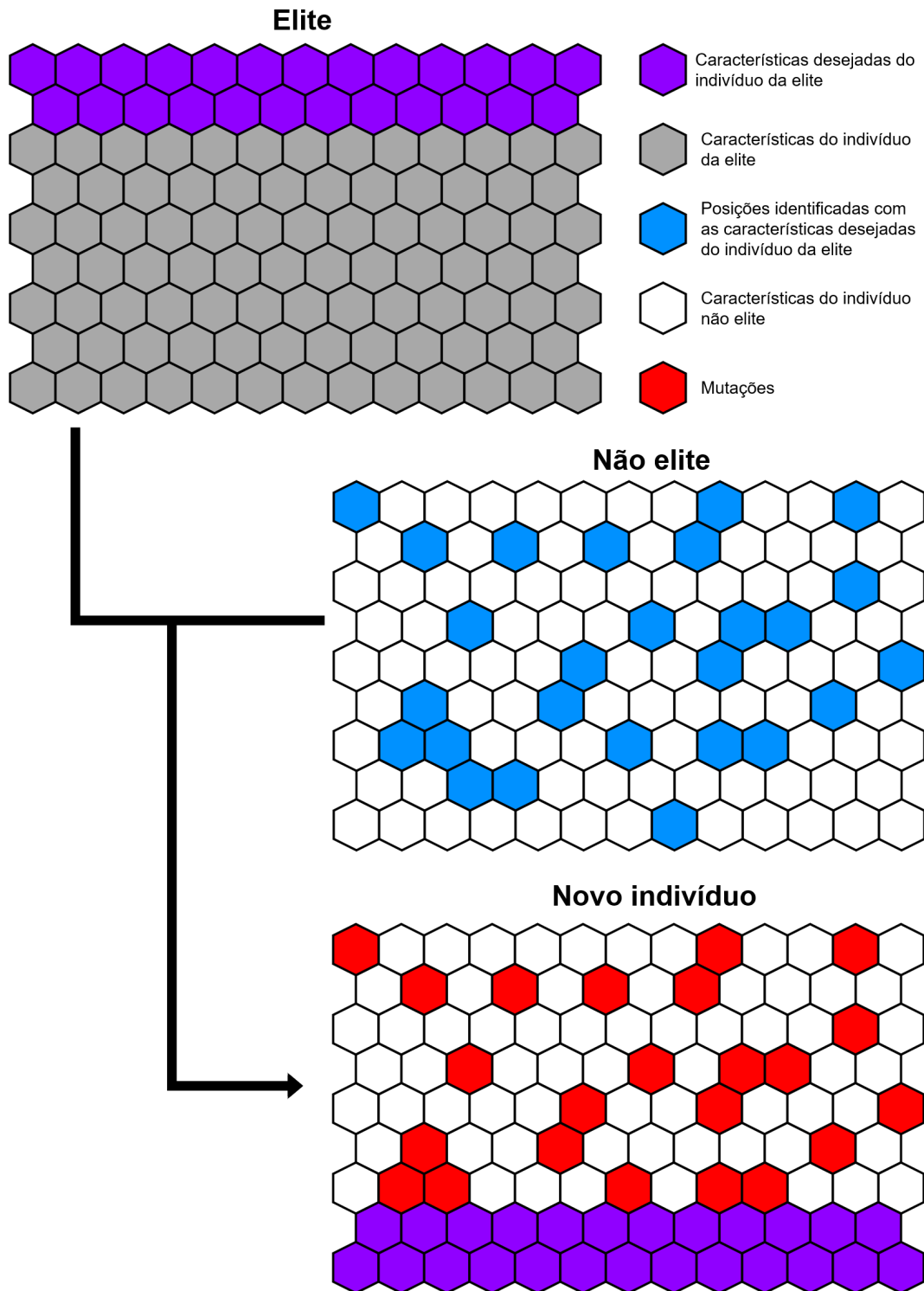
Para a verificação do Requisito 3, o decodificador percorre o mapa até encontrar um vértice que possua um terreno de rio. Após isso, ele aciona uma função recursiva para todos os vizinhos desse vértice que também sejam rios. Cada vez que um rio é verificado, ele é marcado como visualizado. Sempre que um rio não visualizado é verificado, o contador geral aumenta em 1. Ao final da função recursiva, se o valor total retornado pela função for menor que o número total de rios presentes no mapa, isso significa que um ou mais terrenos de rio estão desconectados. Assim, o Requisito 3 é violado. Diferentemente dos demais requisitos, este requisito pode ser violado apenas uma vez.

Após atingir o tamanho desejado da população, o algoritmo ordena a população de forma crescente. Portanto, o primeiro elemento contém a chave com o menor número de restrições violadas, e o último elemento contém a chave com o maior número de restrições. Em outras palavras, o primeiro elemento contém a chave de melhor satisfação, e o último elemento contém a chave de pior satisfação.

Terminada a ordenação, o algoritmo inicia o processo de evolução do BRKGA. Primeiramente, verifica se a pontuação do primeiro membro da população é igual a 0 (satisfaz todos os requisitos) ou se o processo de evolução ultrapassou o tempo limite. Caso ambas as condições sejam falsas, o algoritmo inicia um laço de repetição, começando pelo primeiro integrante dos não elite. Para cada iteração, um membro é selecionado, e verifica-se sua elegibilidade para o cruzamento (posição no vetor menor que a quantidade de mutantes). Caso ele esteja apto a participar do cruzamento, um membro aleatório da elite é escolhido para realizar a troca de genes. Nesse processo, as primeiras duas fileiras do mapa do indivíduo da elite são implantadas no indivíduo não elite, como representado nas Figuras 19 e 20. Se o indivíduo não for qualificado para o cruzamento, ele sofrerá uma mutação (realizando novamente o embaralhamento da chave). Após cada processo de cruzamento e mutação, as novas chaves são reavaliadas pelo decodificador.

Ao finalizar o processo de evolução, a população é reorganizada e a condição de parada é mais uma vez analisada. Se ela for satisfeita, o laço é interrompido e a chave de melhor satisfação é retornada, encerrando assim a execução do algoritmo.

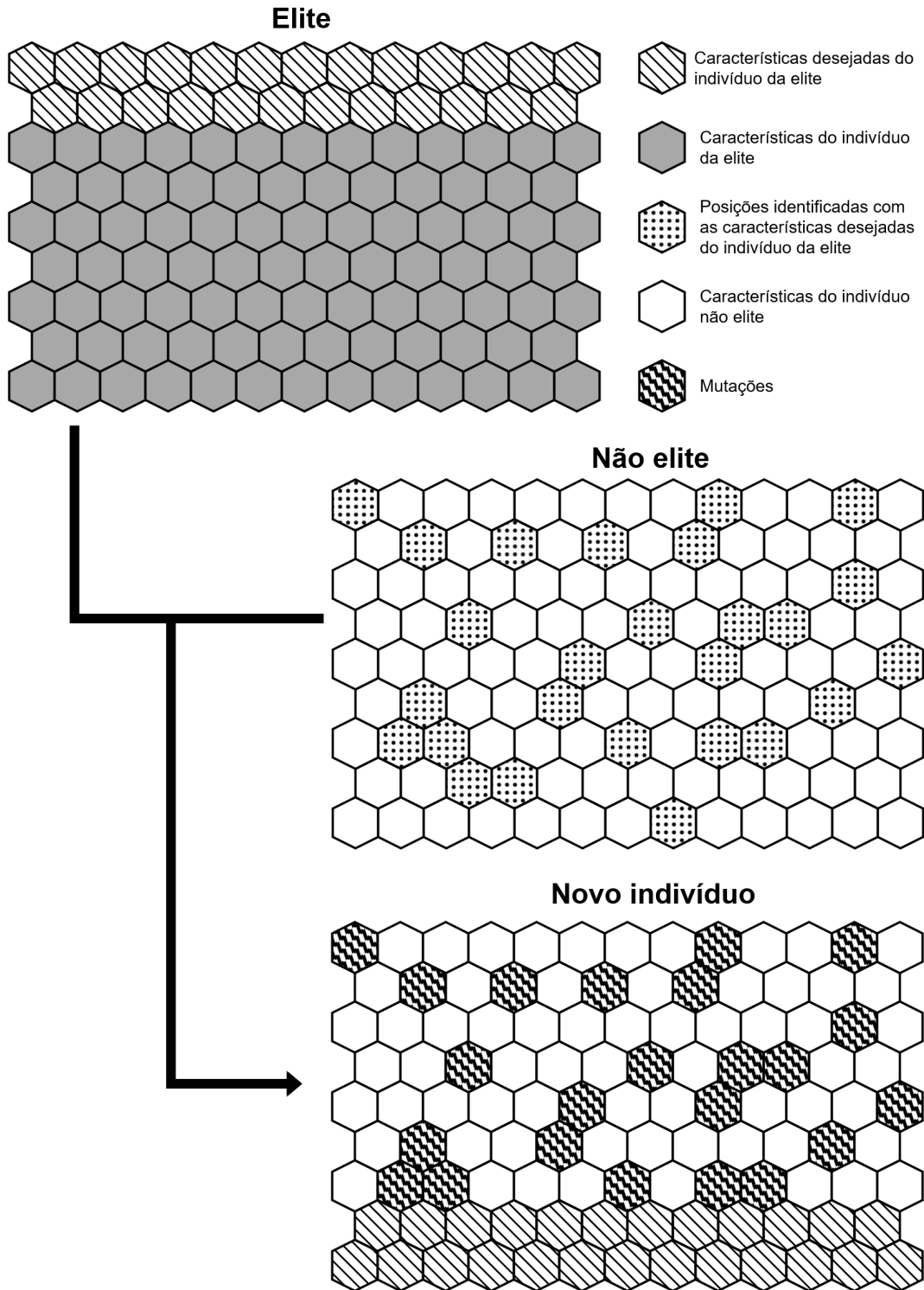
Figura 19 – Processo de cruzamento de indivíduos do *Terra Mystica* (Cores).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para ampliar o ambiente de testes, será proposta uma versão adicional do algoritmo, desta vez utilizando a técnica de reinicialização. O algoritmo começará guardando o valor do indivíduo na primeira posição. Sempre que o algoritmo da primeira população obtiver um valor menor que o guardado, ocorrerá uma atualização do valor. Se o algoritmo for incapaz

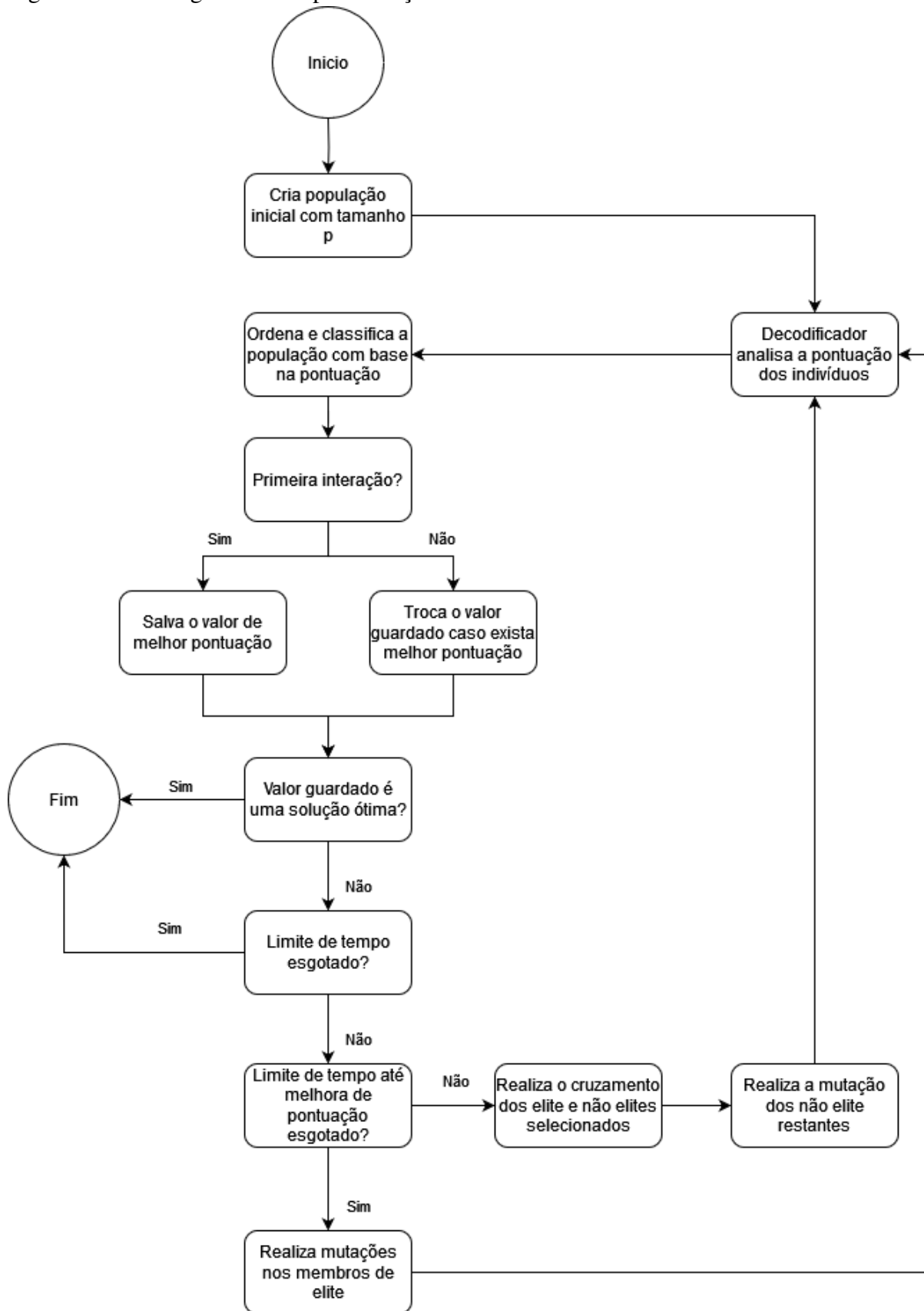
Figura 20 – Processo de cruzamento de indivíduos do *Terra Mystica* (Símbolos).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

