

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Um sistema hierárquico para o apoio à tomada de decisões em jogos 4X

Davi Laranjo Villa

JUIZ DE FORA
JULHO, 2026

Um sistema hierárquico para o apoio à tomada de decisões em jogos 4X

DAVI LARANJO VILLA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS

CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Raul Fonseca Neto

JUIZ DE FORA

JULHO, 2026

UM SISTEMA HIERÁRQUICO PARA O APOIO À TOMADA DE DECISÕES EM JOGOS 4X

Davi Laranjo Villa

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Raul Fonseca Neto
Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação- COPPE/UFRJ

Saulo Moraes Villela
Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação - COPPE/UFRJ

Carlos Cristiano Hasenclever Borges
Doutor em Engenharia Civil - COPPE/UFRJ

JUIZ DE FORA
09 DE JULHO, 2026

A Deus, por tudo que tem feito por mim.

Aos meus pais, pelo apoio e sustento.

À minha irmã, pelo carinho e apoio.

Resumo

Os jogos do gênero 4X (eXplorar, eXpandir, eXplotar e eXterminar) exigem que os jogadores realizem decisões estratégicas complexas envolvendo desenvolvimento econômico, avanço tecnológico, expansão territorial e combate. Entre esses jogos, *The Battle of Polytopia* destaca-se por oferecer mecânicas simplificadas em relação a títulos tradicionais do gênero, mantendo desafios significativos de planejamento e otimização de recursos.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo heurístico de apoio à tomada de decisão estratégica, tática e operacional em *The Battle of Polytopia*, com foco na avaliação de escolhas tecnológicas e econômicas ao longo da partida. “Na camada estratégica, o modelo utiliza uma função de valor baseada em características do estado do jogo, como tipo de mapa, recursos disponíveis, custo das tecnologias, potencial de crescimento econômico e retorno esperado das ações ao longo do tempo e emprega um sistema de inferência nebulosa para selecionar o comportamento a ser adotado. A partir dessa função, combinações de tecnologias e ações econômicas serão avaliadas e classificadas por meio de uma pontuação estratégica, permitindo identificar alternativas com maior potencial de desenvolvimento. Dessa forma, a camada tática pode então gerar objetivos intermediários a serem atingidos, bem como definir parâmetros mínimos a serem alcançados em cada turno. Com isso, o nível operacional poderá analisar a situação de combate e avaliar quais objetivos intermediários são possíveis de cumprir e determinar qual a melhor escolha em termos de uma pontuação operacional.

Espera-se que os resultados contribuam para a compreensão de processos de tomada de decisão em jogos 4X e demonstrem a aplicabilidade de métodos heurísticos na análise de estratégias em ambientes complexos.

Palavras-chave: Jogos 4X, Inteligência artificial em jogos, Heurísticas, Tomada de decisão, Polytopia.

Abstract

4X games (eXplore, eXpand, eXploit, and eXterminate) require players to make complex strategic decisions involving economic development, technological advancement, territorial expansion, and combat. Among these games, The Battle of Polytopia stands out for offering simplified mechanics compared to traditional titles in the genre while still maintaining significant challenges related to planning and resource optimization.

This work proposes the development of a heuristic model to support strategic, tactical, and operational decision-making in The Battle of Polytopia, with a focus on evaluating technological and economic choices throughout the course of a match. At the strategic level, the model employs a value function based on game-state characteristics such as map type, available resources, technology costs, economic growth potential, and the expected return of actions over time. It also incorporates a fuzzy inference system to determine the behavioral approach to be adopted. Based on this value function, combinations of technologies and economic actions are evaluated and ranked through a strategic score, enabling the identification of alternatives with greater development potential. The tactical layer can then generate intermediate objectives to be achieved, as well as define minimum performance targets for each turn. Finally, the operational level analyzes combat situations, evaluates which intermediate objectives can be accomplished, and determines the best course of action according to an operational score.

The expected results are to contribute to a better understanding of decision-making processes in 4X games and to demonstrate the applicability of heuristic methods for strategy analysis in complex environments.

Keywords: 4X Games, Artificial Intelligence in games, Heuristics, Decision making, Polytopia.

Agradecimentos

A Deus, pela misericórdia e grandes feitos em minha vida.

À minha família, pelo apoio e ajuda na minha trajetória da vida.

Ao professor Raul pela orientação, amizade e principalmente, pela paciência, sem a qual este trabalho não se realizaria.

Aos professores do Departamento de Ciência da Computação pelos seus ensinamentos e aos funcionários do curso, que durante esses anos, contribuíram de algum modo para o meu enriquecimento pessoal e profissional.

A todos os funcionários da UFJF, por manterem e zelarem essa grande instituição que me formou profissionalmente.

*“Confia ao SENHOR as tuas obras, e teus
pensamentos serão estabelecidos”.*

Provérbios 16:3

Conteúdo

Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	10
Lista de Abreviações	11
1 Introdução	12
1.1 Motivação	13
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 Estruturação	14
2 Trabalhos Relacionados	16
2.1 Obras em Jogos 4X	16
2.1.1 Sid Meier's Civilization VI	16
2.1.2 Stellaris	17
2.2 Obras em Outros Tipos de Jogos	18
2.2.1 Alien: Isolation	18
2.2.2 Starcraft 2	19
3 Fundamentação Teórica	20
3.1 Inteligência Artificial e Jogos de Estratégia	20
3.2 Jogos 4X e a Complexidade de Decisão	20
3.3 Macrodecisões e Microdecisões	21
3.3.1 Macrodecisões	21
3.3.2 Microdecisões	22
3.3.3 Resultado da Divisão	22
3.4 Árvores Tecnológicas como Problemas de Otimização	22
3.5 Sistemas de Apoio à Decisão e Funções de Utilidade	23
3.6 Heurísticas e Avaliação de Estados em Jogos de Estratégia	24
3.7 Planejamento Estratégico de Longo Prazo em Jogos 4X	25
4 Taxonomia do The Battle of Polytopia	27
4.1 Estrelas e Recursos	27
4.2 Objetivos	27
4.2.1 Um Jogador	28
4.2.2 Multi-Jogador	29
4.3 Layout	29
4.3.1 Terra Firme	29
4.3.2 Água	30
4.4 Tecnologias	31
4.4.1 Árvore Tecnológica Normal	31
4.4.2 Árvores tecnológicas Especiais	33

4.5	Tribos	38
4.5.1	Tribos Normais	38
4.5.2	Tribos Especiais	40
4.6	Tipos de Unidades	41
4.6.1	Terrestre	41
4.6.2	Aquático	41
4.6.3	Anfíbio	42
4.6.4	Aéreo	42
4.7	Distribuição de Recursos	42
4.8	Monumentos e Missões	44
4.9	Ruínas	45
4.9.1	Ruína em Terra Firme	45
4.9.2	Ruína no Oceano	46
4.10	Cidades	47
4.10.1	Capitais	47
4.10.2	Cidades Comuns	48
4.10.3	Recompensas por Melhoria	48
4.11	Dinâmica de jogo	49
4.11.1	Combate	49
4.11.2	Zona de Controle	49
4.11.3	Encontrando adversários	50
4.11.4	Tempo de Jogo	50
4.12	Movimentação de Unidades e Estradas	51
5	Proposta	52
5.1	Modelo Matemático Baseado em Pontuação	52
5.1.1	Heurísticas de Avaliação de Tecnologias	52
5.1.2	Avaliação Econômica das Ações	53
5.1.3	Tomada de Decisão Baseada em Pontuação	53
5.2	Arquitetura Hierárquica da Inteligência Artificial	54
5.2.1	Camada Estratégica Baseada em Inferência Nebulosa	55
5.2.2	Camada Tática Baseada em Regras	57
5.2.3	Camada Operacional de Microgerenciamento	58
5.2.4	Calibração dos Pesos	62
5.2.5	Coordenação Entre as Camadas	62
6	Simulação do Modelo	64
6.1	Contexto Inicial	64
6.2	Primeira Reavaliação da Estratégia	67
6.3	Nova Reavaliação	68
6.4	Alcançando a Primeira Meta	69
6.5	Crescimento Econômico	70
6.6	Avaliação Operacional	73
6.7	Avaliação Quantitativa	74
7	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	76
7.1	Métodos de Aprendizado	76
7.2	Requisitos de Código	76
7.3	Reprodutibilidade	77
7.4	Refinamento das Fórmulas	77

7.5 Conclusão	77
Bibliografia	79

Lista de Figuras

4.1	Árvore Tecnológica das tribos normais	32
4.2	Árvore Tecnológica da tribo Aquarion	34
4.3	Árvore Tecnológica da tribo Elyrion	35
4.4	Árvore Tecnológica da tribo Polaris	36
4.5	Árvore Tecnológica da tribo Cymanti	37
6.1	Situação no turno 3	65
6.2	Situação no turno 6	67
6.3	Situação no começo do turno 9	68
6.4	Situação final do turno 9	69
6.5	Situação final do turno 10	70
6.6	Situação no turno 12	71
6.7	Situação no turno 13	71
6.8	Situação no começo do turno 14	72
6.9	Situação final do turno 14	72
6.10	Situação no começo do turno 18	73
6.11	Situação final do turno 18	74

Lista de Tabelas

4.1	Distribuição percentual de terrenos nas fronteiras internas das tribos	42
4.2	Modificadores de geração de recursos por tribo	43
5.1	Valores dos pesos de macrogerenciamento	57
5.2	Valores dos pesos de microgerenciamento	59
6.1	Indicadores quantitativos da simulação	75

Lista de Abreviações

DCC	Departamento de Ciência da Computação
FTL	Faster Than Light
GOAP	Goal-Oriented Action Planning
IA	Inteligência Artificial
MCTS	Monte Carlo Tree Search
RTS	Real Time Strategy
SIN	Sistema de Inferência Nebulosa
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
4X	eXplorar, eXpandir, eXplotar e eXterminar

1 Introdução

No contexto dos jogos 4X, existem múltiplas obras e diversas complexidades por trás do tema, bem como diferentes métodos aplicados para proporcionar diferentes graus de dificuldade aos jogadores.

Nesse sentido, este trabalho visa analisar os problemas detectados na bibliografia, estudar as soluções propostas e então fazer um estudo de caso do The Battle of Polytopia, identificando problemas, associando requisitos, definições e com isso, propor um modelo matemático que visa aumentar as chances de vitória do agente por meio da maximização de um fator pontuação. Dessa forma, será possível então propor a escolha de um modelo de IA que terá por objetivo analisar o estado da partida e fazer a escolha de comportamento que melhor atenda à necessidade do agente, utilizando um sistema de inferência nebulosa, que mudará pesos de escolha de ação e definirá o movimento das unidades baseado no tipo de comportamento, com a meta de cumprir objetivos intermediários, definidos por um sistema baseado em regras. Tais regras visam gerar objetivos a serem cumpridos pelo agente, que ao serem cumpridos, resultam em uma vantagem econômica e/ou militar. Dessa maneira, o agente poderá então determinar o que é possível de ser feito em nível operacional, e assim, seguir os objetivos intermediários, que visam trazer o agente à vitória.

Tal combinação de decisões tanto no macrogerenciamento quanto no microgerenciamento leva milhões de jogadores no mundo inteiro a aprimorar suas habilidades em ambos os aspectos, enquanto que desenvolvedores e acadêmicos desenvolvem fórmulas matemáticas do problema com o objetivo de montar um algoritmo capaz de tomar decisões que o aproximem da vitória. Devido à complexidade do problema e, no caso do The Battle of Polytopia, a aleatoriedade somada à névoa de guerra, não é possível calcular uma estratégia do começo da partida até o final e determinar com certeza que essa estratégia irá vencer a partida. Entretanto, é possível tomar decisões de curto, médio e longo prazo durante a partida que visam aprimorar certos aspectos do macrogerenciamento que em troca, permitirão o agente ter uma vantagem no microgerenciamento contra o adversário.

1.1 Motivação

O motivo pela realização desse trabalho vem dos recentes avanços da IA e o problema de otimização em situações as quais são inviáveis de se calcular computacionalmente devido ao tamanho do problema, o tempo computacional e as diversas restrições do problema.

Devido às diferentes abordagens ao problema, seja por meio de expansão econômica ou por melhor tomada de decisão em combate, é fato que ambos os aspectos são importantes para alcançar o objetivo máximo, que é a vitória da partida. Portanto, equilibrar o gasto financeiro entre desenvolvimento econômico e tecnológico com o gasto de produção de exército é chave para obter excelentes resultados tanto no macrogerenciamento, quanto no microgerenciamento.

Ademais, a capacidade de adaptação de um modelo baseado em novas informações é de suma importância em certas áreas, como por exemplo: concorrentes lançando novos produtos no mercado, planejamento urbano para resposta a desastres naturais e gestão de cadeias de suprimentos globais, em que eventos políticos internacionais repentinos podem afetar drasticamente a economia.

1.2 Justificativa

Atualmente, existem poucos estudos na área e IAs capazes de fornecer um verdadeiro desafio aos jogadores no gênero 4X. No jogo The Battle of Polytopia, não há nenhuma IA implementada, apenas bots que seguem um conjunto previsível de regras e que recebem vantagens artificiais para tornar a experiência um pouco mais desafiadora para o jogador. Porém, com a devida fundamentação teórica e correta formulação matemática do problema, é possível criar uma IA que toma decisões econômicas fortes, controle bem as ações de combate e assim, providencie uma experiência desafiadora ao jogador, podendo até se tornar melhor que a maioria dos jogadores.

Além disso, existe uma grande oportunidade de estudar e desenvolver formas e técnicas para se obter soluções que, mesmo não sendo as mais ótimas possíveis, providenciam uma vantagem significativa ao agente para alcançar a vitória.

Dessa forma, a construção de um modelo capaz de interpretar a situação e elabo-

rar um conjunto de ações de forma estruturada em um ambiente controlado com múltiplas variáveis demonstra a sua capacidade de ser adaptado para solucionar problemas reais.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do presente trabalho reside no estudo de representações matemáticas na bibliografia e assim, propor um modelo para a criação de uma IA capaz de receber por entrada as informações da partida e com isso, utilizar de ferramentas de aprendizado de IA para transformar esses dados em uma linguagem matemática a qual a IA poderá interpretar e produzir uma resposta na partida.

