



Relatório de Projeto

Inteligência Artificial para Sistemas Autónomos

Licenciatura em Engenharia Informática e de Computadores

Autores: **Francisco Engenheiro**

ISEL ID: 49428

Professor: **Phd Luís Morgado**

Ano académico: 2023/2024

Índice

1	Introdução	2
2	Enquadramento Téorico	4
2.1	Agente Inteligente	4
2.2	Ambiente	5
2.3	Agente Relacional	6
2.4	Arquiteturas de Agente	7
3	Projeto - Parte 1	8
3.1	Arquitetura de software	8
3.1.1	Métricas	8
3.1.2	Princípios	9
3.2	Processo de Desenvolvimento de Software	10
3.2.1	Tipos de Implementação	10
3.3	Modelação de um Sistema Computacional	11
3.3.1	Modelo Formal de Computação	11
3.4	Desenvolvimento do Jogo	12
3.5	Estrutura do Projeto	14
4	Projeto - Parte 2	15
4.1	Agentes Reativos	16
4.1.1	Reação	16
4.1.2	Comportamento	16
4.1.3	Comportamento Composto	17
4.2	Controlo Reativo	18
4.3	Arquitetura Reativa com Memória	18
4.4	Biblioteca SAE	20
4.5	Caracterização do Ambiente	21
4.6	Implementação do Agente Reativo	21
4.7	Estrutura do Projeto	23

5	Projeto - Parte 3	24
5.1	Raciocínio Automático	24
5.1.1	Modelo de um Problema	25
5.2	Mecanismo de procura	26
5.2.1	Processo de Procura	26
5.3	Estratégias de Procura	27
5.3.1	Procuras Não-Informadas	27
5.3.2	Procuras Informadas	28
6	Projeto - Parte 4	29
7	Revisão do Projeto	30
8	Conclusão	31
	Referências	34

Capítulo 1

Introdução

Este relatório documenta o projeto desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Inteligência Artificial para Sistemas Autónomos (IASA), da Licenciatura em Engenharia Informática e de Computadores (LEIC).

O projeto tem como objetivo a aprendizagem de conceitos de inteligência artificial e a sua aplicação no desenvolvimento de sistemas autónomos. O capítulo 2 descreve esses conceitos que servem de base aos restantes temas estudados e ao projeto realizado.

O projeto está dividido em duas partes:

- **Parte 1:** Desenvolvimento de uma biblioteca em *java* que fornece os mecanismos base para a implementação dos subsistemas que representam os conceitos gerais de inteligência artificial (e.g., agente, ambiente) e outros conceitos relacionados (e.g., máquina de estados); Desenvolvimento de um jogo em Java que integra essa biblioteca (ver capítulo 3);
- **Parte 2:** Desenvolvimento de um agente reativo em *python* com módulos comportamentais para recolher alvos e evitar obstáculos num ambiente com dimensões fixas (ver capítulo 4).

Cada parte do projeto está organizada de forma a descrever o objetivo principal no contexto geral do projeto; fazer uma síntese dos conceitos estudados que se acharam relevantes para a sua implementação; caracterização do ambiente onde o agente vai atuar; descrever a implementação realizada, nomeadamente, a arquitetura do agente usada; justificar as principais decisões tomadas e a sua relação com os conceitos estudados; e apresentar a estrutura do código desenvolvido.

Existe um capítulo dedicado à revisão do projeto realizado, onde são identificados e descritos os erros cometidos nas entregas realizadas, com a indicação do problema e da respetiva correção, justificada com base nos conhecimentos adquiridos.

O projeto foi realizado individualmente e as entregas foram realizadas semanalmente, de forma

incremental, de acordo com o plano de trabalho definido.

Capítulo 2

Enquadramento Téorico

A inteligência artificial, um ramo da engenharia informática, concentra-se no desenvolvimento de algoritmos e sistemas que imitam a capacidade humana de raciocínio. Entre as suas diversas aplicações, destacam-se a visão computacional, o processamento de linguagem natural, a robótica e a aprendizagem automática (*machine learning*). No contexto da aprendizagem automática, mais concretamente para o desenvolvimento de sistemas autónomos, ao qual este projeto se insere, destacam-se os conceitos de inteligência e autonomia. A inteligência caracteriza-se pela relação entre a cognição (i.e. capacidade de realizar a ação adequada dadas as condições do ambiente) e a racionalidade (i.e., capacidade de decidir no sentido de conseguir o melhor resultado possível perante os objectivos que se pretende atingir dado o conhecimento disponível). Já a autonomia é a habilidade de um sistema operar de forma independente, sem intervenção externa, seja ela humana ou de outro sistema. Representa uma característica da inteligência e portanto ser autónomo não significa ser inteligente, no entanto, ser inteligente implica ser autónomo [1].

2.1 Agente Inteligente

O modelo de um agente inteligente é uma abstração que permite representar a interação de um sistema com o ambiente onde opera. Este implementa um ciclo realimentado percepção-processamento-ação (ver figura 2.1), através do qual é realizado o controlo da função do sistema de modo a concretizar a finalidade desse sistema (e.g., a travagem automática de um automóvel quando deteta um obstáculo à sua frente) [1].

Além da autonomia, as características principais de um agente inteligente, que estão dependentes do tipo de arquitetura (ver secção 2.4), são:

- **Reactividade:** Capacidade de reagir aos diversos estímulos do ambiente;
- **Pró-actividade:** Capacidade de tomar a iniciativa em função dos seus objetivos;

- **Sociabilidade:** Capacidade de interagir com outros agentes de forma a atingir os seus objetivos, sejam eles individuais ou coletivos;
- **Finalidade:** Propósito que o agente deve atingir e ao qual todas as suas características contribuem para a sua concretização.

Um agente pode perceber eventos do ambiente através de sensores e executar comandos no ambiente através de atuadores.

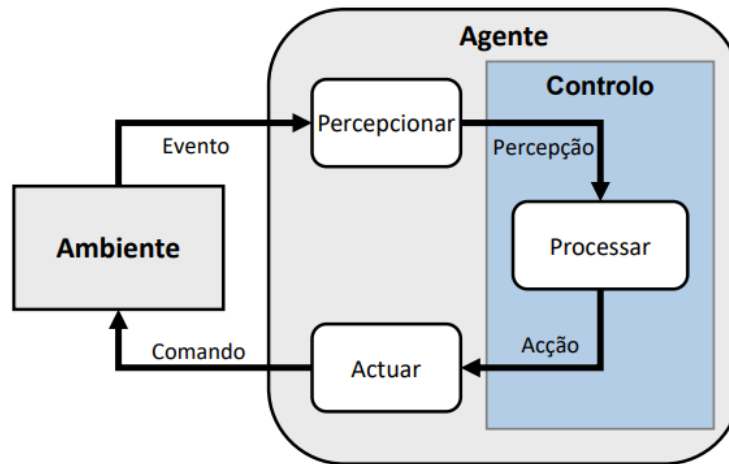


Figura 2.1: Representação conceptual da relação entre agente e ambiente. Retirado de [2], slide 30.

2.2 Ambiente

O espaço onde um agente opera é designado por ambiente, e que pode ser real, com sensores e atuadores físicos, (e.g., uma sala de aula) ou virtual (e.g., um jogo de computador). É caracterizado pelas seguintes propriedades [3]:

- **Totalmente Observável vs. Parcialmente Observável:** Um ambiente é totalmente observável se o agente tem acesso a uma descrição completa do ambiente e que lhe permite resolver o problema em questão sem necessitar de guardar estado interno; caso contrário, é parcialmente observável;
- **Tipo de Agente:** Os ambientes podem ser de agente único (i.e., apenas existe um agente a atuar) ou multi-agente (i.e., existem vários agentes a atuar, iguais ou diferentes entre si);
- **Determinístico vs. Estocástico:** Um ambiente é determinístico se o estado seguinte é unicamente determinado pelo estado atual e pela ação do agente; caso contrário, é estocástico. Mais ainda, dizemos que um ambiente continua a ser determinístico, mas mais concretamente estratégico, caso estejamos num ambiente multi-agente onde o

próximo estado pode estar também dependente das ações de outros agentes (e.g., num jogo de xadrez);

- **Episódico vs. Sequencial:** Um ambiente é episódico se a experiência do agente é dividida em episódios independentes; caso contrário, é sequencial (i.e., pode ser representado por uma sequência de estados);
- **Estático vs. Dinâmico:** Um ambiente é estático se não se altera enquanto o agente está a tomar uma decisão; caso contrário, é dinâmico;
- **Discreto vs. Contínuo:** Um ambiente é discreto se o número de estados possíveis é finito; caso contrário, é contínuo.

