



# Relatório de Projeto

## Inteligência Artificial para Sistemas Autónomos

Licenciatura em Engenharia Informática e de Computadores

Autores: **Arthur Morgan, Nathan Drake, Joel Miller e Cloud Strife**  
ISEL IDs: **35612, 35613, 35614 e 35615**  
Professor: **Phd Geralt of Rivia**  
Ano académico: **2023/2024**

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
1.1	Nome da secção deste capítulo . . . . .	2
1.2	A segunda secção deste capítulo . . . . .	2
1.2.1	A primeira sub-secção desta secção . . . . .	3
1.2.2	A segunda sub-secção desta secção . . . . .	3
1.3	Organização do documento . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Enquadramento Téorico</b>	<b>4</b>
2.1	Agente Inteligente . . . . .	4
2.2	Ambiente . . . . .	5
2.3	Agente Relacional . . . . .	6
2.4	Arquiteturas de Agente . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Projeto - Parte 1</b>	<b>8</b>
3.1	Arquitetura de software . . . . .	8
3.1.1	Métricas . . . . .	8
3.1.2	Princípios . . . . .	9
3.2	Processo de Desenvolvimento de Software . . . . .	9
3.2.1	Tipos de Implementação . . . . .	10
3.3	Desenvolvimento do Jogo . . . . .	10
3.4	Estrutura do Projeto . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Projecto - Parte 2</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Projecto - Parte 3</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Projecto - Parte 4</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Revisão do Projeto</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Conclusão</b>	<b>17</b>
	<b>Referências</b>	<b>18</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Este é o início do capítulo. Exemplo de indentação do segundo parágrafo.

### 1.1 Nome da secção deste capítulo

Texto da secção. Na figura 1.1 mostra-se o logótipo do ISEL. Em [1] encontra várias referências para o assunto. O artigo [2] é o mais popular conforme indicação do IEEE. Logo a seguir aparece [3]. A identificação das referências deve ser melhorada.



Figura 1.1: Legenda da figura com o logótipo do ISEL.

Continuação do texto depois do parágrafo que refere a figura.

### 1.2 A segunda secção deste capítulo

Na segunda secção deste capítulo, vamos abordar o enquadramento, o contexto e as funcionalidades.

### **1.2.1 A primeira sub-secção desta secção**

As sub-secções são úteis para mostrar determinados conteúdos de forma organizada. Contudo, o seu uso excessivo também não contribui para a facilidade de leitura do documento.

### **1.2.2 A segunda sub-secção desta secção**

Esta é a segunda sub-secção desta secção, a qual termina aqui.

## **1.3 Organização do documento**

O restante relatório encontra-se organizado da seguinte forma.

## 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 e as condições do ambiente). 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.

### 2.1 Agente Inteligente

O modelo de um sistema inteligente é uma abstracção que permite representar a interacção de um sistema com o seu ambiente. Este implementa um ciclo realimentado percepção-processamento-acção (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).

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;
- **Pro-actividade:** capacidade de tomar a iniciativa em função dos seus objetivos;
- **Sociabilidade:** capacidade de interagir com outros agentes em prol de atingir os seus objetivos, individuais ou coletivos;

- **Finalidade:** propósito que o agente deve atingir e ao qual todas as suas características contribuem para a sua concretização.

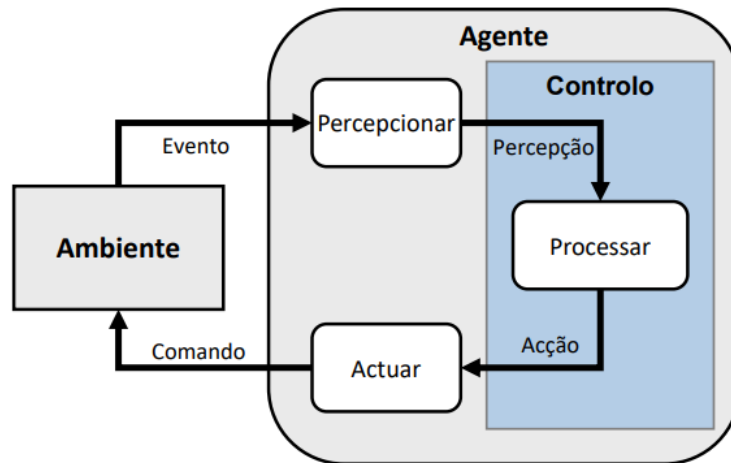


Figura 2.1: Representação conceptual da relação entre agente e ambiente.