1.3.2 Objetivos Específicos

Determinar a melhor combinação de heurísticas de aprendizado de IA para cada nível da estruturação, como por exemplo:

- Sistema baseado em regras;
- IA baseada em Utilidade;
- Árvore decisória;
- Sistemas de lógica Fuzzy;

1.4 Estruturação

Dessa forma, um estudo e análise de obras relacionadas será feita no Capítulo 2. Em seguida, uma avaliação das metodologias e técnicas será feita em seu viés conceitual e prático na fundamentação teórica, abordada no Capítulo 3. Então, no Capítulo 4, será feita uma taxonomia completa do jogo The Battle of Polytopia, alvo do estudo de caso deste trabalho. Dessa maneira, no Capítulo 5, será proposto um modelo de IA, com sua estrutura arquitetural, algoritmos de aprendizagem de IA, bibliotecas a serem utilizadas e planejamento matemático. Com isso, uma breve simulação irá apresentar um problema prático e um dilema de decisão no Capítulo 6. Por fim, no Capítulo 7, serão tratados as

considerações finais e os trabalhos futuros.

2 Trabalhos Relacionados

No contexto dos jogos, o uso da IA tem se mostrado ser de grande interesse de diversos setores da comunidade, desde membros da comunidade até grandes empresas, os quais investem tempo, talento e dinheiro para criar e aperfeiçoar IAs em jogos eletrônicos.

Os frutos desse investimento resultam em adversários controlados por IA mais desafiadores e realistas, melhorando a experiência dos jogadores e aumentando a qualidade do produto.

2.1 Obras em Jogos 4X

2.1.1 Sid Meier's Civilization VI

Também conhecido e apelidado como Civ 6, nesse jogo, cada agente controla uma nação diferente, sendo que, as características da nação escolhida, incluindo suas vantagens, desvantagens e unidades especiais são baseadas em fatos reais e registros históricos. Dada a escolha da civilização, o agente também seleciona um líder, que concede algumas vantagens extras, de forma a focar em uma certa estratégia de jogo. Os líderes são inspirados em figuras históricas reais, e suas vantagens em jogo correspondem a feitos históricos, políticas e conquistas feitas no mundo real. O objetivo do jogo é conduzir a sua nação desde a antiguidade, até a era do futuro, guiando todas as decisões ao longo das eras, como por exemplo: Construindo cidades, construindo distritos e obras de infraestrutura, alocando em quais hexágonos a população da cidade trabalhará, construindo maravilhas, gerindo a posição do exército, escolhendo o tipo de governo e suas políticas e progredindo em uma árvore tecnológica e árvore de progressão cultural.

A comunidade desenvolveu um mod "Real Strategy" Infixo (2019a) que melhora os bots do jogo de forma a proporcionar um desafio maior para o jogador. Entretanto, a escolha feita foi de um modelo de IA baseado em regras, seguindo a vertente da IA simbólica. Tal escolha foi feita devido ao fato de que caso utilizassem um método como

o de redes neurais, o custo computacional tornaria muito elevado pois cada adversário na partida iria ter a sua própria análise em profundidade a cada rodada. Dessa forma, um sistema baseado em regras é capaz de providenciar um certo desafio ao jogador sem pesar o custo computacional, porém, o algoritmo não se aprimora ou se torna mais eficiente nas estratégias já conhecidas.

2.1.2 Stellaris

Nesse jogo de ficção científica, o agente controla uma civilização que acaba de descobrir a tecnologia FTL, que permite suas espaçonaves viajarem para outros sistemas e assim, mapear e colonizar a galáxia. O jogo possui uma vasta quantidade de recursos, fatores, demandas da população, estruturas, tecnologias, espaçonaves e espionagem. Dado que o mapa galático é imenso, há uma grande complexidade no manuseio dos recursos e, existem muitos outros agentes no mapa, isso faz com que o custo computacional do jogo por si só seja imenso, inclusive havendo relatos de que certas configurações do jogo devem ser desativadas sob risco do jogo nem conseguir rodar.

Dada tal complexidade e dificuldade do jogo devido ao fato de requerer um alto nível de gerenciamento de recursos, planejamento estratégico, diplomacia e posicionamento militar, os bots foram programados para seguir um conjunto de regras que os levam a dar um certo nível de desafio ao jogador sem fazer de um grande custo computacional. Porém, tais regras não foram bem determinadas em termos de real eficiência e portanto, a real dificuldade dos bots se dá em modos de jogo com dificuldades em nível maior, em que os bots passam a ter multiplicadores de produção. Essa metodologia resulta em dois extremos negativos quanto à experiência do jogador: um deles é o fato dos bots tomarem decisões econômicas, militares e de tecnologia ineficientes, além de sempre tentarem atacar o jogador, mesmo quando não possuem uma economia de guerra forte o bastante para sustentar o conflito. O segundo extremo é a injustiça quanto ao fato de que os bots sempre terão mais recursos, espaçonaves e exército que o jogador, o que, combinado com o primeiro problema, pode levar a um jogo em que ou o jogador possui chances pequenas de vitória ou o bot toma decisões muito ineficientes, e a dificuldade acaba não sendo sentida pelo jogador.

Para solucionar os dois problemas, a comunidade criou o mod "Stellar AI" Workshop (2026) em que foi criado um método de comportamento que as IAs seguem, em que tal comportamento é escolhido baseado no estado atual do jogo. Além disso, foi feito um aprimoramento na função de avaliação de utilidade, alterando pesos na fórmula para que a IA tome decisões que a farão um adversário mais forte sem precisar ter um multiplicador na produção de recursos, além de fazê-lo priorizar a pesquisa científica na maioria dos casos. O mod utiliza do mesmo sistema baseado em regras, mas faz adequações de forma a proporcionar um maior desafio ao jogador. A IA também passa a classificar planetas especializá-los para a produção de um único recurso. A IA clássica (baseada em regras e algoritmos de busca determinísticos) foi adotada em detrimento da IA moderna (baseada em redes neurais e aprendizado de máquina) devido às restrições de custo computacional do jogo. Enquanto os métodos clássicos executam lógicas diretas e previsíveis, os modelos modernos de aprendizado exigem um processamento massivo de hardware que tornaria o jogo impossível de rodar em tempo real.

2.2 Obras em Outros Tipos de Jogos

2.2.1 Alien: Isolation

Tanto o site AI e Games (2023) quanto Machina (2023) falam sobre e como funciona o jogo de sobrevivência "Alien: Isolation", que possui uma IA desacoplada e estruturada em duas camadas, uma onisciente, chamada de "diretora" a qual sabe exatamente a posição do jogador, itens, e a localização do Alien. A segunda camada recebe dicas de onde o Alien deve se mover, mas sem revelar a exata localização do jogador, para que, com fontes visuais e de áudio, procure pelo jogador, utilizando de uma árvore decisória para guiar o Alien. O Alien possui uma árvore decisória que determina comportamentos, rotas de patrulha e formas de reação às ações do jogador. Nem todos os nós da árvore estão desbloqueados no começo do jogo.

A metodologia utilizada para aumentar a dificuldade do jogo é de verificar certos comportamentos do jogador os quais são repetidos com frequência e então desbloquear sub-nós da árvore decisória, por exemplo: há um projétil arremessável que gera ruído, cujo

propósito é de atrair o Alien, dando ao jogador a oportunidade de se mover e cumprir objetivos enquanto o Alien está distraído. Porém, após o uso frequente desse item, um sub-nó da árvore decisória é desbloqueado, permitindo o Alien ignorar o ruído e se mover para a origem do projétil, dando uma impressão de que o Alien está "aprendendo" ou "evoluindo". Para recompensar ou punir o jogador baseado na sua "coragem", existe um medidor de ameaça, o qual aumenta quanto mais próximo o Alien está do jogador e diminui caso o jogador esteja escondido. Caso o medidor de ameaça fique muito tempo sem chegar ao limite, o Alien então recebe dicas da posição do jogador, começa a desbloquear novos sub-nós da árvore e passa a abrir armários e procurar em lugares onde o jogador pode se esconder. Entretanto, se o medidor de ameaça chegar ao limite, o Alien então recua para as ventilações e entra no modo "Backstage", em que ele não patrulhará o mapa por um determinado período de tempo, dando uma chance ao jogador de cumprir os objetivos, recompensando-o por evitar o Alien sem se esconder, mas por ser capaz de estar fora do campo de visão e não produzir ruído.

2.2.2 Starcraft 2

No jogo RTS "Starcraft 2", há uma comunidade dedicada a criar IAs que utilizam de diversos métodos de IA e de técnicas do jogo para atingir a vitória. A IA AlphaStar DeepMind (2019), desenvolvida pela Google DeepMind é um grande exemplo de modelo "justo", pois ela segue as regras e limitações impostas pela liga ranqueada. A AlphaStar utiliza de redes neurais, aprendizado por reforço, aprendizado via multi-agente e aprendizado por imitação. Para solucionar o problema das estratégias do agente, os desenvolvedores criaram agentes "oportunistas", os quais o objetivo deles não é de ter uma estratégia que seja vencedora contra a maioria das estratégias e adversários, mas que tenham estratégias que sejam eficientes em vencer o AlphaStar. Dessa forma, o AlphaStar pode aprimorar suas estratégias gerais e aprende a lidar com casos específicos onde a sua estratégia original deve se adaptar à escolha do adversário.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Inteligência Artificial e Jogos de Estratégia

A utilização de Inteligência Artificial (IA) em jogos digitais acompanha a evolução da própria computação. Desde os primeiros programas de xadrez propostos por Alan Turing até sistemas modernos como AlphaGo e AlphaStar, os jogos têm sido utilizados como ambientes de teste para técnicas avançadas de tomada de decisão e planejamento estratégico.

Segundo Li (2024), os jogos representam ambientes ideais para o desenvolvimento de algoritmos de IA, pois permitem a observação de processos de decisão em cenários controlados, porém complexos. O autor destaca que a otimização estratégica em jogos tornou-se uma área importante de pesquisa, envolvendo técnicas como aprendizado de máquina, aprendizado por reforço, redes neurais e busca em árvores Monte Carlo (MCTS).

Além do entretenimento, as soluções desenvolvidas para jogos têm sido adaptadas para aplicações reais envolvendo alocação de recursos, logística e planejamento estratégico.

Nesse contexto, jogos de estratégia constituem um dos maiores desafios para sistemas inteligentes, pois exigem planejamento de longo prazo, gerenciamento de recursos e adaptação constante a ambientes dinâmicos.

3.2 Jogos 4X e a Complexidade de Decisão

O gênero 4X recebeu esse nome a partir dos quatro pilares fundamentais de sua jogabilidade:

- Explorar
- Expandir
- Explotar
- Exterminar

Segundo a definição clássica de jogos 4X, o jogador deve explorar o mapa, expan-

dir seu território, explorar recursos disponíveis e eliminar adversários.

Jogos como Civilization, Master of Orion e Galactic Civilizations tornaram-se referências do gênero por incorporarem sistemas complexos de desenvolvimento tecnológico, expansão territorial, economia e combate.

Uma característica marcante dos jogos 4X é o crescimento exponencial do espaço de decisões. À medida que a partida avança:

- novas tecnologias são desbloqueadas;
- mais cidades passam a ser administradas;
- novas unidades surgem;
- mais informações tornam-se disponíveis.

O trabalho de Chen et al. (2026) destaca que esse crescimento produz um espaço combinatório extremamente grande, onde cada decisão possui consequências imediatas e também efeitos de longo prazo.

Essa característica torna os jogos 4X especialmente adequados para pesquisas sobre planejamento estratégico e sistemas de apoio à decisão.

3.3 Macrodecisões e Microdecisões

Um dos conceitos centrais encontrados nos trabalhos analisados é a distinção entre decisões estratégicas (macro) e decisões operacionais (micro).

Segundo Chen et al. (2026), um sistema eficiente para jogos 4X deve ser separado em dois tipos de decisão:

3.3.1 Macrodecisões

Relacionada a:

- escolha tecnológica;
- expansão territorial;
- desenvolvimento econômico;
- definição de estratégia militar;
- condição de vitória desejada.

3.3.2 Microdecisões

Relacionada a:

- movimentação de unidades;
- combate;
- melhorias específicas;
- gerenciamento local de cidades.

3.3.3 Resultado da Divisão

Os autores demonstram que sistemas especializados em decisões operacionais frequentemente apresentam bom desempenho operacional, mas encontram dificuldades para executar planejamento estratégico de longo prazo Chen et al. (2026).

Essa distinção é particularmente relevante para Battle of Polytopia, pois o jogo possui mecânicas simplificadas de microgerenciamento e forte dependência das decisões tecnológicas e econômicas tomadas nos primeiros turnos.

A eficiência das macrodecisões impacta diretamente a eficiência das microdecisões, pois uma economia mais forte que a do adversário permite o treinamento de mais unidades e unidades mais fortes.

3.4 Árvores Tecnológicas como Problemas de Otimização

Uma das principais características dos jogos 4X modernos é a presença de árvores tecnológicas.

A introdução desse conceito é apontada como uma das grandes inovações da série Civilization.

A árvore tecnológica cria dependências entre tecnologias e obriga o jogador a decidir:

- quais tecnologias pesquisar;
- quando pesquisá-las;

- quais benefícios imediatos e futuros cada escolha proporciona.

Matematicamente, esse problema pode ser interpretado como um processo de otimização sujeito a restrições.

Cada tecnologia possui:

- custo em estrelas;
- benefício imediato;
- benefícios futuros;
- sinergias com outras tecnologias.

O valor de uma tecnologia não depende apenas dela própria, mas também do contexto do mapa e das tecnologias futuras que ela permite acessar.

Essa observação fundamenta a proposta de utilização de funções de pontuação para avaliação tecnológica.

3.5 Sistemas de Apoio à Decisão e Funções de Utilidade

Uma das abordagens mais utilizadas para lidar com problemas complexos de tomada de decisão consiste na construção de funções de utilidade. Segundo a literatura de Inteligência Artificial, uma função de utilidade é um mecanismo capaz de associar um valor numérico a diferentes estados ou alternativas, permitindo que um agente compare opções distintas e selecione aquela considerada mais vantajosa.

De acordo com Li (2024), sistemas modernos de otimização estratégica em jogos frequentemente utilizam funções de avaliação para estimar a qualidade de estados futuros sem a necessidade de explorar exaustivamente todo o espaço de possibilidades. Essa estratégia reduz significativamente o custo computacional da tomada de decisão, tornando viável a aplicação de algoritmos em ambientes complexos e dinâmicos.