de gerar melhorias na população após um intervalo de tempo, o algoritmo realizará mutações nos indivíduos da elite, forçando assim novas características para os membros da elite. As verificações de soluções ótimas serão feitas com base no melhor resultado armazenado. Uma adaptação do fluxograma para essa técnica pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 – Fluxograma da implementação do BRKGA com reinício.

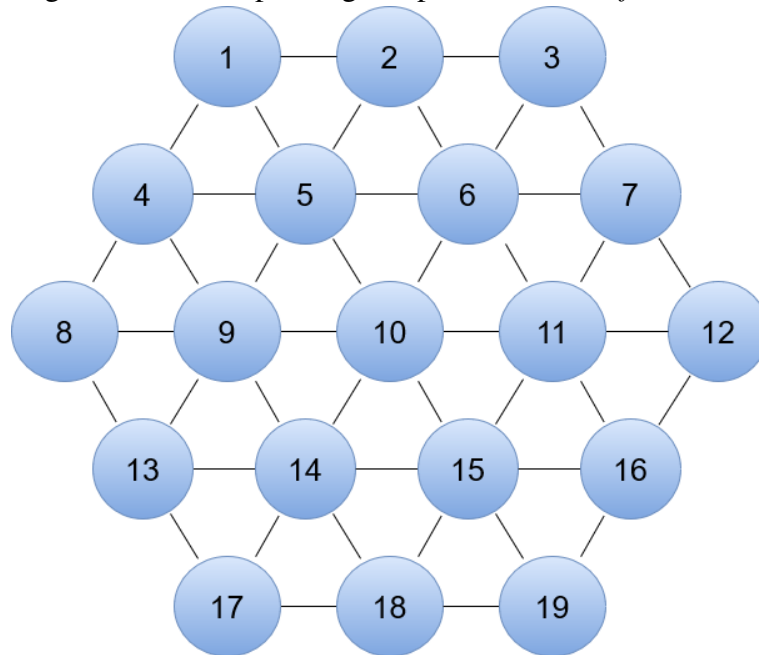


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.6 Implementação do BRKGA para *Settlers of Catan*

Foi feita a transformação do mapa em um grafo, como pode ser visto na Figura 22. Cada grafo será referente a uma possível solução. Cada vértice representa um hexágono no mapa, o qual possui dois valores, um número n e um terreno t , onde n pertence ao conjunto $\{2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12\}$ e t corresponde a um dos 5 terrenos disponíveis. Existe um vértice predefinido para todas as soluções, sendo ele $[n: 7, t: \text{deserto}]$. Dadas essas informações, o decodificador irá tratar de verificar quão bem cada solução satisfaz os problemas de balanceamento com base nos requisitos descritos na Seção 5.4, e o algoritmo realizará o processo do BRKGA explicado na Seção 3.3.

Figura 22 – Exemplo de grafo para o *Settlers of Catan*



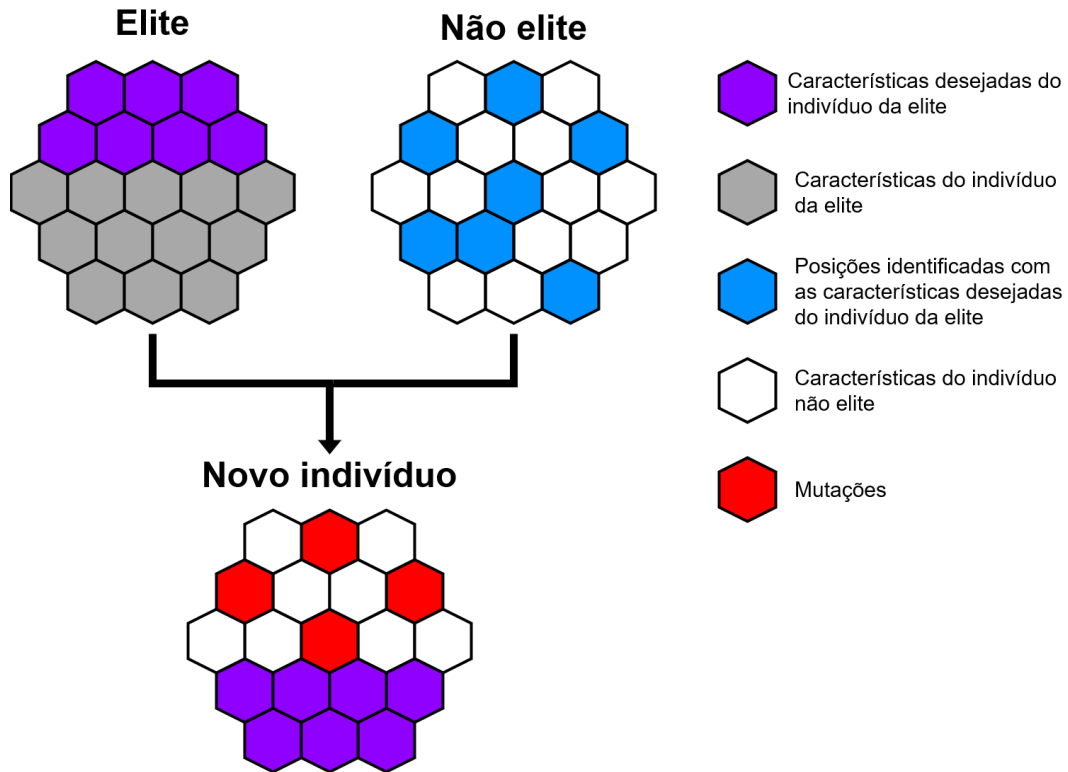
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A implementação do BRKGA para o *Settlers of Catan* será semelhante à implementação proposta para o *Terra Mystica* na Seção 5.5, seguindo os mesmos fluxogramas presentes nas Figuras 18 e 21, com diferenças no processo de cruzamento de indivíduos e no funcionamento do decodificador para tratar as restrições do novo mapa.

O processo de cruzamento será similar ao proposto para o *Terra Mystica*, sendo as duas primeiras fileiras do indivíduo de elite transferidas para as duas últimas linhas do elemento não elite. No entanto, para o *Settlers of Catan*, esse processo precisará ser feito tanto para os números quanto para os terrenos, pois as restrições dependem das relações entre eles. Sendo assim, o algoritmo realizará o processo de cruzamento, representado nas Figuras 23 e 24, duas

vezes, uma para realizar a cópia dos terrenos e outra para realizar a cópia dos números.

Figura 23 – Processo de cruzamento de indivíduos do *Settlers of Catan* (Cores).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

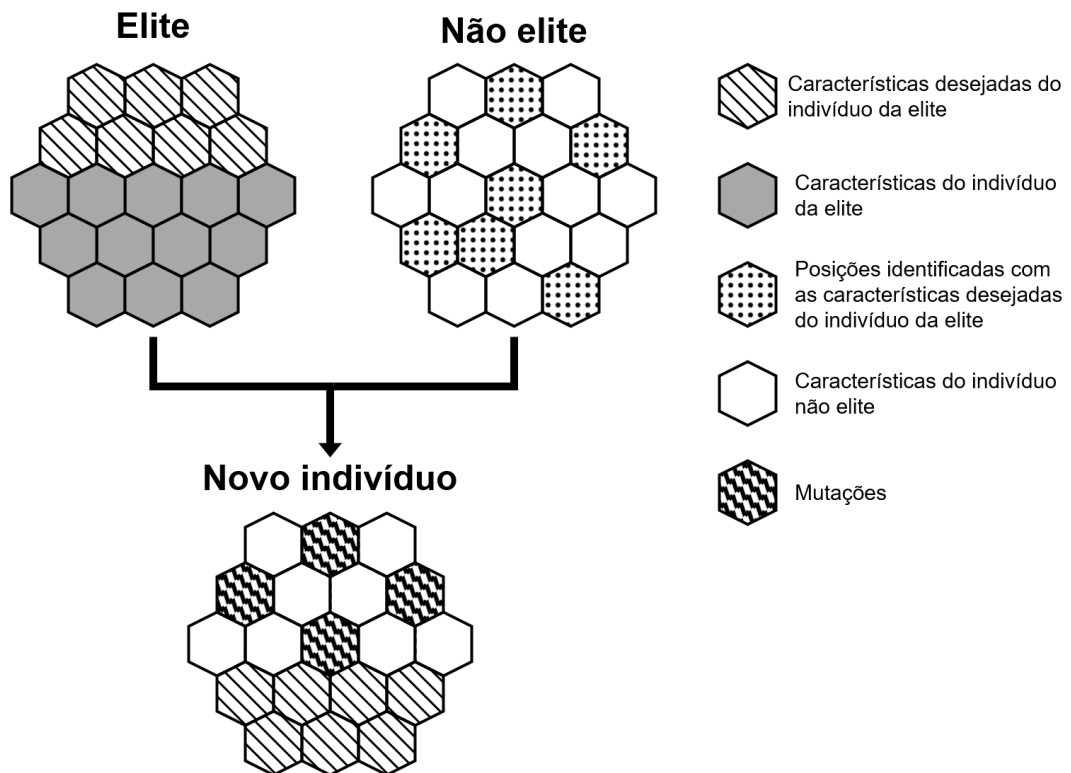
Um problema que pode ocorrer durante o cruzamento proposto é a possível separação do terreno de deserto e do número 7, caso estejam nas últimas duas linhas do terreno não elite. Para impedir isso de ocorrer, sempre que o algoritmo for realizar a troca de terreno, ele verifica se o terreno que será transferido é um deserto e, caso seja, ele irá transferir o número 7 para o mesmo destino, impedindo assim a separação.

Para realizar a pontuação dos mapas, o decodificador do *Settlers of Catan* receberá uma chave do algoritmo, contendo os terrenos e seus valores. Ele então irá distribuí-los pelo grafo mostrado na Figura 5, para então realizar as verificações dos requisitos.

Para a verificação dos requisitos 1 e 3, o decodificador irá percorrer o grafo e analisar as propriedades do vértice atual e de seus vizinhos. Caso o terreno do vértice atual seja igual ao terreno de algum de seus vizinhos, o Requisito 1 é violado. Caso o número do vértice atual seja 6 ou 8, e algum de seus vizinhos possua um número 6 ou 8, o Requisito 3 é violado.

Para a verificação do Requisito 2, o decodificador irá percorrer o grafo e armazenar a soma das probabilidades de cada grupo de recurso. Após terminar de percorrer o grafo, ele analisa se a diferença da soma das probabilidades entre um grupo difere em no máximo 1.