## 2.2 Ambiente

O espaço onde um agente opera é designado por ambiente. É caracterizado (ver figura 2.2) pelas seguintes propriedades:

- **Físico vs. Virtual:** Um ambiente pode existir fisicamente (e.g., uma sala de aula) ou ser simulado de forma virtual (e.g., um jogo de computador);
- **Totalmente Observável vs. Parcialmente Observável:** Um ambiente é totalmente observável se o agente tem acesso a uma descrição completa do ambiente, 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 actual e pela acção 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 acções 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.

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 [4].

## 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 e a forma como estes interagem entre si. Um dos componentes de um agente é o módulo de controlo,

que é responsável por processar percepções e gerar ações. A forma como este módulo é implementado determina o modelo de arquitetura do agente, que pode ser:

- **Reativo:** Associado a um paradigma comportamental, é caracterizado por associações diretas entre percepções e ações. A finalidade deste modelo é a concretização de objetivos implícitos, presentes nas associações estímulo-resposta;
- **Deliberativo:** Associado a um paradigma simbólico, é caracterizado pela existência de um módulo de deliberação que se situa entre a percepção 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) e outros conceitos relacionados (e.g., máquina de estados).

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 (ver secção3.1.1) e princípios (ver secção3.1.2)) que garantem a qualidade da arquitetura.

Associado à elaboração da arquitetura de software, foi necessário definir um processo de desenvolvimento de software (ver secção3.2) que permitisse a implementação dos diferentes subsistemas de forma progressiva, através de diferentes níveis de abstracção (i.e., modelo, arquitetura e implementação).

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 e a sua interação.

### 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 arquitectura de um software indicadoras da qualidade dessa arquitectura;

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;

- **Ordem:** (de menos acoplamento para mais) Herança → Composição → Agregação → Associação → Dependência.

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).

### 3.1.2 Princípios

Os princípios no contexto da arquitectura de software são um conjunto de convenções que orientam a sua definição, garantindo a qualidade de produção da mesma. 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 arquitectura 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 abstracção:

- **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. Essa alternância poderá ser circular (i.e., implementação → arquitectura → modelo → implementação).

### 3.2.1 Tipos de Implementação

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	Sequence Diagram	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 atividades 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).

Já a linguagem de modelação unificada (UML) 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.

## 3.3 Desenvolvimento do Jogo

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

- **Personagem:** Representa o agente do jogo;
- **Ambiente:** Representa o ambiente onde a Personagem opera;
- **Máquina de Estados:** Representa a máquina de estados associada ao controlo da Personagem. Ver figura 3.1.

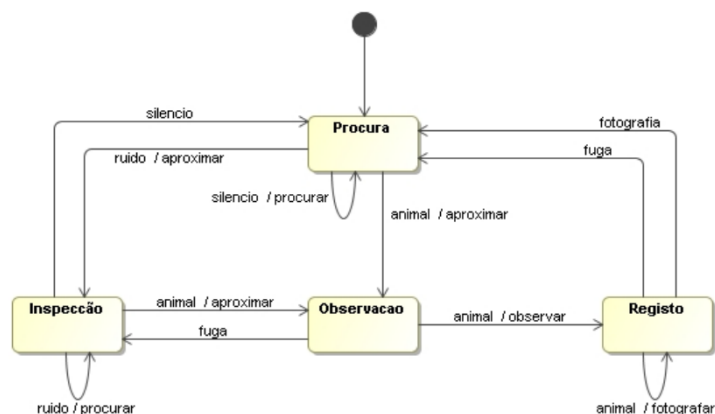


Figura 3.1: Máquina de estados associada ao controlo da Personagem.