Na figura 2.2 são apresentados exemplos de caracterização de ambientes.

Ambiente	Observável?	Agentes?	Determinístico?	Episódico?	Estático?	Contínuo?
Palavras Cruzadas	Completamente Observável	Agente Único	Determinístico	Sequencial	Estático	Discreto
Poker	Parcialmente Observável	Multi-Agente	Estocástico	Sequencial	Estático	Discreto
Mundo Real	Parcialmente Observável	Multi-Agente	Estocástico	Sequencial	Dinâmico	Contínuo

Figura 2.2: Exemplos de caracterização de ambientes. Retirado de [3].

2.3 Agente Relacional

Um agente racional é um tipo de agente que realiza as ações corretas, ou seja, deve conseguir, a partir da exploração e aprendizagem, descobrir estratégias para chegar ao seu objetivo de forma ótima. Para esse efeito, é escolhida a ação que maximiza o valor esperado da medida de desempenho segundo a informação que lhe é fornecida (i.e., percepções) e o conhecimento adquirido até ao momento (e.g., conhecimento disponível sobre o ambiente).

O conceito de recolha de informação entra neste contexto, visto que a exploração pode ser feita fora do âmbito do objetivo com vista a adquirir conhecimento (e.g., estado do ambiente, ações possíveis, recompensas associadas a cada ação, etc) e, assim, melhorar a tomada de decisão seguinte.

No entanto, a racionalidade não implica clarividência, isto é, a ação tomada pode não resultar no que pretendemos ou esperamos, visto que o raciocínio nem sempre leva ao sucesso (e.g., o planeamento de uma viagem de avião, que foi reservada com antecedência e com atenção às condições climáticas, não garante que o voo não seja cancelado no dia da viagem ou a viagem não seja interrompida por qualquer motivo alheio, mesmo tendo sido tomadas todas as precauções possíveis com base na informação disponível).

2.4 Arquiteturas de Agente

A arquitetura de um agente é a estrutura que define quais os componentes do agente (estrutura) e a forma como estes interagem entre si (comportamento). Um dos componentes de um agente é o módulo de controlo, que é responsável por processar perceções e gerar ações. A forma como este módulo é implementado determina o modelo de arquitetura do agente [1], que pode ser:

- **Reativo:** Associado a um paradigma comportamental, é caracterizado por associações diretas entre perceções e ações. A finalidade deste modelo é a concretização de objetivos implícitos (i.e., não estão explicitamente representados, por exemplo simbolicamente) presentes nas associações estímulo-resposta (i.e., as ações são diretamente ativadas em função das perceções);
- **Deliberativo:** Associado a um paradigma simbólico, é caracterizado pela existência de um módulo de deliberação que se situa entre a perceção e a ação. É neste módulo que ocorre o raciocínio e a tomada de decisão, com base em objetivos explícitos;
- **Híbrido:** Combinação dos modelos reativo e deliberativo, com o objetivo de tirar partido das vantagens que cada um oferece.

Capítulo 3

Projeto - Parte 1

Esta parte do projeto incidiu principalmente sobre desenvolvimento de uma biblioteca, em *java*, para providenciar abstrações dos subsistemas que representam conceito gerais de inteligência artificial (e.g., agente, ambiente) (ver figura 2.1) e outros conceitos relacionados (e.g., máquina de estados, conceito de transição de estado).

Para tal, foi necessário definir uma arquitetura de software que permitisse a implementação dos diferentes subsistemas de forma independente e modular, seguindo as diretrizes (i.e., métricas, princípios e padrões) que garantem a qualidade da arquitetura desenvolvida.

A implementação da biblioteca foi feita com base na consulta e compressão de diagramas UML e de sequência de forma a garantir a correta implementação dos diferentes subsistemas.

Por fim foi desenvolvido um jogo (ver secção 3.4) que integra a biblioteca desenvolvida, permitindo a interação com o jogador por meio de comandos em texto.

3.1 Arquitetura de software

A arquitetura de software aborda a complexidade inerente ao desenvolvimento de software por meio de uma série de vertentes que estão interligadas.

3.1.1 Métricas

As métricas são medidas de quantificação da arquitetura de um software, indicadoras da qualidade dessa arquitetura [4].

O acoplamento é uma métrica inter-modular que mede o grau de interdependência entre os módulos de um sistema. Pode ser medido através da:

- **Direção:** Unidirecional vs Bidirecional (uni representa menos acoplamento);
- **Visibilidade:** Quando menor for a visibilidade de um módulo, menor é o seu acoplamento;

- **Relação:** (de mais acoplamento para menos) Herança → Composição → Agregação → Associação → Dependência (ver figura 3.1).

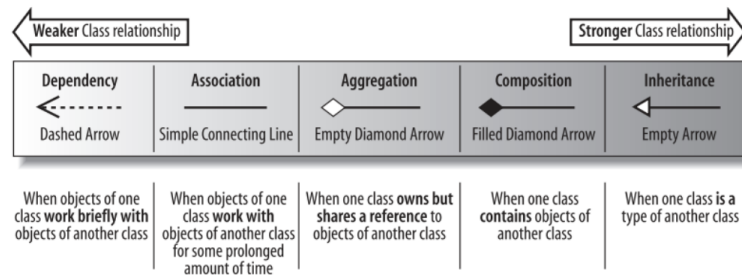


Figura 3.1: Relações entre classes e nível de acoplamento. Retirado de [4], slide 5.

A coesão é uma métrica intra-modular que determina o nível de coerência funcional de um subsistema/módulo, seja pela sua organização (i.e., cada modulo está organizado por conteúdo) ou pela sua funcionalidade (e.g., *single responsibility principle* - cada modulo tem uma única responsabilidade).

Destacam-se ainda outras métricas igualmente importantes, como a simplicidade e a adaptabilidade. A simplicidade representa, como o nome indica, a simplicidade da arquitetura desenvolvida, sendo que quanto mais simples for a arquitetura, mais fácil é a sua compreensão e manutenção. Já adaptabilidade mede a facilidade de alteração da arquitetura (i.e., adição de novos módulos ou alteração nos módulos existentes não deve implicar modificações significativas na arquitetura).

3.1.2 Princípios

Os princípios, no contexto da arquitetura de software, são um conjunto de convenções que orientam a sua definição no sentido de garantir a qualidade de produção da mesma, nomeadamente, no que se refere à minimização do acoplamento, à maximização da coesão e à gestão da complexidade [4]. Alguns exemplos são:

- **Abstração:** Define a forma como os componentes de um sistema são representados, permitindo a ocultação de detalhes de implementação;
- **Modularização:** Ao qual está associado a decomposição (e.g, divisão do sistema em sub-módulos) e o encapsulamento (i.e., ocultação de detalhes de implementação e/ou manutenção de estado privado e interno);
- **Factorização:** Onde a arquitetura é dividida em camadas, cada uma com um conjunto de responsabilidades bem definidas. Pode ser estrutural (e.g, Herança) e funcional (e.g, Delegação);

3.2 Processo de Desenvolvimento de Software

O processo de desenvolvimento de software consiste na criação da organização de um sistema de forma progressiva, através de diferentes níveis de abstração:

- **Modelo (Conceptual):** Representação abstrata do sistema, que define o que o sistema deve fazer, sem especificar como;
- **Arquitetura (Modelo Concreto):** Representação concreta do sistema, que define como o sistema deve ser implementado;
- **Implementação:** Código fonte que implementa o sistema definindo como o sistema deve ser executado.

