UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Silas Franco dos Reis Alves

**Arquitetura de Controle Inteligente
para Interação Humano-Robô**

São Carlos
2016

Silas Franco dos Reis Alves

**Arquitetura de Controle Inteligente
para Interação Humano-Robô**

Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Dinâmicos

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2016

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

R375a   Reis-Alves, Silas Franco dos
Arquitetura de Controle Inteligente para Interação
Humano-Robô / Silas Franco dos Reis-Alves; orientador
Ivan Nunes da Silva. São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2016.

1. Arquitetura de Controle. 2. Interação
Humano-Robô. 3. Robótica Móvel. 4. Sistemas
Inteligentes. 5. Robótica Assistiva. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **SILAS FRANCO DOS REIS ALVES**.

Título da tese: "Arquitetura de controle inteligente para interação humano-robô".

Data da defesa: 01/04/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Ricardo Ribeiro Gudwin**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Titular **Alberto Cliquet Junior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Teodiano Freire Bastos Filho**
(Universidade Federal do Espírito Santo/UFES)

APROVADO

Profa. Titular **Roseli Aparecida Francelin Romero**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

*À minha avó, Josephina, que ao me ensinar a ler,
escrever, e a tabuada, me ensinou, também, o seu
amor pelo Ensino e o Saber.*

Agradecimentos

No desenvolvimento desta tese, contei com o apoio direto e indireto de diversas pessoas, sem as quais não a teria completado. Assim, agradeço:

À minha família, que me acompanhou na tormenta e na bonança, me incentivando e apoiando em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva e Prof. Dr. Humberto Ferasoli Filho, educadores exemplares, pela dedicação e amizade, e por terem me orientado e indicado o caminho a trilhar.

Ao Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho que, sempre solícito e dedicado, me acolheu em seu Grupo de Pesquisa e tornou possível minha visita técnica na UFES.

Ao Prof. Dr. René Pegoraro, Prof. Dr. Marco Caldeira, e Prof. Dr. Alvaro Uribe Quevedo pela amizade, ajuda e incentivo durante o desenvolvimento do trabalho.

A todos os colegas de laboratório do LAIPS/USP, GISDI/UNESP e LAI/UFES, em especial: Prof. Dr. Danilo Spatti, Takao Matsumura, Azael Sousa, Celso Lisboa, Carlos Valadão, Christiane Goulart, Flávia Loterio, Anibal Cotrina.

Aos meus colegas de república, Laura Valencia, Ana Cecília Villa, Astrid Benavides e Hamilton Rivera, que me acolheram e compartilharam minha estadia em Vitória.

Aos professores e servidores da USP/São Carlos, UNESP/Bauru, UFES/Vitória, em especial: Marisa Fortulan, Sérgio Komori e Isméria Rosa.

Ao RASC (Rede de Assistência Sócioeducacional Cristã) e à AFAPAB (Associação de Familiares e Amigos de Portadores de Autismo de Bauru) por terem viabilizado a execução do teste piloto deste trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora, Prof. Dr. Alberto Cliquet Júnior, Prof. Dr. Ricardo Ribeiro Gudwin, Prof.^a Dr.^a Roseli Aparecida Francelin Romero, e Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho, pela valiosa contribuição para o aperfeiçoamento deste trabalho.

À FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio financeiro concedido (Processos 2012/12050-0 e 2011/17610-0), sem o qual a realização deste trabalho não seria possível.

Aos meus cães e gatos de estimação, em especial meu gato Tigrão “Juaquim”, que passou várias noites em claro ao meu lado.

À Freepik pelos pictogramas fornecidos e a Kevin MacLeod pelas músicas.

E, finalmente, a todas as pessoas que, apesar de não explicitamente citadas, contribuíram durante a minha caminhada até aqui.

*É que ninguém caminha sem aprender a caminhar,
sem aprender a fazer o caminho caminhando, sem
aprender a refazer, a retocar o sonho por causa do
qual a gente se pôs a caminhar.*

Paulo Freire (Pedagogia da Esperança, 1997)

Resumo

REIS-ALVES, S. F. **Arquitetura de Controle Inteligente para Interação Humano-Robô**. 2016. 131 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Supondo-se que os robôs coexistirão conosco num futuro próximo, é então evidente a necessidade de Arquiteturas de Controle Inteligentes voltadas para a Interação Humano-Robô. Portanto, este trabalho desenvolveu uma Organização de Arquitetura de Controle Inteligente comportamental, cujo objetivo principal é permitir que o robô interaja com as pessoas de maneira intuitiva e que motive a colaboração entre pessoas e robôs. Para isso, um módulo emocional sintético, embasado na teoria bidimensional de emoções, foi integrado para promover a adaptação dos comportamentos do robô, implementados por Esquemas Motores, e a comunicação de seu estado interno de modo inteligível. Esta Organização subsidiou a implantação da Arquitetura de Controle em uma aplicação voltada para a área assistencial da saúde, consistindo, destarte, em um estudo de caso em robótica social assistiva como ferramenta auxiliar para educação especial. Os experimentos realizados demonstraram que a arquitetura de controle desenvolvida é capaz de atender aos requisitos da aplicação, conforme estipulado pelos especialistas consultados. Isto posto, esta tese contribui com o projeto de uma arquitetura de controle capaz de agir mediante a avaliação subjetiva baseada em crenças cognitivas das emoções, o desenvolvimento de um robô móvel de baixo-custo, e a elaboração do estudo de caso em educação especial.

Palavras-chave: Arquitetura de Controle; Interação Humano-Robô; Robótica Móvel; Sistemas Inteligentes; Robótica Assistiva.

Abstract

REIS-ALVES, S. F. **Control Architecture for Human-Robot Interaction**. 2016. 131 p. Thesis (Doctorate) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Assuming that robots will coexist with humans in the near future, it is conspicuous the need of Intelligent Control Architectures suitable for Human-Robot Interaction. Henceforth, this research has developed a behavioral Control Architecture Organization, whose main purpose is to allow the intuitive interaction of robot and people, thus fostering the collaboration between them. To this end, a synthetic emotional module, based on the Circumplex emotion theory, promoted the adaptation of the robot behaviors, implemented using Motor Schema theory, and the communication of its internal state. This Organization supported the adoption of the Control Architecture into an assistive application, which consists of the case study of assistive social robots as an auxiliary tool for special education. The experiments have demonstrated that the developed control architecture was able to meet the requirements of the application, which were conceived according to the opinion of the consulted experts. Thereafter, this thesis contributes with the design of a control architecture that is able to act upon the subjective evaluation based on cognitive beliefs of emotions, the development of a low-cost mobile robot, and the development of the case study in special education.

Keywords: Control Architecture; Human-Robot Interaction; Mobile Robotics; Intelligent Systems; Assistive Robotics.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Gata “Tiquinha”, um exemplo de animal de estimação autônomo, tomando suas próprias decisões enquanto seu “dono” (ou usuário) não fornece algum comando.....	31
Figura 2.1 – Paradigmas das arquiteturas de controle para robôs móveis: (a) Hierárquico; (b) Comportamental; e (c) Híbrido.	42
Figura 2.2 – Arquitetura CAST, adaptada de (KOSUGE et al., 2003).....	43
Figura 2.3 – Arquitetura de Controle do Kismet (BREAZEAL, 1998).	44
Figura 2.4 – Arquitetura de controle proposta por (MURPHY, R.R. et al., 2002), mostrando a relação entre o GEC, o GEE, e o mensurador de progresso da tarefa.	45
Figura 2.5 – Arquitetura de controle baseada em emoções proposta por Hirth, Braun e Berns (HIRTH, Jochen et al., 2007).....	46
Figura 2.6 – Arquitetura de controle baseada em emoções UKL (HIRTH, Jochen et al., 2011).	47
Figura 2.7 – Arquitetura de controle desenvolvida.....	52
Figura 2.8 – Modelo de memória modal, adaptado de (GAZZANIGA et al., 2012, cap. 7).....	53
Figura 2.9 – Diagramas representando (a) o Modelo circunflexo, adaptado de (RUSSELL, 1980), e (b) o modelo adotado neste trabalho (b), especificado pela Tabela 2.2..	57
Figura 2.10 – Integração dos comportamentos por meio de soma, que se assemelha a um Perceptron.....	59
Figura 2.11 – Necessidades do robô móvel.	61
Figura 3.1 – Robô MARIA durante uma seção de terapia com uma criança com TEA, modificado de (GOULART, Christiane Mara, 2015).....	65
Figura 3.2 – Robô Pomodoro com o celular e sem a “roupa” protetora (a), e com a roupa protetora (b).	70
Figura 3.3 – Modelo cinemático de um robô móvel de tração diferencial.....	71
Figura 3.4 – Arquitetura de hardware do robô Pomodoro.	72
Figura 3.5 – Diagrama de caso de uso do sistema de informação.	76
Figura 3.6 – Diagrama de caso de uso do sistema proposto.	76
Figura 3.7 – Diagrama de implantação do sistema completo, englobando o sistema de informação e o sistema robótico.	77
Figura 3.8 – Captura de tela (screenshot) do Servidor do robô.....	79