Figura 24 – Processo de cruzamento de indivíduos do *Settlers of Catan* (Símbolos).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

6 AMBIENTE COMPUTACIONAL

Nesse Capítulo serão apresentadas as especificações da máquina e os recursos utilizados para a implementação descrita no Capítulo 5.

A especificações da maquina utilizada são as seguintes:

- Sistema Operacional: Windows 10 Pro
- Processador: Intel(R) Core(TM) i5-9300h CPU @ 2.40GHz 2.40GHz
- Memoria RAM: 16GB
- Placa de Video: NVIDIA GeForce GTX 1650

Para o ambiente de desenvolvimento, foi utilizado o *Visual Studio Code*, e a linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento foi o C++. Para melhorar o desempenho do algoritmo, foi implementado o algoritmo de ordenação *HeapSort*; para mais informações, consulte Szwarcfiter e Markenzon (1994). Os grafos e mapas criados pelo autor neste documento foram feitos utilizando a ferramenta online *Draw.io*; para mais informações, veja Ltd (2005). Para a criação dos gráficos presentes, foi utilizada a ferramenta *Google Sheets*, que pode ser encontrada em Google (2006).

O código desenvolvido nesse trabalho pode ser acessado em Mendes Filho (2023)

7 RESULTADOS

Neste Capítulo, serão apresentados os resultados obtidos a partir da implementação realizada na metodologia, bem como a comparação com dados já existentes nos trabalhos relacionados.

Para solucionar o problema de forma eficiente, será utilizada a estratégia de satisfazer o maior número possível de requisitos, de modo a quebrar o menor número de restrições. Uma pontuação será atribuída a cada mapa apresentado, sendo os pontos obtidos cada vez que uma restrição é violada. Múltiplos pontos podem ser obtidos por restrição; assim, os mapas com menores pontuações serão aqueles que desobedecerem menos restrições.

7.1 Resultados para o *Terra Mystica*

Para o problema do *Terra Mystica*, o algoritmo será executado 30 vezes para uma população de 1000 e mais 30 vezes para uma população de 50000 indivíduos, a fim de analisar possíveis melhorias no desempenho para diferentes tamanhos de população. O tempo limite para cada execução de ambas as populações foi de 5 minutos. Esses parâmetros foram escolhidos para analisar o desempenho em comparação com os resultados do ACO (SARAIVA *et al.*, 2020) para a criação de um mapa sob as mesmas restrições.

Durante os testes iniciais, o algoritmo apresentou grandes dificuldades para satisfazer todos os requisitos, apresentando uma pontuação média de 30 restrições quebradas por mapa para ambas as populações. Os resultados obtidos para a população de 1000 indivíduos podem ser visualizados na Tabela 3, enquanto os resultados para a população de 50000 indivíduos podem ser vistos na Tabela 4. É importante lembrar que foi atribuído um peso ao Requisito 3 para garantir a presença de um rio único, o que resulta em um pico inicial na pontuação.

As Figuras 25 e 26 apresentam o desempenho médio das populações de 1000 e 50000 indivíduos, respectivamente, enquanto a Figura 27 mostra uma comparação do desempenho entre as duas populações.

Tabela 3 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 1000 indivíduos do *Terra Mystica*.

Mapa	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
1	134	37	37	37	37	34	33	33	33	31	31	29	29	29	29	29
2	137	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
3	135	36	36	35	35	35	35	35	35	31	31	28	28	28	28	28
4	134	39	39	38	35	35	33	33	32	32	32	32	32	32	32	32
5	138	40	40	38	38	37	37	37	36	35	32	32	31	31	31	31
6	136	36	36	36	32	32	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
7	131	46	38	35	35	35	33	25	25	25	25	25	25	25	25	25
8	135	34	31	31	31	31	31	31	22	22	22	22	22	22	22	22
9	136	39	37	37	35	35	35	35	35	35	31	31	31	31	31	31
10	137	41	41	41	37	37	36	34	34	34	34	34	34	34	26	26
11	135	33	33	33	33	33	33	33	31	31	31	31	31	31	31	31
12	139	43	34	34	34	33	33	33	33	33	33	29	29	29	29	29
13	138	39	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	32	32	32	32
14	135	33	33	33	33	33	33	33	33	33	32	32	32	32	32	32
15	137	35	35	35	34	34	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
16	139	40	40	40	35	35	35	35	35	35	31	31	31	31	31	31
17	141	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
18	136	38	38	38	38	38	38	36	36	36	36	36	36	36	34	28
19	137	40	39	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
20	137	39	39	39	39	39	39	36	36	36	36	33	33	33	33	33
21	136	40	37	37	37	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
22	135	44	44	44	44	43	42	39	39	39	39	39	39	35	35	35
23	138	43	43	42	42	42	42	36	35	35	35	35	33	33	33	33
24	136	35	35	35	35	35	35	35	31	31	31	30	29	29	29	29
25	137	46	46	46	45	45	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
26	134	37	37	35	35	35	35	35	35	30	30	30	30	30	30	30
27	138	44	42	40	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
28	138	47	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
29	134	38	38	38	37	37	37	37	37	37	33	33	33	31	31	31
30	137	41	39	35	35	35	35	32	31	31	31	29	29	29	29	29
Média	136	38	37	36	35	35	34	33	33	32	32	31	31	31	30	30

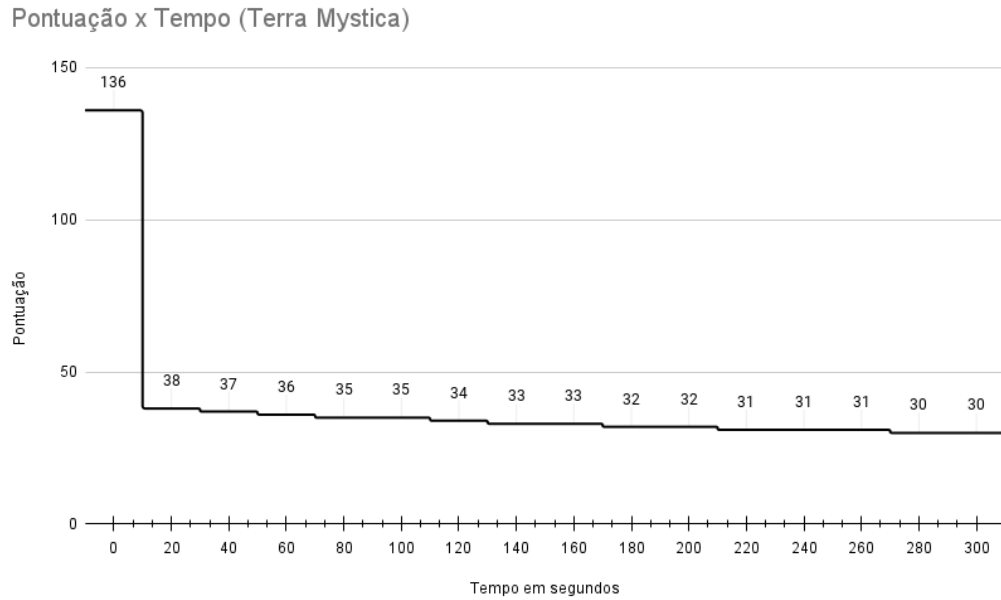
Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Tabela 4 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 50000 indivíduos do *Terra Mystica*.

Mapa	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
1	126	45	42	35	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
2	129	38	38	38	38	37	37	32	32	30	30	30	30	30	30	30
3	129	45	33	33	31	31	31	31	31	31	31	31	28	28	28	28
4	129	43	37	36	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
5	128	42	38	34	34	34	34	34	34	34	34	33	33	33	33	33
6	130	40	40	35	35	35	35	35	35	35	35	34	34	34	34	34
7	126	43	40	40	36	36	36	36	34	34	34	34	34	34	34	34
8	127	38	37	37	36	36	36	36	36	33	33	33	33	33	33	28
9	126	42	35	35	35	35	35	31	31	31	31	31	29	29	29	29
10	128	40	38	35	34	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
11	130	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
12	129	39	38	37	35	35	35	35	35	35	31	31	31	31	31	31
13	127	43	39	39	39	38	36	36	36	35	34	31	31	31	31	31
14	127	43	43	35	35	35	35	35	35	35	33	33	33	30	30	30
15	129	46	39	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	33	33	32
16	129	42	42	37	37	34	34	34	34	34	33	33	33	33	33	33
17	127	37	37	32	32	32	32	32	32	27	27	27	27	27	27	27
18	126	42	42	42	42	39	39	36	36	36	36	33	33	33	29	29
19	128	41	41	37	37	35	35	35	31	31	31	31	31	31	31	31
20	130	38	38	37	37	37	37	37	35	35	35	35	34	34	34	34
21	129	43	41	40	38	38	33	33	33	33	31	31	31	31	31	31
22	127	41	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
23	124	38	36	36	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
24	126	43	41	37	34	34	34	34	31	31	31	31	31	31	26	26
25	130	45	41	29	29	29	29	29	29	29	29	29	27	27	27	27
26	127	48	40	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
27	127	42	42	39	36	36	36	34	34	34	34	30	30	30	30	30
28	129	34	34	33	33	33	33	30	30	30	30	30	30	30	30	30
29	128	44	37	37	34	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
30	132	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Média	127	40	38	35	34	33	33	32	32	32	31	31	31	30	30	30

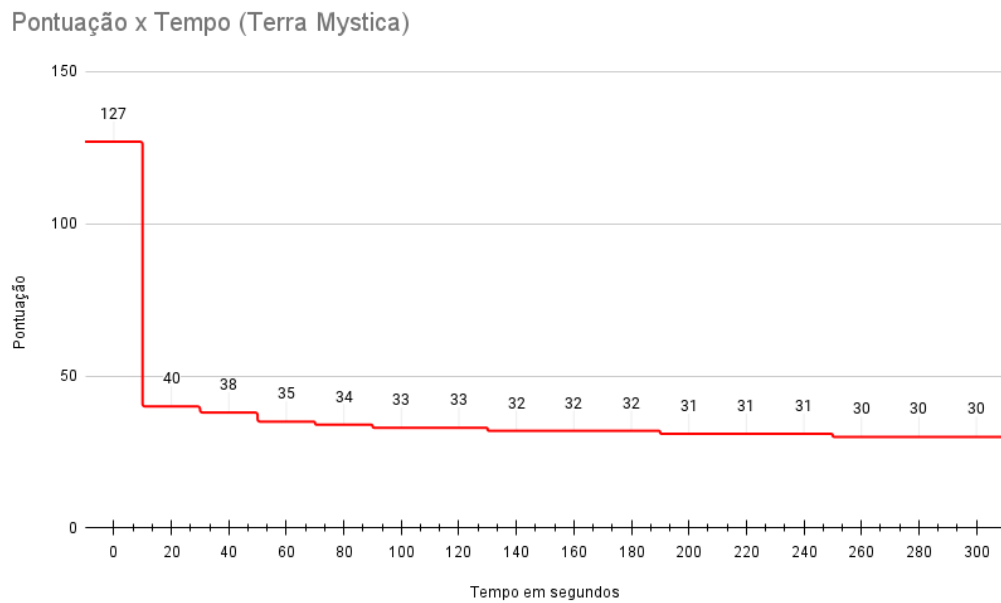
Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Figura 25 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA no *Terra Mystica* para uma população de 1000 indivíduos.