Consiste num processo iterativo, em que as diferentes actividades de desenvolvimento são alternadas ao longo do tempo em função do conhecimento e do nível de detalhe envolvido [4]. Essa alternância poderá ser circular (i.e., implementação \rightarrow arquitetura \rightarrow modelo \rightarrow implementação).

3.2.1 Tipos de Implementação

A implementação deve ser realizada em duas etapas principais: a implementação estrutural e a implementação comportamental (ver tabela 3.1).

Tabela 3.1: Tipos de Implementação

Tipo	Modelo Associado	Designação
Estrutural	UML	Define a estrutura de um sistema, ou seja, a forma como os componentes se relacionam entre si.
Comportamental	Diagrama de Sequência	Define o comportamento de um sistema, ou seja, a forma como os componentes interagem e comunicam entre si.

Mais detalhadamente, os diagramas de sequência ou atividade representam o fluxo de controlo de um sistema, ou seja, a sequência de actividades que um sistema executa e a sua ordem. Definem-se como modelos de interação com uma organização bidirecional (i.e., horizontal \rightarrow tempo e vertical \rightarrow estrutura) e são compostos por diferentes elementos de modelação (e.g., mensagens, operadores, linha de vida) [4].

Já a linguagem de modelação unificada (i.e., UML - *Unified Modeling Language*) representa um modelo de comportamento com interação como perspetiva principal de modelação. Este tipo de modelação descreve a forma como as partes de um sistema interagem entre si e com o exterior para produzir o comportamento do sistema. No contexto do projeto, esta linguagem também ajudou a compreender os conceitos fundamentais associados a um sistema

computacional (ver secção 3.3) através do suporte à representação de diagramas de transição de estado.

3.3 Modelação de um Sistema Computacional

Um sistema computacional geral, pode ser caracterizado de forma abstrata (ver figura 3.2), através de uma representação de estado, que define em cada momento a configuração interna do sistema, e de uma função de transformação que gera as saídas e o próximo estado em função das entradas e do estado actual do sistema [5].

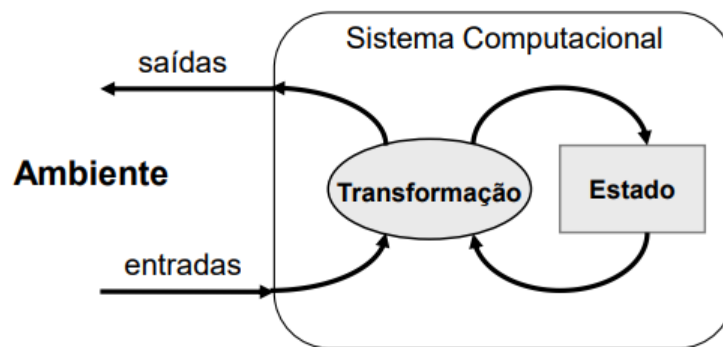


Figura 3.2: Modelo abstrato de um sistema computacional. Retirado de [5], slide 3.

Os conceitos fundamentais de um sistema computacional [5] são:

- **Dinâmica:** Descreve os estados que um sistema pode assumir e a forma como eles evoluem ao longo do tempo, determinando o comportamento do sistema;
- **Comportamento:** Expressa a estrutura de controlo do sistema, que corresponde à forma como o sistema age (gera as saídas) perante a informação proveniente do exterior (entradas) e do seu estado interno.

3.3.1 Modelo Formal de Computação

A função de transformação (i.e., responsável por gerar as saídas e o próximo estado em função das entradas e do estado actual do sistema), pode ser decomposta em duas funções distintas (ver tabela 3.2), em que \mathbf{Q} representa o conjunto de estados possíveis do sistema (regularmente designado por espaço de estados), Σ representa o conjunto de entradas possíveis e \mathbf{Z} representa o conjunto de saídas possíveis (ver figura 3.3).

Tabela 3.2: Funções de Transformação de um Sistema Computacional

Designação	Expressão	Descrição
Função de Transição (δ)	$\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$	Define a relação entre o estado do sistema e as entradas que recebe, e o próximo estado.
Função de Saída (λ)	$\lambda : Q \times \Sigma \rightarrow Z$	Define a relação entre o estado do sistema e as entradas que recebe, e a saídas que produz.

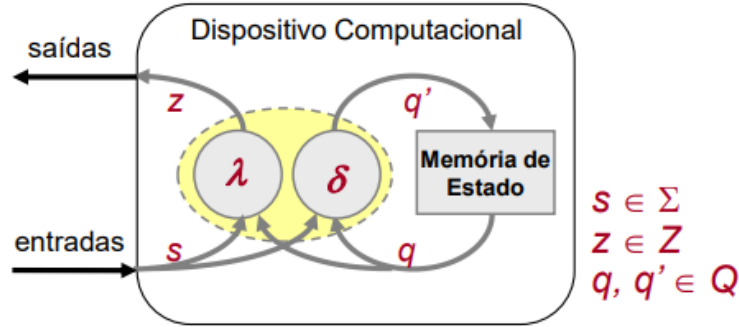


Figura 3.3: Modelo de um sistema computacional. Retirado de [5], slide 3.

Associado a um determinado modelo de um sistema computacional, está uma máquina de estados, que representa, de forma abstrata, o comportamento do sistema em função do tempo. Pode ser caracterizada por:

- **Estado:** Se o número de estados possíveis é finito, então a máquina de estados é finita; caso contrário, é infinita;
- **Determinismo:** Uma máquina de estados finita também pode ser subcaracterizada em determinística (i.e., existe apenas uma transição para o mesmo estado e entrada) ou não determinística (i.e., existe mais do que uma transição para o mesmo estado e entrada). Para qualquer máquina de estados não determinística, existe uma máquina de estados determinística equivalente; [6, 7]
- **Função de Saída:** Se a função de saída λ depende das entradas Σ , então a máquina de estados é do tipo *Mealy* ($\lambda : Q \times \Sigma \rightarrow Z$); caso contrário, é do tipo *Moore* ($\lambda : Q \rightarrow Z$).

3.4 Desenvolvimento do Jogo

Tendo por base os conceitos anteriormente abordados, que consolidaram a aprendizagem inerente à implementação da biblioteca, foi desenvolvido um jogo. No seu processo de desenvolvimento, foi definido um conjunto de componentes que providenciam implementações concretas dos subsistemas expostos pela biblioteca, adaptados ao contexto específico do jogo:

- **Personagem:** Representa o agente único do jogo;

- **Ambiente:** Representa o ambiente onde a Personagem opera;
- **Máquina de Estados:** Representa a máquina de estados associada ao controlo da Personagem. Caracterizada por ser finita, não determinística e do tipo *Mealy* (Ver figura 3.4).

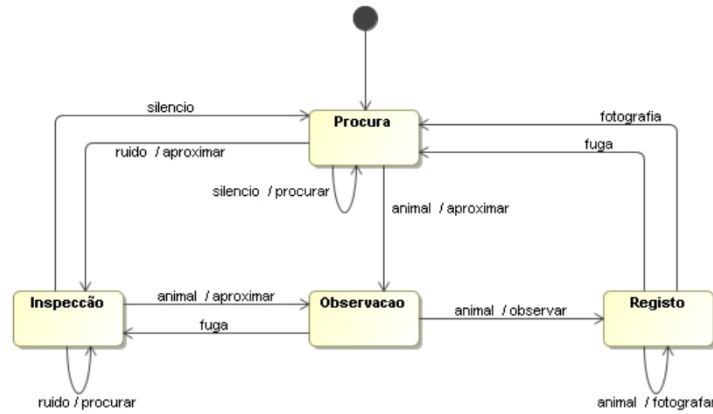


Figura 3.4: Máquina de estados associada ao controlo da Personagem. Retirado de [5], slide 14.