Figura 3.9 – Robô Pomodoro com a “cabeça”, isto é, o <i>smartphone</i> exibindo duas expressões: (a) alegria e (b) surpresa.	80
Figura 3.10 – Captura de tela (<i>screenshot</i>) da tela do Servidor de visão.	82
Figura 3.11 – Diagrama de máquina de estados do comportamento <i>Chamar atenção</i>	87
Figura 3.12 – Diagrama de máquina de estados do comportamento <i>Jogo de cartões</i>	87
Figura 3.13 – Elementos utilizados na atividade lúdica <i>Jogo de cartões</i> , mostrando (a) os cartões utilizados e (b) o robô Pomodoro exibindo o cartão em sua face.	88
Figura 3.14 – Diagrama de máquina de estados do comportamento <i>Jogo de dança</i>	88
Figura 3.15 – Diagrama de máquina de estados do comportamento <i>Toque</i>	89
Figura 3.16 – Diagrama de máquina de estados do comportamento <i>Buscar pessoa</i>	89
Figura 3.17 – Diagrama dos esquemas motores <i>Chamar pessoa</i> (<i>Call person</i>), <i>Parabenizar</i> (<i>Congratulate</i>), <i>Incentivar</i> (<i>Incentivate</i>) e <i>Pedir toque</i> (<i>Ask for touch</i>).	92
Figura 3.18 – Diagrama do esquema motor <i>Pedir cartão</i> (<i>Ask for card</i>).	92
Figura 3.19 – Diagrama do esquema motor <i>Dormir</i> (<i>Sleep</i>).	92
Figura 3.20 – Diagrama do esquema motor <i>Passear</i> (<i>Wander</i>).	93
Figura 3.21 – Diagrama do esquema motor <i>Dança</i> (<i>Dance</i>).	93
Figura 3.22 – Diagrama do esquema motor <i>Evitar perigo</i> (<i>Avoid danger</i>).	94
Figura 3.23 – Estrutura básica dos controladores de olhar social.	94
Figura 3.24 – Página principal do sistema de informação.	96
Figura 3.25 – Parte da interface usada para gerenciar os pacientes cadastrados.	97
Figura 3.26 – Tela de cadastramento de paciente.	97
Figura 3.27 – Tela do sistema durante a sessão de terapia.	98
Figura 4.1 – Voluntário participando da atividade lúdica <i>Jogo de cartões</i>	100
Figura 4.2 – Vista superior do experimento, representando a (a) posição inicial e (b) posição final do <i>smartphone</i> em relação à cabeça do usuário.	102
Figura 4.3 – Gráficos mostrando a variação dos erros nos eixos <i>X</i> e <i>Y</i> do controlador de olhar social.	102
Figura 4.4 – Retratos do Experimento 1, mostrando o robô: (a) em sua posição inicial, onde aciona o comportamento buscar pessoa; (b), (f), (j) olhando para a esquerda e (c), (g), (k) direita, em busca de um rosto; (d), (h) se movendo para uma (e), (i) nova posição; (l) com o comportamento dormir ativado para reestabelecer seu humor; (m) com seu humor estabilizado.	104
Figura 4.5 – Gráfico composto do Experimento 1.	105
Figura 4.6 – Retratos do Experimento 2, onde: (a) o robô aciona o comportamento buscar pessoa; (b) o robô exibe emoção neutra e, depois, (c) feliz; (d) o robô inicia o comportamento jogo de cartões e solicita o cartão “abacaxi”; (e) o voluntário	

mostra o cartão “abacaxi” para o robô; (f) o robô parabeniza o voluntário; (g) o robô continua o jogo de cartões solicitando o cartão maçã; (h) o robô solicita o cartão “pera”, mas o voluntário responde intencionalmente com o cartão errado; (i) o robô incentiva o voluntário a continuar jogando, apesar do erro; (j) o voluntário continua a responder com os cartões errados; (k) conforme o voluntário erra, o humor do robô torna-se neutro e, depois, (l) triste; (m) quando o voluntário volta a responder corretamente, o humor do robô volta a ser neutro e, depois, (n) excitado; (o) o robô executa o comportamento toque; (p) o voluntário sai do campo de visão do robô, que continua solicitando o toque; (q) o voluntário volta ao seu lugar e o robô ajusta a posição de sua “cabeça”, em decorrência de seu olhar social; (r) o robô executa novamente o comportamento toque; (s) o voluntário sai do campo de visão do robô, que inicia o comportamento buscar pessoa e começa a (t) olhar para os lados.....107

Figura 4.7 – Gráfico do Experimento 2.....	108
Figura 4.8 – Participação de DT1 na sessão experimental.....	110
Figura 4.9 – Participação de DT2 (a) na sessão experimental e (b) brincando com o robô como se fosse um carrinho de brinquedo.	111
Figura 4.10 – Participação de DT3 na sessão experimental.....	111
Figura 4.11 – Participação de DT4 na sessão experimental.....	112
Figura 4.12 – Participação de DT5 na sessão experimental.....	112
Figura 4.13 – Participação de TEA1 na sessão experimental.....	113
Figura 4.14 – No início da sessão experimental, (a) TEA2 demonstrava aversão ao robô. Depois de interagir com o apoio da técnica, (b) TEA2 passou a interagir normalmente com o robô.....	114
Figura 4.15 – Participação de TEA3 na sessão experimental.....	114
Figura 4.16 – Participação de TEA4 na sessão experimental.....	115

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Principais atributos e ressalvas das arquiteturas de controle e BICA afetivas.	51
Tabela 2.2 – Classificação das emoções.....	58
Tabela 3.1 – Estudo de caso analisado conforme os cinco atributos da IHR apresentados pela Seção 2.2.	67
Tabela 3.2 – Adequação da aplicação proposta ao código de ética apresentado pela Seção 2.1.	68
Tabela 3.3 – Sensores e atuadores do robô Pomodoro.....	70
Tabela 3.4 – Relação das emoções e seus pictogramas e cores respectivas.	74
Tabela 3.5 – Chaves mantidas pelo servidor do robô.	80
Tabela 3.6 – Chaves mantidas pelo servidor da “cabeça” do robô (<i>smartphone</i>).	81
Tabela 3.7 – Chaves mantidas pelo servidor de visão computacional.....	82
Tabela 3.8 – Chaves mantidas pelo <i>Control Server</i>	83
Tabela 3.9 – Emoções “despertadas” por cada transição de comportamento.....	90
Tabela 3.10 – Emoções despertadas pelos esquemas motores.	91
Tabela 3.11 – Função do operador Σ para cada tipo de dado.	91
Tabela 3.12 – Chaves com os parâmetros de configuração do robô.....	95
Tabela 3.13 – Chaves usadas pelo sistema de informação.	96
Tabela 4.1 – Valores da magnitude e emoção de cada transição.....	101

Lista de Algoritmos

Algoritmo 3.1 – Algoritmo principal do deliberante.	84
Algoritmo 3.2 – Algoritmo referente ao nível 0 da pirâmide de prioridades.....	84
Algoritmo 3.3 – Algoritmo referente ao nível 1 da pirâmide de prioridades.....	85
Algoritmo 3.4 – Algoritmo referente ao nível 2 da pirâmide de prioridades.....	86

Lista de Siglas

ADREAM	Arquiteturas Dinâmicas Reconfiguráveis para Sistemas Embarcados Autônomos Móveis
AFAPAB	Associação de Familiares e Amigos de Portadores de Autismo de Bauru
AGV	<i>Autonomous Guided Vehicle</i>
AMAES	Associação dos Amigos do Autismo do Espírito Santo
AMOLED	<i>Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode</i>
BD	Banco de Dados
CAST	<i>Control Architecture based on Step Transition</i>
CC	Corrente contínua
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CNRS	Centro Nacional de Pesquisa Científica
GEC	Gerador de estado de comportamentos
GEE	Gerador de estado emocional
GISDI	Grupo de Integração de Sistemas e Dispositivos Inteligentes
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HTML5	<i>Hypertext Markup Language, version 5</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IA	Inteligência Artificial
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IHR	Interação Humano-Robô
IrDA	<i>Infrared Data Association</i>
LAAS	Laboratório de Análise de Arquitetura de Sistemas
LAI	Laboratório de Automação Industrial
LCD	Liquid Crystal Display
MARIA	<i>Mobile Autonomous Robot for Interaction with Autistics</i>
NASREM	<i>NASA/NBS Standard Reference Model</i>
NFC	<i>Near Field Communication</i>
NoSQL	<i>Not Only Structured Query Language</i>
OpenCV	<i>Open Computer Vision</i>
PHP	PHP: <i>Hypertext Preprocessor</i> (acônimo recursivo)
PLN	Processamento de Linguagem Natural
QR	<i>Quick Response</i>

RASC	Rede de Assistência Sócioeducacional Cristã
TCA	<i>Task Control Architecture</i>
TEA	Transtorno do Espectro Autista
TTL	<i>Time To Live</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UKL	<i>University of Kaiserslautern</i>
UML	<i>Unified Modelling Language</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
USP	Universidade de São Paulo
VGA	<i>Video Graphics Array</i>
XAMPP	X (letra que representa um sistema operacional qualquer), Apache, MariaDB, PHP, Perl
ZXing	<i>Zebra Crossing</i>

Sumário

1	Introdução	29
1.1	Justificativa e Motivação.....	31
1.2	Objetivos	33
1.3	Organização da Tese	33
2	Arquitetura de Controle Inteligente	35
2.1	Ética para Robôs.....	36
2.2	Interação Humano-Robô.....	38
2.3	Arquiteturas de Controle	41
2.4	Arquiteturas Cognitivas Biologicamente Inspiradas	47
2.5	Organizando a Arquitetura de Controle	50
2.5.1	Espaço de Memória.....	52
2.5.2	Interfaces para hardware.....	55
2.5.3	Processadores de dados.....	55
2.5.4	Controlador.....	56
2.5.5	Emoções	56
2.5.6	Comportamentos.....	58
2.5.7	Deliberante.....	60
3	Estudo de Caso em Robótica Social Assistiva	63
3.1	Contextualização.....	64
3.2	Robô Pomodoro.....	68
3.2.1	Modelo Cinemático	70
3.2.2	Arquitetura de Hardware	71
3.2.3	Expressões faciais.....	74
3.3	Modelagem do Sistema de Software.....	75
3.4	Espaço de Memória	78
3.5	Interfaces para Hardware	79
3.5.1	Robô.....	79
3.5.2	Cabeça do robô	80
3.6	Processador de Dados: Visão Computacional	82
3.7	Controlador.....	83
3.7.1	Deliberante.....	83
3.7.2	Comportamentos.....	86