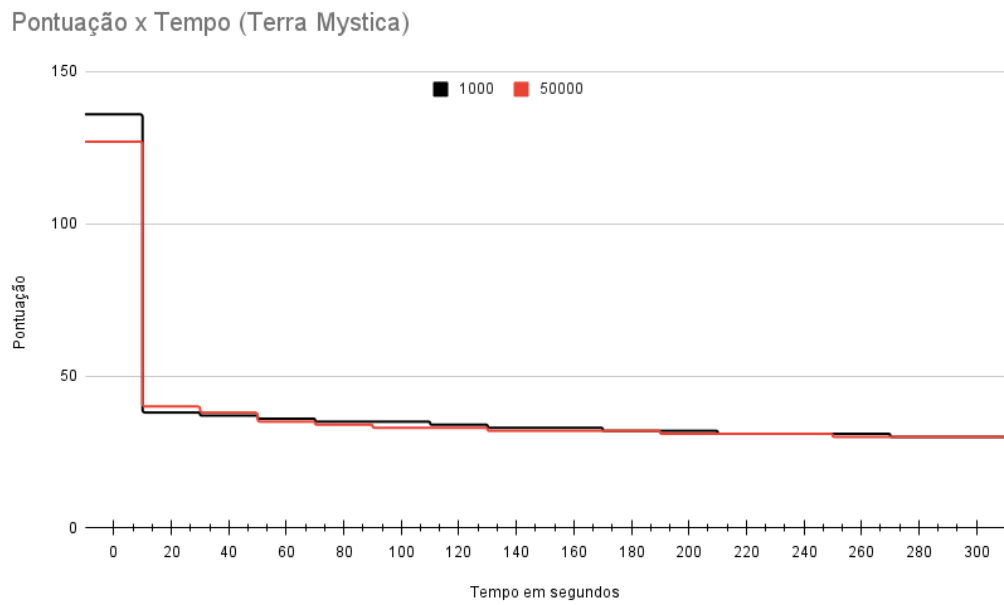
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 26 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA no *Terra Mystica* para uma população de 50000 indivíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Figura 27 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA no *Terra Mystica* para populações de tamanhos diferentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Após os testes iniciais foram realizados os testes utilizando a técnica de reiniciar, porém mais uma vez os resultados não foram satisfatórios. O valor médio de restrições para a população de 1000 indivíduos aumentou de 30 para 33, enquanto a de 50000 aumentou de 30 para 32. Além disso o melhor mapa encontrado alcançou um valor de apenas 28. Os resultados obtidos para a população de 1000 indivíduos podem ser visualizados na Tabela 5, enquanto os resultados para a população de 50000 indivíduos podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 5 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 1000 indivíduos do *Terra Mystica* com reiniciar.

Mapa	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
1	136	39	39	36	36	36	36	36	35	35	35	35	35	35	34	34
2	136	43	39	34	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
3	135	34	34	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
4	138	43	43	42	39	39	37	37	37	37	37	37	37	36	36	36
5	134	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	33	33
6	136	32	32	32	32	32	32	32	30	30	30	30	30	30	30	30
7	137	39	39	39	39	39	39	39	35	35	35	35	35	35	35	35
8	136	48	38	38	38	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
9	135	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
10	138	44	44	44	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
11	139	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
12	133	46	42	42	42	42	42	42	41	41	38	38	35	35	35	35
13	135	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	34	34
14	137	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
15	137	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
16	135	50	38	38	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
17	133	38	38	38	38	38	38	38	38	37	37	37	37	37	37	37
18	136	45	44	44	40	38	38	37	37	37	35	35	35	35	35	35
19	138	39	39	39	39	39	39	39	39	39	35	35	35	35	35	35
20	136	119	48	47	47	42	42	42	42	42	42	42	42	34	34	34
21	139	40	39	39	39	39	39	38	38	38	38	38	38	38	38	38
22	139	38	38	38	38	35	35	35	35	35	35	35	32	32	32	32
23	134	43	43	37	37	37	37	37	37	36	36	34	34	34	34	34
24	136	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
25	134	40	40	39	39	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
26	135	38	38	38	38	38	38	34	34	34	34	34	34	34	34	34
27	132	42	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
28	136	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	31	31	31	31
29	137	40	40	40	40	40	37	36	36	36	35	35	33	33	33	32
30	133	40	38	38	38	37	37	37	37	28	28	28	28	28	28	28
Média	135	41	37	37	36	35	35	35	35	34	34	34	34	33	33	33

Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

As Figuras 28 e 29 apresentam o desempenho médio com reiniciar das populações de 1000 e 50000 indivíduos, respectivamente, enquanto a Figura 30 mostra uma comparação do desempenho entre as duas populações utilizando a técnica de reiniciar.

No fim, o melhor mapa obtido teve uma pontuação de 22. Uma representação gráfica do melhor mapa obtido durante os testes pode ser visto por meio de cores na Figura 31, e por

Tabela 6 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 50000 indivíduos do *Terra Mystica* com reiniciar.

Mapa	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
1	127	42	38	35	35	34	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
2	128	42	35	35	35	35	35	35	30	30	30	30	30	30	30	30
3	131	43	38	38	38	38	35	35	35	35	35	35	35	35	35	32
4	128	39	39	36	36	36	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
5	126	41	39	39	37	37	34	34	34	34	34	34	34	34	34	31
6	129	42	41	40	36	36	36	36	32	32	32	32	32	32	32	32
7	132	50	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
8	129	44	40	40	36	36	36	36	36	36	36	36	34	32	32	32
9	129	44	33	33	33	33	33	33	33	33	29	29	29	29	29	29
10	128	38	36	31	31	31	31	31	31	31	31	30	30	30	30	30
11	129	41	41	38	36	36	36	36	36	36	31	31	31	31	31	31
12	128	41	41	38	38	38	38	36	36	36	35	35	35	35	30	30
13	128	44	44	40	37	37	37	37	34	34	34	34	34	34	34	34
14	130	41	40	38	38	38	38	36	36	36	33	33	33	33	33	33
15	127	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	33	33
16	129	42	42	42	41	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
17	127	41	41	41	35	33	33	33	33	33	33	33	33	29	29	29
18	129	40	40	40	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
19	130	41	38	38	38	33	33	31	31	31	31	31	31	31	31	31
20	128	50	37	37	37	36	36	36	36	36	34	34	34	34	34	34
21	130	47	47	42	42	42	41	40	40	37	37	37	37	37	37	37
22	129	48	43	43	43	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
23	128	42	42	36	36	36	36	36	36	36	36	36	29	29	29	29
24	124	52	43	43	42	35	35	35	35	33	33	33	33	33	33	32
25	127	46	44	40	40	40	35	35	34	34	32	32	32	32	32	32
26	126	56	45	44	44	44	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
27	126	44	44	42	41	41	41	34	34	34	34	34	34	34	34	34
28	129	45	45	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	35
29	130	43	43	39	39	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
30	128	47	47	44	38	38	38	38	38	38	38	38	38	37	35	34
Média	128	43	40	38	37	35	34	34	34	33	33	33	33	32	32	32

Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

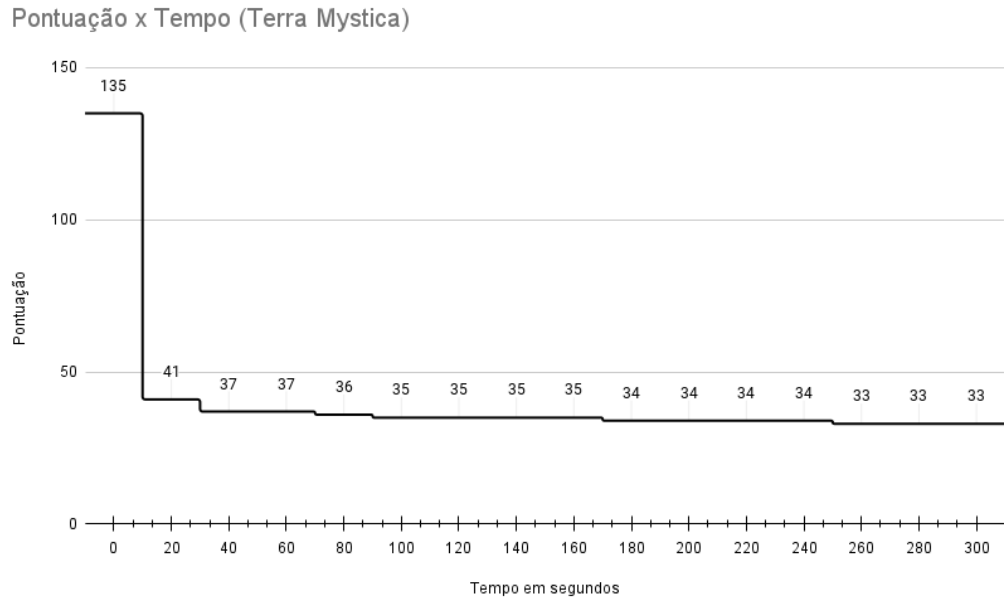
meio de símbolos na Figura 32. A Tabela 7 compara o resultado obtido pelo melhor mapa do BRKGA em comparação com mapas já existentes.

Tabela 7 – Numero de vezes que um requisito é violado para o melhor mapa gerado do BRKGA para o *Terra Mystica* e outros mapas oficiais.

Mapa	Pontuação	Requisito 1	Requisito 2	Requisito 3	Requisito 4
Melhor mapa BRKGA	22	10	0	0	12
Mapa Original	9	0	3	0	6
Fire and Ice	12	0	3	0	9
Fjords	9	0	0	0	9

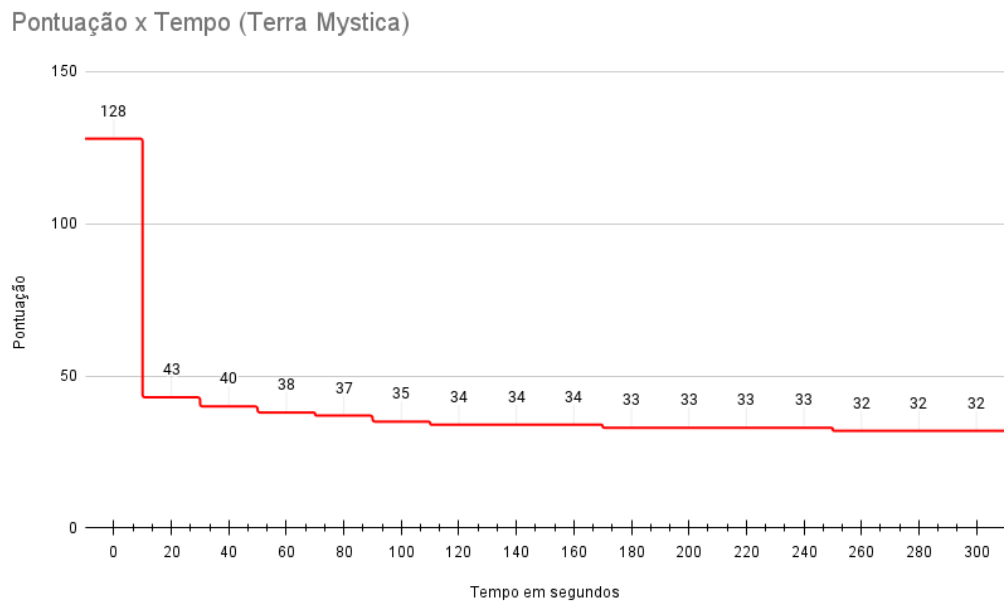
Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Figura 28 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com reiniciar no *Terra Mystica* para uma população de 1000 indivíduos.



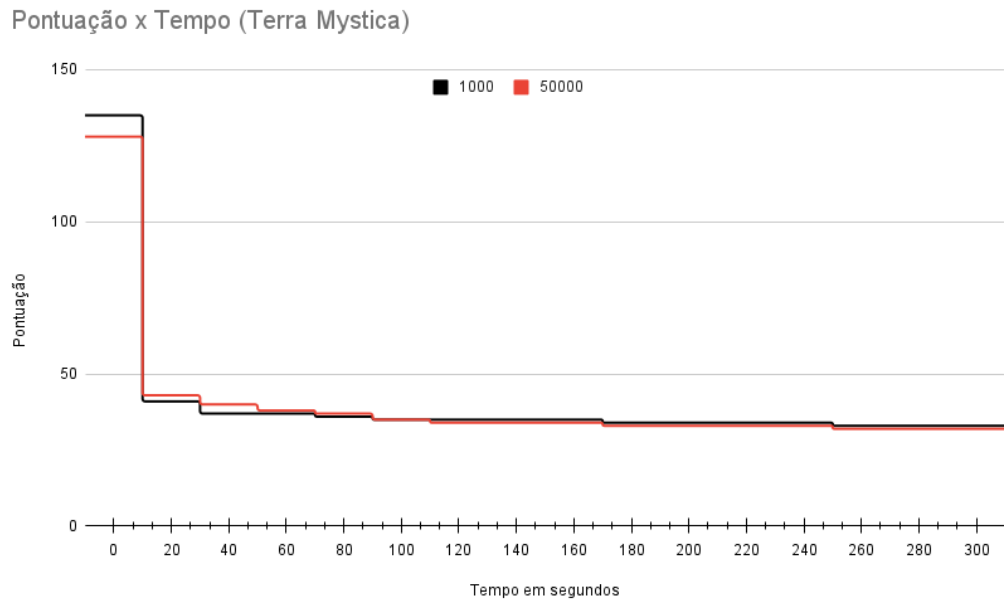
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 29 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com reiniciar no *Terra Mystica* para uma população de 50000 indivíduos.