Nos jogos de estratégia, especialmente nos pertencentes ao gênero 4X, o número de possibilidades cresce rapidamente ao longo da partida. Conforme discutido por Chen et al. (2026), a expansão do império, o desenvolvimento tecnológico e o gerenciamento econômico produzem um espaço de estados extremamente amplo, dificultando a busca por soluções ótimas exatas.

Nesse contexto, funções de utilidade tornam-se ferramentas fundamentais para a

construção de sistemas de apoio à decisão, uma vez que permitem comparar alternativas distintas por meio de uma métrica comum. Em vez de determinar diretamente qual ação é a melhor, o sistema atribui valores às opções disponíveis e seleciona aquela que apresenta maior utilidade esperada.

Outra abordagem amplamente utilizada em sistemas de decisão é a lógica nebulosa, conforme Lääveri (2017). Diferentemente da lógica clássica, em que uma condição é verdadeira ou falsa, a lógica nebulosa permite representar graus intermediários de pertinência. Dessa forma, conceitos vagos como “alta quantidade de recursos”, “baixo crescimento econômico” ou “forte potencial estratégico” podem ser modelados matematicamente por meio de conjuntos nebulosos e funções de pertinência.

Os Sistemas de Inferência Nebulosa (SIN) utilizam regras do tipo SE-ENTÃO para combinar múltiplos critérios e produzir uma avaliação final. Essa característica torna a lógica nebulosa particularmente adequada para jogos de estratégia, nos quais muitos fatores relevantes não possuem limites rígidos ou relações lineares claramente definidas.

Para determinar se uma solução encontrada é boa ou não, basta avaliar quantas regras intermediárias foram cumpridas, comparar a quantidade de cidades do agente com o adversário e comparar a quantidade de estrelas por turno do agente com o adversário.

3.6 Heurísticas e Avaliação de Estados em Jogos de Estratégia

A avaliação heurística constitui uma das principais técnicas empregadas em Inteligência Artificial para jogos. Em problemas cuja complexidade inviabiliza a exploração completa do espaço de busca, funções heurísticas são utilizadas para estimar a qualidade de um estado de jogo a partir de informações parciais.

Segundo Li (2024), algoritmos de otimização estratégica frequentemente dependem de mecanismos de avaliação capazes de identificar estados promissores e direcionar o processo de busca para regiões mais relevantes do espaço de soluções.

Nos jogos 4X, essa necessidade torna-se ainda mais evidente devido à grande quantidade de variáveis envolvidas. Aspectos como desenvolvimento tecnológico, cres-

cimento econômico, expansão territorial, poder militar e acesso a recursos precisam ser considerados simultaneamente durante o processo decisório.

A dissertação de Lääveri (2017) sobre jogos 4X destaca que a evolução histórica do gênero resultou em sistemas cada vez mais complexos, nos quais a tomada de decisão depende da análise conjunta de múltiplos fatores interdependentes.

Nesse cenário, heurísticas permitem transformar informações qualitativas em indicadores quantitativos, tornando possível comparar estratégias distintas. Em vez de procurar a solução ótima global, muitas aplicações adotam estratégias de busca aproximada que produzem soluções suficientemente boas dentro de um tempo computacional aceitável.

Essa característica explica a ampla utilização de heurísticas em agentes de jogos, sistemas especialistas e mecanismos de apoio à decisão.

Um exemplo seria a proximidade e quantidade de unidades inimigas do agente. Poucas unidades representam uma baixa ameaça e portanto, pesquisar tecnologias econômicas e aumentar a produção de estrelas por turno recebem uma prioridade muito maior que o treinamento de unidades.

3.7 Planejamento Estratégico de Longo Prazo em Jogos 4X

Uma das principais características dos jogos pertencentes ao gênero 4X é a forte dependência de planejamento de longo prazo. Diferentemente de jogos focados predominantemente em execução operacional, decisões realizadas nos primeiros turnos podem produzir impactos significativos ao longo de toda a partida.

Conforme discutido por Chen et al. (2026), sistemas de Inteligência Artificial para jogos 4X enfrentam dificuldades particulares devido à necessidade de coordenar decisões econômicas, tecnológicas e militares em horizontes temporais extensos.

A escolha de tecnologias, por exemplo, não afeta apenas os recursos imediatamente disponíveis ao jogador. Essas decisões também determinam quais opções estarão acessíveis nos turnos seguintes, influenciando o desenvolvimento econômico, a produção

militar e a capacidade de expansão territorial.

De forma semelhante, investimentos econômicos realizados no início da partida frequentemente produzem efeitos acumulativos que se propagam ao longo do tempo. Essa característica cria relações de dependência entre decisões presentes e resultados futuros, fenômeno frequentemente associado ao conceito de snowball effect em jogos de estratégia.

Segundo os estudos analisados, o desafio central para sistemas de tomada de decisão em jogos 4X consiste justamente em equilibrar benefícios imediatos e vantagens futuras.

Dessa forma, o planejamento estratégico de longo prazo constitui um dos principais fundamentos teóricos para o desenvolvimento de modelos de avaliação e apoio à decisão em jogos como The Battle of Polytopia, nos quais escolhas tecnológicas e econômicas realizadas nos primeiros turnos podem determinar o sucesso ou fracasso da estratégia adotada ao longo da partida.

4 Taxonomia do The Battle of Polytopia

No jogo The Battle of Polytopia o agente controla uma tribo, podendo aprimorar cidades, treinar unidades e lutar contra outras tribos, que são controladas por outros agentes. O tamanho e tipo de mapa podem variar, assim como a geração do mundo e as recompensas de ruínas são aleatórias e, portanto, nenhuma partida é a mesma. Existe uma névoa de guerra, em que o agente não possui visão do que ainda não foi revelado. O agente pode pesquisar tecnologias para desbloquear novas ações, unidades e outros bônus. Há 16 tribos totais no jogo, com 12 sendo normais e 4 especiais. Cada tribo possui um terreno único e, portanto, a geração de recursos é também única. Dentre as 12 tribos normais, 11 delas começam a partida com uma tecnologia única e em alguns casos, uma unidade inicial diferente e estrelas iniciais diferentes. As tribos especiais possuem unidades, estruturas e mecânicas diferentes das tribos normais, com pontos mais fortes e pontos mais fracos em diferentes aspectos.

Essa definição do The Battle of Polytopia se encaixa na mesma definição e análise de problema feita por Kipper e Nesteriuk (2016), em que há uma gama de elementos em comum, como o procedimento de turnos, a presença de território, construções, recursos, população e tecnologia.

4.1 Estrelas e Recursos

A única moeda do jogo são estrelas. Qualquer ação que tenha um custo, será em estrelas.

Recursos podem ser explorados dentro das fronteiras de cidades para conceder população. O custo de extração também é dado em estrelas.

4.2 Objetivos

O objetivo principal em The Battle of Polytopia depende do modo de jogo, entretanto, em todos os modos, existe um fator em comum: Só pode haver 1 vencedor. Portanto, o

jogo é sempre tratado como todos contra todos, entretanto, é possível assinar acordos de paz contra outros adversários para encerrar o combate com tal adversário.

4.2.1 Um Jogador

Existem 4 modos de jogo individuais, em que o agente joga contra bots. São eles:

Perfeição

Nesse modo, o objetivo é obter a maior pontuação que o agente conseguir em 30 turnos. Quanto mais bots adversários e quanto maior a dificuldade, maior o multiplicador final da pontuação. Não é possível escolher o tipo de mapa ou alterar manualmente o tamanho do mapa.

Dominação

Nesse modo, o objetivo é eliminar todos os adversários o mais rápido possível. A pontuação final é determinada por: Taxa de unidades perdidas vs unidades destruídas, número de turnos até a vitória e se o agente foi o que destruiu todas as tribos adversárias. Não é possível escolher o tipo de mapa ou alterar manualmente o tamanho do mapa.

Criativo

Nesse modo, não há um objetivo fixo, o jogo nunca termina, podendo até não haver adversários. O tamanho do mapa, tipo de mapa e número de adversários podem ser alterados. Esse modo é útil para experimentar ou simular diferentes situações.

Desafio Semanal

Toda semana, há um cenário diferente, em que o agente recebe uma tribo, tipo de mapa, tamanho do mapa, tecnologias iniciais, estrelas iniciais e adversários pré determinados. O objetivo é obter a maior pontuação que o agente conseguir em 20 turnos.

4.2.2 Multi-Jogador

Existem 2 modos de jogo que podem ser jogados contra 1 até 15 adversários. O tamanho do mapa, tipo de mapa e número de adversários podem ser alterados antes de criar a sala, e essas informações são disponíveis aos outros jogadores antes deles selecionarem a tribo que vão jogar. Caso um jogador se renda, ele será eliminado e toda a sua tribo será controlada por um bot. Se houver apenas um jogador humano na partida, ele será vitorioso automaticamente.

Glória

O objetivo desse modo é atingir um valor pré determinado de pontos. Assim que o primeiro jogador atingir a pontuação, ele será o vencedor da partida. É possível vencer por completa eliminação dos adversários também.

Poder

O objetivo desse modo é capturar todas as capitais da partida, inclusive estar em posse da própria capital. Um jogador não é eliminado caso perca a sua capital.

4.3 Layout

O jogo se passa em um grid 2D, dividido por células em formato de quadrado. Em cada célula, podem existir apenas um tipo de terreno, que pode conter uma ou nenhuma característica, pode conter um recurso ou não, e pode conter uma estrutura ou não. As 4 quinas do mapa contêm 1 farol cada, em que uma vez descoberto, concede 1 população para a capital.

O custo padrão de movimento é sempre 1 em todas as células, entretanto, estradas e pontes podem reduzir o custo para 0,5 e algumas células podem interromper o movimento de uma unidade.

4.3.1 Terra Firme

Existem 3 tipos de células em terra firme:

Planície

Pode conter: frutas, terra fértil e esporos de fungo.

O custo de movimento dessa célula é 1 por padrão e qualquer estrutura nível 3, monumento ou templo pode ser colocado aqui.

Floresta

Pode conter: animal e esporos de fungo.

Essa célula interrompe o movimento de todas as unidades que não possuem o atributo "rastejar" ou "Voador" e apenas forjas, Micélio, Clato, madeiras e templo da floresta podem ser colocados aqui.

Montanha

Pode conter: metal.

Essa célula interrompe o movimento de todas as unidades que não possuem o atributo "voador" e apenas minas e templos da montanha podem ser colocados aqui.

4.3.2 Água

Existem 2 tipos de células aquáticas, e a distinção quanto à sua geração é que será água rasa apenas se houver pelo menos uma célula de terra firme cardinalmente adjacente à célula de água.

Água Rasa

Pode conter: peixe, estrela-do-mar e campo fértil aquático.

O custo de movimento dessa célula é 1 e apenas portos, templos aquáticos e monumentos podem ser colocados aqui.

Água Profunda

Pode conter: peixe, estrela-do-mar e campo fértil aquático.

O custo de movimento dessa célula é 1 e apenas templos aquáticos podem ser colocados aqui.

4.4 Tecnologias

Para treinar novas unidades, construir novas estruturas, obter visão de recursos e realizar ações que resultam em melhorias de cidades, o jogador precisa pesquisar novas tecnologias a fim de desbloquear essas ações. O custo em estrelas para pesquisar uma tecnologia é sempre:

$$Custo = X * Y + 4 \quad (4.1)$$

em que X é o nível da tecnologia e Y é o número total de cidades que o agente possui.

A árvore tecnológica funciona como um grafo não direcionado, em que cada tecnologia é um nó e cada aresta indica quais tecnologias podem ser pesquisadas após a mesma.

Cada tecnologia pode desbloquear uma ou mais vantagens, por exemplo: uma nova unidade, um bônus, a coleta de um recurso, uma estrutura, uma missão, a possibilidade de movimento para células específicas ou ações especiais.

Há um total de 25 tecnologias que podem ser pesquisadas.

4.4.1 Árvore Tecnológica Normal

As 12 tribos normais compartilham da mesma árvore tecnológica como segue a imagem 4.1:

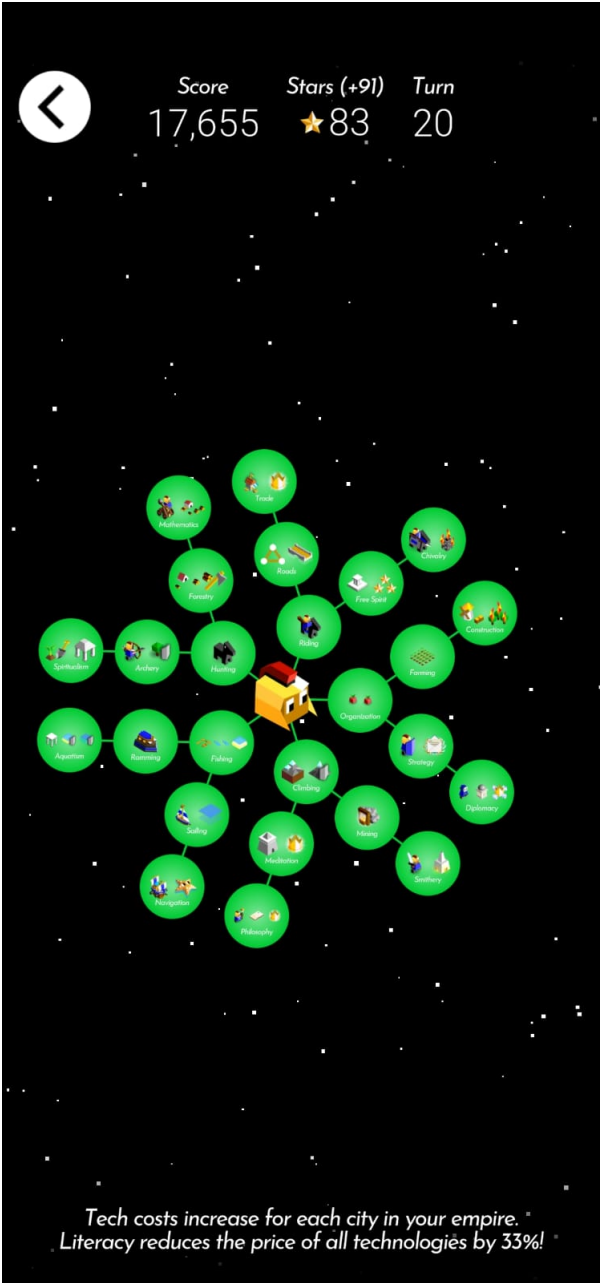


Figura 4.1: Árvore Tecnológica das tribos normais

4.4.2 Árvores tecnológicas Especiais

As 4 tribos especiais possuem algumas divergências quanto às tecnologias, entretanto o tamanho da árvore é a mesma.