3.7.3	Esquemas Motores.....	90
3.8	Sistema de Informação.....	95
4	Experimentos e Resultados.....	99
4.1	Experimentos em Laboratório.....	100
4.1.1	Olhar social.....	101
4.1.2	Experimento 1.....	103
4.1.3	Experimento 2.....	103
4.2	Teste Piloto.....	109
4.2.1	RASC.....	109
4.2.2	AFAPAB.....	113
4.3	Discussão sobre os resultados.....	115
5	Conclusão.....	117
5.1	Considerações Finais e Contribuições.....	117
5.2	Discussão e Trabalhos Futuros.....	121
	Referências Bibliográficas.....	123
	APÊNDICE A – Publicações.....	133
	APÊNDICE B – Vídeos.....	137
	APÊNDICE C – Peças do Robô Pomodoro.....	139
	APÊNDICE D – Diagrama de Circuito.....	147

1 INTRODUÇÃO

“(...) palavra puxa palavra, uma ideia traz outra, e assim se faz um livro, um governo, ou uma revolução; alguns dizem mesmo que assim é que a natureza compôs as suas espécies.”

Machado de Assis (Primas de Sapucaia!, 1884)

Durante toda sua existência, a humanidade sempre buscou adaptar o ambiente às suas necessidades. Em um passado remoto, nossos ancestrais desenvolveram ferramentas rústicas manuais. Conforme as eras passavam e o conhecimento humano se expandia, as ferramentas primitivas foram aprimoradas e novos inventos eram criados. Os artefatos, que outrora eram acionados pela força bruta dos homens e outros animais, incorporaram estruturas mecânicas que minimizavam o esforço e, mais tarde, substituíram a força animal por outras fontes de energia, como as correntezas dos rios, o fluxo do vento, a pressão do vapor, e a eletricidade. Esse curto resumo da evolução humana demonstra o anseio das pessoas por sistemas autônomos, capazes de realizar trabalho sem interferência humana. Dentre os vários sistemas autônomos idealizados, talvez o mais esperado seja uma criatura com inteligência e habilidade semelhantes às de um ser humano. Uma criatura capaz de perceber e entender o mundo, de receber e executar ordens, de ouvir e falar. Uma criatura capaz de interagir seguramente dentro de nossa sociedade, como um ser vivo. Essa criatura onírica, que desde os tempos mais remotos tem habitado o imaginário humano, se materializa hoje na máquina à qual damos o nome de “robô” – nome este que sela seu destino de servidão. Cunhado por Karel Čapek em sua peça R.U.R. (*Rossum's Universal Robots*), de 1920, o nome é oriundo do termo tcheco “*robota*”, que significa “trabalhador forçado”.

Várias obras artísticas, da literatura à sétima arte, retratam robôs¹ pluriformes que convivem na sociedade humana, servindo-a com suas habilidades por vezes sobre-humanas. No entanto, fora do irrestrito território que é a imaginação dos artistas, os robôs constituem-se de máquinas mais simples, com capacidades por muito inferiores às de seus pares imaginários. No contexto atual, a ciência e a tecnologia Robótica não permitem a construção de um robô tão sofisticado. Ainda assim, as várias pesquisas em Robótica

---

¹ É importante ressaltar que o termo “robô” é usado aqui como sinônimo para “robô móvel”, não para “braço robótico” ou “robôs manipuladores”, cuja definição e desafios são de diferente natureza.

apontam para robôs com um conjunto de oito qualidades semelhantes, que podem ser consideradas essenciais para qualquer projeto robótico.

Existir no mundo real é a primeira qualidade de qualquer robô, pois robôs virtuais (simulados) não compartilham da complexidade do mundo real e sequer são capazes de realizar uma tarefa real. Obviamente, a simulação rigorosa permite a solução de problemas antes que o robô real seja montado, sendo uma etapa importante dentro do projeto de um robô móvel. Contudo, é a materialidade do corpo que define a existência do robô.

Existir, entretanto, não é o suficiente para o robô. Ele também deve ser capaz de *perceber o mundo* por meio dos seus “sentidos”, que são fornecidos pelos seus vários sensores, e de *agir sobre o mundo* com seu “corpo”, que é acionado pelos diversos atuadores que o compõem. Caso contrário, o robô não poderá prestar-se a qualquer tarefa.

Em se tratando de tarefas, *navegar pelo mundo* é a tarefa mais elementar que um robô deve desempenhar e, paradoxalmente, é também uma das mais complexas. Mesmo hoje, a navegação de robôs é tida como um problema aberto, apesar de diversas técnicas terem sido desenvolvidas para este fim. Esta arduidade deve-se à necessidade do robô de *entender o mundo*, pelo menos até determinado grau cognitivo, para *interagir com o mundo* com o intuito de *cumprir seu objetivo*.

Como se já não bastasse os desafios acima postulados, o robô ainda deve enfrentá-los autonomamente, sem a interferência humana. A *autonomia* de um robô é o que o torna diferente de todas as máquinas já fabricadas pela imaginação humana, pois se espera que ele seja capaz de compreender o mundo e tomar suas ações por si só, sem ser operado por uma pessoa. Para isso, diferentes *Arquiteturas de Controle* foram propostas com o fim de orquestrar cada componente do robô de forma harmoniosa e autônoma. No entanto, a presença da autonomia não implica necessariamente na ausência de pessoas. Pelo contrário, um robô com alta autonomia deve ser capaz de se relacionar com as pessoas como se fosse uma delas. Por essa razão, a *Interação Humano-Robô* (IHR) estuda os mecanismos que o robô deve possuir para que possa comunicar-se de forma engajadora, significativa e eficiente.

Os avanços das áreas de pesquisa que tratam de cada uma dessas qualidades postuladas definem o cenário atual da Robótica, no qual também se insere esta Tese de Doutorado. Pressupondo como verdadeira a afirmação de que os robôs coexistirão conosco num futuro próximo, é evidente a necessidade de *Arquiteturas de Controle Inteligentes* com capacidades de *Interação Humano-Robô*. Motivado, portanto, pela vasta aplicabilidade da Robótica e pela necessidade de *Arquiteturas de Controle* voltadas à IHR, este trabalho desenvolveu uma *Organização de Arquitetura de Controle Inteligente*, dentro dos paradigmas já existentes, inspirada em modelos naturais cujo objetivo principal é permitir que o robô

interaja com as pessoas de forma intuitiva e que motive a colaboração entre pessoas e robôs. Esta arquitetura tem o propósito de permitir que o robô: se comunique com uma pessoa, ou usuário; receba comandos referentes a uma tarefa; opere de forma segura para cumprir sua missão; e tome decisões mesmo sem a solicitação do usuário, como se estivesse imitando o comportamento de um animal de estimação, como exemplificado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Gata “Tiquinha”, um exemplo de animal de estimação autônomo, tomando suas próprias decisões enquanto seu “dono” (ou usuário) não fornece algum comando.

Balizado, portanto, pela organização desenvolvida, a arquitetura de controle foi implantada em uma aplicação voltada para a área assistencial da saúde, onde as tecnologias assistivas têm favorecido pessoas com disfunção, ou até mesmo ausência, de uma estrutura anatômica, fisiológica ou cognitiva. Nesta área, o uso de robôs sociais assistivos – capazes tanto de auxiliar na terapia quanto de interagir com pacientes ou terapeutas – é relevante visto que podem auxiliar tanto no tratamento da disfunção, quanto na inclusão social do sujeito. A pertinência dessa área e o sucesso de iniciativas correlatas subsidiaram o desenvolvimento de um *estudo de caso em robótica social assistiva* como ferramenta auxiliar para educação especial, com o qual a organização da arquitetura de controle inteligente foi utilizada e avaliada.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

As aplicações robóticas atuais não apresentam forte interação entre humanos e robôs. Na verdade, é muito comum que um sistema robótico industrial suponha que nenhum humano estará presente na célula de operação de um braço robótico, assim como se supõe que nenhum humano estará no caminho de um AGV (*Autonomous Guided Vehicle*). Se de fato houver um humano, o robô simplesmente encerrará sua operação e a retomará quando o

ambiente for novamente seguro. Esta ausência de interação entre humanos e robôs existe por razões de segurança – afinal, uma máquina não deve fazer mal a um humano, seja qual for a situação. Todavia, isto não implica que a colaboração ativa entre pessoas e máquinas não seja de interesse para a sociedade.

A interação entre humanos e robôs é celebrada há décadas pela ficção científica, onde os robôs detêm as mesmas capacidades cognitivas de um ser humano e são, portanto, capazes de comunicar-se e interagir de forma natural. No mundo literário, são vários os exemplos de como os robôs podem contribuir de forma benéfica para a humanidade – ou até mesmo causar o seu declínio quando mal utilizados. No mundo real, porém, ainda não encontramos robôs com a mesma autonomia de um inseto (FRANZ; MALLOT, 2000), e a ideia de que um robô possa alcançar as mesmas habilidades racionais de um ser humano ainda é uma utopia.