O jogo consiste num ambiente virtual onde a personagem tem por objectivo registar a presença de animais através de fotografias, simulando a exploração no mundo real. O ambiente pode ser caracterizado (ver secção 2.2) por ser:

- **Parcialmente observável:** A Personagem apenas sabe o que está no seu campo de visão, e por isso precisa de explorar o ambiente para descobrir o que está à sua volta, necessitando de guardar estado interno para tomar decisões (e.g., se observou um animal anteriormente, então pode registar a sua presença);
- **Agente único:** Considerou-se que a Personagem é a única a atuar no ambiente no contexto do problema, visto que os animais são tratados como objetos passivos e integrantes do ambiente, pois não apresentam objetivos próprios.
- **Estocástico:** Porque o estado seguinte pode depender de eventos aleatórios (e.g., a fuga de um animal) e não somente do estado atual e da ação da Personagem;
- **Sequencial:** Pois existe uma linha de acontecimentos que se sucedem (e.g., não é possível inspecionar, registar ou observar algo sem ser feita primeiro uma procura);
- **Dinâmico:** Pois o ambiente pode mudar enquanto a Personagem está a tomar uma decisão (e.g., os animais podem fugir);
- **Discreto:** Pois o número de estados possíveis é finito (e.g., pode ser mapeado para uma máquina de estados finita).

Foi criada uma aplicação (ver figura 3.5) de CLI (i.e., *command-line interface*) em *java*, que possibilita a interação com o jogador por meio de comandos em texto. Tendo em conta que a interface gráfica não era o foco desta parte do projeto, foi emulada através de texto descritivo.

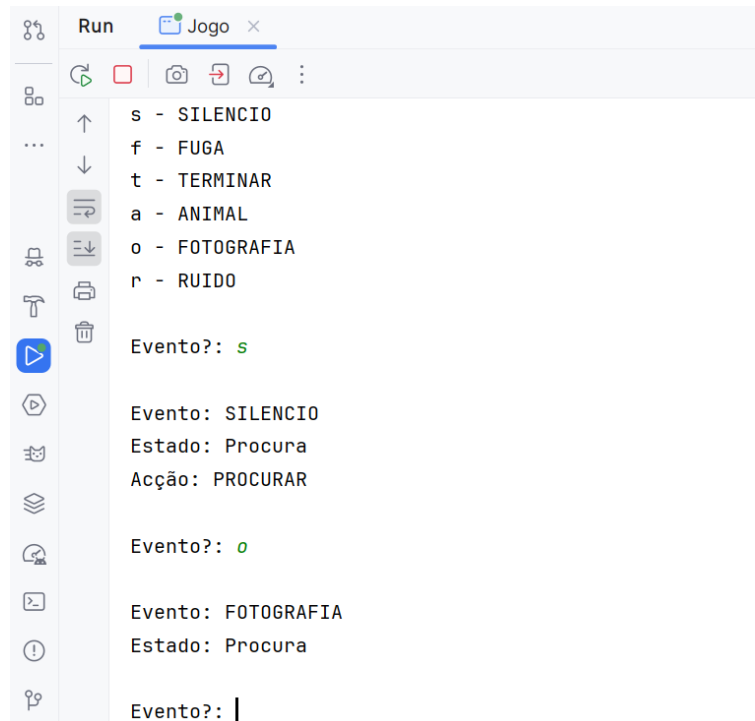


Figura 3.5: Utilização da aplicação do jogo.

3.5 Estrutura do Projeto

No processo de desenvolvimento de software associado a esta fase do projeto, foi definida a seguinte estrutura em módulos e que está presente na pasta *iasa_jogo/src*:

- *agente*: Integra classes e interfaces que definem o Agente e os seus componentes (e.g., módulo de controlo);
- *ambiente*: Agrega interfaces que representam o Ambiente e os seus componentes (e.g., comandos, eventos);
- *maquest*: Contém classes que definem o conceito de Máquina de Estados e os seus componentes (e.g., estados, transições);
- *jogo*: Agrega os detalhes da implementação do jogo, onde são integrados os módulos anteriores e definidas implementações concretas dos mesmos, adequadas ao contexto a que o jogo se insere.

Capítulo 4

Projeto - Parte 2

Nesta fase do projeto, o objetivo foi criar, em *python*, um sistema inteligente capaz de se movimentar num espaço com dimensões fixas onde existem obstáculos. A finalidade do agente prospector é recolher os alvos e evitar os obstáculos presentes no ambiente (ver figura 4.1). O agente pode ser considerado homólogo a um robô móvel autônomo (e.g., um robô que aspira sozinho a casa), que se pode mover nos quatro sentidos cardeais (i.e., norte, sul, este e oeste).

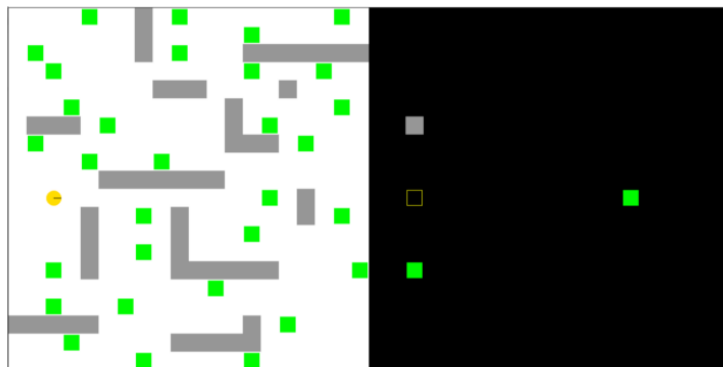


Figura 4.1: Representação visual desta fase do projeto. Retirado de [8], slide 13.

Para que o agente possa atingir os objetivos propostos, foi necessário implementar (ver secção 4.6) um agente reativo e os módulos comportamentais associados, que definem os objetivos de forma implícita.

Tal como em fases anteriores, a implementação foi feita com base na consulta e compressão de diagramas UML e de sequência de forma a garantir a correta implementação dos diferentes subsistemas.

4.1 Agentes Reativos

Na secção da arquitetura de agentes (ver secção 2.4), foi referido que uma arquitetura reativa é caracterizada pela associação direta entre perceções e ações. Associada a esta arquitetura está a ideia de que um agente reativo é composto por um conjunto de reações, e que são organizadas de forma modular em módulos comportamentais designados por comportamentos.

4.1.1 Reação

Inerente à arquitetura de agentes reativos, está o conceito de mecanismo de reação e que apresenta os seguintes elementos:

- **Estímulo:** Define a informação que é extraída de uma perceção, de forma a ser utilizada na ativação de uma resposta. Vários estímulos podem ser ativados por uma única perceção. Estão regularmente associados a um parâmetro de intensidade, que pode ser utilizado para determinar a prioridade de ativação de uma resposta;
- **Resposta:** Representa a geração de uma resposta a estímulos, inerentemente ligada a uma ação a ser executada e à sua respetiva prioridade. Além de poder ser ativada por um estímulo, uma resposta pode ser ativada diretamente por uma perceção, de forma a garantir restrições de ativação (i.e., guardas) se necessário;
- **Reação:** Módulo que associa estímulos a respostas.

Um agente reativo é composto por um conjunto de reações, que devem ser organizadas de forma modular em módulos comportamentais designados por comportamentos. Isto permite que as reações internas do agente sejam encapsuladas, facilitando a sua manutenção e escalabilidade.

4.1.2 Comportamento

Um comportamento (ver figura 4.2) define um módulo associado ao processamento de perceções do módulo de controlo de um agente reativo, onde é definida a forma como os objetivos implícitos do agente devem ser concretizados. Encapsula um conjunto de reações relacionadas entre si, possivelmente com uma sequência temporal, de forma a atingir um ou mais objetivos (e.g., evitar obstáculos, recolher alvos, etc). Associado a um objetivo podem existir sub-objetivos.