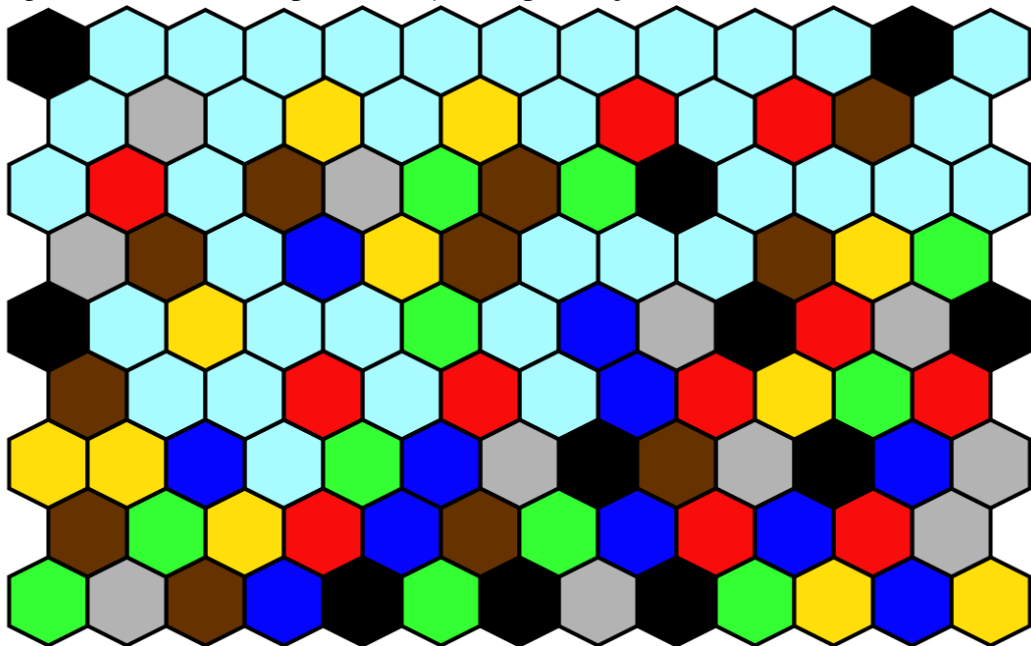
Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Figura 30 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com reiniciar no *Terra Mystica* para populações de tamanhos diferentes.



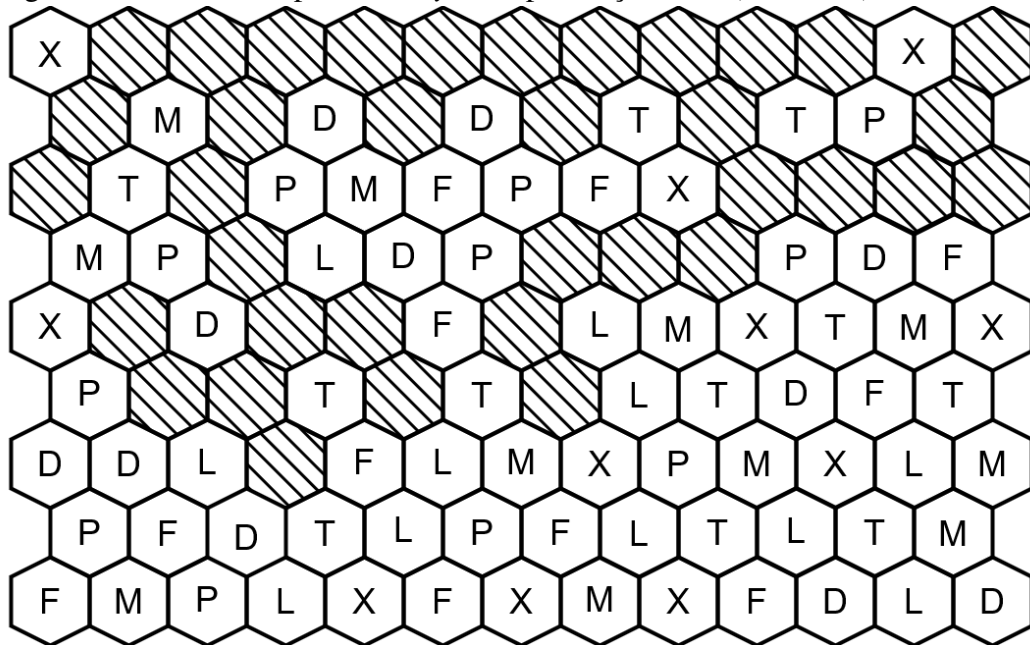
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 31 – Melhor mapa *Terra Mystica*, pontuação = 22 (Cores).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 32 – Melhor mapa *Terra Mystica*, pontuação = 22 (Símbolos).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

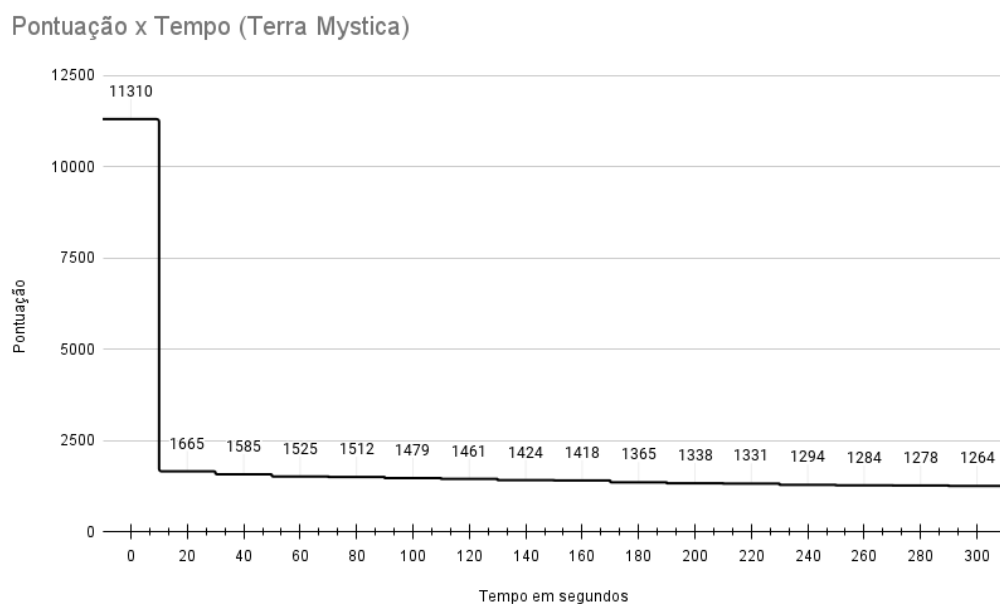
Devido o algoritmo não ser capaz de gerar soluções perfeitas para o problema foi tomada a decisão de priorizar os requisitos 1 e 3, assim seria possível manter um nível de semelhança com os mapas originais e garantir um certo nível de balanceamento. Para aumentar a prioridade do Requisito 1 foi colocado um peso de 100 na sua pontuação para cada vez que o requisito for violado, dessa forma o algoritmo irá tender a escolher mapas com menor violações desse requisito. Devido o alteração do sistema de pontuação foi necessário aumentar o peso do Requisito 3 de 100 para 10000, assim o algoritmo também priorizará mapas onde todos os rios formarem um componente conexo.

O algoritmo, entretanto, continuou a apresentar dificuldades para satisfazer todos os requisitos, apresentando uma media de 1274 pontos para a população de 1000 indivíduos, e 1327 pontos para a população de 50000 indivíduos.

Os resultados obtidos para a população de 1000 indivíduos podem ser visualizados na Tabela 8, enquanto os resultados para a população de 50000 indivíduos podem ser vistos na Tabela 9.

O desempenho médio das populações de 1000 e 50000 indivíduos com a utilização de pesos pode ser visto nos gráficos das Figuras 33 e 34 respectivamente. Um gráfico com a comparação entre o desempenho de ambas as populações ao decorrer do tempo limite pode ser visto na Figura 35

Figura 33 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso no *Terra Mystica* para uma população de 1000 indivíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 8 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 1000 indivíduos do *Terra Mystica* com peso.

Mapa	0	60	120	180	240	300
1	10929	1927	1219	1219	1219	1219
2	10926	1930	1720	1720	1720	1720
3	10730	2026	1726	1726	1721	1721
4	10423	2227	1520	1520	1320	720
5	10821	2119	1827	1827	1432	1432
6	10830	1725	1325	1325	1325	1221
7	10734	1535	1535	1421	1421	1421
8	10422	1734	1328	1328	1328	1328
9	10735	1632	1120	1025	1025	1025
10	10938	1519	1519	1519	1328	1328
11	10933	2030	1231	1231	1227	1227
12	10821	1424	1325	1325	1325	1325
13	11029	1733	1633	1527	1336	1336
14	10824	1529	1529	1227	1227	1227
15	10727	1534	1522	1522	1522	1425
16	10826	1921	626	626	626	626
17	10629	1624	1624	1624	1618	1426
18	10831	1733	1336	1336	1336	1323
19	11018	1820	1818	1516	1328	1328
20	10632	1920	1620	1329	1230	1230
21	10823	1518	1420	1420	1420	1420
22	10925	1734	1126	1126	1126	1126
23	10826	1331	1331	1240	1240	1031
24	10822	1825	1531	1531	1322	1228
25	10919	1221	1221	1221	1221	621
26	10828	1929	1537	1537	1336	1119
27	10723	1729	1729	1419	1226	1226
28	10923	1230	1230	1230	1230	1223
29	11027	1729	1529	1529	1122	1122
30	10636	1429	1429	1429	1421	1329
Média	10807	1710	1439	1385	1309	1235

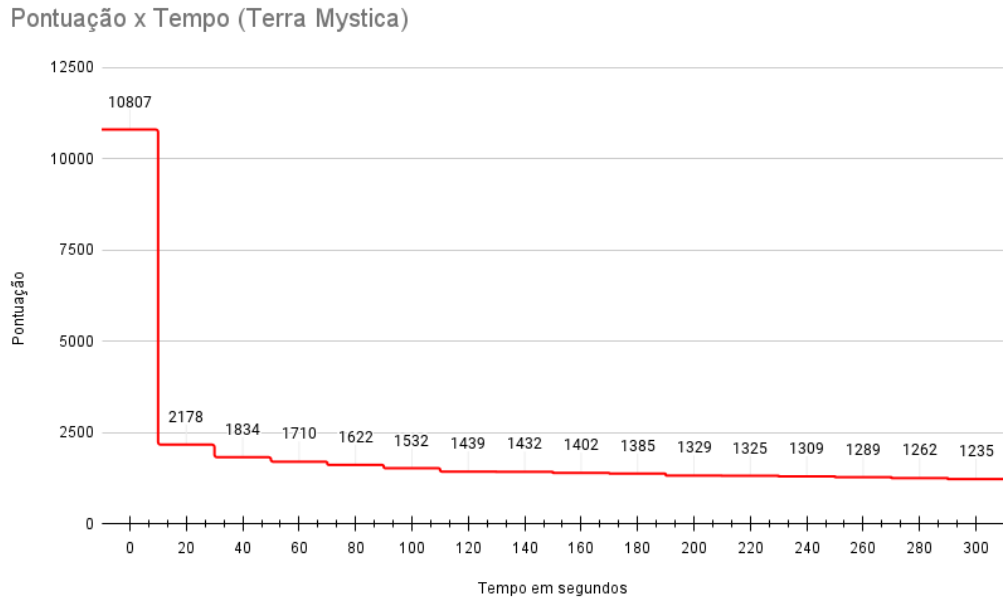
Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Tabela 9 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 50000 indivíduos do *Terra Mystica* com peso.