Isto não significa, porém, que não existam exemplos reais de interação entre humanos e robôs. Naturalmente, a capacidade de interação destes robôs é muito restrita, pois o problema da interação é complexo e envolve diversas áreas do conhecimento, sendo que as ferramentas tecnológicas disponíveis não são suficientes para resolver tal problema. Entretanto, os robôs – e principalmente os robôs móveis – estão vagarosamente entrando em nossos lares, e esta é uma tendência certa de futuro (GATES, 2007). Há, inclusive, pessoas que se recusam a trocar seus robôs de serviço, como o Roomba da iRobot ou o já descontinuado AlBo da Sony, por considerá-los membros da família (MATARIĆ, 2007; THE NEW YORK TIMES, 2015).

Hoje é possível encontrar a utilização de robôs em diferentes setores de aplicação. Para mercado doméstico, já se é possível adquirir robôs móveis comerciais capazes de realizar algumas tarefas corriqueiras. Existem robôs capazes de aspirar pó, aparar grama, limpar piscinas e lavar janelas de forma autônoma e segura, sem a necessidade da supervisão de um ser humano. Há, também, robôs de entretenimento, como a série de robôs de brinquedo da WowWee, o reproduzidor de áudio interativo Rolly da Sony, e o humanoide Nao da Aldebaran.

No intuito de investigar como robôs e outros sistemas autônomos interagem entre si e com as pessoas, o Laboratório de Análise de Arquitetura de Sistemas (LAAS) do Centro Nacional de Pesquisa Científica (CNRS) da França criou o projeto ADREAM (Arquiteturas Dinâmicas Reconfiguráveis para Sistemas Embarcados Autônomos Móveis), em meados de 2010 (LABORATOIRE D'ANALYSE ET D'ARCHITECTURE DES SYSTÈMES, 2012). O objetivo do projeto é investigar e desenvolver metodologias e tecnologias para a integração de dispositivos móveis inteligentes, robôs e redes de computadores em um ambiente doméstico.

Outro setor em que a robótica tem sido utilizada com sucesso é a Medicina. Neste setor, os robôs móveis têm sido aplicados com êxito em exercícios de reabilitação (REINKENSMEYER et al., 2001; URIBE-QUEVEDO, 2011), para a interação com crianças autistas (ROBINS, B. et al., 2005), inclusão social de crianças com deficiências motoras severas (VALADA et al., 2011), e robôs de companhia para pessoas com deficiência (REMAZEILLES et al., 2008).

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos gerais desta tese consistem na investigação e desenvolvimento de uma arquitetura de controle inteligente baseada em uma arquitetura de software aberta e flexível que incorpore mecanismos para a navegação de robôs móveis e a interação entre humanos e robôs. Dentro desse contexto, os objetivos da tese de doutorado são pautados em três itens principais apresentados a seguir.

1. Avaliar uma arquitetura de controle inteligente que propicie cenários de interação entre humanos e robôs de forma engajadora;
2. Avaliar as estratégias empregadas no desenvolvimento de arquiteturas de software flexíveis para o desenvolvimento de arquiteturas de controle inteligentes para robôs móveis autônomos;
3. Desenvolver e aplicar uma arquitetura de controle inteligente no cenário da robótica socialmente assistiva.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Como bem coloca Machado de Assis na abertura deste capítulo, a ordenação adequada de palavras e ideias faz um livro, um governo, uma revolução ou, neste caso particular, uma tese de doutorado. Imposta pelo rigor do método científico, a ordenação que compôs esta tese parte do genérico ao específico, do conceito à aplicação. Cada capítulo restringe gradativamente o cerco em torno do trabalho aqui desenvolvido.

Portanto, este primeiro capítulo se prestou a evidenciar os horizontes do tema investigado e apontar o destino almejado. Para isto, ele alude às justificativas e motivações do trabalho na Seção 1.1 e seus objetivos na Seção 1.2.

Balizado pelos objetivos e justificativas apresentadas, o *Capítulo 2* se envereda pelo território das arquiteturas de controle. Desta forma, ele explora o lastro teórico da tese e apresenta a organização da arquitetura de controle inteligente para interação humano-robô.

O desenvolvimento da aplicação da arquitetura de controle inteligente, no entanto, encontra-se no *Capítulo 3*. Nele é relatada a adaptação e desenvolvimento da arquitetura de controle para uma aplicação específica dentro do escopo da robótica social assistiva.

Posteriormente, o *Capítulo 4* descreve os experimentos realizados com a aplicação implementada. Nele também é observado o alinhamento dos resultados obtidos com os objetivos da aplicação e da arquitetura de controle inteligente.

Finalmente, o *Capítulo 5* apresenta as conclusões acerca do trabalho, tendo em vista os objetivos alcançados e as contribuições realizadas. A tese é então encerrada com a apresentação das diretrizes para desenvolvimento futuro, que pode, fortuitamente, marcar um novo começo.

2 ARQUITETURA DE CONTROLE INTELIGENTE

“Minha estimada senhorita Glória, os robôs não são pessoas. Eles são mecanicamente mais perfeito que nós, e possuem uma capacidade intelectual impressionante, no entanto não possuem alma.”

Karel Čapek (R.U.R., 1920, tradução nossa)

Embora seja verdade que há máquinas com capacidade mecânica superior à nossa em situações específicas, o mesmo não pode ser dito sobre a capacidade intelectual delas. Ainda assim, as máquinas tratadas neste trabalho, i.e., os robôs móveis autônomos, necessitam de algum meio de tomada de decisão que os permita cumprir seus objetivos num mundo dinâmico. Este meio é chamado de arquitetura de controle.

A *arquitetura de controle* fornece um método formal para a organização de um sistema de controle, impondo-lhe regras e restrições (MATARIĆ, 1992). Consequentemente, é ela que define os componentes arquiteturais de um robô móvel e como tais componentes interagem entre si (DEAN, WELLMAN, 1991 apud MURPHY, 2000). Em outras palavras, a arquitetura de controle determina como se dá o fluxo de informação dentro de um sistema robótico móvel (MURPHY, Robin, 2000) e viabiliza seu comportamento “inteligente”.

O termo *inteligente* remete à Inteligência Artificial (IA), tradicionalmente entendida como a área de pesquisa dedicada à criação de sistemas inteligentes. Dentre os sistemas de IA, destacam-se aqueles chamados de *bioinspirados*, cujo princípio de funcionamento baseia-se em estruturas encontradas nos seres vivos. Redes Neurais Artificiais, Lógica Nebulosa (ou Fuzzy) e Algoritmos Genéticos são exemplos consolidados desta categoria.

Voltando a atenção ao contexto da IHR, são evidentes as vantagens que os sistemas inteligentes proporcionam às arquiteturas de controle. Eles fornecem um instrumentário útil para a adaptação dos comportamentos autônomos do robô móvel frente às situações impostas pelo usuário humano ou pelo ambiente.

Portanto, este capítulo apresentará a *organização da arquitetura de controle inteligente* desenvolvida neste trabalho, contemplando, também, o referencial teórico que a embasa. O ponto inicial da apresentação gira em torno das questões éticas que envolvem o desenvolvimento de qualquer sistema robótico, dada a grande importância e atualidade do tema. Em seguida, discute-se a base teórica das arquiteturas de controle, cujo intuito é

ajudar a caracterizar a arquitetura desenvolvida em relação aos paradigmas de controle, e da interação humano-robô, a área “fim” deste trabalho. A seção subsequente utiliza a discussão das sessões anteriores para apresentar a organização da arquitetura de controle desenvolvida, que agrega os aspectos éticos e de IHR seguindo os paradigmas conhecidos para arquiteturas de controle. É importante observar que a organização da arquitetura de controle trata apenas das regras construtivas de seus módulos, e não da implementação ou adequação destes módulos para uma aplicação particular. Estas questões a respeito da implementação serão contempladas no capítulo seguinte.

Finalmente, retornando nossa atenção ao texto de Čapek, cabe aqui ressaltar, com a devida descrição, que apesar deste capítulo ter como objetivo contribuir, mesmo que timidamente, à *capacidade intelectual espantosa* dos robôs, ele não possui qualquer intenção de divagar sobre a inexistência da *alma* destes maquinários.

2.1 ÉTICA PARA ROBÔS

Depois de uma série de escândalos envolvendo espionagem internacional, vazamento de informações privadas de usuários de diferentes serviços da Internet, e experimentos sociais realizados por redes sociais, há uma crescente preocupação para estabelecer uma legislação que resguarde a integridade e privacidade das pessoas num mundo onde a tecnologia torna-se cada vez mais ubíqua. Neste contexto, a robótica se encontra numa situação delicada não apenas pelo seu potencial em substituir largamente a mão-de-obra humana, mas também por suas aplicações bélicas. Por essas razões, várias instituições, como a *European Robotics Research Network* (EURON) (VERUGGIO, 2006), a iniciativa *Open Roboethics* (MOON et al., 2012), e o comitê técnico para ética robótica da IEEE Robotics and Automation Society (IEEE, 2015) vêm somando esforços para compor um conjunto de diretrizes que regrem o desenvolvimento ético de robôs – a chamada “roboética” (tradução livre para “*roboethics*”).

As primeiras diretrizes de ética para robótica antecedem muitos dos robôs clássicos. Proposta por Isaac Asimov em seu conto de ficção científica “*Runaround*” (ASIMOV, 1942), as três leis da robótica são, provavelmente, a referência mais famosa para o tema. São elas:

1. Um robô não pode ferir um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra algum mal.
2. Um robô deve obedecer as ordens que lhe sejam dadas por seres humanos, exceto nos casos em que tais ordens entrem em conflito com a Primeira Lei.