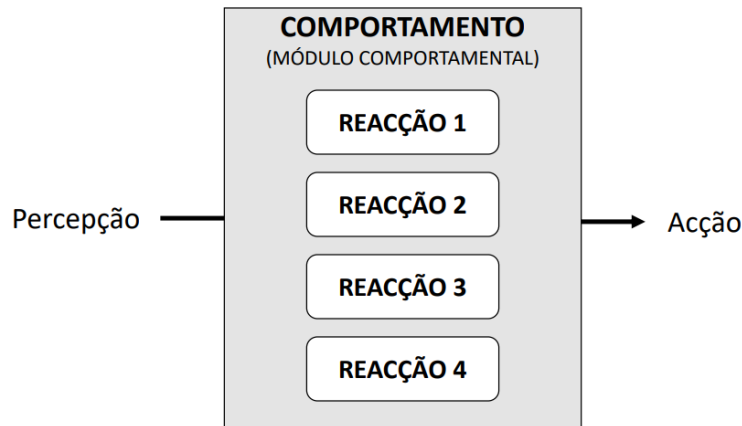


Figura 4.2: Módulo comportamental de um agente reativo. Retirado de [9], slide 11.

Tipos de Comportamento:

- **Comportamento Fixo:** Caracterizado por ter uma resposta fixa, pois gera uma ação em permanência;
- **Comportamento Simples:** Reação;
- **Comportamento Composto:** Agrega sub-comportamentos, ao qual está associado um mecanismo de seleção de ação de forma a determinar a ação a realizar em função das respostas dos mesmos.

4.1.3 Comportamento Composto

Como em comportamentos compostos, uma percepção pode ativar múltiplas reações, as quais geram diferentes ações, é necessário definir um mecanismo de seleção de ação. Alguns dos mecanismos de seleção de ação mais comuns são:

- **Execução paralela:** As ações são executadas em paralelo, porque não interferem entre si;
- **Seleção por prioridade:** As ações são selecionadas em função de uma prioridade. É possível distinguir dois tipos de comportamentos compostos com seleção por prioridade:
 - **Prioridade:** Representa uma forma de comportamento composto com um mecanismo de seleção de ação de prioridade dinâmica, e que portanto a prioridade dos comportamentos associados varia consoante o tempo (e.g., o comportamento “evitar obstáculo” tem prioridade sobre “explorar” quando o agente se encontra próximo de um obstáculo, mas “explorar” tem prioridade sobre “evitar obstáculo” quando não existem obstáculos próximos).
 - **Hierarquia:** Representa uma forma de comportamento composto com um mecanismo

de seleção de ação de prioridade por hierarquia fixa de subsunção (i.e., as camadas superiores controlam as inferiores, através da inibição, supressão e/ou reinício dos comportamentos associados). Os comportamentos mais altos na hierarquia têm prioridade sobre os mais baixos (correção de ação), e não variam consoante o tempo (e.g., o comportamento “carregar bateria”, tem prioridade sobre os comportamentos “explorar” ou “evitar obstáculo”, pois representa um comportamento mais básico e fundamental para a sobrevivência do agente, e que não varia consoante o tempo).

- **Combinação:** As ações são combinadas numa única resposta por composição (e.g., soma vectorial);
- **Seleção aleatória:** As ações são selecionadas aleatoriamente.

4.2 Controlo Reativo

Como foi apresentado na secção de arquiteturas de agentes (ver secção 2.4), um agente tem associado um módulo de controlo que é responsável por processar perceções e gerar ações. No caso de um agente reativo, o processar das perceções é realizado com base num módulo comportamental, também designado comportamento, o qual representa o comportamento geral do agente e que pode ser constituído por diferentes sub-comportamentos (ver figura 4.3) [8].

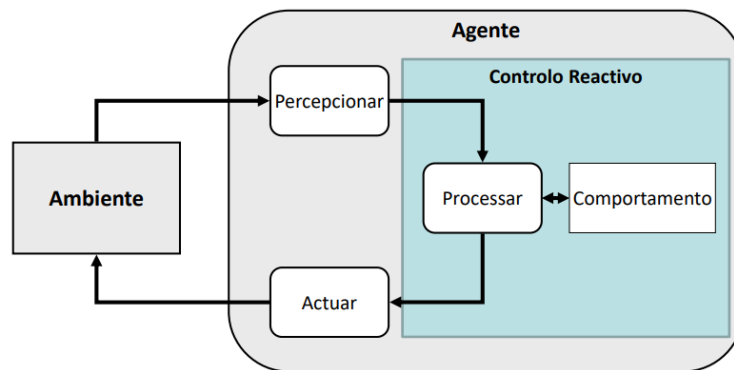


Figura 4.3: Agente com controlo reativo. Retirado de [8], slide 11.

4.3 Arquitetura Reativa com Memória

Numa arquitetura reativa com memória (ver figura 4.4), as reações dependem não só das perceções, mas também da memória de perceções anteriores (ou de informação delas derivada) para gerar as ações. Para esse efeito é necessário manter internamente memória, a qual é atualizada a partir das perceções e das reações ativadas, influenciando essas mesmas reações, bem como as ações geradas [10].

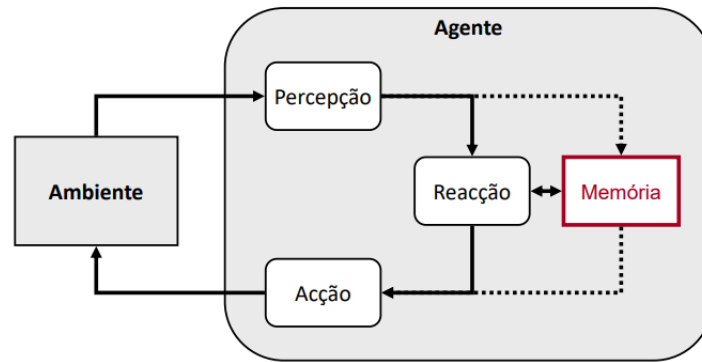


Figura 4.4: Arquitetura reativa com memória. Retirado de [10], slide 5.

O conceito de memória, associado a um comportamento, pode ser implementado de várias formas, como, por exemplo:

- **Estado:** As percepções anteriores, que sejam relevantes, são armazenadas num estado interno do comportamento (ver figura 4.5), que é atualizado e consultado em função das percepções atuais e que influencia a geração de ações (e.g., o agente move-se numa direção aleatória até que a contagem dos passos efetuados seja superior a um determinado valor, e só depois é que muda de comportamento);
- **Máquina de Estados:** Além de ter em conta as percepções atuais e as reações correspondentes, o comportamento pode ter em consideração entradas ou até um mecanismo de reset, que influenciam a próxima transição de estado e a consequente geração de ações e possíveis saídas (ver figura 4.6). As entradas e saídas representam, neste contexto, interligações entre comportamentos [10].

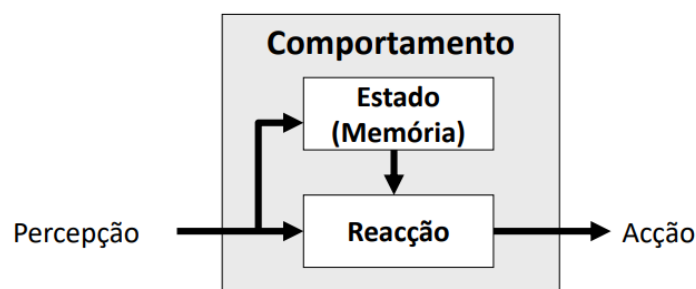


Figura 4.5: Comportamento com estado. Retirado de [10], slide 7.