Árvore Tecnológica do Aquarion

A marinha é substituída por animais aquáticos, e a tecnologia "ramming" é substituída por "aquaculture" que permite a construção postos avançados que conectam cidades à capital e a construção de fazendas aquáticas.

Além disso, as estradas são substituídas por bolhas, que aumentam o movimento de unidades anfíbias sob esse efeito. Unidades podem usar sua ação para alagar planícies. Alagar planícies ou se mover a uma faz com que a unidade receba o efeito da bolha. Receber dano ou se mover para terra firme não alagada resulta na perda da bolha.

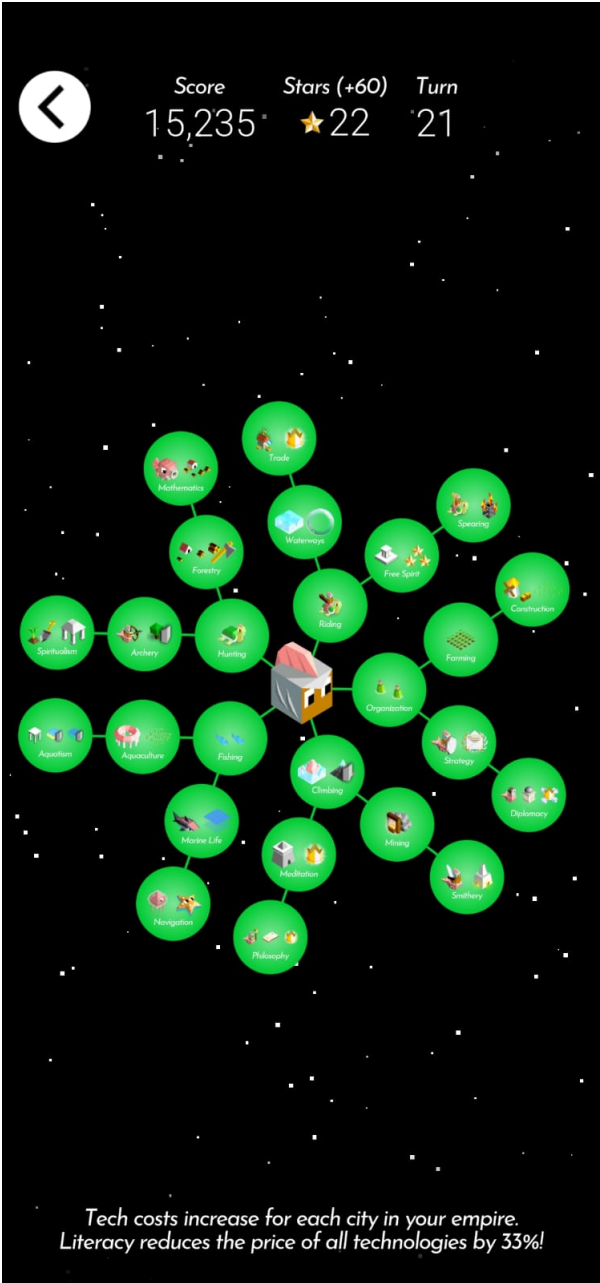


Figura 4.2: Árvore Tecnológica da tribo Aquarion

Árvore Tecnológica do Elyrion

A tecnologia de caça é substituída por "Forest magic" em que ao invés de pagar 2 estrelas para caçar o animal e ganhar 1 população para a cidade, o jogador paga 3 estrelas para transformar o animal em uma unidade de combate.

Além disso, A tecnologia de desmatamento permite o jogador construir santuários, que produzem 1 estrela por turno para cada animal adjacente. Essa tribo não pode cortar florestas ou queimá-las para transformar em terra fértil.

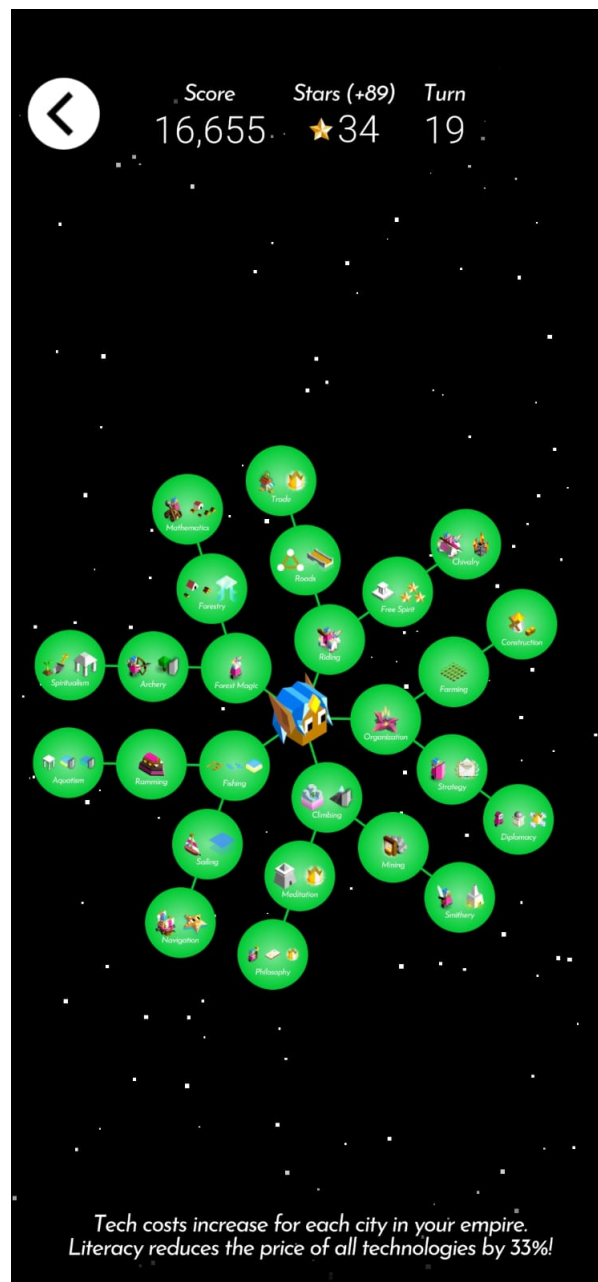


Figura 4.3: Árvore Tecnológica da tribo Elyrion

Árvore Tecnológica do Polaris

A tecnologia de pesca é substituída por "Frostworks" em que ao invés de pescar, o jogador pode treinar "moonis" por 5 estrelas, que congelam a área ao redor de onde movem, e construir postos avançados por 5 estrelas que conectam cidades por meio do gelo.

Além disso, não há uma marinha, mas unidades que se movem rapidamente pelo gelo, uma tecnologia que amplia o movimento de tropas terrestres sobre o gelo, um banco de gelo que produz baseado no número de células congeladas no mapa e os arqueiros possuem flechas que congelam os inimigos.

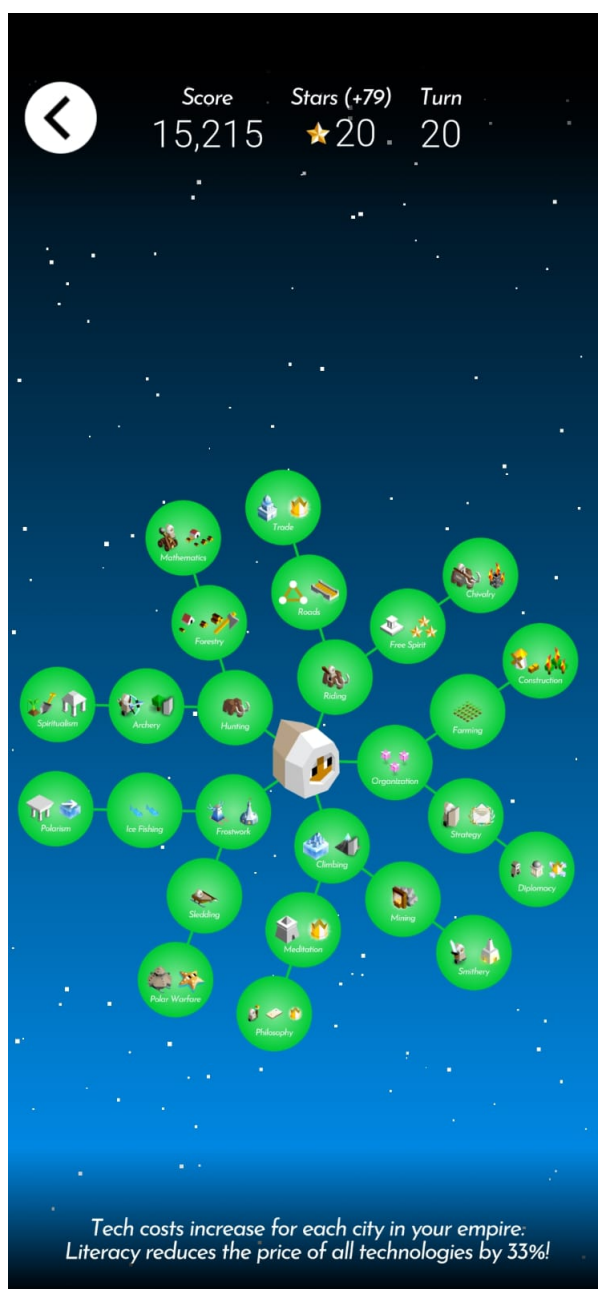


Figura 4.4: Árvore Tecnológica da tribo Polaris

4.5 Tribos

Existem 16 tribos no jogo, cada uma com seus respectivos biomas e vantagens iniciais diferentes.

4.5.1 Tribos Normais

Existem 12 tribos normais, elas possuem as mesmas tecnologias e mesmas unidades. A super unidade é o gigante. São elas:

Xin-Xi

Começa o jogo com 7 estrelas, um guerreiro e a tecnologia de escalada desbloqueada.

Possui duas montanhas com metal garantidas na capital.

Imperius

Começa o jogo com 5 estrelas, um guerreiro e a tecnologia de organização desbloqueada.

Possui duas frutas garantidas na capital.

Não existem planícies vazias adjacentes a vilas nesse bioma.

Bardur

Começa o jogo com 5 estrelas, um guerreiro e a tecnologia de caça desbloqueada.

Possui dois animais garantidos na capital.

Oumaji

Começa o jogo com 6 estrelas, uma montador e a tecnologia de montaria desbloqueada.

Possui duas frutas garantidas na capital.

Kickoo

Começa o jogo com 5 estrelas, um guerreiro e a tecnologia de pesca desbloqueada.

Possui dois peixes garantidos na capital.

Hoodrick

Começa o jogo com 7 estrelas, um arqueiro e a tecnologia de arquearia desbloqueada.

Possui dois animais garantidos na capital

Luxidoor

Começa o jogo com 2 estrelas, um guerreiro e a capital no nível 3.

Possui duas frutas, dois animais, dois peixes, uma terra fértil e uma montanha com metal garantidos na capital

Vengir

Começa o jogo com 5 estrelas, um espadachim e a tecnologia de fundição desbloqueada.

Possui uma montanha com metal garantida na capital.

Zebasi

Começa o jogo com 5 estrelas, um guerreiro e a tecnologia de agricultura desbloqueada.

Possui duas terras férteis garantidas na capital.

Ai-mo

Começa o jogo com 5 estrelas, um conversor de mentes e a tecnologia de filosofia desbloqueada.

Possui dois animais garantidos na capital

Quetzali

Começa o jogo com 7 estrelas, um defensor e a tecnologia de estratégia desbloqueada.

Possui duas frutas garantidas na capital.

Não existem planícies vazias adjacentes a vilas nesse bioma.

Yadakk

Começa o jogo com 7 estrelas, um guerreiro e a tecnologia de estradas desbloqueada.

Possui duas frutas garantidas na capital.

4.5.2 Tribos Especiais

Existem 4 tribos especiais, com alguns pontos em comum, mas com diferentes mecânicas, regras e algumas unidades diferentes.

Aquarion

Começa o jogo com 5 estrelas, um guerreiro e todas as unidades podem se mover em água rasa.

Possui dois peixes garantidos na capital.

Essa tribo pode construir estruturas em água rasa e água profunda, todas as suas unidades são anfíbias ou aquáticas, e a existência dessa tribo em uma partida força a possibilidade de geração de campos férteis aquáticos em todas as vilas do mapa. Essa tribo pode inundar células de terra firme para ampliar o movimento de unidades anfíbias e permitir que unidades aquáticas se movam em terra firme. A super unidade dessa tribo é um caranguejo gigante

Elyrion

Começa o jogo com 5 estrelas, um guerreiro e a tecnologia de caça é modificada e desbloqueada.

Possui dois animais garantidos na capital.

Essa tribo sabe exatamente a posição de todas as ruínas do mapa. Essa tribo não pode cortar árvores e animais são transformados em uma unidade "polytauro" ao invés de ser convertido em população. A super unidade dessa tribo é um ovo de dragão de fogo, que cresce com o tempo.

Polaris

Começa o jogo com 5 estrelas, um "moonie" e a tecnologia de pesca é modificada e desbloqueada.

Possui dois animais garantidos na capital.

Essa tribo não possui uma marinha, ao invés, ela congela células de água para andar e lutar sobre o gelo. Também pode congelar unidades inimigas e construir postos

avancados sobre o gelo para conectar cidades. A super unidade dessa tribo é uma "gaami", uma unidade com muita vida, defesa e ataque que congela a área ao redor após se mover.

Essa tribo não possui um bioma próprio. Caso haja apenas tribos polaris na partida, a geração de recursos segue a distribuição padrão.

Cymanti

Começa o jogo com 5 estrelas, um conversor de mentes especial e a tecnologia de agricultura é modificada e desbloqueada.