3. Um robô deve proteger sua própria existência desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira ou Segunda Leis.

Apesar de estas leis servirem como inspiração para a criação de contos – e para a discussão da ética para robôs –, elas pouco contribuem tecnicamente para a elaboração de uma legislação que regre não apenas o robô enquanto agente, mas também as demais pessoas e empresas envolvidas no seu desenvolvimento. No entanto, existem esforços dentro da comunidade de pesquisadores de robótica para criar regras práticas. Exemplo disso são as “três leis da robótica responsável” propostas por Robin Murphy e David D. Woods (2009), cujo objetivo é fomentar a discussão sobre o papel da responsabilidade e autoridade em sistemas robóticos. São elas:

1. Um humano não deve implantar um robô caso o sistema de trabalho humano-robô não atenda os mais altos padrões de segurança e ética.
2. Um robô deve responder aos humanos de forma apropriada ao papel que desempenha.
3. Um robô deve possuir autonomia situada² suficiente para proteger a sua existência, contanto que tal proteção forneça uma transferência de controle suave que não entre em conflito com a Primeira e Segunda lei.

Seguindo uma linha de raciocínio semelhante à de Murphy e Woods, Alan Winfield (2013) apresentou durante a *4th EUCogIII Members Conference* cinco leis que haviam sido propostas pelo *Engineering and Physical Sciences Research Council* e *Arts and Humanities Research Council* do Reino Unido (2010). São elas:

1. Robôs são ferramentas multiuso. Robôs não devem ser projetados somente ou primariamente para matar ou ferir humanos, exceto quando de interesse para a segurança nacional.
2. Humanos, não os robôs, são agentes responsáveis. Os robôs devem ser projetados e operados na medida do possível para obedecer às leis existentes, liberdades e direitos fundamentais, incluindo a privacidade.
3. Robôs são produtos. Eles devem ser projetados usando processos que garantam que sejam confiáveis e seguros.
4. Robôs são artefatos manufaturados. Eles não devem ser projetados de forma fraudulenta para explorar usuários vulneráveis; ao contrário, sua natureza mecânica deve ser transparente.

---

² Autonomia situada refere-se ao estado (situação) de um agente (no caso, o robô), a capacidade desse agente de reconhecer esse estado particular e agir de acordo com o intuito de alcançar um objetivo.

5. Deve ser atribuída à uma pessoa a responsabilidade legal por um robô.

Apesar de diferentes, os três conjuntos de leis apontam para a necessidade de robôs que garantam a segurança das pessoas, evitando ações que venham a feri-las ou infligir leis e direitos vigentes. Se, por um lado, as características físicas de um robô móvel ditam qual sua capacidade mecânica de causar danos, por outro lado, é a arquitetura de controle que leva um robô a utilizar esta capacidade mecânica para causar danos ou não. Consequentemente, o desenvolvimento de uma arquitetura de controle deve, também, incorporar diretrizes éticas. Portanto, durante o desenvolvimento da arquitetura de controle inteligente, tomou-se o cuidado de obedecer às leis apresentadas por Alan Winfield, conforme será observado no decorrer deste trabalho. Para facilitar a leitura, doravante o termo “código de ética” será usado para designar este conjunto de leis.

2.2 INTERAÇÃO HUMANO-ROBÔ

A área dedicada ao desenvolvimento de sistemas robóticos que colaboram com as pessoas para realizar tarefas é conhecida como *interação humano-robô* e é fundamentada por diferentes áreas, como as ciências cognitivas, psicologia, biologia e a etologia (BURKE et al., 2004; DAUTENHAHN, 2007; GOODRICH; SCHULTZ, 2007). Seu caráter multidisciplinar torna difícil enquadrar as pesquisas da área (BURKE et al., 2004), sendo que seus desafios podem ser agrupados em cinco atributos (GOODRICH; SCHULTZ, 2007):

1. Natureza da tarefa,
2. Autonomia,
3. Estrutura da equipe,
4. Comunicação
5. Adaptação e aprendizagem.

Naturalmente, o robô móvel necessita de um objetivo por definição. Esse objetivo, os meios disponíveis para alcançá-lo, e suas restrições são fortemente dependentes da *natureza da tarefa*. A robótica móvel se presta a uma grande variedade de aplicações, seja no entretenimento (ARKIN, Ronald C. et al., 2003), na realização de tarefas domésticas (KOAY et al., 2009), ou na área da saúde (REINKENSMEYER et al., 2001; REMAZEILLES et al., 2008; ROBINS, B. et al., 2005; URIBE-QUEVEDO, 2011; VALADÃO et al., 2011). Claramente, cada uma destas aplicações possui requisitos e restrições diferentes que impactam diretamente no projeto do robô, alterando e moldando suas estruturas físicas e lógicas no intuito de adaptá-

lo à tarefa e ao ambiente. Por esta razão, os estudos da aplicação e do ambiente da aplicação constituem um problema fundamental no projeto da IHR. Adicionalmente, o código de ética explicita que a tarefa não deve ser de natureza danosa (primeira e terceira lei), ilegal (segunda lei), fraudulenta (quarta lei), ou espúria (quinta lei).

Em sequência, a *autonomia* determina o grau de intervenção humana em um sistema robótico durante a realização das tarefas e envolve tanto aspectos operacionais quanto cognitivos. Obviamente, como será explorada a seguir, a autonomia depende intrinsecamente de outros atributos, como a natureza da tarefa e a estrutura da equipe. Além disso, a autonomia deve estar em consonância com o código de ética, da mesma forma que a natureza da tarefa, especialmente em relação à segunda e à quinta lei, que indicam que o robô não pode violar a legislação vigente e que ele, enquanto máquina, não é o responsável pelas suas ações. Portanto, ele só deve operar com a anuência da pessoa responsável.

Intimamente ligada à autonomia está a *estrutura da equipe*, que determina quais agentes trabalharão em conjunto e qual a hierarquia entre eles. As *relações numéricas* referem-se à quantidade de robôs e pessoas na equipe e, em geral, apresentam-se em quatro categorias (BURKE et al., 2004): uma pessoa e um robô; uma pessoa e muitos robôs; muitas pessoas e um robô; ou muitas pessoas e muitos robôs. As *relações de liderança* definem quais papéis serão desempenhados pelas pessoas e robôs envolvidos na tarefa e qual o grau de dependência entre eles, com o fim de maximizar o desempenho e eficiência do trabalho colaborativo (HOWARD; CRUZ, 2006). Tradicionalmente, os sistemas robóticos são tratados como submissos à vontade humana (GOODRICH; SCHULTZ, 2007), mas existem trabalhos que apontam para cenários onde o robô ordena às pessoas (YAMAMOTO et al., 1992). Mesmo em uma hierarquia superior, o robô não deve ferir os direitos do indivíduo (segunda lei) e não é o responsável pela equipe (quinta lei).

Para que uma equipe composta por pessoas e robôs seja eficiente, é necessária a aplicação de mecanismos de *comunicação* que permitam o fluxo de informação dentro da equipe. No escopo da IHR, a comunicação tradicionalmente faz uso de interfaces homem-máquina (URIBE et al., 2011), mas recentemente há grandes esforços em desenvolver interfaces mais naturais e intuitivas às pessoas, baseando-se nas linguagens verbais, fortemente associada à linguagem natural, e não-verbais dos seres humanos.

Uma abordagem de comunicação baseia-se no *processamento de língua natural*, ou PLN, encarregando-se da extração e interpretação de informações de objetos de natureza linguística, com o fim de produzir algum efeito ou tarefa (SILVA, 1996). Na robótica, o PLN, geralmente associado a um sistema de *reconhecimento de fala* para codificação da linguagem verbal em texto, tem sido explorado para a interpretação de comandos (JURAFSKY; MARTIN,

2009; LEE, JaeMoon et al., 2009) e na extração de emoções para adaptação do comportamento do robô (ALY; TAPUS, 2013; SCHEUTZ et al., 2006; WÖLLMER et al., 2011).

Outros trabalhos dão ênfase em meios de comunicação mais sutis, que interpretam expressões não-verbais. O *olhar social*, por exemplo, consiste no comportamento humano comunicar face-a-face (MATARIĆ, 2007), e foi investigado para cenários com um robô e uma pessoa (HARA, 2004) e com um robô e várias pessoas (MUTLU et al., 2006). A *atenção compartilhada* fornece meios para que duas ou mais direcionem o foco de sua atenção visual para o mesmo objeto de interesse (POLICASTRO et al., 2009), e tem sido solucionada por meio de métodos probabilísticos (BEGUM et al., 2009; HOFFMAN et al., 2006) e de inteligência artificial (POLICASTRO et al., 2009). A *comunicação proxêmica*, que corresponde às distâncias que as pessoas mantêm de outras pessoas conhecidas ou desconhecidas, também tem sido foco de pesquisa na área de IHR (FEIL-SEIFER; MATARIC, 2010; MEAD; MATARIC, 2012; MUMM; MUTLU, 2011; TAKAYAMA; PANTOFARU, 2009). Existem outras formas de comunicação, além destas citadas, como as que envolvem o tato, ou toque, (KIM, Young-Min et al., 2010) ou até mesmo música (MURATA et al., 2008).