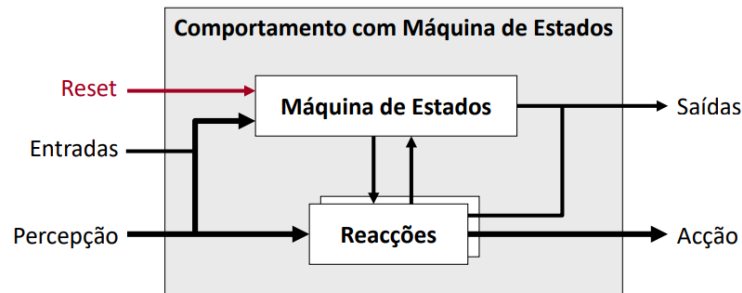


Figura 4.6: Comportamento com máquina de estados. Retirado de [10], slide 8.

Tabela 4.1: Vantagens e desvantagens da manutenção de estado em arquiteturas reativas. Retirado de [10].

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Poder produzir todo o tipo de comportamentos; • Representar a evolução temporal do comportamento do agente; • Representar comportamentos complexos baseados na evolução temporal das percepções (e.g., agir devido à inexistência de um alvo após um determinado número de passos); • Lidar com falhas, explorando novas ações (e.g., escolher uma nova direção após embater num obstáculo). 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da complexidade espacial; • Aumento da complexidade computacional (i.e., manter as representações de estado); • Limitações no suporte de representações complexas e exploração de planos alternativos de ação.

4.4 Biblioteca SAE

Para esta fase do projeto foi disponibilizada uma biblioteca em *python* que apresenta e estende os conceitos expostos pela biblioteca realizada na primeira fase do projeto (ver capítulo 3). Além disso, a biblioteca SAE (Simulador de Ambiente de Execução) permite a execução de um agente autónomo num ambiente simulado bidimensional, composto por alvos e obstáculos [11]. Oferece, além de outras funcionalidades, a possibilidade de utilizar sete configurações de ambiente predefinidas.

A interface gráfica é composta por duas áreas de visualização (ver figura 4.7): a primeira área (à esquerda) apresenta a configuração do ambiente escolhida e com a indicação do agente; e a segunda área (à direita) é uma área de visualização de informação interna do agente.

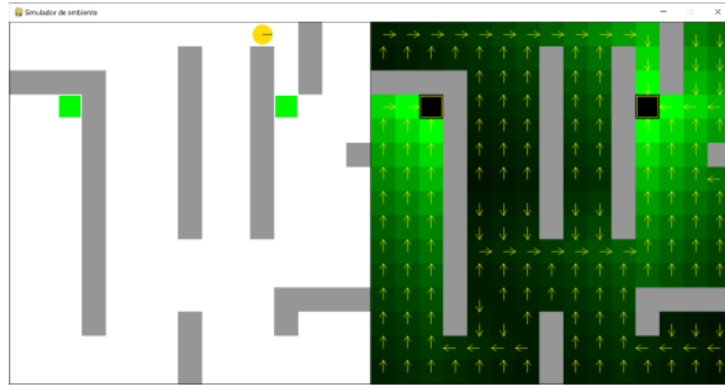


Figura 4.7: Interface gráfica do SAE. Retirado de [11], pág. 3.

4.5 Caracterização do Ambiente

O ambiente onde o agente reativo se movimenta é virtual, bidimensional, com dimensões fixas e composto por alvos e obstáculos estáticos. Pode ser caracterizado (ver secção 2.2) por ser:

- **Totalmente observável:** O agente tem acesso a toda a informação do ambiente;
- **De agente único:** O ambiente contém apenas um agente a atuar;
- **Determinístico:** O próximo estado é unicamente determinado pelo estado atual e pela ação do agente;
- **Sequencial:** As ações do agente afetam as etapas consequentes (e.g., a recolha de um alvo implica a sua remoção do ambiente);
- **Estático:** O ambiente não muda enquanto o agente está a decidir a próxima ação a realizar;
- **Discreto:** O ambiente é composto por um número finito de estados possíveis.

4.6 Implementação do Agente Reativo

No âmbito desta fase do projeto, foram realizadas as seguintes tarefas:

1. Definição de uma biblioteca denominada ECR (Esquemas Comportamentais Reativos) que expõe os mecanismos base de comportamento (ver secção 4.1.2), reação (ver secção 4.1.1), estímulo, resposta, e comportamento composto (ver secção 4.1.3);
2. Implementação de um conjunto de comportamentos e subcomportamentos que permitem ao agente autónomo atingir os objetivos propostos (i.e., recolher alvos e evitar obstáculos) utilizando a biblioteca ECR;

3. Observação do comportamento do agente e da sua interação com o ambiente através da interface gráfica da biblioteca SAE;
4. Adição de comportamentos mais complexos ao controlo do agente reativo de forma a melhorar o seu desempenho tendo em conta os objetivos propostos (e.g., inicialmente o agente apenas explorava numa direção aleatória, mas posteriormente foram adicionados comportamentos compostos de recolha de alvos e evitação de obstáculos); Ocorreu em simultâneo com o ponto 3.

Em relação ao ponto 2, foram implementados os seguintes comportamentos:

- **Recolher Alvo:** Representa um comportamento composto com um mecanismo de seleção de ação por hierarquia fixa de prioridade, que corresponde ao objetivo do agente prospector de recolher alvos. O agente deve, por esta ordem de prioridade, ter em consideração os seguintes subcomportamentos: (1) aproximar alvo; (2) evitar obstáculos; e (3) explorar o ambiente.
- **Aproximar Alvo:** Representa um comportamento composto com um mecanismo de seleção de ação por prioridade dinâmica, que corresponde ao objetivo do agente prospector de se aproximar de um alvo. Como a distância entre o agente e os diversos alvos varia consoante a posição do agente no ambiente (i.e., a intensidade do estímulo varia), o agente deve selecionar o alvo mais próximo (i.e., priorizar o estímulo que apresenta maior intensidade) e por isso é que é usado um mecanismo de seleção por prioridade dinâmica (ver secção 4.1.3).
- **Evitar Obstáculo:** Representa um comportamento composto com um mecanismo de seleção de ação por hierarquia fixa de prioridade, que corresponde ao objetivo do agente prospector de evitar obstáculos. É usado este mecanismo de seleção de ação, porque a próxima direção livre de obstáculos é calculada em função da posição do agente e dos obstáculos presentes à sua volta, de forma aleatória. E portanto, num dado momento, não existe uma direção livre mais prioritária (no sentido literal) que outra, mas sim, uma hierarquia onde estão definidas, pela ordem de descoberta aleatória, as direções livres de obstáculos encontradas.
- **Explorar:** Define um comportamento fixo sem memória (e.g., representação interna de perceções anteriores) e que, por isso está condenado à repetição. Está associado ao objetivo “explorar” e caracteriza-se por ter uma resposta fixa, pois gera uma ação em permanência, que consiste em mover-se numa direção aleatória. Não depende de nenhum estímulo para ser ativado.

Além dos comportamentos descritos, para os comportamentos compostos, foram implementados estímulos, respostas e reações, de forma a garantir a descrição e execução correta dos comportamentos

associados.

Em paralelo ao desenvolvimento da implementação descrita e de forma a introduzir os conceitos de arquitetura reativa com memória, mais concretamente, o conceito de comportamento com estado (ver secção 4.3), foi introduzido um comportamento que não caracteriza nenhum objetivo inicial descrito. Este comportamento, denominado *Contar Passos*, caracterizado por ser um comportamento fixo com memória, foi implementado com a finalidade de contar os passos do agente e tomar decisões com base no número de passos efetuados (e.g., ao fim de um determinado número de passos, o agente muda de direção). No entanto, tal comportamento não consta na implementação final do agente reativo, pois não é relevante para os objetivos propostos.

4.7 Estrutura do Projeto

No processo de desenvolvimento de software associado a esta fase do projeto, foi definida a seguinte estrutura em módulos e que está presente na pasta *iasa_agente/src*:

- *agente*: Integra a implementação do agente reativo e do seu controlo, bem como os componentes dos módulos comportamentais associados;
- *lib/ecr*: Integra a implementação da biblioteca ECR;
- *lib/sae*: Integra a implementação da biblioteca SAE, que foi disponibilizada para esta fase do projeto.
- ficheiro *teste.py*: Executa o agente reativo implementado no ambiente simulado com a configuração escolhida, providenciado pela biblioteca SAE.