Mapa	0	60	120	180	240	300
1	10826	1922	1423	1423	1423	1125
2	11329	1223	1223	1223	1223	1223
3	11324	1322	1322	1322	1319	1319
4	11431	1434	1434	1026	1026	1026
5	11228	1030	1030	1030	1030	1030
6	11235	1930	1826	1821	1620	1214
7	11322	1223	1223	1223	1223	1223
8	11127	1627	1624	1624	1426	1426
9	11033	1231	1231	1231	1231	1231
10	11427	1335	1335	1229	1229	1229
11	11525	1425	1423	1331	1331	1331
12	11525	1730	1623	1123	1017	1017
13	11130	1423	1423	1221	1121	1121
14	11436	1633	1532	1326	1326	1326
15	11028	1626	1626	1527	1421	1421
16	11426	1722	1620	1435	1420	1420
17	11317	1336	1336	1336	1336	1336
18	11423	1620	1620	1423	1423	1423
19	11121	1523	1523	1523	1523	1422
20	11222	1422	1312	1312	1120	1120
21	11125	1223	1223	1223	1223	1223
22	11228	1618	1128	1128	1128	1128
23	11527	1630	1621	1419	1419	1321
24	11422	1722	1617	1617	1024	1024
25	11530	1723	1723	1723	1318	1318
26	11431	1224	1224	1224	1224	1224
27	11522	1825	1527	1232	1137	1137
28	11131	1727	1727	1521	1521	1521
29	11627	1525	1525	1525	1525	1525
30	11335	1825	1825	1631	1529	1529
Média	11310	1525	1461	1365	1294	1264

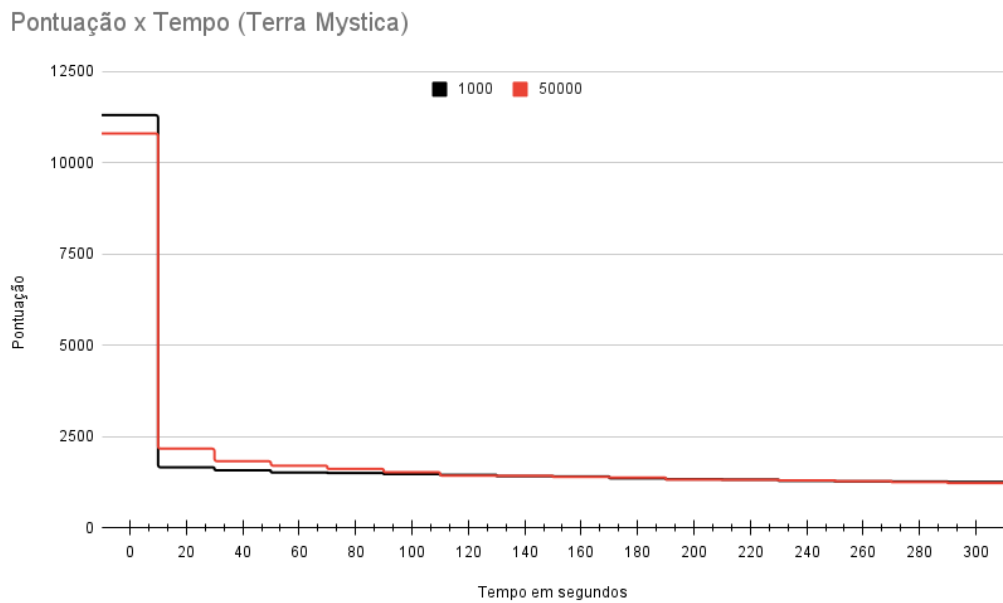
Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Figura 34 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso no *Terra Mystica* para uma população de 50000 indivíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Figura 35 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso no *Terra Mystica* para populações de tamanhos diferentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A fim de procurar melhorar os resultados obtidos durante o primeiro teste com pesos foi feito um segundo teste usando a técnica de reiniciar. Porém os resultados mais uma vez não foram agradáveis. Embora a media geral dos resultados tenha sido melhor, as soluções não chegaram a uma pontuação aceitável. A media da população de 1000 indivíduos diminuiu de 1235 para 1154, e a media da população de 50000 indivíduos diminuiu de 1264 para 1092. Os resultados obtidos com a utilização de pesos e reiniciar para a população de 1000 indivíduos podem ser visualizados na Tabela 10, enquanto os resultados para a população de 50000 indivíduos podem ser vistos na Tabela 11.

Tabela 10 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 1000 indivíduos do *Terra Mystica* com peso e reiniciar.

Mapa	0	60	120	180	240	300
1	11121	1530	1530	1020	1020	1020
2	11422	1425	1030	1030	1030	1030
3	11231	1017	1017	1017	1017	1017
4	11420	1326	1326	1320	1320	1320
5	11130	1836	1422	1422	1422	1422
6	11233	1138	1138	1138	1138	1138
7	11537	1423	1320	1320	1320	1320
8	11328	1216	1216	1216	1216	938
9	11526	1028	1023	1023	1023	1023
10	11421	1435	1331	1227	1227	1023
11	11022	1426	1327	1229	1229	1227
12	11338	1522	1322	1322	1130	1130
13	11419	1530	1433	1433	1433	1319
14	11326	1827	1517	1229	1229	1220
15	11032	1424	1424	1322	1322	1322
16	11515	926	926	926	926	926
17	11627	1524	1326	1326	1028	1028
18	11228	1523	1523	1031	1031	1031
19	11526	1620	1620	1320	1320	1320
20	11331	1729	733	733	733	733
21	11032	1530	1025	1025	1025	1025
22	11022	1434	1434	1231	1231	1231
23	11125	1534	1220	1220	1220	1220
24	11229	1527	925	925	925	925
25	11324	1426	1422	1422	1422	1221
26	11432	1421	1421	1421	1421	1421
27	11118	1728	1522	1326	1326	1326
28	11343	1224	1224	1224	1224	1224
29	11327	1217	1217	1217	1217	1217
30	11225	1535	1418	1321	1321	1321
Média	11297	1433	1277	1197	1181	1154

Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

O desempenho médio das populações de 1000 e 50000 indivíduos com a utilização

Tabela 11 – Pontuação ao decorrer do tempo dos mapas com população de 50000 indivíduos do *Terra Mystica* com peso e reiniciar.

Mapa	0	60	120	180	240	300
1	10827	1633	1423	1423	824	824
2	10829	1220	1220	1220	1220	1220
3	11020	1423	1423	1024	1024	1024
4	10825	1627	1627	1330	1328	1328
5	11032	1224	1224	1224	1224	1224
6	10622	1630	1429	1323	922	922
7	10917	1740	1033	1033	1033	1033
8	10820	1819	1525	1118	1118	1118
9	10825	1328	1328	1125	1125	820
10	10827	930	930	930	930	930
11	10629	1618	1527	1527	1326	1326
12	10821	1416	1220	1220	1220	1220
13	10829	1732	830	830	830	830
14	10821	1719	1526	1424	1229	1028
15	10918	1218	1218	1218	1218	1218
16	11018	1520	1425	1423	1123	1123
17	10823	1428	1428	1428	1323	1225
18	10330	1422	1119	1119	1119	1119
19	10629	1439	1132	1132	1132	1132
20	10927	1723	1720	1229	1229	1229
21	10722	1629	1517	1517	1332	1231
22	11019	1727	1437	1130	1130	916
23	10831	1434	1128	1128	1028	1028
24	10831	1627	1034	1034	1034	1034
25	10526	1623	1623	1436	1436	1436
26	10628	1935	1323	1323	1228	1228
27	10925	1635	1424	1424	1221	1221
28	10924	1529	1319	825	825	825
29	10622	1432	1432	1432	1028	1028
30	10821	1729	1324	926	926	926
Média	10804	1536	1328	1215	1122	1092

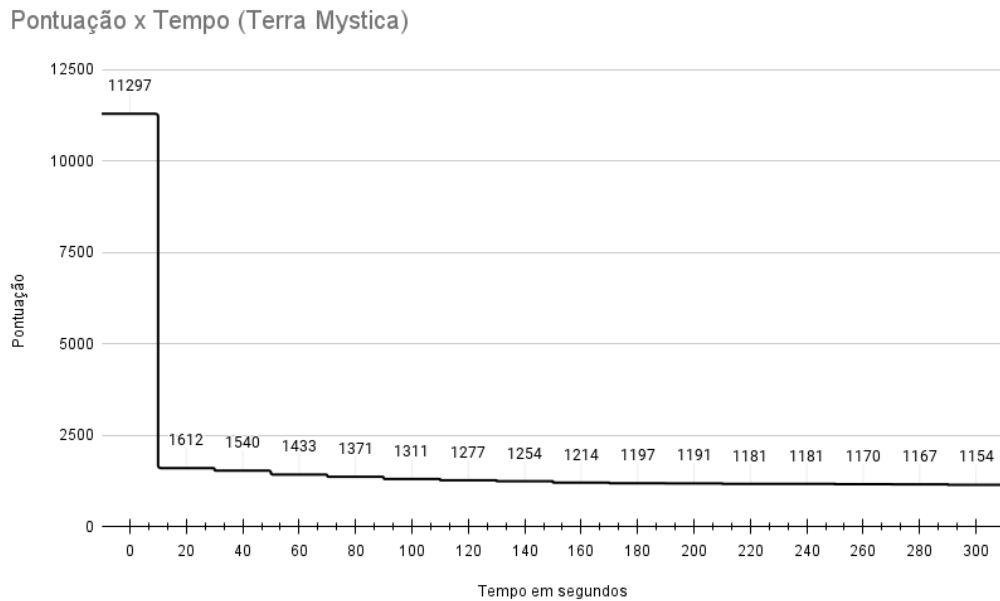
Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

de pesos pode ser visto nos gráficos das Figuras 36 e 37 respectivamente. Um gráfico com a comparação entre o desempenho de ambas as populações ao decorrer do tempo limite pode ser visto na Figura 43.

No fim, o melhor mapa obtido utilizando pesos teve uma pontuação de total de 621. Uma representação gráfica do melhor mapa obtido durante os testes pode ser visto por meio de cores na Figura 39, e por meio de símbolos na Figura 40. A Tabela 12 compara o resultado obtido pelo melhor mapa do BRKGA com peso em comparação com mapas já existentes.

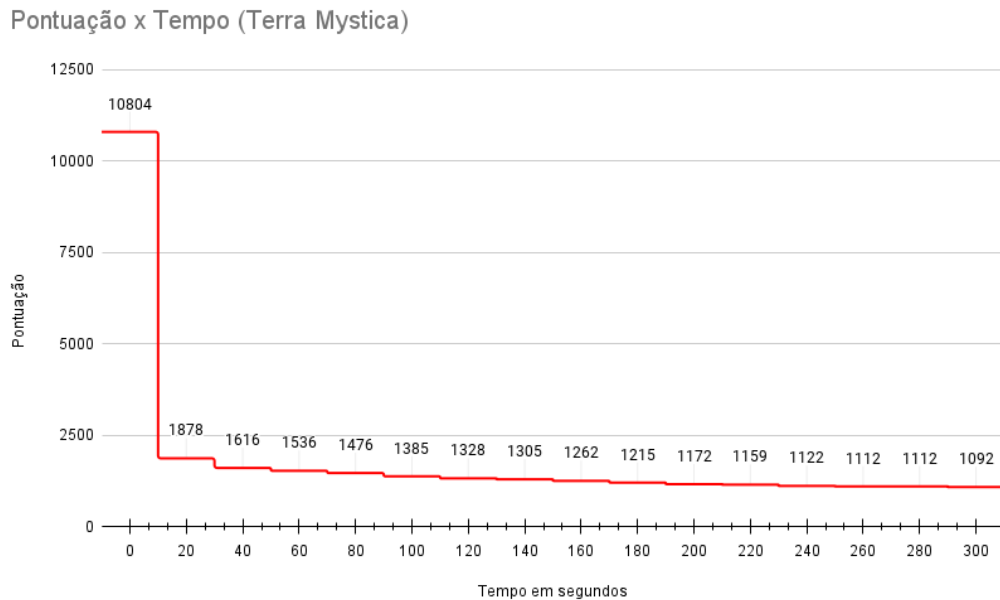
É seguro afirmar, após inúmeros testes, que o ACO se mostrou superior ao BRKGA na geração de mapas para o *Terra Mystica*, uma vez que o BRKGA não conseguiu alcançar um resultado ótimo em nenhuma de suas execuções, muitas vezes nem mesmo atingindo um

Figura 36 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso e reiniciar no *Terra Mystica* para uma população de 1000 indivíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