O quinto atributo, *aprendizado*, é um campo ainda em seus estágios iniciais para a área da robótica (MATARIĆ, 2007), e se preocupa em fornecer a capacidade do robô se adaptar automaticamente à tarefa ou ambiente modificando suas estruturas de dados internas. Vários trabalhos foram propostos para resolver o problema da navegação autônoma (BAJRACHARYA et al., 2008; INFANTES et al., 2010; RAM et al., 1994; SAFFIOTTI, 1997; TANI, 1996), envolvendo tanto aprendizado por reforço quanto supervisionado. Para a IHR, o aprendizado se preocupa com o problema de ensinar o robô a realizar uma tarefa ou em aprender as características do usuário. Nicolescu e Matarić (2001) apresentam um mecanismo para o aprendizado robótico de tarefas de alto nível através de demonstração. Outros trabalhos dão ênfase no aprendizado das características do usuário (BURGHART et al., 2007; MITSUNAGA et al., 2008). Há também pesquisas a respeito de sistemas que aprendem a seguir o olhar das pessoas quando fita um objeto, ação esta que é chamada de *atenção compartilhada* (HOFFMAN et al., 2006; POLICASTRO et al., 2009).

Deve-se ressaltar que o código de ética também deve ser seguido seja na comunicação, seja no aprendizado, dando especial atenção à quarta lei, pois ambas podem conferir a um robô móvel a capacidade de explorar a vulnerabilidade do usuário – principalmente no que toca à privacidade. Atualmente, a tecnologia está longe de permitir a criação de robôs com essa capacidade, porém há debates semelhantes a respeito da coleta de dados de usuários por meio dos serviços de Internet. Essa discussão, porém, foge do escopo desta seção.

Finalmente, estes cinco atributos devem ser definidos durante o processo de desenvolvimento da arquitetura de controle voltada para IHR, pois são eles que definem as características dos módulos arquiteturais. No entanto, algumas características, tais como aquelas que definem os comportamentos específicos do robô móvel, não são abordadas durante a organização da arquitetura, pois estão alinhadas ao propósito da aplicação, que será apresentado no Capítulo 3. Este capítulo preocupa-se em abordar os comportamentos de propósito geral e apresenta, ao final, como estes comportamentos se integram aos demais módulos da arquitetura de controle.

2.3 ARQUITETURAS DE CONTROLE

Conforme já apresentado na introdução desta seção, a arquitetura de controle fornece um método formal para a organização de um sistema de controle, impondo regras e restrições que definem os componentes arquiteturais e como tais componentes interagem entre si, determinando, assim, o fluxo de informação entre estes componentes. Por essa razão, a arquitetura de controle contempla fatores que vão além da composição física do robô móvel (seus efetadores, atuadores e sensores), incluindo o propósito da aplicação, os aspectos da IHR e o código de ética.

Por envolver tantos fatores diferentes, e possivelmente contraditórios, a composição de uma arquitetura de controle é uma tarefa complexa. É fácil, então, compreender o motivo da existência das várias arquiteturas de controle diferentes na literatura. Cada uma incorpora as condições ímpares de cada projeto. Apesar das grandes diferenças, as arquiteturas de controle para robôs móveis podem, curiosamente, ser estudadas e classificadas de acordo com a inter-relação de três primitivas (DUDEK; JENKIN, 2010; MATARIĆ, 2007; MEDEIROS, 1998; MURPHY, Robin, 2000) comumente aceitas na robótica: “Sentir”, que engloba as funções que produzem uma informação relevante a partir de um sensor do robô; “Planejar”, que é composto de funções que utilizam informações oriundas dos sensores ou de um banco de dados para orquestrar a execução de uma ou mais tarefas do robô; e “Agir”, que abrange as funções que geram ação no mundo físico por meio do acionamento de atuadores

Valendo-se dessas primitivas, é possível distinguir os três paradigmas das arquiteturas de controle (MURPHY, Robin, 2000): deliberativo; reativo; e híbrido. No paradigma *deliberativo*, o fluxo de informação se dá na ordem “Sentir-Planejar-Agir”, ou seja, os dados sensoriais alimentam um sistema de planejamento que coordena, ou delibera, as

ações do robô, que finalmente são sentidas pelos sensores do robô, fechando assim o ciclo de controle mostrado na Figura 2.1 (a). Numa linha contrária ao paradigma deliberativo, encontra-se o paradigma reativo, mostrado pela Figura 2.1 (b), onde o fluxo de informação se dá entre “Sentir-Agir”, sem a necessidade de um módulo de planejamento, ou seja, as ações do robô se dão de forma reativa. Finalmente, o paradigma híbrido combina a velocidade de resposta do paradigma reativo com a precisão e planejamento do paradigma deliberativo. No paradigma híbrido, apresentado pela Figura 2.1 (c), o fluxo de informação se dá na ordem “Planejar, Sentir-Agir”, que significa que o planejamento é feito paralelamente ao laço reativo, e nele interfere quando necessário. É importante lembrar que no paradigma híbrido ainda há uma relação entre as primitivas “Sentir-Planejar”, permitindo que o planejamento leve em conta informações atualizadas sobre o ambiente.

Figura 2.1 – Paradigmas das arquiteturas de controle para robôs móveis: (a) Hierárquico; (b) Comportamental; e (c) Híbrido.

Algumas arquiteturas de controle para robôs móveis representativas de cada um dos três paradigmas são a NASREM (NASA/NBS *Standard Reference Model*), “subordinação” (*subsumption*), TCA (*Task Control Architecture*) e LAAS (*Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes*). A arquitetura NASREM segue o paradigma deliberativo e é baseada em vários estágios de processamento que, sucessivamente, transformam um dado do ambiente em uma decisão de controle (ALBUS, 1991). Já arquitetura de subordinação desenvolvida por Brooks (1985), inspirada nos comportamentos observados em animais, se enquadra no paradigma reativo. A arquitetura TCA proposta por Simmons (1990), identificada pelo paradigma híbrido, adota uma estrutura semelhante àquela de um sistema operacional, com um controlador central para o qual os módulos funcionais se reportam. Por fim, a arquitetura LAAS, também do paradigma híbrido, é dividida em três níveis, sendo eles duas camadas de decisão e uma camada funcional (CHATILA, 1995).

Voltando a atenção para as arquiteturas de controle para IHR, pode-se citar a arquitetura híbrida CAST (*Control Architecture based on Step Transition*) concebida para o robô *Miss DanceR*, um humanoide feminino capaz de valsar com um parceiro humano (KOSUGE et al., 2003). Conforme mostra a Figura 2.2, os atuadores são acionados pelo

Gerador de movimento de acordo com a combinação dos dados provenientes dos sensores de posição e força do robô, do módulo que estima o próximo passo do parceiro humano (*Estimador de passo*) e do *Conhecimento* sobre os passos de uma valsa. Nesta arquitetura, o conhecimento sobre uma determinada dança é representado pelas trajetórias de cada passo e por um grafo com as possíveis transições para cada passo.

Figura 2.2 – Arquitetura CAST, adaptada de (KOSUGE et al., 2003).

Com essa organização simples, a CAST possibilita uma IHR na qual o robô ajusta sua trajetória em relação à sua localização e, também, à localização e força exercida por seu parceiro humano. O que a torna interessante, no entanto, é a presença de dois módulos claramente projetados para IHR: o *Conhecimento* a respeito da tarefa a ser realizada pelo robô (Trajetórias dos passos) e pelo parceiro humano (Transições dos passos); e o *Estimador de passos*, que é voltado para detectar a intenção do usuário. Conhecer as ações do usuário e ser capaz de detectar sua intenção – ou seja, prever sua ação – é necessária para que as ações tomadas pelo robô sejam coerentes com a situação.

Conhecer e prever as ações do usuário, no entanto, não é suficiente para que um robô cumpra satisfatoriamente suas tarefas, ou ofereça uma IHR útil. Um robô deve ser capaz de agir mesmo em situações inesperadas ou desconhecidas, e deve comunicar-se por meios eficientes com o usuário. De certo, as máquinas atuais não são capazes de atender esses quesitos, ao contrário dos animais, que lidam com eles diariamente. A excelente adaptabilidade dos animais (em especial, do ser humano) tem inspirado soluções que copiam os mecanismos naturais de tomada de decisão, dentre as quais destaca-se a introdução de emoções. A pesquisa em emoções humanas mostra claramente que elas auxiliam na resolução de problemas adaptativos (GAZZANIGA et al., 2012), pois fornecem guias heurísticos para a rápida tomada de decisões, mesmo defronte de situações complexas e multifacetadas (SLOVIC et al., 2002). Essa capacidade cognitiva levou ao desenvolvimento de algumas arquiteturas de controle baseadas em emoções.

Uma das arquiteturas pioneiras no uso de emoções é a adotada pela cabeça robótica Kismet, desenvolvida por Cintia Breazel (1998). Ela é composta por quatro subsistemas, como mostrado pela Figura 2.3, dos quais o principal é o *Sistema Motivacional*, constituído por *Pulsões*³, que acionam comportamentos e processos emocionais, e *Emoções*, que modifica a expressão facial do robô por meio de *Atos de expressão motora*. Os demais subsistemas tratam da percepção do ambiente, dos comportamentos do robô, e da atuação dos mecanismos robóticos. Logo, o *Sistema Perceptual* extrai características salientes do ambiente para realimentar os demais módulos, interpretando como “dor” qualquer sinal cuja intensidade ultrapasse um limiar preestabelecido. Por sua vez, o *Sistema Comportamental* possui comportamentos capazes de consumir as pulsões por intermédio do *Sistema Motor*, que aciona os atuadores do robô de acordo com suas *Habilidades motoras*.