Possui dois esporos de fungo garantidos na capital

Essa tribo não possui terras férteis em seu bioma, ao invés, ela possui esporos para criar fazendas de fungo que crescem com o tempo. Suas unidades são modificadas e quase todo o seu arsenal possui o traço "creep" que permite evitar a interrupção de movimento em algas e florestas. Essa tribo utiliza de veneno para enfraquecer unidades inimigas e disseminar mais esporos de fungo para fins econômicos. A super unidade dessa tribo é uma centopeia gigante, que cresce em segmentos toda vez que mata uma unidade inimiga no ataque. Caso um segmento esteja desconectado de outro segmento ou cabeça, então tal segmento se transforma em uma nova centopeia.

4.6 Tipos de Unidades

Existem 4 tipos de unidades no jogo:

4.6.1 Terrestre

Pode se mover apenas em células de terra firme ou aquáticas com alga.

4.6.2 Aquático

Pode se mover apenas em células de água ou de terra firme inundadas.

4.6.3 Anfíbio

Pode se mover em qualquer terreno, mas células de terra firme não inundadas interrompem o seu movimento.

4.6.4 Aéreo

Pode se mover em qualquer terreno, mesmo se não possuir a tecnologia para tal.

4.7 Distribuição de Recursos

As seguintes imagens em forma de tabelas mostram a distribuição dos recursos:

Tabela 4.1: Distribuição percentual de terrenos nas fronteiras internas das tribos

	Xin-Xi	Imperius	Bardur	Oumaji	Kickoo	Hoodrick	Luxidoor	Vengir	Zebasi	Ai-Mo	Aquarion	Quetzali	Elyrion	Yadakk	Cymanti
Mountain	20,00	14,28	15,46	11,45	7,69	6,38	14,28	14,28	9,68	20,00	17,66	14,28	7,69	9,68	16,67
Forest	35,56	38,10	33,00	12,21	41,03	51,06	38,10	38,10	25,81	35,56	23,52	38,10	41,03	25,81	37,04
Field	44,44	47,62	51,54	76,34	51,28	42,56	47,62	47,62	64,51	44,44	58,82	47,62	51,28	64,51	46,29
Empty Field	25,00	0,00	50,00	25,00	25,00	25,00	25,00	47,50	37,50	47,50	37,50	0,00	12,50	12,50	40,00
Crop / Field	37,50	25,00	0,00	37,50	37,50	37,50	37,50	48,75	43,75	3,75	18,75	2,50	56,25	31,25	0,00
Fruit / Field	37,50	75,00	50,00	37,50	37,50	37,50	37,50	3,75	18,75	48,75	43,75	97,50	31,25	56,25	45,00
Empty Mountain	0,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	0,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Mine / Mountain	100,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	100,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
Empty Forest	50,00	75,00	50,00	90,00	50,00	50,00	50,00	95,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	40,00
Game / Forest	50,00	25,00	50,00	10,00	50,00	50,00	50,00	5,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	45,00
Spore / Forest	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00
Spore / Field	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00

A parte superior da tabela indica a tribo, e a parte lateral esquerda indica nessa ordem:

- Mountain: Chance de gerar montanha por célula (vale para o bioma inteiro)
- Forest: Chance de gerar floresta por célula (vale para o bioma inteiro)
- Plain: Chance de gerar planície por célula (vale para o bioma inteiro)
- Empty/Field: Dado que foi gerado uma planície, qual a chance de ser vazio
- Crop/Field: Dado que foi gerado uma planície, qual a chance de conter um campo fértil
- Fruit/Field: Dado que foi gerado uma planície, qual a chance de conter uma fruta
- Empty Mountain: Dado que foi gerado uma montanha, qual a chance de ser vazia
- Mine/Mountain: Dado que foi gerado uma montanha, qual a chance de conter metal

- Empty/Forest: Dado que foi gerado uma floresta, qual a chance de ser vazia
- Game/Forest: Dado que foi gerado uma floresta, qual a chance de conter um animal
- Spore/Forest: Dado que foi gerado uma floresta, qual a chance de conter esporos de fungo
- Spore/Field: Dado que foi gerado uma planície, qual a chance de conter esporos de fungo

A primeira tabela é a distribuição da chance de geração aleatória por célula do bioma. A chance de gerar planície, floresta e montanha se mantém a mesma independente da proximidade de vilas. A chance de gerar o recurso dado o tipo de célula é calculado apenas para células adjacentes a vilas. A geração de recursos não adjacentes a vilas, mas dentro do raio de um possível crescimento de fronteira é sempre de 1/3 da geração normal.

É importante ressaltar que a tribo Polaris não possui bioma próprio. Caso haja apenas tribos Polaris na partida, o jogo utiliza a geração da tribo Luxidoor.

A tabela trata apenas células de terra firme.

Tabela 4.2: Modificadores de geração de recursos por tribo

Modificador	Xin-Xi	Imperius	Bardur	Oumaji	Kickoo	Hoodrick	Luxidoor	Vengir	Zebasi	Ai-Mo	Aquarion	Quetzali	Elyrion	Yadakk	Cymanti
Aquacrops	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
Mountain	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,2
Forest	1,0	1,0	0,8	0,2	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0
Fruit	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1	0,5	1,0	1,0	2,0	1,0	1,5	1,0
Crop	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1	0,5	0,1	1,5	1,0	0,0
Game	1,0	0,5	1,0	0,2	1,0	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Fish	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Metal	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Spores	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,2
Water	–	–	–	0,5	2,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

A parte superior da tabela indica a tribo, e a parte lateral esquerda indica modificadores nessa ordem:

- AquaCrops: Campos férteis aquáticos
- Mountain: montanhas
- Forest: florestas
- Fruit: frutas
- Crop: Campos férteis
- Animals: Animais
- Fish: Peixes
- Metal: Metal

- Spores: Esporos de fungo
- Water: Água
- Starting Resource: Recurso inicial (já mencionado na seção de tribos)
- Base rate: Taxa base de geração de recursos

Essa tabela representa a geração de recursos e tipos de células de forma relativa. Os multiplicadores em 1.0 significam que há paridade com a taxa base de geração de recursos. Diferentes tonalidades de verde indicam multiplicador maior que o padrão, e as diferentes tonalidades de vermelho indicam multiplicador menor que o padrão.

Essa disparidade de multiplicadores pode ser comparada com a imagem anterior, e serve para mostrar de forma mais prática a diferença de geração de recursos, mostrando quais tribos possuem estratégias mais bem definidas devido à sua tecnologia inicial e pelos recursos gerados em seu bioma natal.

A taxa base de geração de peixes é de 37,5% e a de campos férteis aquáticos é de 37,5 %.

4.8 Monumentos e Missões

Existem 7 missões particulares a serem cumpridas. Uma vez alcançado tal objetivo, o jogador recebe um monumento único. Cada missão só pode ser cumprida uma vez, e mesmo que os parâmetros mínimos sejam perdidos após a missão ser cumprida, o monumento não é perdido. Cada monumento é diferente para representar qual missão foi concluída e, concede 400 pontos e 3 de população na cidade em que for colocado.

Métropole

Requisito: Aprimorar uma cidade para o nível 5

Desbloqueio: Ter uma cidade aprimorada

Matador

Requisito: Eliminar 10 unidades inimigas

Desbloqueio: eliminar 1 unidade inimiga

Explorador

Requisito: Descobrir todos os faróis do mapa

Desbloqueio: Descobrir 1 farol

Conector

Requisito: Conectar 5 cidades à sua capital

Desbloqueio: Conectar uma cidade à sua capital

Pacifista

Requisito: Não executar nenhum ataque por 5 turnos

Desbloqueio: Pesquisar a tecnologia de meditação

Gênio

Requisito: Pesquisar todas as 25 tecnologias

Desbloqueio: Pesquisar a tecnologia de filosofia

Riqueza

Requisito: Obter 100 estrelas

Desbloqueio: Pesquisar a tecnologia de comércio

4.9 Ruínas

Ruínas são estruturas pré existentes no mapa, as quais podem ser exploradas pelos jogadores ao mover uma unidade na célula. Elas concedem uma única recompensa. A recompensa é aleatória.

4.9.1 Ruína em Terra Firme

Não pode existir adjacente a uma vila. Pode conter dentre 5 recompensas:

Explorador

Concede um explorador do ponto de partida da ruína, que move por 12 células revelando o máximo de névoa de guerra possível. Essa recompensa não é válida caso não haja células com névoa de guerra entre 2 casas de distância.

População

Concede 3 de população para a capital. Essa recompensa não é válida caso o jogador não controle uma capital.

Recursos

Concede 10 estrelas para o jogador

Tecnologia

Concede uma tecnologia não pesquisada que pode ser descoberta. Essa recompensa não é válida caso todas as tecnologias já tenham sido descobertas.

Espadachim Veterano

Concede uma unidade "Espadachim" com status "veterano"

4.9.2 Ruína no Oceano

Não pode existir em água rasa e deve estar sempre a pelo menos 2 casas de distância de qualquer vila ou capital. Pode conter dentre 6 recompensas:

Explorador

Concede um explorador do ponto de partida da ruína, que move por 12 células revelando o máximo de névoa de guerra possível. Essa recompensa não é válida caso não haja células com névoa de guerra entre 2 casas de distância.

População

Concede 3 de população para a capital. Essa recompensa não é válida caso o jogador não controle uma capital.

Recursos

Concede 10 estrelas para o jogador

Tecnologia

Concede uma tecnologia não pesquisada que pode ser descoberta. Essa recompensa não é válida caso todas as tecnologias já tenham sido descobertas.

Piratas

Concede um guerreiro veterano em uma jangada promovida a aríete

Cidade Perdida

Gera uma nova cidade nível 1 e recursos a serem explorados, como peixe e campo fértil aquático. Apenas a tribo Aquarion pode obter essa recompensa. A tribo Aquarion sempre obtém essa recompensa quando descobre uma ruína aquática.

4.10 Cidades

Cada cidade requer X de população para aprimorar para o próximo nível, em que X é o nível a ser alcançado. As cidades naturalmente possuem como parte de seu território todas as células a 1 espaço de distância cardinalmente e colateralmente, formando um quadrado 3×3 .

4.10.1 Capitais

Capitais produzem uma estrela por turno a mais que o normal, recebem 1 de população para cada farol encontrado, recebem a recompensa da ruína de população e recebem 1 de população para cada cidade sua conectada à capital.

Capitais possuem prioridade a serem geradas pelo menos a 5 células de distância de outras capitais. Essa regra só é quebrada caso não seja possível atender à demanda pelo número de jogadores e mapa.

Os recursos são gerados de forma aleatória, e caso não atendam ao mínimo requerido da tribo, então uma mudança manual é feita até o critério ser satisfeito.

4.10.2 Cidades Comuns

Cidades comuns são obtidas por meio da captura de vilas. Vilas podem ser capturadas ao mover uma unidade até a mesma e executar a ação de captura.

Cidades comuns recebem 1 de população quando são conectadas à capital. A conexão pode ser feita por estradas, portos ou estruturas especiais. Uma cidade conectada pode servir como ponto de conexão para outras cidades.

Os recursos são gerados de forma aleatória, seguindo uma tabela.

Capturar uma vila cria território para a cidade apenas em células que não pertencem a outra cidade.

4.10.3 Recompensas por Melhoria

Após aprimorar uma cidade, existem duas possibilidades de escolha baseado no nível aprimorado:

Nível 2

Obter uma oficina: A cidade tem mais 50 pontos e ela produz 1 estrela por turno a mais

Obter um explorador: Um explorador parte da célula da cidade e revela o máximo de névoa de guerra possível

Nível 3

Obter recursos: Receba 5 estrelas

Obter uma muralha: o bônus de defesa da cidade passa a ser um multiplicador de 4 vezes ao invés de 1.5

Nível 4

Obter população: A cidade ganha 3 de população

Crescer fronteira: A fronteira da cidade cresce para um quadrado de 5x5

Nível 5 ou Mais

Obter parque: A cidade A cidade tem mais 250 pontos e ela produz 1 estrela por turno a mais

Obter super unidade: Uma super unidade aparece na cidade. Se a célula estiver ocupada, a unidade é empurrada para outra célula para dar espaço à super unidade

4.11 Dinâmica de jogo

O jogo se passa em turnos, em que cada jogador executa suas ações somente em seu turno.

A produção de estrelas é feita sempre no começo do turno.

4.11.1 Combate

Cada unidade pode ocupar apenas uma célula. Unidades possuem diferentes atributos que as permitem ter diversas características, como por exemplo poder ou não atacar após se mover, converter unidades inimigas, atacar a distância, mover-se após atacar, entre outros.

A unidade atacante sempre ataca primeiro, e o defensor retalia apenas se a unidade inimiga estiver dentro do seu alcance e dentro da visão do jogador.

O dano causado no ataque e sofrido em retaliação é baseado no valor de ataque do atacante, os pontos de vida do atacante, o valor de defesa do defensor e os pontos de vida do defensor.

Caso a unidade defensora morra, nenhum contra ataque é feito

4.11.2 Zona de Controle

Todas as unidades não invisíveis geram um efeito de zona de controle em todas as células adjacentes a ela. Isso significa que todas as células em que existe o efeito de zona de

controle interrompem o movimento inimigo, independentemente do custo de movimento real da célula.

Esse efeito não afeta as suas próprias unidades, unidades que possuem o atributo "sneak" ou unidades de outras tribos a qual há tratados de paz.

4.11.3 Encontrando adversários

Diversas ações aumentam ou diminuem a pontuação de um jogador. A pontuação é relevante apenas em dois tipos de situação:

- Uma partida no modo Glória
- Estrelas ao encontrar um jogador

A pontuação é um referencial de progresso de cada jogador, mas não significa necessariamente que esteja melhor na partida (exceto no modo Glória)

- Entre 0 a 999 pontos: 3 estrelas
- Entre 1000 a 1999 pontos: 5 estrelas
- Entre 2000 a 2999 pontos: 7 estrelas
- Entre 3000 a 3999 pontos: 9 estrelas
- 4000 pontos ou mais: 11 estrelas

Essas estrelas extras só podem ser recebidas quando o jogador encontra um outro jogador pela primeira vez. Para encontrar um outro jogador, é necessário ter visão de uma de suas unidades, cidades, receber uma oferta de paz ou uma embaixada.

É possível que um jogador A encontre o jogador B mas o jogador B não encontre o jogador A.