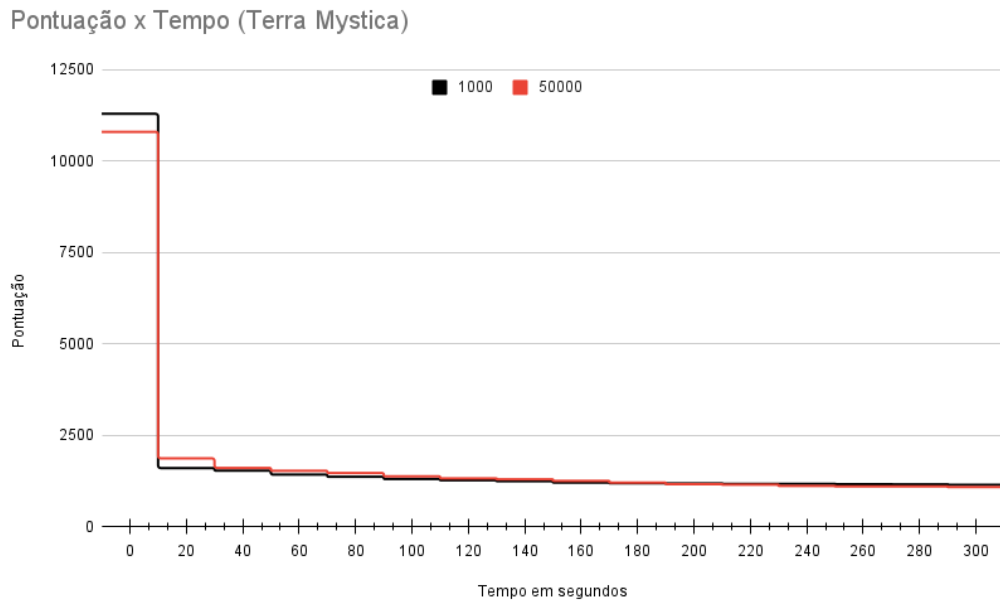
Figura 37 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso e reiniciar no *Terra Mystica* para uma população de 50000 indivíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

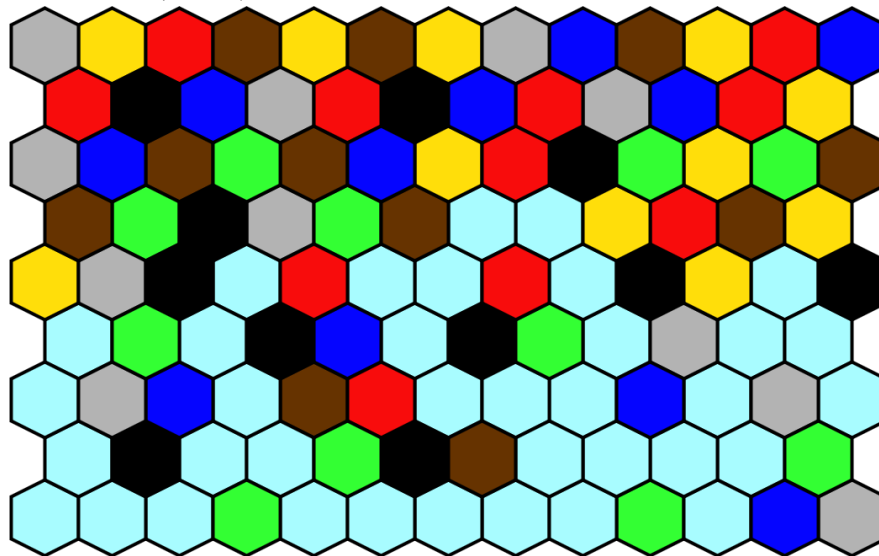
resultado satisfatório. Por outro lado, o ACO demonstrou ser capaz de atender a todos os requisitos propostos pelo documento em menos de 5 minutos. Além disso, é difícil deduzir se a utilização de uma população grande ou pequena tem de fato alguma diferença significativa no problema, devido aos resultados dos testes de ambas as populações terem resultado em valores

Figura 38 – Gráfico de desempenho médio do BRKGA com peso e reiniciar no *Terra Mystica* para populações de tamanhos diferentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 39 – Melhor mapa *Terra Mystica* com peso, pontuação = 621 (Cores).



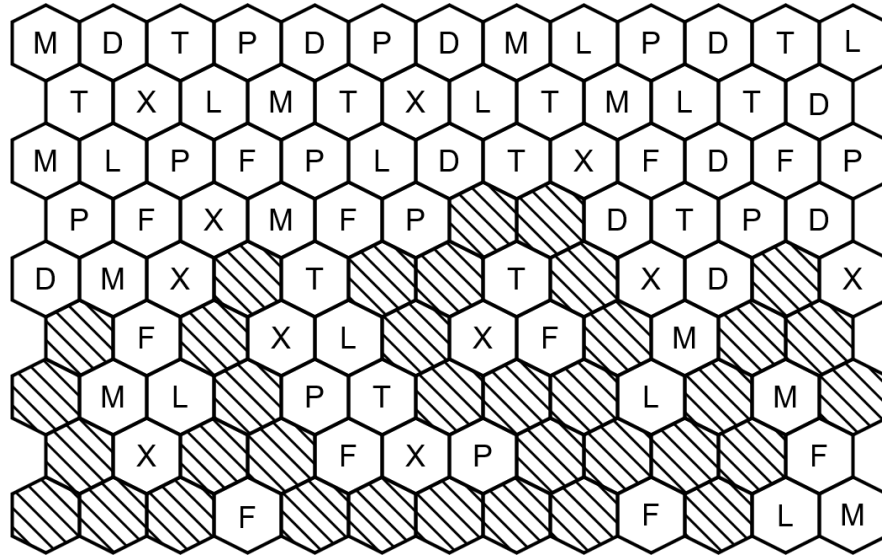
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Tabela 12 – Numero de vezes que um requisito é violado para o melhor mapa gerado do BRKGA para o *Terra Mystica* e outros mapas oficiais.

Mapa	Pontuação	Requisito 1	Requisito 2	Requisito 3	Requisito 4
Melhor mapa BRKGA com peso	621	6	16	0	5
Mapa Original	9	0	3	0	6
Fire and Ice	12	0	3	0	9
Fjords	9	0	0	0	9

Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Figura 40 – Melhor mapa *Terra Mystica* com peso, pontuação = 621 (Símbolos).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

muito próximos.

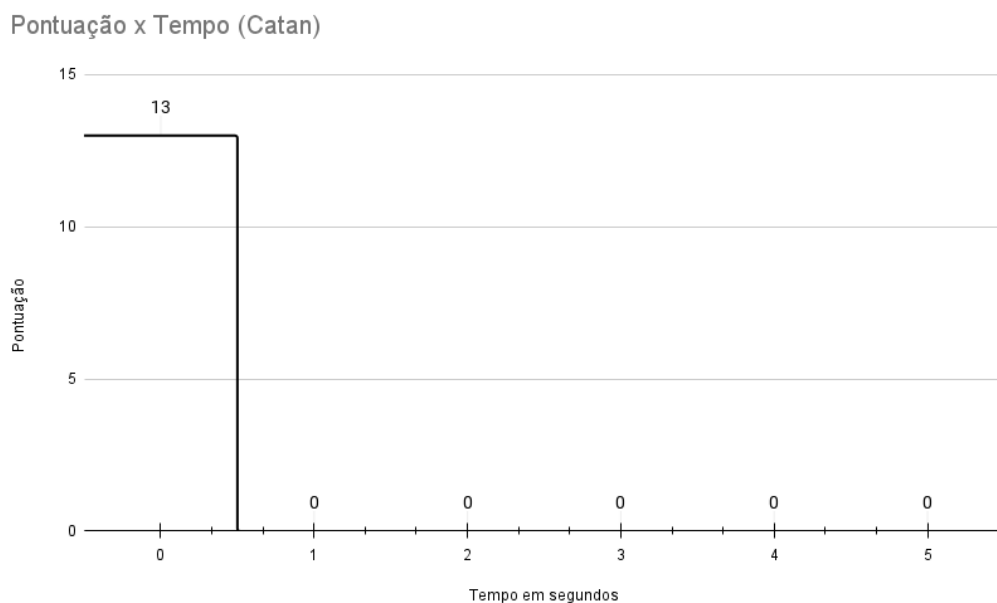
7.2 Resultados para o *Settlers of Catan*

Para o problema do *Settlers of Catan*, o algoritmo será novamente executado 30 vezes para uma população de 1000 e mais 30 vezes para uma população de 50000 indivíduos, a fim de analisar possíveis melhorias no desempenho para diferentes tamanhos de população. O tempo limite para cada execução de ambas as populações também será de 5 minutos. Esses parâmetros foram escolhidos para analisar o desempenho em comparação com os resultados do ACO (SARAIVA *et al.*, 2020) para a criação de um mapa sob as mesmas restrições.

Na primeira execução, o algoritmo apresentou um desempenho satisfatório, conseguindo gerar resultados ótimos (sem restrições violadas) em uma média de 0.17 segundos para a população de 1000 indivíduos e 4.9 segundos para a população de 50000 indivíduos. A Tabela 13 mostra o tempo de execução até chegar na solução ótima de todos os mapas de ambas as populações.

No geral, a população de 1000 indivíduos demonstrou ser mais adequada para o problema do *Settlers of Catan* do que a população de 50000 indivíduos. O desempenho de ambas as populações ao longo de 5 segundos pode ser visto nas Figuras 41 e 42. A Figura 43 mostra a comparação lado a lado do desempenho de ambas as populações.

Figura 41 – Gráfico de desempenho do BRKGA no *Settlers of Catan* para uma população de 1000 indivíduos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Ao final, todos os mapas gerados alcançaram o resultado esperado. Uma representa-

Tabela 13 – Tabela de tempo até solução ótima do BRKGA para o *Settlers of Catan*.

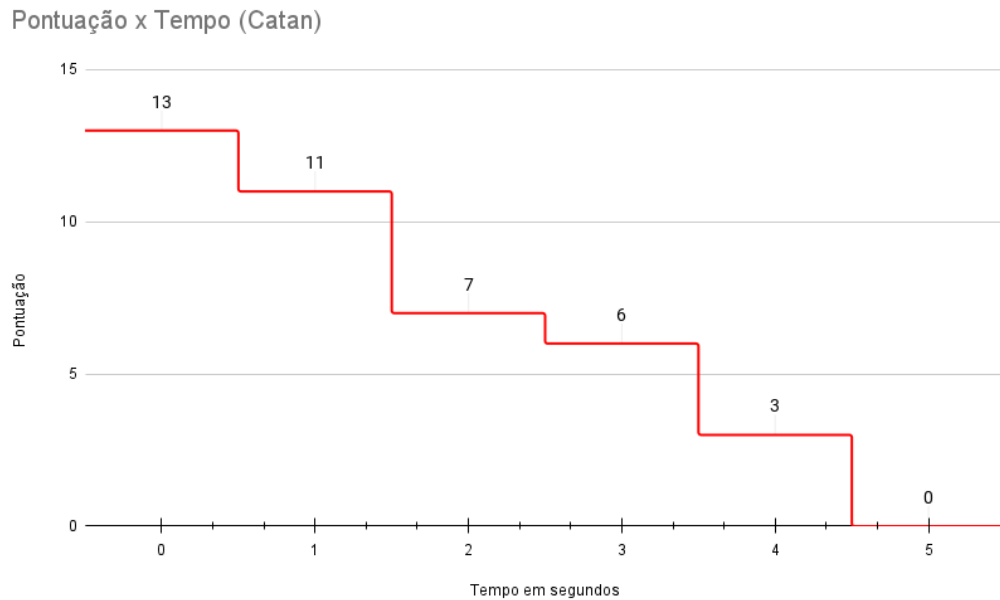
Mapa	População de 1000	População de 50000
1	0.181045s	4.97248s
2	0.143001s	7.01395s
3	0.256983s	5.39656s
4	0.359569s	3.88303s
5	0.235403s	6.09565s
6	0.148776s	6.10188s
7	0.145418s	5.17902s
8	0.177288s	5.76316s
9	0.128817s	5.32216s
10	0.168727s	6.73271s
11	0.208546s	5.71551s
12	0.223495s	3.64004s
13	0.138786s	6.39877s
14	0.171733s	4.86424s
15	0.097681s	5.5126s
16	0.205628s	5.31506s
17	0.169491s	4.82269s
18	0.200918s	3.44798s
19	0.125678s	6.2704s
20	0.15622s	4.54391s
21	0.127524s	4.81183s
22	0.107606s	6.14387s
23	0.138792s	4.51939s
24	0.282488s	4.18768s
25	0.170386s	4.21434s
26	0.262819s	5.0252s
27	0.132873s	5.10715s
28	0.201862s	6.51937s
29	0.070592s	3.5688s
30	0.22423s	4.90835s
Média	0.178758	4.90836s

Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

ção com cores de um dos mapas obtidos pelo algoritmo pode ser visualizada na Figura 44. Uma representação do mesmo mapa por meio de símbolos está disponível na Figura 45.