Na arquitetura do Kismet, os vários módulos trabalham em conjunto para satisfazer suas *pulsões*, que podem ser sociais, de estímulos, de segurança, ou de fadiga. Portanto, há um comportamento consumidor para cada *pulsão*, que aciona o robô por intermédio do sistema motor. Adicionalmente, as *pulsões* influenciam as *emoções* do robô, que consequentemente acionam o sistema motor com o intuito de expressá-las por meio da face robótica, que finalmente serve para comunicar as “necessidades” do robô ao usuário. Desta forma, a arquitetura permite ao Kismet interagir com o usuário de forma intuitiva, imitando a forma humana de comunicação.

Figura 2.3 – Arquitetura de Controle do Kismet (BREAZEL, 1998).

Adotando outra abordagem, a arquitetura de controle híbrida apresentada por Murphy et al. (MURPHY, R.R. et al., 2002) utiliza emoções para possibilitar a adaptação

³ Pulsão (tradução para o termo alemão “trieb”), conforme concebida por Freud, é a “origem” inconsciente de todo pensamento e ação humana que, consequentemente, define a estrutura psíquica de cada indivíduo.

dinâmica do comportamento do robô em relação ao contexto, ou até mesmo trocar de comportamento para evitar impasses (*deadlocks*). Conforme mostra a Figura 2.4, os comportamentos, seus parâmetros e monitores de desempenho são selecionados pelo Gerador de estado de comportamentos (GEC), com base no progresso da tarefa e na saída do Gerador de estado emocional (GEE). O progresso da tarefa é resultado das *Medidas de progresso da tarefa*, determinadas pelos comportamentos individuais, seus monitores e pela comunicação com outros robôs, ou agentes externos. Estas medidas também influenciam o GEE, implantado como uma máquina de estados finitos que determina a emoção do robô frente às diferentes situações. Esta organização permite que o GEC adapte os parâmetros do comportamento de acordo com a emoção gerada pelo GEE, ou troque de comportamento como um todo.

Figura 2.4 – Arquitetura de controle proposta por (MURPHY, R.R. et al., 2002), mostrando a relação entre o GEC, o GEE, e o mensurador de progresso da tarefa.

Para demonstrar a arquitetura, Murphy et al. desenvolveram uma aplicação com um robô garçom, encarregado de servir aperitivos a um público, e um robô encarregado de reabastecer as bandejas do garçom. Portanto, ambos os robôs devem trabalhar em conjunto de forma harmônica para servir o público sem causar acidentes. Apesar de não abordar o tema de IHR diretamente, esta arquitetura mostra que o uso de emoções viabiliza a adaptação ou seleção de comportamentos, permitindo a melhora do desempenho de um sistema robótico.

A arquitetura de controle baseada em emoções proposta por Hirth, Braun e Berns (HIRTH, Jochen et al., 2007) é composta por três módulos principais: comportamentos, emoção e cognição. Todas as ações do robô são efetuadas pelos *Comportamentos*, que

podem ser ativados por estímulos externos (reativo), pelo estado emocional, ou pelo módulo de cognição (deliberativo). O módulo de *Emoções* é composto por *Desejos*, que representam objetivos de baixo nível, tais como “sobrevivência” ou “consumo de energia”, cuja fusão leva a um *Estado emocional* definido num espaço emocional de três dimensões: *valência* (quão favorável é o estímulo), *ativação* (quão excitante é um estímulo), e *postura* (quão disposto a agir está o robô). A mudança do Estado emocional pode acarretar mudanças nos desejos. O terceiro módulo, *Cognição*, detém o conhecimento a respeito das tarefas e objetivos, sendo, portanto, o responsável por acionar os comportamentos na ordem adequada com o intuito de cumprir os objetivos do robô.

A cabeça humanoide ROMAN (HIRTH, J. et al., 2007) utiliza a arquitetura de Hirth, Braun e Berns para interagir com usuários humanos. Nesta aplicação, os desejos (como exploração e comunicação) determinam “o que fazer”, enquanto o estado emocional especifica “como fazer”, fazendo a cabeça modificar as expressões faciais com transições amenas e sintetizar a fala com velocidade adequada (HIRTH, Jochen et al., 2007).

Figura 2.5 – Arquitetura de controle baseada em emoções proposta por Hirth, Braun e Berns (HIRTH, Jochen et al., 2007).

A arquitetura de controle UKL (*University of Kaiserslautern*) é uma evolução da arquitetura de Hirth, Braun e Berns (HIRTH, Jochen et al., 2011), cujo objetivo é desenvolver as seguintes funções das emoções: regulatória (emoção), seletiva (percepção), expressiva (hábitos), motivacional (motivos) e classificatória (emoção). Para este fim, ela emprega três estruturas principais. A primeira estrutura, *Centro de emoções*, consiste de módulos comportamentais estendidos chamados *Motivos*, usados para determinar os objetivos especiais do robô, e por um módulo de *Apreciação* (*Appraisal*), cuja função *avaliadora*

interpreta os estímulos em função do espaço de emoções dado pela valência, ativação e postura, e influencia a percepção do ambiente e usuário, os ganhos das funções dos motivos, e o acionamento dos hábitos. A segunda estrutura, *Percepção*, implementa os processadores de sinais sensoriais e os funde com o fim de extrair informações do usuário. A terceira estrutura, *Hábitos*, é uma rede de comportamentos que representam desde primitivas motoras simples, que agem em *resposta direta* a um estímulo percebido, até hábitos complexos que representam uma tarefa completa. Nesta arquitetura, o Centro de emoções interpreta um papel fundamental, pois é capaz de modificar, por meio de sua *função seletiva*, os parâmetros dos processadores de sinais e, por intermédio de sua *função motivacional*, de acionar comportamentos.

Figura 2.6 – Arquitetura de controle baseada em emoções UKL (HIRTH, Jochen et al., 2011).

2.4 ARQUITETURAS COGNITIVAS BIOLOGICAMENTE INSPIRADAS

Outro campo de pesquisa voltado ao desenvolvimento de agentes inteligentes é o das Arquiteturas Cognitivas Biologicamente Inspiradas (*Biologically Inspired Cognitive Architectures* – BICA). Estabelecido formalmente em 2005 por um projeto fomentado pela DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), Estados Unidos da América, o objetivo das BICA tem sido desenvolver, implantar e avaliar teorias, princípios de design, e arquiteturas de cognição humana baseadas em conceitos da Psicologia e Neurologia, com o interesse de empregá-las em uma variedade de aplicações e máquinas inteligentes (ARMOUR; GUNNING, 2005).

Contando, portanto, com pouco mais de uma década de pesquisa e um objetivo arrojado, os resultados obtidos na pesquisa de BICA encontram-se em estágio inicial, embora sejam significativos para diversas áreas. Atualmente, a Robótica tem servido às BICA como uma plataforma experimental para validação, ao invés de estar se apropriando delas para compor aplicações práticas. Ainda assim, os conceitos elaborados pelas BICA certamente são de interesse da Robótica e, portanto, esta seção se dedica a este campo de pesquisa.

As BICA podem ser classificadas por numerosos atributos: o projeto original lista mais de 900 tópicos e subtópicos relacionados (ARMOUR; GUNNING, 2005), enquanto a tabela comparativa mantida pela BICA Society (2012) classifica as arquiteturas sob cerca de 58 características. Por essa razão, Duch, Oentaryo e Pasquier (2008) propuseram uma taxonomia onde as BICA são agrupadas de acordo com o método utilizado para implantar a *memória* e *aprendizado*. Esta taxonomia divide as BICA em resultando em três modelos arquiteturais: simbólico, emergente e híbrido.

As *arquiteturas simbólicas*, como o nome indica, utilizam símbolos de alto nível para descrever e solucionar problemas. Estes símbolos são organizados na memória utilizando *regras*, que codificam o conhecimento de especialistas humanos, ou *grafos*, cujos nodos (ou nós) representam as entidades simbólicas e cujas arestas representam seus relacionamentos (DUCH et al., 2008). Para utilizar os símbolos para o aprendizado, tais arquiteturas empregam processos analíticos ou indutivos (DUCH et al., 2008). O *aprendizado analítico* utiliza conhecimento *a priori* para distinguir características relevantes das irrelevantes a cerca de um pequeno conjunto de exemplos, enquanto o *aprendizado indutivo* tenta encontrar correlações e regularidades estatísticas dentro de um grande conjunto de treinamento (MITCHELL; THRUN, 1996). A arquitetura SOAR (*State, Operator And Result*) é um exemplo clássico de arquitetura simbólica que implementa um sistema especialista baseado em regras (LAIRD et al., 1987).

Por outro lado, as *arquiteturas emergentes* são inspiradas em ideias conexionistas e são, portanto, organizadas em rede de tal modo que seus nodos interagem entre si para revelar propriedades emergentes (DUCH et al., 2008). Sua memória pode ser *globalizada*, onde todo o conhecimento é distribuído homogeneamente pela rede, ou *localizada*, quando conhecimentos diferentes são gravados em agrupamentos locais da rede (MUKAWA; LIM, 2013). Esta organização de memória propicia o *aprendizado associativo*, relacionado ao aprendizado supervisionado ou por reforço da IA, e o *aprendizado competitivo*, caracterizado por técnicas de treinamento não-supervisionado (DUCH et al., 2008). Um exemplo deste tipo

de arquitetura é a Leabra, que consiste de várias redes neurais que suportam variadas funções cognitivas (O'REILLY et al., 2015).