4.11.4 Tempo de Jogo

Uma partida normalmente dura cerca de 20 a 30 turnos, exceto quando há situações com um claro vencedor, cujo caso a partida termina bem antes.

O tempo de partida é influenciado pelo tamanho e tipo de mapa, mas em média, cada turno consome 1,5 minutos por jogador. Portanto, uma partida de 2 jogadores dura cerca de 30 a 45 minutos. Esse número pode ser menor ou maior dependendo do tipo ou tamanho do mapa, pois o tempo de acréscimo recebido é dependente do número de

cidades e unidades que um jogador possui. Essa regra é válida apenas para o modo com tempo ao vivo.

No modo em partidas diárias, o tempo por turno é previamente determinado em 1 dia ou 1 semana por turno por jogador.

4.12 Movimentação de Unidades e Estradas

Unidades em geral sempre possuem um custo de 1 ponto de movimento por célula que se deslocam.

Entretanto, a presença de obstáculos como florestas, montanhas ou zona de controle interrompem o movimento, independente do custo de movimento da célula.

Todavia, a presença de estradas ou pontes muda essas regras. Analisando cada célula como sendo um vértice de um grafo não direcionado, a presença de uma estrada naquela célula permitirá que aquela célula se conecte a outras células caso essas possuam estradas também.

Uma vez que uma célula está conectada a outra via estradas, o custo de movimentação entre essas células se reduz para 0.5, e no caso de florestas, a interrupção de movimento é removida se o movimento for feito via estradas.

Unidades que possuem 0.5 pontos de movimento restantes podem se mover para células com custo de movimento de 1.

Só é possível utilizar do desconto de movimento proporcionado por pontes e estradas caso essas estejam em seu território ou em território neutro.

É possível utilizar pontes inimigas como se fossem planícies, mas o desconto de movimento não se aplica.

5 Proposta

Dado o que foi levantado na literatura, é factível que existem métodos matemáticos e arquiteturas de IA que consigam utilizar de sistemas de apoio a decisão para os problemas em jogos 4X. Dessa maneira, utilizando o conhecimento acumulado, é possível propor um modelo matemático para o The Battle of Polytopia, além de formular a arquitetura da IA a ser utilizada.

5.1 Modelo Matemático Baseado em Pontuação

O modelo matemático será dividido em duas partes, a de avaliação das tecnologias e da avaliação econômica das ações. Essa seção avalia somente o aspecto do macrogerenciamento, e constrói uma fórmula de avaliação de pontuação total das ações, modificada pelo peso do tipo de comportamento adotado.

5.1.1 Heurísticas de Avaliação de Tecnologias

Os trabalhos analisados mostram que sistemas de IA frequentemente utilizam heurísticas para reduzir a complexidade da tomada de decisão.

Em vez de explorar todas as possibilidades futuras, a IA atribuirá pesos a fatores relevantes do estado atual do jogo. Aplicando esse princípio ao Battle of Polytopia, o valor de uma tecnologia pode ser modelado por uma função baseada em recursos exploráveis, ganhos imediatos, sinergias futuras e custo de pesquisa.

Dessa forma, a pontuação de uma tecnologia pode ser representada por:

$$Score_{Tech} = \frac{w_1 R + w_2 I + w_3 S}{C} \quad (5.1)$$

onde:

- R representa a quantidade de recursos exploráveis pela tecnologia;
- I representa os ganhos imediatos obtidos após sua pesquisa;

- S representa as sinergias futuras e possibilidades estratégicas desbloqueadas;
- C representa o custo da tecnologia em estrelas;
- w1, w2 e w3 representam pesos atribuídos a cada critério.

Essa abordagem transforma uma decisão qualitativa em um problema quantitativo, permitindo comparar tecnologias distintas por meio de uma métrica comum.

5.1.2 Avaliação Econômica das Ações

A literatura mostra que decisões econômicas exercem influência decisiva sobre o desempenho em jogos 4X.

Após a escolha de uma tecnologia, torna-se necessário decidir como investir as estrelas restantes em melhorias, crescimento populacional e expansão econômica. Para isso, cada ação econômica pode receber uma pontuação baseada em seu retorno esperado.

Consequentemente, a função de avaliação econômica pode ser descrita por:

$$Score_{Econ} = \frac{w_4 \Delta SPT + w_5 G + w_6 U}{C} \quad (5.2)$$

onde:

- ΔSPT representa o aumento esperado de estrelas por turno (Stars Per Turn);
- G representa o avanço no nível das cidades;
- U representa a utilidade estratégica da ação;
- C representa o custo da ação econômica;
- w4, w5 e w6 representam pesos associados a cada critério.

Essa formulação permite comparar diferentes investimentos econômicos utilizando uma métrica unificada de custo-benefício.

5.1.3 Tomada de Decisão Baseada em Pontuação

Os trabalhos analisados convergem para a ideia de que a tomada de decisão em jogos complexos pode ser tratada como um problema de maximização de utilidade.

Dessa forma, a avaliação de um turno é realizada por meio da combinação da tecnologia escolhida e das ações econômicas realizadas após sua aquisição.

Dessa maneira, a pontuação total do turno pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$Score_{Total} = Score_{Tech} + Score_{Econ} \quad (5.3)$$

O sistema então seleciona a combinação que produz a maior pontuação total. Formalmente:

$$(T, A)^* = \arg \max_{(T, A)} Score_{Total} \quad (5.4)$$

onde:

- T representa a tecnologia escolhida;
- A representa o conjunto de ações econômicas executadas após a pesquisa da tecnologia;
- $(T, A)^*$ representa a combinação considerada ótima segundo o modelo.

Essa formulação está alinhada com a literatura moderna de Inteligência Artificial aplicada a jogos, na qual a seleção de ações é frequentemente modelada como um problema de otimização baseado na maximização de uma função de valor. Dessa forma, o sistema passa a avaliar simultaneamente os benefícios tecnológicos e econômicos de cada decisão, permitindo a escolha da alternativa mais vantajosa para o desenvolvimento do império ao longo da partida.

5.2 Arquitetura Hierárquica da Inteligência Artificial

A arquitetura proposta segue uma abordagem hierárquica de tomada de decisão, dividida em três níveis complementares.

No nível superior encontrará-se o módulo de decisão estratégica, responsável por determinar o estilo geral de atuação da IA. Em seguida, um módulo de planejamento tático converterá essa estratégia em objetivos concretos de médio prazo. Por fim, uma camada operacional realizará o controle direto das unidades presentes no mapa.

O processo de decisão ocorrerá sempre no começo do turno, sempre que novas células de névoa de guerra forem reveladas e sempre que uma recompensa de ruína for

obtida. A visão de novas células e uma recompensa específica podem afetar drasticamente como o agente deve abordar a situação.

Essa divisão reduzirá a complexidade do problema ao separar decisões de longo prazo das ações executadas a cada turno, prática que é amplamente utilizada em agentes para jogos de estratégia.

Dessa forma, com a definição de agente por Ferreira (2006), o agente utiliza de sensores para perceber o ambiente, que então executa uma ação que altera o ambiente. Esse conceito pode ser traduzido para o The Battle of Polytopia, em que o ambiente é composto pelo mapa, com seus pontos de interesse como as cidades e ruínas, os sensores são todas as células visíveis pelo agente e as estrelas por turno, a percepção se dá pela interpretação da camada estratégica sobre a situação do ambiente e as ações são a pesquisa de tecnologias, movimento de unidades e coleta de recursos dentro das cidades.

Níveis da arquitetura

- Estratégico
- Tático
- Operacional

5.2.1 Camada Estratégica Baseada em Inferência Nebulosa

A camada estratégica será responsável por selecionar o comportamento predominante da IA durante cada turno.

Utilizando conceitos de lógica nebulosa aplicados em IA por Martins (2003), a decisão da camada estratégica será realizada por meio de um Sistema de Inferência Nebulosa (SIN), utilizando variáveis relacionadas ao estado atual da partida.

As variáveis de entrada do sistema são:

- Produção econômica;
- Força militar relativa;
- Número de cidades controladas;
- Distância média aos inimigos;

- Território disponível para expansão.

Cada variável é representada por conjuntos linguísticos. Por exemplo, a variável produção econômica é dividida nos conjuntos:

- Baixa;
- Média;
- Alta.

De forma semelhante, a força militar é representada pelos conjuntos:

- Fraca;
- Equilibrada;
- Forte.

As regras nebulosas foram definidas manualmente com base no conhecimento especializado sobre as mecânicas do jogo *The Battle of Polytopia* e na observação de estratégias utilizadas por jogadores experientes.

Exemplos de regras utilizadas incluem:

- SE Território Livre é Grande E Força Militar é Equilibrada ENTÃO Comportamento = Expansionista;
- SE Produção Econômica é Baixa ENTÃO Comportamento = Econômico;
- SE Força Militar é Forte E Inimigo Próximo ENTÃO Comportamento = Agressivo;
- SE Força Militar é Fraca E Inimigo Próximo ENTÃO Comportamento = Defensivo.

A saída do sistema corresponde ao grau de ativação dos quatro comportamentos disponíveis: expansionista, econômico, agressivo e defensivo.

Como múltiplos comportamentos podem apresentar graus de pertinência simultaneamente, o sistema permite transições suaves entre estratégias ao longo da partida.

A escolha do comportamento afeta diretamente os pesos de w_1 , w_2 , w_3 , w_4 , w_5 e w_6 nas fórmulas do modelo matemático.

Pesos Atribuídos

A seguinte tabela apresenta os pesos escolhidos:

Tabela 5.1: Valores dos pesos de macrogerenciamento

Comportamento	w1	w2	w3	w4	w5	w6
Expansionista	0,6	0,3	0,1	0,5	0,2	0,3
Econômico	0,5	0,2	0,3	0,6	0,3	0,1
Agressivo	0,3	0,6	0,1	0,3	0,4	0,3
Defensivo	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,1

5.2.2 Camada Tática Baseada em Regras

Após a seleção do comportamento estratégico, a camada tática definirá objetivos de médio prazo.

Essa camada utilizará um sistema baseado em regras para traduzir o comportamento escolhido em metas concretas.

Exemplos:

Expansionista

SE comportamento = expansionista

ENTÃO

- priorizar exploração;
- priorizar melhorias imediatas;
- priorizar captura de cidades neutras.

Econômico

SE comportamento = econômico

ENTÃO

- maximizar estrelas por turno;
- priorizar tecnologias econômicas;
- priorizar upgrades com sinergia de longo prazo.

Agressivo

SE comportamento = agressivo

ENTÃO

- produzir unidades militares;
- avaliar uso de estradas ofensivamente;
- concentrar forças de ataque em alvos de interesse.

Defensivo

SE comportamento = defensivo

ENTÃO

- reforçar fronteiras;
- produzir unidades resistentes;
- proteger cidades vulneráveis.

5.2.3 Camada Operacional de Microgerenciamento

A camada operacional será responsável pela movimentação individual das unidades e pela execução das ações determinadas pelas camadas superiores da arquitetura.

Diferentemente da camada estratégica, que opera sobre objetivos abstratos e decisões de longo prazo, a camada operacional atuará diretamente sobre o estado atual do mapa, sendo responsável por converter os objetivos definidos pelo sistema de inferência nebulosa e pelo sistema baseado em regras em ações concretas executadas pelas unidades.

Para cada unidade disponível será gerado um conjunto de ações possíveis, incluindo movimentação, ataque, exploração, captura de cidades e posicionamento defensivo. Cada ação receberá uma pontuação heurística que representa sua contribuição para os objetivos estratégicos atuais.

A pontuação operacional de uma ação é calculada por:

$$Score_{Op}(u, a) = w_1S + w_2O + w_3T + w_4E + w_5D \quad (5.5)$$

onde:

- S representa a pontuação de sobrevivência;
- O representa a pontuação ofensiva;
- T representa a pontuação de controle territorial;
- E representa a pontuação de exploração;
- D representa o alinhamento da ação com os objetivos definidos pelas camadas superiores;
- w_i representam os pesos associados a cada fator.

Tabela 5.2: Valores dos pesos de microgerenciamento

Comportamento	w1	w2	w3	w4	w5
Expansionista	0,2	0,05	0,2	0,35	0,2
Econômico	0,35	0,05	0,1	0,2	0,2
Agressivo	0,15	0,4	0,2	0,05	0,2
Defensivo	0,3	0,3	0,2	0,05	0,15

A ação escolhida para cada unidade será aquela que maximizar a função de avaliação operacional:

$$a^* = \arg \max_{a \in A(u)} Score_{Op}(u, a) \quad (5.6)$$

onde $A(u)$ representa o conjunto de ações possíveis para a unidade u .

Essa abordagem reduz significativamente o custo computacional quando comparada à exploração exaustiva de todos os movimentos possíveis do turno.

Sistema de Avaliação Operacional

O sistema de avaliação operacional utiliza uma combinação de métricas locais para estimar a qualidade de cada ação disponível. Essas métricas procuram representar os principais aspectos envolvidos no microgerenciamento das unidades, incluindo sobrevivência, combate, controle territorial e exploração.

Sobrevivência A pontuação de sobrevivência procura estimar a segurança da unidade após a execução da ação.

$$S = HP + B_d - N_i \quad (5.7)$$

onde:

- HP representa a quantidade de pontos de vida restantes da unidade;
- B_d representa o bônus defensivo oferecido pelo terreno;
- N_i representa a quantidade de inimigos capazes de atacar a unidade após a movimentação.

Capacidade Ofensiva A pontuação ofensiva mede o potencial de dano causado ao adversário.

$$O = D_e + K - R \quad (5.8)$$

onde:

- D_e representa o dano esperado causado ao alvo;
- K representa um bônus aplicado caso exista possibilidade de eliminação da unidade inimiga;
- R representa o risco de retaliação após o ataque.

Controle Territorial O controle territorial busca quantificar a contribuição da ação para o domínio do mapa.

$$T = C + Z + X \quad (5.9)$$

onde:

- C representa a aproximação de cidades inimigas ou neutras;

- Z representa o controle de gargalos e posições estratégicas;
- X representa a expansão da área controlada.

Exploração A exploração avalia o potencial da ação para revelar novas informações sobre o mapa.

$$E = F + V \quad (5.10)$$

onde:

- F representa a quantidade de novas células reveladas;
- V representa a descoberta de aldeias, cidades ou recursos.