Capítulo 5

Projeto - Parte 3

Nesta fase do projeto, o objetivo foi criar, em *python*, TODO

5.1 Raciocínio Automático

O raciocínio automático é uma área da inteligência artificial que se dedica a desenvolver algoritmos capazes de inferir conclusões a partir de um conjunto de premissas. Pode ser visto como um processo computacional, onde se parte de uma representação de conhecimento de um determinado problema e se chega a conclusões, com base em regras de inferência (i.e., processo de manipulação de representações simbólicas para deduzir novas informações baseadas em conhecimento do domínio).

Associado ao processo de raciocínio automático, estão dois tipos de atividades principais:

- **Exploração:** A exploração das opções possíveis, e que requer antecipação e previsão das suas consequências (raciocínio prospectivo) (e.g., num determinado momento, quantas jogadas possíveis existem num jogo de xadrez para que o jogador possa ganhar o jogo)
- **Avaliação:** A avaliação das opções exploradas, que requer a comparação das opções possíveis e a escolha da melhor opção. Associadas a escolha estão métricas como o custo e a utilidade (e.g., de todas as jogadas possíveis, qual a que maximiza a probabilidade de ganhar o jogo de xadrez)

De forma a resolver um determinado problema, através do raciocínio automático, é necessário representar o conhecimento do seu domínio através de representações simbólicas internas ao sistema - modelo do problema - com a informação necessária para a resolução do mesmo. Estas representações servem de base à simulação para exploração e avaliação de opções possíveis, e são obtidas através de processos de codificação (i.e., da informação concreta do problema em estruturas simbólicas internas) e de decodificação (i.e., processo inverso). A imagem 5.1 ilustra um exemplo de codificação e decodificação de um problema.

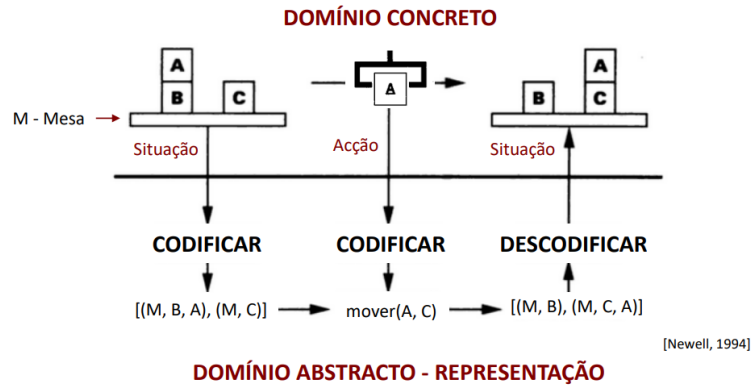


Figura 5.1: Representação de um problema. Retirado de [12], slide 8.

5.1.1 Modelo de um Problema

O modelo de um problema é uma representação simbólica interna ao sistema, que contém a informação necessária para a resolução do problema. O mecanismo de raciocínio automático é responsável por manipular esta representação, de forma a inferir conclusões e a resolver o problema. Esta representação tem como base os seguintes conceitos:

- **Estado:** Representação única e simbólica de um conjunto de informações concretas que caracterizam um estado da modelação de um problema. No âmbito do raciocínio automático, os estados abstraem os aspetos (configurações) estruturais que caracterizam o problema. Ao conjunto de estados possíveis de um problema e às transições entre eles, dá-se o nome de espaço de estados;
- **Operadores:** Representação de uma ação geradora de uma transição de um estado para outro. No âmbito do raciocínio automático, os operadores abstraem as transformações (dinâmicas) que ocorrem. Associado a um operador estão duas funções: uma que gera o estado sucessor a partir de um dado estado e outra que define o custo associado a essa transição, e que pode depender ou não do estado atual e do estado sucessor;
- **Transição:** Em contraste com o operador, a transição é a ação efetiva da passagem de um estado para outro (geram o estado sucessor), que ocorre quando um operador é aplicado sobre as representações internas dos estados.
- **Problema:** Dá suporte ao raciocínio automático, modelando um problema ao qual está inerente uma finalidade; Associado a um problema está o estado inicial, um conjunto de operadores e uma função predicado [13] que verifica se um estado recebido é um estado objetivo ou objetivos explícitos. O problema considera-se resolvido quando um estado objetivo é atingido.

5.2 Mecanismo de procura

O mecanismo de procura é um dos mecanismos de raciocínio automático, que tem como objetivo encontrar uma solução para um problema de procura.

Associado a um mecanismo de procura está o conceito de árvore de procura, que é uma estrutura responsável por manter a informação gerada durante o processo de procura. Caracteriza-se pelos seguintes conceitos:

- **Nó:** Representa um estado do problema. Além disso, contém informação, tal como: operador (que foi aplicado para gerar o estado sucessor, e que pode não existir); antecessor (nó antecessor ao qual foi aplicado o operador para gerar este nó, e que pode não existir). E informação complementar para controlo do processo de procura: profundidade (do nó na árvore de procura, incremental a cada nível da árvore de procura); custo (associado ao caminho que vai do nó raiz ao nó, incremental a cada transição de um nó para o nó sucessor). Existe ainda o conceito de nós abertos (que ainda não foram expandidos) e nós fechados (que já foram expandidos); Os nós são comparáveis entre si através do seu custo;
- **Fronteira:** Representa os nós folhas da árvore de procura. Estes nós são candidatos a serem expandidos. A forma como é feita essa expansão dependerá da estratégia de procura utilizada (ver secção 5.3).
- **Solução:** Representa um percurso (sequência de estados e operadores), no espaço de estados, nomeadamente, corresponde ao caminho que vai do nó raiz (estado inicial) a um dos nós objetivo (estado objetivo). Podem existir várias soluções para um problema de procura, que dependem também da estratégia de procura utilizada (ver secção 5.3), ou até mesmo não existir solução.

5.2.1 Processo de Procura

O processo de procura (ver figura 5.2.1) é um processo iterativo que tem como objetivo encontrar uma solução para um problema de procura, através da exploração do espaço de estados a partir do estado inicial. É caracterizado pelos seguintes passos [14]:

- É verificado se o estado atual corresponde ao estado objetivo. Se corresponder ao objetivo, o processamento termina e é retornado o percurso do estado inicial ao estado objetivo (i.e., a solução);
- Não sendo o estado atual um objetivo, esse estado é expandido, sendo gerados todos os estados sucessores por aplicação dos vários operadores possíveis;
- Para cada estado sucessor é repetido o processo;

- Se não existirem estados sucessores, o processo de procura termina com a indicação de que não existe solução. A não existência de estados sucessores resulta, por exemplo, da exploração de todo o espaço de estados sem ter sido encontrada solução.

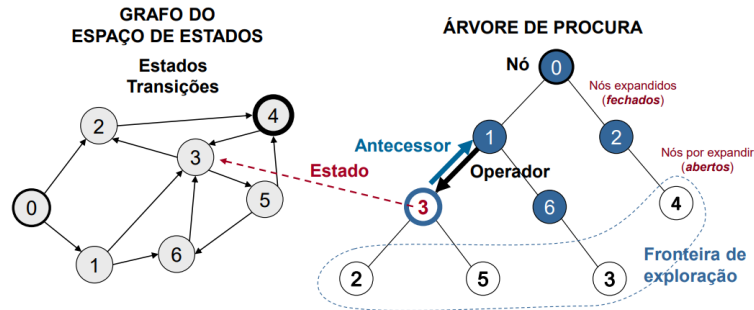


Figura 5.2: Processo de procura. Retirado de [14], slide 7.

5.3 Estratégias de Procura

As estratégias de procura são responsáveis por definir a forma como a árvore de procura é explorada, ou seja, a ordem pela qual os nós são expandidos. Existem várias estratégias de procura que se podem dividir em dois grupos: estratégias de procura não informada (cega) (ver secção 5.3.1) e estratégias de procura informada (heurística) (ver secção 5.3.2).