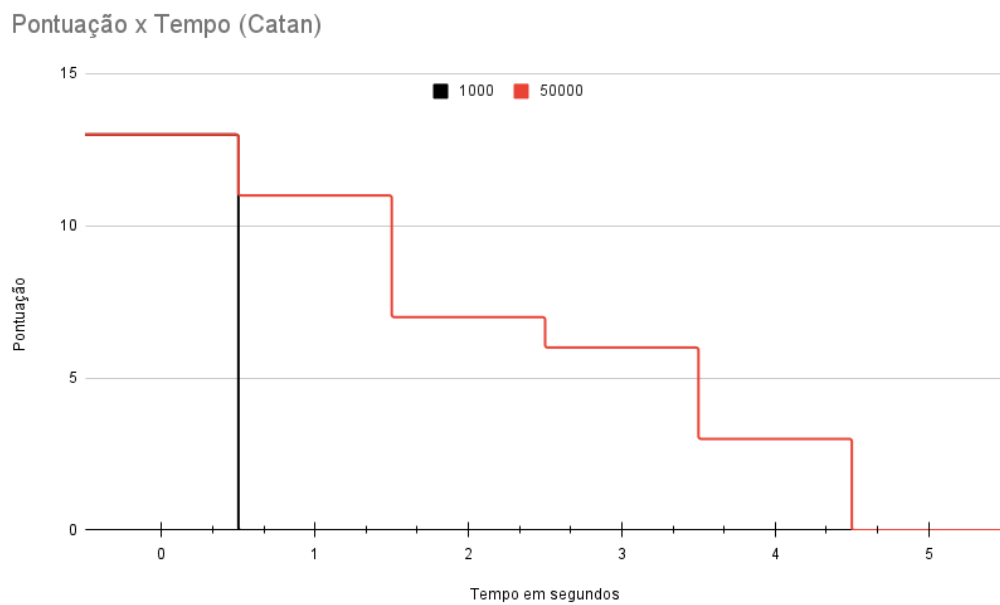
Diferentemente de sua execução com o *Terra Mystica*, o BRKGA se mostrou extremamente eficiente em sua primeira iteração com o *Settlers of Catan*, dispensando a necessidade de testes de reiniciar e de peso, revelando-se tão eficaz quanto o ACO.

Figura 42 – Gráfico de desempenho do BRKGA no *Settlers of Catan* para uma população de 50000 indivíduos.



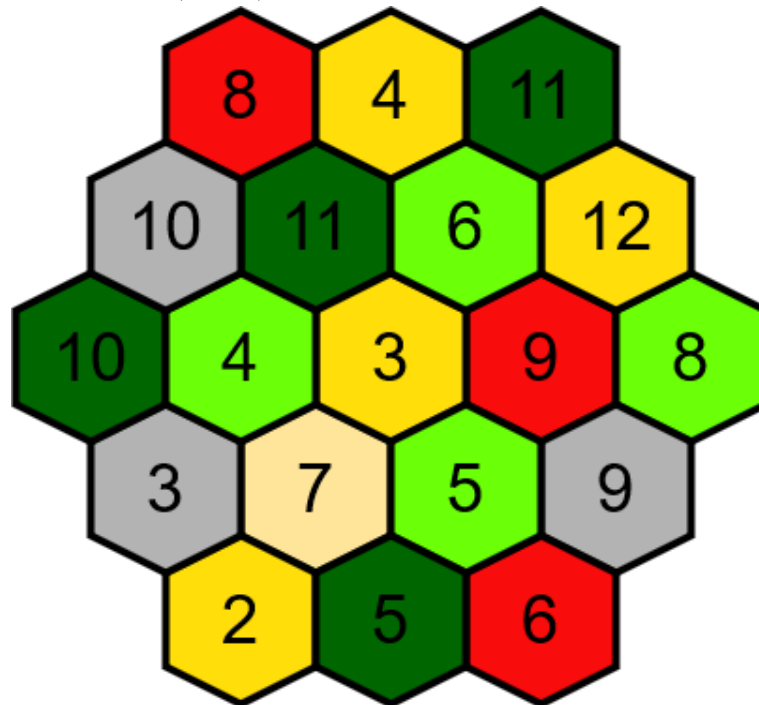
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 43 – Gráfico de comparação de desempenho do BRKGA no *Settlers of Catan* para populações de tamanhos diferentes.



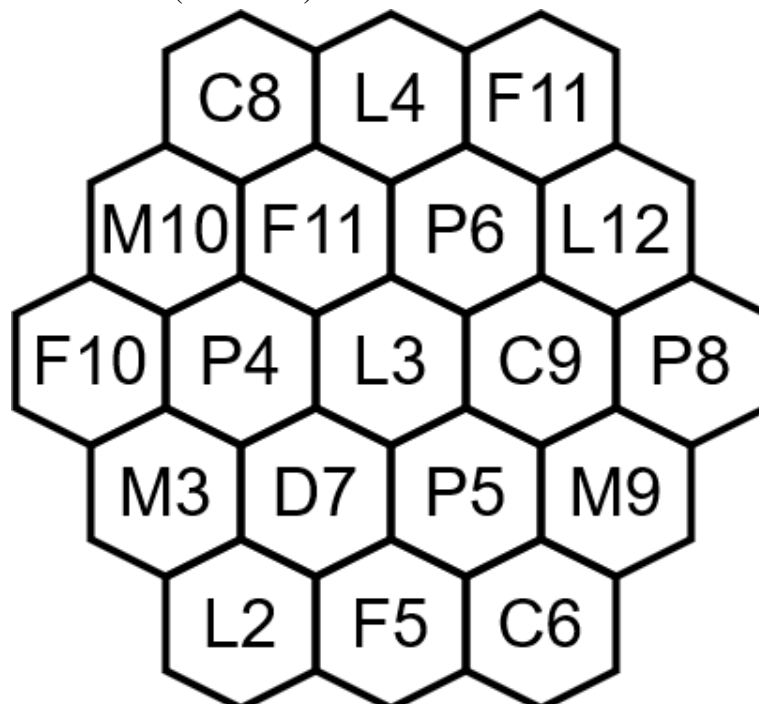
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 44 – Melhor mapa *Settlers of Catan*, pontuação = 0
(Cores).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 45 – Melhor mapa *Settlers of Catan*, pontuação = 0
(Símbolos).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

8 CONCLUSÃO

O desempenho obtido pelo algoritmo no *Terra Mystica* indica uma má compatibilidade entre algoritmos genéticos e problemas de alta complexidade. Por outro lado, o desempenho no *Settlers of Catan* sugere que o uso desses algoritmos em problemas um pouco mais simples pode ser muito eficaz. No geral, este trabalho permitiu ampliar o estudo de geração procedural e algoritmos genéticos para a geração de mapas de tabuleiro. O autor reconhece que a falta e conhecimento e de trabalhos na área dificultou as escolhas a serem tomadas durante a implementação e que outros métodos podem gerar resultados mais satisfatórios. Será interessante realizar estudos futuros para descobrir novas formas de realizar o cruzamento entre os mapas do *Terra Mystica*, a fim de gerar filhos de forma mais eficaz. Além disso, propõe-se a geração do rio no início do algoritmo para melhorar o desempenho no *Terra Mystica*. Dessa forma, nenhum membro irá violar os requisitos do rio, possibilitando que indivíduos mutantes tenham uma maior chance de entrar para o grupo da elite. Assim, é finalizado esse documento com grandes esperanças de promover incentivo para futuras pesquisas na área de balanceamento e geração de contudo de forma procedural para jogos.

REFERÊNCIAS

- BEAN, J. C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. **ORSA journal on computing**, INFORMS, v. 6, n. 2, p. 154–160, 1994.
- BOROVNIKOV, I.; ZHAO, Y.; BEIRAMI, A.; HARDER, J.; KOLEN, J.; PESTRAK, J.; PINTO, J.; POURABOLGHASEM, R.; CHAPUT, H.; SARDARI, M. *et al.* Winning isn't everything: Training agents to playtest modern games. In: **AAAI Workshop on Reinforcement Learning in Games**. [S.l.: s.n.], 2019.
- BRESLAU, L.; DIAKONIKOLAS, I.; DUFFIELD, N.; GU, Y.; HAJIAGHAYI, M.; JOHNSON, D. S.; KARLOFF, H.; RESENDE, M. G.; SEN, S. Disjoint-path facility location: Theory and practice. In: SIAM. **2011 Proceedings of the Thirteenth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX)**. [S.l.], 2011. p. 60–74.
- GOLDBERG, D.; EDWARD, G. D.; GOLDBERG, D.; GOLDBERG, V. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley Publishing Company, 1989. (Artificial Intelligence). ISBN 9780201157673. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=3_RQAAAAMAAJ>.
- GONÇALVES, J. F.; RESENDE, M. G. Biased random-key genetic algorithms for combinatorial optimization. **Journal of Heuristics**, Springer, v. 17, n. 5, p. 487–525, 2011.
- GOOGLE. **Google Sheets**. 2006. Acessado em: 2023-11-10. Disponível em: <<https://www.google.com/sheets/about/>>.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. [S.l.]: MIT press, 1992.
- KHALIFA, A.; FAYEK, M. Literature review of procedural content generation in puzzle games. 2015.
- LTD, J. **draw.io**. 2005. Acessado em: 2023-11-10. Disponível em: <<https://www.drawio.com/>>.
- MENDES FILHO, F. E. **BRKGA for Map Generation in Settlers of Catan and Terra Mystica**. 2023. Disponível em: <<https://github.com/IA-Ruby/BRKGA-for-Map-Generation-in-Settlers-of-Catan-and-Terra-Mystica>>.
- MOJANG. **Minecraft**. 2011. PC.
- NINTENDO. **Mario Kart 8**. 2014. Nintendo Switch, Wii U.
- PEREIRA, F. S. **Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.
- RESENDE, M. Introdução aos algoritmos genéticos de chaves aleatórias viciadas. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, p. 3680–3691, 2011.
- RESENDE, M. G.; TOSO, R. F.; GONÇALVES, J. F.; SILVA, R. A biased random-key genetic algorithm for the steiner triple covering problem. **Optimization Letters**, Springer, v. 6, n. 4, p. 605–619, 2012.

- RUSSELL, S.; RUSSELL, S.; NORVIG, P.; DAVIS, E. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. Prentice Hall, 2010. (Prentice Hall series in artificial intelligence). ISBN 9780136042594. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=8jZBksh-bUMC>>.
- SARAIVA, R.; GRICSHENKO, A.; ARAÚJO, L.; JÚNIOR, B.; CARVALHO, G. Using ant colony optimisation for map generation and improving game balance in the terra mystica and settlers of catan board games. In: . [S.l.: s.n.], 2020.
- SMITH, G. An analog history of procedural content generation. In: **FDG**. [S.l.: s.n.], 2015.
- SPEARS, W. M.; JONG, K. D. D. **On the virtues of parameterized uniform crossover**. [S.l.], 1995.
- STROGATZ, S. One giant step for a chess-playing machine. **New York Times**, p. 1–6, 2018.
- SZWARCFITER, J. L.; MARKENZON, L. **Estruturas de Dados e seus Algoritmos**. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 1994. v. 2.
- TOGELIUS, J.; YANNAKAKIS, G. N.; STANLEY, K. O.; BROWNE, C. Search-based procedural content generation. In: SPRINGER. **European Conference on the Applications of Evolutionary Computation**. [S.l.], 2010. p. 141–150.
- TOGELIUS, J.; YANNAKAKIS, G. N.; STANLEY, K. O.; BROWNE, C. Search-based procedural content generation: A taxonomy and survey. **IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games**, IEEE, v. 3, n. 3, p. 172–186, 2011.
- ZOHAIB, M. Dynamic difficulty adjustment (dda) in computer games: A review. **Advances in Human-Computer Interaction**, Hindawi, v. 2018, 2018.