O jogo consiste num ambiente onde a personagem tem por objectivo registar a presença de animais através de fotografias. O ambiente deste jogo, pode ser caracterizado (ver secção2.2) por ser:

- **Virtual:** O ambiente é simulado e não existe fisicamente;
- **Totalmente Observável:** 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;
- **De agente único:** Apenas existe um agente a atuar, neste caso, uma Personagem;
- **Determinístico:** O estado seguinte é unicamente determinado pelo estado actual e pela acção do agente;
- **Sequencial:** Pois existe uma linha de acontecimentos que se sucedem (e.g., não é possível inspeccionar, registar ou observar algo sem ser feita primeiro uma procura);
- **Estático:** Não se altera enquanto o agente está a tomar uma decisão;
- **Discreto:** O número de estados possíveis é finito.

Foi criada uma aplicação3.2 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.

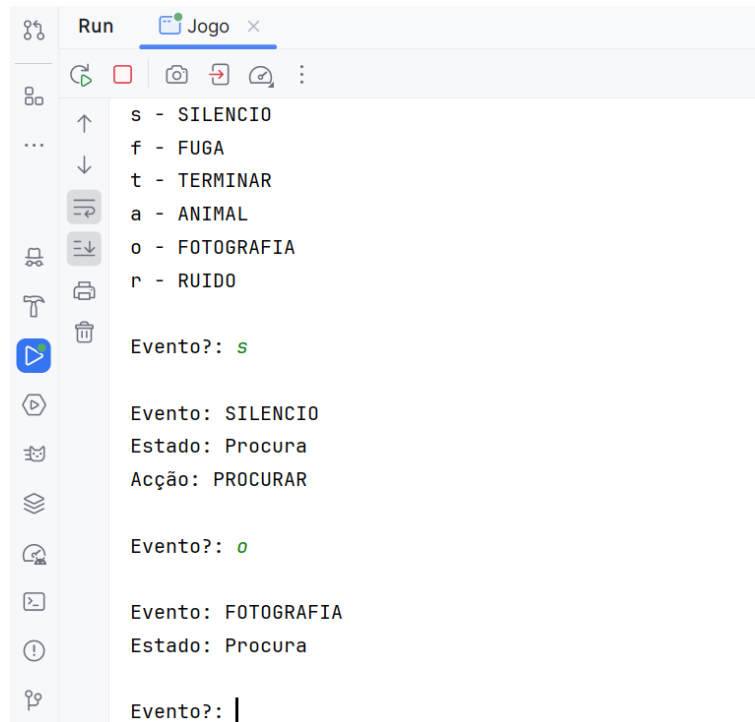


Figura 3.2: Utilização da aplicação do jogo.

### 3.4 Estrutura do Projeto

No processo de desenvolvimento de software associado a este 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

# Projecto - Parte 2

Este é o capítulo de testes. É possível forçar a inclusão de todas as referências com [].

Modo de matemática em texto  $x = ma^2$  e em equação (duas formas):

$$x = ma^2$$

$$x = ma^2 \tag{4.1}$$

## Capítulo 5

# Projecto - Parte 3

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 6

# Projecto - 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

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.

# Referências

- [1] Wikipedia contributors. Big data — Wikipedia, the free encyclopedia, 2019. [Online; accessed 28-February-2019].
- [2] Xindong Wu, Xingquan Zhu, Gong-Qing Wu, and Wei Ding. Data mining with big data. *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, 26(1):97–107, Jan 2014.
- [3] J.G. Andrews, S. Buzzi, Wan Choi, S.V. Hanly, A. Lozano, A.C.K. Soong, and J.C. Zhang. What will 5g be? *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 32(6):1065–1082, June 2014.
- [4] LEIC - Departamento de Engenharia Informática, Instituto Superior Técnico. Agentes - Resumos LEIC, 2024. [Online; accessed April 16, 2024].
- [5] John von Neumann. *The Computer and the Brain*. Yale University Press, New Haven, CT, USA, 1958.
- [6] Brian W. Kernighan and P. J. Plauger. *The Elements of Programming Style*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 2nd edition, 1982.
- [7] Leonid Boytsov. Indexing methods for approximate dictionary searching: Comparative analysis. *J. Exp. Algorithmics*, 16:1.1:1.1–1.1:1.91, May 2011.
- [8] Tomasz Jurkiewicz and Kurt Mehlhorn. On a model of virtual address translation. *J. Exp. Algorithmics*, 19:1.9:1.1–1.9:1.28, January 2015.