Alguns dos critérios de classificação das estratégias de procura são [15, 16]:

- **Completa:** Se a estratégia encontra **sempre** uma solução para o problema proposto, caso exista (e caso não exista, diz que não há solução).
- **Ótima:** Se a estratégia encontra a solução com o menor custo possível.
- **Complexidade de espaço:** Espaço de memória necessário para encontrar a solução (i.e., número máximo de nós que a estratégia mantém em memória)
- **Complexidade de tempo:** Tempo necessário para encontrar a solução (i.e., número de operações necessárias para encontrar a solução)
- **Profundidade Máxima:** Corresponde à quantidade máxima de espaços entre um qualquer par de estados (m).
- **Fator de Ramificação:** Número máximo de sucessores de um dado nó (b).
- **Profundidade da solução:** Profundidade do nó objetivo na árvore de procura (d).

5.3.1 Procuras Não-Informadas

As procuras não-informadas (ver figura 5.3.1) são estratégias de procura que não utilizam informação adicional para guiar o processo de procura.

Método de Procura	Tempo	Espaço	Ótimo	Completo
Profundidade	$O(b^m)$	$O(bm)$	Não	Não
Largura	$O(b^d)$	$O(b^d)$	Sim	Sim
Custo Uniforme	$O(b^{\lceil C^*/\epsilon \rceil})$	$O(b^{\lceil C^*/\epsilon \rceil})$	Sim	Sim
Profundidade Limitada	$O(b^l)$	$O(bl)$	Não	Não
Profundidade Iterativa	$O(b^d)$	$O(bd)$	Sim	Sim

b – factor de ramificação
 d – dimensão da solução
 m – profundidade da árvore de procura
 l – limite de profundidade
 C^* – Custo da solução ótima
 ϵ – Custo mínimo de uma transição de estado ($\epsilon > 0$)

Figura 5.3: Tabela de estratégias de procura não-informadas. Retirado de [16], slide 12.

Procura em Profundidade

Procura em Profundidade Limitada

Procura em Profundidade Iterativa

Procura em Largura

Procura de Custo Uniforme

5.3.2 Procuras Informadas

Uma heurística é algo que fornece informação para resolver algo de forma expedita, são estimativas rápidas e por isso não são garantidamente ótimas (não produzem indicações robustas que garantidamente levam a boas soluções, no entanto são boas indicações e ajudam a orientar a procura).

Capítulo 6

Projeto - Parte 4

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Capítulo 7

Revisão do Projeto

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Capítulo 8

Conclusão

O projeto permitiu adquirir conhecimentos sobre inteligência artificial e os mecanismos base necessários para a implementação de agentes autónomos, através da aplicação prática de conceitos estudados ao longo do semestre.

Outras temáticas, como a arquitetura de software e o processo de desenvolvimento de software, foram também abordadas, aprendidas e aplicadas ao longo do projeto, o que permitiu a aquisição de competências em áreas como a análise, o design e a implementação de sistemas de software.

Foram adquiridas competências de programação em *java* e *python*, especialmente vocacionadas para a programação orientada a objetos, o que permitiu modular, de forma incremental, os diferentes subsistemas das arquiteturas implementadas, reduzindo a complexidade inerente ao desenvolvimento de sistemas de software.

Em relação as diferentes partes do projeto, na primeira parte, foi desenvolvida uma biblioteca em *java* onde foram implementados os mecanismos bases relacionados com os conceitos gerais de inteligência artificial (e.g., agente, ambiente) e um jogo que integra essa biblioteca. O jogo consistia num ambiente virtual onde a personagem tinha por objectivo registar a presença de animais através de fotografias, simulando a exploração no mundo real. O agente foi implementado com uma arquitetura reativa com memória, mais concretamente, criou-se uma máquina de estados finita no seu módulo de controlo, que permitia a tomada de decisões com base no estado anterior, em eventos pre-definidos do ambiente e na ação a executar pelo agente. Com esta arquitetura observou-se que o agente conseguia atingir os objetivos propostos, mas não conseguia reagir a situações inesperadas (i.e., eventos não previstos que pudessem ocorrer no ambiente). Mais ainda, na caracterização do ambiente, considerou-se que o mesmo era dinâmico e parcialmente observável, o que permite concluir que a arquitetura reativa implementada não é a mais adequada para o problema proposto, visto que não consegue reagir a situações inesperadas.

Na segunda parte do projeto, foi desenvolvido um agente reativo em *python* com módulos comportamentais para recolher alvos e evitar obstáculos num ambiente virtual com dimensões fixas. O agente foi implementado com uma arquitetura reativa simples (i.e., sem memória), onde um comportamento composto (que englobava os subcomportamentos: aproximar alvo, evitar obstáculo, explorar) foi integrado no módulo de controlo. Este módulo comportamental ficou responsável por processar a informação sensorial do agente e escolher a ação a executar com base nessa informação. Esta integração permitiu a escolha da ação a executar com base num mecanismo de seleção de ação, mais concretamente, por hierarquia fixa de prioridade. Com esta arquitetura observou-se, através da interface gráfica da biblioteca SAE, que o agente conseguia atingir os objetivos propostos, mas não de forma ótima (i.e., o caminho mais rápido para recolher todos os alvos, evitando os obstáculos, não era seguido).

Após análise dos resultados obtidos, concluiu-se que nenhum dos agentes implementados pode ser considerado um agente relacional (ver secção 2.3), uma vez que não conseguem realizar as ações corretas de forma ótima, apenas conseguem atingir os objetivos propostos. Visto que ambas as arquiteturas implementadas são arquiteturas reativas, a resposta pode estar nas arquiteturas deliberativas e híbridas (ver secção 2.4), que não foram abordadas neste projeto.

Referências

- [1] Luis Morgado. Inteligência Artificial - Introdução, 2024. [Online; accessed April 16, 2024].
- [2] Luis Morgado. Introdução à Engenharia de Software - Parte 1, 2024. [Online; accessed April 17, 2024].
- [3] LEIC - Departamento de Engenharia Informática, Instituto Superior Técnico. Agentes - Resumos LEIC, 2024. [Online; accessed April 16, 2024].
- [4] Luis Morgado. Introdução à Engenharia de Software - Parte 2, 2024. [Online; accessed April 17, 2024].
- [5] Luis Morgado. Introdução à Engenharia de Software - Parte 3, 2024. [Online; accessed April 23, 2024].
- [6] Wikipedia contributors. Finite-state machine, 2024. Online; accessed April 23, 2024.
- [7] Eddie Jaoude. State Machines: Basics of Computer Science. *freeCodeCamp.org*, 2019. [Online; accessed April 23, 2024].
- [8] Luis Morgado. Arquitetura de Agentes Reativos - Parte 2, 2024. [Online; accessed April 24, 2024].
- [9] Luis Morgado. Arquitetura de Agentes Reativos - Parte 1, 2024. [Online; accessed April 23, 2024].
- [10] Luis Morgado. Arquitetura de Agentes Reativos - Parte 3, 2024. [Online; accessed April 24, 2024].
- [11] Luis Morgado. Simulador de Ambiente de Execução - Documentação, 2024. [Online; accessed April 24, 2024].
- [12] Luis Morgado. Raciocínio Automático, 2024. [Online; accessed May 5, 2024].
- [13] Stanford University. Functional Programming, 2024. [Online; accessed May 5, 2024].

- [14] Luis Morgado. Procura em Espaço de Estados - Parte 1, 2024. [Online; accessed May 5, 2024].
- [15] LEIC - Departamento de Engenharia Informática, Instituto Superior Técnico. Procura Cega - Resumos LEIC, 2024. [Online; accessed May 5, 2024].
- [16] Luis Morgado. Procura em Espaço de Estados - Parte 2, 2024. [Online; accessed May 8, 2024].