Alinhamento Estratégico O alinhamento estratégico mede o quanto uma ação contribui para os objetivos definidos pelas camadas superiores da arquitetura.

Esse fator permite que a camada operacional adapte seu comportamento de acordo com a estratégia atualmente selecionada pelo Sistema de Inferência Nebulosa.

Sistema de Priorização de Alvos

Uma dificuldade comum em jogos de estratégia consiste em determinar qual inimigo deve ser atacado quando existem múltiplas opções disponíveis.

Para resolver esse problema, a arquitetura inclui um mecanismo de priorização de alvos baseado em regras heurísticas.

Os alvos recebem prioridade conforme a seguinte ordem:

1. Unidades capazes de capturar cidades no próximo turno;
2. Unidades que podem ser eliminadas imediatamente;
3. Unidades com maior potencial ofensivo;
4. Unidades que ameaçam cidades próprias;
5. Demais unidades inimigas.

Quando houver empate, será selecionado o alvo que apresentar menor custo de eliminação ou maior relevância estratégica.

Esse mecanismo permite que a IA concentre recursos em ameaças mais críticas e evite dispersar ataques de forma ineficiente.

5.2.4 Calibração dos Pesos

Os pesos utilizados nas funções heurísticas foram definidos empiricamente por meio de partidas experimentais realizadas durante o desenvolvimento do agente.

A calibração consistiu na execução sucessiva de partidas de teste, ajustando-se os pesos de cada componente da função de avaliação até obter comportamentos coerentes com os objetivos estratégicos definidos pelo sistema nebuloso.

Além disso, cada comportamento estratégico utiliza um conjunto distinto de pesos, permitindo que a camada operacional adapte suas decisões ao contexto atual da partida.

Para o comportamento expansionista, a exploração e o controle territorial recebem maior importância. Para o comportamento econômico, o alinhamento com objetivos de crescimento e desenvolvimento urbano possui maior peso. Já os comportamentos agressivo e defensivo priorizam respectivamente a capacidade ofensiva e a sobrevivência das unidades.

Essa abordagem permite que a estratégia selecionada pela camada superior influencie diretamente a avaliação operacional das ações disponíveis, promovendo uma integração consistente entre os diferentes níveis da arquitetura da IA.

5.2.5 Coordenação Entre as Camadas

O funcionamento completo da IA ocorrerá de forma hierárquica.

- O Sistema de Inferência Nebulosa definirá o comportamento predominante.
- O Sistema Baseado em Regras gerará objetivos intermediários.
- A Camada Operacional executará ações concretas para atingir esses objetivos.
- O estado do jogo será atualizado.
- O processo será repetido a cada turno.

Essa arquitetura combina flexibilidade estratégica, interpretabilidade e baixo custo computacional, características desejáveis para agentes clássicos em jogos do gênero 4X, como é o caso do The Battle of Polytopia.

6 Simulação do Modelo

A seguir é apresentada uma simulação do funcionamento da arquitetura proposta aplicada ao jogo *The Battle of Polytopia*. O objetivo desta simulação não é apenas descrever os eventos ocorridos durante a partida, mas demonstrar como as camadas estratégica, tática e operacional interagem para produzir as decisões do agente.

Em todos os turnos analisados, o processo decisório segue o mesmo ciclo:

1. Atualização do estado do jogo;
2. Avaliação das variáveis de entrada do Sistema de Inferência Nebulosa;
3. Seleção do comportamento predominante;
4. Avaliação das tecnologias disponíveis;
5. Avaliação das ações econômicas disponíveis;
6. Definição dos objetivos intermediários da camada tática;
7. Avaliação operacional das ações possíveis;
8. Execução das ações de maior pontuação.

Dessa forma, todas as decisões descritas neste capítulo são resultado da execução das funções de avaliação apresentadas nos capítulos anteriores.

6.1 Contexto Inicial

A simulação foi realizada utilizando a tribo Imperius em um mapa do tipo Continentes com tamanho Normal (16x16 células).

No início do turno 3, as variáveis estratégicas apresentam os seguintes valores qualitativos:

- Produção econômica: Baixa;



Figura 6.1: Situação no turno 3

- Força militar: Baixa;
- Território controlado: Baixo;
- Potencial de expansão: Médio.

Após a aplicação do Sistema de Inferência Nebulosa, o comportamento econômico apresentou o maior grau de ativação. Consequentemente, os pesos utilizados pelas funções de avaliação passaram a privilegiar crescimento econômico e geração de estrelas por turno.

A camada estratégica então avalia as tecnologias disponíveis utilizando a Equação 5.1.

$$Score_{Tech} = \frac{w_1 R + w_2 I + w_3 S}{C} \quad (6.1)$$

Para a tecnologia Caça:

$$Score_{Caça} = \frac{0.5 * 2 + 0.2 * 1 + 0.3 * 5}{5} = 0.54 \quad (6.2)$$

Para a tecnologia Pesca:

$$Score_{Pescaria} = \frac{0.5 \times 2 + 0.2 \times 0 + 0.3 \times 2}{5} = 0.32 \quad (6.3)$$

Em seguida, a camada estratégica avalia as ações econômicas associadas a cada tecnologia.

$$Score_{Econ} = \frac{w_4 \Delta SPT + w_5 G + w_6 U}{C} \quad (6.4)$$

Para Caça:

$$Score_{Caça} = \frac{0.6 \times 2 + 0.3 \times 1 + 0.1 \times 5}{4} = 0.50 \quad (6.5)$$

Para Pesca:

$$Score_{Pesca} = \frac{0.6 \times 2 + 0.3 \times 1 + 0.1 \times 0}{4} = 0.375 \quad (6.6)$$

A pontuação total é calculada por:

$$Score_{Total} = Score_{Tech} + Score_{Econ} \quad (6.7)$$

Obtendo-se:

$$Score_{Caça} = 1.04 \quad (6.8)$$

$$Score_{Pesca} = 0.695 \quad (6.9)$$

Como a tecnologia Caça apresenta maior pontuação total, ela é selecionada pela camada estratégica.

Após a pesquisa da tecnologia, a camada econômica avalia o uso das estrelas restantes. A alternativa de aprimorar a nova cidade produz maior retorno econômico do que outras ações possíveis, sendo então escolhida. Como resultado, a produção passa para sete estrelas por turno.

A camada tática estabelece como objetivo intermediário a obtenção rápida de cidades nível 3, permitindo acesso às recompensas de desenvolvimento e acelerando o crescimento econômico.

6.2 Primeira Reavaliação da Estratégia



Figura 6.2: Situação no turno 6

Ao final do turno 6, novas informações estão disponíveis.

As cidades encontram-se no nível 3 e a tecnologia Desmatamento já foi pesquisada. Entretanto, a expansão territorial revelou uma quantidade reduzida de florestas úteis para a construção de serralherias.

Nesse momento ocorre uma reavaliação automática da estratégia.

As variáveis do Sistema de Inferência Nebulosa são atualizadas:

- Produção econômica: Média;
- Potencial de crescimento interno: Baixo;
- Potencial de expansão externa: Alto;
- Força militar: Média.

O resultado da inferência aumenta significativamente o grau de ativação do comportamento expansionista.

A camada estratégica então identifica que a obtenção de um gigante por meio exclusivo da linha Matemática tornou-se menos eficiente do que o inicialmente previsto.

Como consequência, a camada tática substitui o objetivo intermediário anterior por um novo objetivo:

Obter uma cidade nível 5 por meio da conexão entre cidades costeiras.

Essa mudança demonstra a função da reavaliação estratégica. O agente não segue rigidamente o plano inicial, mas adapta sua estratégia conforme novas informações são obtidas.

6.3 Nova Reavaliação



Figura 6.3: Situação no começo do turno 9

A exploração revela uma nova vila com elevado potencial econômico.

A camada estratégica executa novamente a avaliação tecnológica e identifica que a tecnologia Matemática volta a apresentar elevada utilidade devido ao potencial de construção de serralherias e à possibilidade de obtenção de um gigante.

Consequentemente, Matemática é pesquisada.

Após a utilização de um explorador, ocorre o primeiro contato com o adversário.

O jogo concede sete estrelas adicionais.

Nesse momento a camada econômica compara as alternativas disponíveis:

- Produção de unidades;
- Armazenamento de recursos;

- Aprimoramento urbano.

A alternativa de aprimoramento urbano produz maior valor para a função econômica devido ao aumento permanente da produção e ao crescimento de fronteira.

Por esse motivo, as estrelas são investidas na cidade central.

O crescimento de fronteira também atende a um objetivo tático relacionado ao controle de futuras posições de ponte, aumentando a segurança territorial e o potencial econômico.

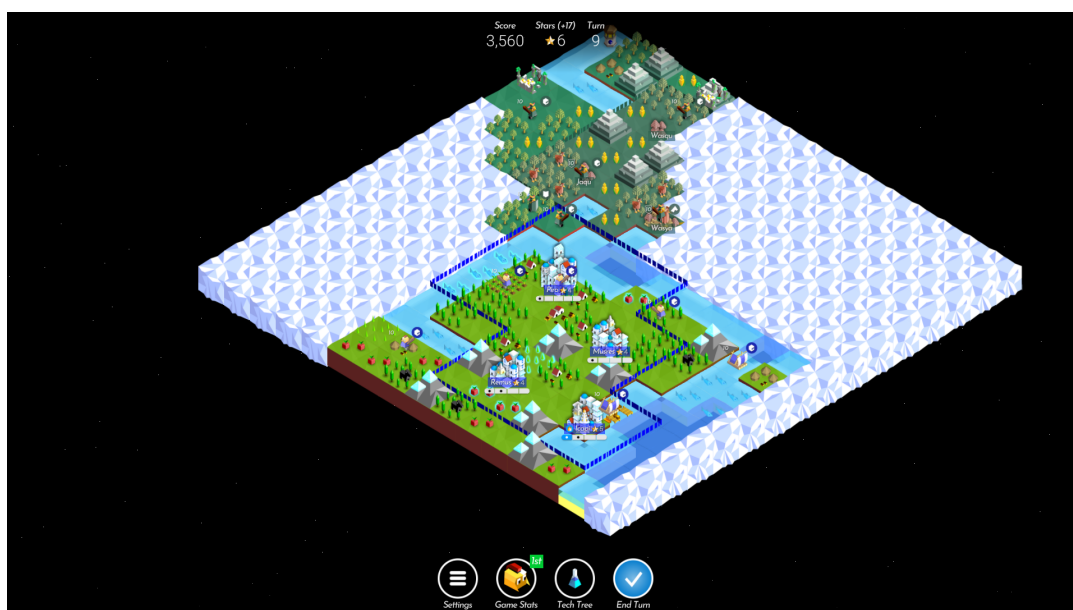


Figura 6.4: Situação final do turno 9

6.4 Alcançando a Primeira Meta

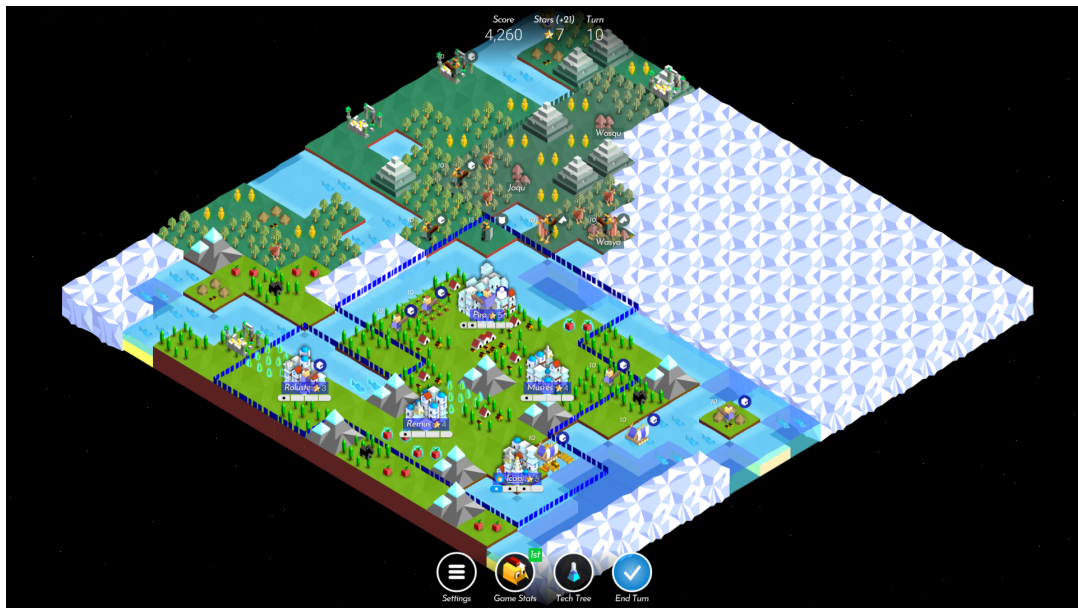


Figura 6.5: Situação final do turno 10

Após a coleta dos recursos disponíveis e a construção da serralheria, o agente alcança o primeiro objetivo intermediário estabelecido anteriormente: obter uma cidade nível 5.

A consequência direta é a geração do primeiro gigante.

Essa mudança altera novamente o estado estratégico da partida.

As variáveis de entrada passam a indicar:

- Economia: Forte;
- Poder militar: Forte;
- Território disponível: Alto.

A ausência de presença inimiga no continente oeste reduz a necessidade de investimentos defensivos e aumenta o grau de ativação do comportamento expansionista.

Com isso, a camada estratégica passa a priorizar as tecnologias Montaria e Estradas.

A camada tática define como novo objetivo intermediário:

Expandir para o continente oeste utilizando pontes e estradas.

6.5 Crescimento Econômico



Figura 6.6: Situação no turno 12

Os recursos acumulados são utilizados para obter as tecnologias necessárias para a expansão terrestre.

A construção de pontes e estradas permite que unidades atravessem rapidamente entre continentes, acelerando a captura de novas vilas.



Figura 6.7: Situação no turno 13

A tecnologia Comércio é então pesquisada.

A decisão é resultado da elevada pontuação econômica obtida pela possibilidade de construção de mercados conectados a serralherias já existentes.

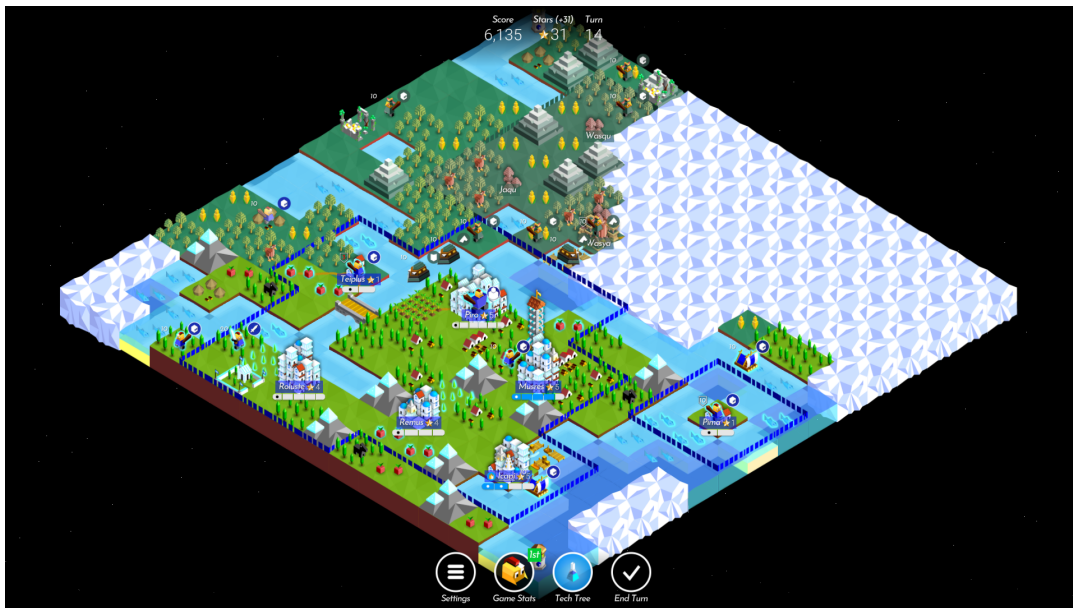


Figura 6.8: Situação no começo do turno 14

Com os mercados disponíveis, a camada econômica passa a priorizar investimentos em infraestrutura.



Figura 6.9: Situação final do turno 14

A produção econômica cresce de 24 estrelas por turno para 42 estrelas por turno em apenas dois turnos.

Esse resultado demonstra a interação entre diferentes níveis da arquitetura. A estratégia expansionista adotada anteriormente permitiu o acesso a novas cidades, enquanto a estratégia econômica posterior explorou esse crescimento por meio da construção de

mercados.

6.6 Avaliação Operacional

Após consolidar a vantagem econômica, o foco da tomada de decisão desloca-se para a utilização eficiente das unidades militares.



Figura 6.10: Situação no começo do turno 18

Nesse estágio da partida, a estratégica assume o comportamento agressivo, visto que o potencial econômico não é mais relevante e atacar o adversário é viável e necessário.

A camada tática define como objetivo intermediário a captura de cidades inimigas.

A camada operacional passa então a avaliar os movimentos possíveis utilizando a função:

$$Score_{Op} = w_1S + w_2O + w_3T + w_4E + w_5D \quad (6.10)$$

onde:

- S representa sobrevivência;
- O representa capacidade ofensiva;
- T representa controle territorial;

- E representa exploração;
- D representa alinhamento estratégico.

Uma análise superficial indicaria a possibilidade de atacar apenas uma cidade inimiga. Entretanto, a camada operacional avalia combinações envolvendo movimentação por estradas, posicionamento dos gigantes e cercos simultâneos.

Como o comportamento agressivo é selecionado, a capacidade ofensiva das ações recebe um peso maior.

As ações que apresentam maior pontuação operacional são selecionadas.

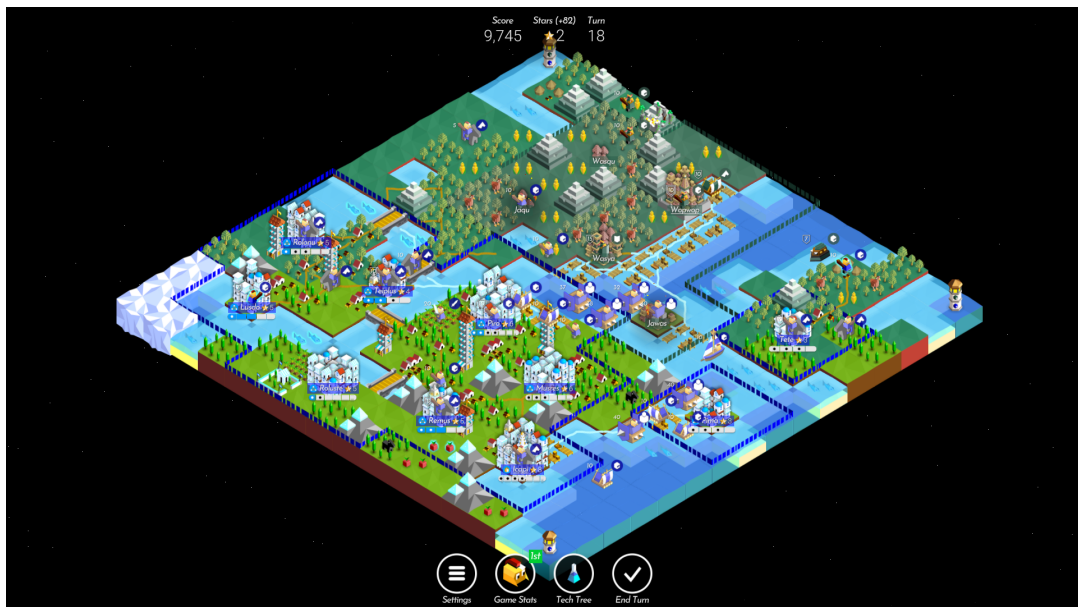


Figura 6.11: Situação final do turno 18

O resultado é a capacidade de atacar e cercar duas cidades inimigas simultaneamente.

Esse exemplo demonstra a função da camada operacional dentro da arquitetura proposta. Enquanto a camada estratégica define o comportamento geral e a camada tática estabelece objetivos intermediários, a camada operacional determina quais movimentos específicos devem ser executados para maximizar a probabilidade de sucesso.

6.7 Avaliação Quantitativa

A Tabela 6.1 apresenta alguns indicadores da evolução do agente durante a simulação:

Tabela 6.1: Indicadores quantitativos da simulação

Indicador	Turno 3	Turno 6	Turno 9	Turno 10	Turno 12	Turno 13	Turno 14	Turno 18
Estrelas por turno	7	12	17	21	22	24	42	82
Cidades controladas	2	3	4	5	6	6	7	10
Gigantes	0	0	0	1	1	1	2	6
Tecnologias pesquisadas	1	4	5	5	7	8	8	10
Continentes acessados	1	1	1	1	2	2	3	4

Os resultados indicam crescimento simultâneo dos indicadores econômicos, territoriais e militares, demonstrando que a arquitetura foi capaz de adaptar seu comportamento ao longo da partida e atingir os objetivos intermediários estabelecidos.

7 Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Desse modo, após a simulação do problema, vários pontos positivos foram detectados, como a capacidade de adaptação e o sucesso pela vitória da partida. Entretanto, há alguns pontos que precisam ser melhorados:

7.1 Métodos de Aprendizado

Para trabalhos futuros, a implementação da IA precisará ter métodos de aprendizado. Utilizando como base o trabalho de Mendonça, Bernardino e Neto (2018) como ponto de partida, o uso do algoritmo genético será de suma importância, permitindo que certos modelos e comportamentos sejam favorecidos em certos tipos de mapa e tamanho.

Ademais, será necessário o uso de uma função de recompensa. Utilizando das ideias implementadas por Mendonça (2014), a implementação de sistemas de recompensa por vitória, recompensa por seguir regras e recompensa por vitória será vital para fazer a análise de quais modelos estão se provando melhores e mais eficientes.

Além disso, usando do conceito de aberturas de Villaça (2003) cada tribo possui diferentes tecnologias iniciais, recursos gerados de forma aleatória e posições iniciais variadas. Logo, A criação de um glossário de aberturas será de suma importância, bem como aquelas aberturas que por meio do aprendizado por reforço serão consideradas melhores.

Exemplos de métodos de aprendizado que podem ser utilizados:

- GOAP;
- Algoritmos de Busca Minimax e MCTS;
- Algoritmos Genéticos;

7.2 Requisitos de Código

Para construir um agente que possa jogar de forma automatizada, será necessário determinar a compatibilidade de bibliotecas do Python com o código-fonte do jogo usando:

- **NumPy** - vetores, matrizes e operações matemáticas;
- **Pandas** - Organizar os estados simulados;
- **Matplotlib** - Projetar gráficos para melhor análise do algoritmo;
- **SciPy** - Fazer análises estatísticas;
- **NetworkX** - representar a árvore tecnológica;

Esse estudo e implementação serão necessários para a automatização e verificação da eficiência do modelo.

7.3 Reprodutibilidade

A versão oficial do jogo não permite a reutilização de sementes, e portanto, partidas não podem ser repetidas e simulados sob as mesmas condições.

Será necessário o uso de mods da comunidade ou fazer a requisição para o desenvolvedor de uma versão especial que permite a criação de partidas na mesma semente e portanto, permitir a reprodução de simulações sob as mesmas circunstâncias.

7.4 Refinamento das Fórmulas

Após a implementação, alterações nas fórmulas poderão ser necessárias para que o modelo produza resultados mais confiáveis. Será necessário também alterar os pesos dos modificadores baseados em comportamento utilizando métodos científicos, visto que os valores escolhidos para esse trabalho se deram de forma empírica.

7.5 Conclusão

Com isso, após a devida formulação teórica e uso na simulação, foi comprovada a eficácia da fórmula matemática na definição do planejamento estratégico e execução das regras impostas. Dessa maneira, a implementação de um agente de IA irá permitir automatizar esse processo e refinará os pesos atribuídos aos comportamentos.

A divisão do problema de forma hierárquica ajudou a dividir o problema em diferentes partes menores, as quais puderam ser interpretadas de forma quantitativa.

Dessa maneira, comparando soluções, uma avaliação final de forma qualitativa pôde ser feita entre diferentes escolhas estratégicas.

O estudo em um ambiente controlado permitiu a resolução de um problema sem consequências reais, o que fornece uma maior liberdade na escolha de modificações para melhorar a eficiência do modelo.

Espera-se que no futuro, hajam modelos que sejam melhores para cada tipo de mapa e tamanho, com estratégias variadas e aberturas aprimoradas, com o uso de técnicas de aprendizado de IA como o algoritmo genético e aprendizado por reforço para aprimorar o modelo, bem como adaptar a escolha das estratégias por meio da análise de geração procedural aleatória dos recursos exploráveis.

Bibliografia

- AI; GAMES. *Revisiting the AI of Alien: Isolation*. 2023. <<https://www.aiandgames.com/p/revisiting-alien-isolation>>. Acessado em: 2 de julho de 2026.
- CHEN, J. et al. Vox deorum: A hybrid llm architecture for 4x / grand strategy game ai - lessons from civilization v. In: *Proceedings of the 21st International Conference on the Foundations of Digital Games (FDG '26)*. Copenhagen, Denmark: ACM, 2026. p. 1–11.
- DĄBROWSKI, S. P. Balancing mechanism in stellar 4x games using graphsage-based inductive representation learning. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, v. 15, n. 2, p. 19, 2024.
- DEEPMIND, G. *AlphaStar: Mastering the Real-Time Strategy Game StarCraft II*. 2019. <<https://deepmind.google/blog/alphastar-grandmaster-level-in-starcraft-ii-using-multi-agent-reinforcement-learning/>>. Acessado em: 2 de julho de 2026.
- FERREIRA, D. V. B. *Aplicação de Técnicas de Evolução Neural na Simulação do Comportamento de Agentes*. Juiz de Fora, MG, Brasil: [s.n.], 2006. 56–63 p.
- INFIXO. *Real Strategy (AI) - CivFanatics Forums*. 2019. <<https://forums.civfanatics.com/threads/real-strategy-ai.640452/>>. Acessado em: 2 de julho de 2026.
- INFIXO. *Steam Workshop::Real Strategy (AI)*. 2019. <<https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=1617282434>>. Acessado em: 2 de julho de 2026.
- KIPPER, D.; NESTERIUK, S. Análise e discussão de problemas encontrados no processo de aprendizagem de jogos 4x. *SBC - Proceedings of SBGames*, SBC, Art & Design Track - Full Papers, p. 673–679, 2016.
- LÄÄVERI, T. *Integrating AI for Turn-Based 4X Strategy Game*. 100 p. Dissertação (Mestrado) — Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki, Finland, 2017.
- LI, Y. Research on artificial intelligence in game strategy optimization. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, Warwick Evans Publishing, v. 4, n. 1, p. 211–217, 2024.
- MACHINA, O. *The AI of Alien: Isolation*. 2023. <<https://www.ollimachina.com/post/the-ai-of-alien-isolation>>. Acessado em: 2 de julho de 2026.
- MARTINS, D. M. S. *Desenvolvimento da Inteligência Artificial Segundo uma Abordagem Evolutiva dos Níveis de Conhecimento*. Juiz de Fora, MG, Brasil: [s.n.], 2003. 97–106 p.
- MENDONÇA, M. R. F.; BERNARDINO, H. S.; NETO, R. F. Reinforcement learning with optimized reward function for stealth applications. *Entertainment Computing*, Elsevier, v. 25, p. 37–47, 2018.
- MENDONÇA, M. R. F. de. *Estratégias de aprendizado por reforço para jogos eletrônicos*. Juiz de Fora, Brasil: [s.n.], 2014. 47 p.

VILLAÇA, F. F. *Um Algoritmo Minimax Combinado com Uso de Aprendizado por Reforço para o Jogo de Damas*. Juiz de Fora, MG, Brasil: [s.n.], 2003. 53–58 p.

WIKI, S. *AI modding*. 2026. <https://stellaris.paradoxwikis.com/AI_modding>. Acessado em: 2 de julho de 2026.

WORKSHOP, S. C. *Steam Workshop::Stellaris AI Mod*. 2026. <<https://steamcommunity.com/workshop/filedetails/?id=3610149307>>. Acessado em: 2 de julho de 2026.