Existem problemas cujos domínios favorecem as arquiteturas simbólicas ou conexionistas; não ambas. Logo, é natural que haja *arquiteturas híbridas* que exploram as vantagens de ambas, simbólica e conexionista, a fim de cobrir maior domínio de problemas. Sua memória passa a ser *localizada-distribuída*, cujas memórias localizadas estão espalhadas em nodos redundantes, ou *simbólica-conexionista*, misturando uma estrutura simbólica (como regras ou grafos) a módulos conexionistas (MUKAWA; LIM, 2013). Considerando estes arranjos de memória, o aprendizado pode ser do tipo *top-down*, quando o aprendizado de um conjunto de regras simbólicas (de alto-nível) fornece os dados para o aprendizado conexionista (de baixo-nível), ou *bottom-up*, quando o agrupamento de dados produzido pelo aprendizado conexionista é utilizado para extrair regras simbólicas (DUCH et al., 2008). Duas principais representantes destas arquiteturas são a CLARION (*Connectionist Learning with Adaptive Rule Induction ON-line*) e LIDA (*Learning Intelligent Distribution Agent*) (LUCENTINI; GUDWIN, 2015).

Outra abordagem que pode ser classificada dentro das arquiteturas híbridas e que fornece subsídio teórico para este trabalho são as *affective BICA*, ou BICA afetivas, que são arquiteturas cognitivas que possuem um modelo computacional para representar emoções (HUDLICKA, 2014). Em geral, as arquiteturas inspiram-se em modelos psicológicos ou neurológicos, que também são importados da *Computação Afetiva* (BROEK, 2012) e da própria Robótica. Hudlicka (2014) propõe que as arquiteturas podem constituir modelos de pesquisa ou aplicados. *Modelos de pesquisa* têm por objetivo emular fidedignamente as emoções dos organismos biológicos, tendo forte influência das neurociências. Em outra vertente, os *modelos aplicados* objetivam deixar a interação mais “natural” e “crível” do ponto de vista humano, possuindo, portanto, mais liberdade quanto a semelhança aos seus equivalentes biológicos. As arquiteturas de controle apresentadas na Seção 2.3 podem ser consideradas exemplos de modelos aplicados, pois a maior preocupação delas é fornecer uma interface humano-robô mais agradável. Por outro lado, as quatro arquiteturas descritas a seguir adotam um modelo de pesquisa, tendo por objetivo a fidelidade às estruturas biológicas.

A arquitetura apresentada por Ren et al. (2013) apresenta um modelo do mecanismo de evocação de emoções por meio de estímulos visuais. Seu objetivo é classificar a valência percebida das imagens, utilizando a base de dados IAPS (*Internationall Affective Picture System*), cujas imagens foram classificadas por humanos, para validação.

Outra arquitetura, desenvolvida por Sellers (2013) para agentes artificiais, utiliza a teoria dimensional que representa a emoção em termos de valência e ativação que evoca diferentes emoções em diferentes planos (ou camadas). Com esta arquitetura, os agentes artificiais com diferentes personalidades, que interagem uns com os outros de forma crível.

Uma arquitetura com um modelo mais completo é apresentada por Samsonovich (2013), que usa diferentes estruturas do cérebro humano para representar os seguintes módulos arquiteturais: memória de trabalho, memória episódica, memória semântica, memória procedural, mapa cognitivo, sistema de valor, e buffer de interface. Devido à complexidade do modelo, sua implementação contemplou apenas os módulos mais simples, que foram utilizados em uma simulação para demonstrar como agentes virtuais interagem entre si. As ações destes agentes foram semelhantes às ações tomadas por jogadores humanos que controlavam um *avatar* virtual para interagir com outros agentes virtuais.

A arquitetura DAC (*Distributed Adaptive Control*, ou “Controle Adaptativo Distribuído”, tradução nossa), que possui mais de 20 anos de pesquisa, pressupõe que o cérebro mantém a estabilidade entre um agente corporificado e o ambiente por intermédio de suas ações (VERSCHURE et al., 1992). Embora possa ser usada para agentes virtuais, seu foco principal é o trabalho com robôs móveis, que fornecem o “corpo” para o sistema. A DAC é uma arquitetura muito completa, tendo sido aplicada em problemas de navegação de robôs móveis, ambientes inteligentes, robôs de exploração, e em humanoides (VERSCHURE, 2012).

2.5 ORGANIZANDO A ARQUITETURA DE CONTROLE

A Organização da Arquitetura de Controle dita os módulos que comporão a arquitetura e como será a inter-relação entre eles para que o robô alcance seu objetivo. Para compô-la, foram consideradas as arquiteturas de controle apresentadas na Seção 2.3 e, também, alguns conceitos utilizados pelas BICA afetivas apresentadas na Seção 2.4. Para situar as principais contribuições de cada uma das arquiteturas, a Tabela 2.1 sintetiza as principais contribuições e ressalvas para cada uma destas arquiteturas.

Assim como as arquiteturas apresentadas na Tabela 2.1, com exceção da CAST, a arquitetura aqui desenvolvida utiliza emoções para acionar seus comportamentos e evitar impasses. Conforme será abordado nas próximas seções, as emoções serão representadas de modo semelhante às dos trabalhos (HIRTH, Jochen et al., 2011; SAMSONOVICH, 2013; SELLERS, 2013; VERSCHURE et al., 1992). Como na CAST, seus comportamentos complexos serão definidos como máquinas de estados, cujas transições, causadas por estímulos

sensoriais ou internos, modificam o estado emocional do robô. Além disso, a arquitetura possuirá um banco de dados para armazenar os dados da interação. Deste modo, a arquitetura almeja possuir uma curva mais rápida de aprendizado para que seja mais facilmente adotada em projetos diferentes.

Tabela 2.1 – Principais atributos e ressalvas das arquiteturas de controle e BICA afetivas.

Arquitetura	Principais atributos	Principais ressalvas
MURPHY et al., 2002	Usa emoções para evitar impasses.	Emoções são máquinas de estados.
CAST (KOSUGE et al., 2003)	Interação baseada em máquinas de estados.	Possui apenas um comportamento.
UKL (HIRTH; SCHMITZ; BERNIS, 2011)	Emoções influenciam a percepção e os hábitos.	Não possui memória.
Kismet (BREAHEL, C., 1998)	Utiliza pulsões e emoções para ativar e modificar os comportamentos.	Não possui memória.
Ren et al. (2013)	Classifica a valência emocional de um estímulo visual.	Não é uma arquitetura completa, mas parte dela.
SELLERS, M., 2013	Retrata emoções em camadas bidimensionais em múltiplas camadas.	Testado com agentes virtuais.
SAMSONOVICH, A. V., 2013	Utiliza modelos embasados nas estruturas do cérebro para representar seus módulos.	Muito complexa, por isso não foi implementada completamente. Os testes envolveram agentes virtuais.
DAC (VERSCHURE et al., 1992)	Considera essencial a existência de um “corpo” para que haja “inteligência”.	Muito complexa; curva de aprendizado lenta para adaptação a aplicações reais.

Quando a classificação, a arquitetura de controle desenvolvida, embora não seja uma BICA, segue um modelo aplicado para as emoções, pois seu objetivo é agir de forma natural, e não ser fiel ao seu equivalente biológico. Ademais, utiliza o paradigma híbrido, pois combina elementos deliberativos e reativos para controlar um robô móvel. A arquitetura também é classificada como comportamental, pois busca inspiração em conceitos comportamentais da biologia e psicologia para a definição de seus blocos construtivos.

Outra característica marcante da arquitetura desenvolvida é sua natureza distribuída. Cada módulo da arquitetura consiste num pacote de software diferente, permitindo melhor aproveitamento de microcomputadores com multiprocessadores ou com processadores multinúcleos, reduzindo o escopo de propagação de *bugs*, e conferindo ao sistema robustez, pois a falha de um módulo não afeta os demais, e flexibilidade, pois novos módulos podem ser adicionados ao sistema sem a necessidade de alterar os demais módulos.

Durante o desenvolvimento da arquitetura, foi tomado cuidado para obedecer algumas diretrizes de ética para a robótica que, apesar de não possuírem efeito de lei, fornecem uma visão clara e honesta para o desenvolvimento de sistemas robóticos.

A arquitetura desenvolvida possui quatro módulos principais, conforme mostra a Figura 2.7. O *espaço de memória* é o módulo central da arquitetura, fornecendo meios de comunicação e de armazenamento de dados. As *interfaces para hardware* são responsáveis pela aquisição e decodificação dos dados sensoriais, e pelo acionamento e controle de atuadores. Os *processadores de dados* implementam diferentes serviços para o sistema robótico. Por sua vez, o *controlador* é o módulo que efetivamente aciona o robô móvel.

Figura 2.7 – Arquitetura de controle desenvolvida.

2.5.1 Espaço de Memória

Um dos pontos chave no desenvolvimento de qualquer sistema distribuído é o estabelecimento de um meio de comunicação eficiente e eficaz, que permita aos módulos intercambiar informações. Num sistema robótico, os dados de saída de um módulo podem ser os dados de entrada de um ou mais módulos; ademais, alguns dados podem ser relevantes apenas no momento de sua criação – como uma leitura de um sensor – ou em qualquer momento – como um mapa do ambiente. Para responder estes requisitos, foi proposto o *espaço de memória*, módulo central da arquitetura, inspirado nos modelos psicológicos da memória humana e baseado em sistemas computacionais. Por um lado, os modelos da Psicologia oferecem ideias de como a mente humana processa os vários

estímulos e os organiza em nossa memória. Por outro lado, os sistemas computacionais, tais como os bancos de dados e os sistemas de quadro negro ou quadro branco, fornecem um conjunto de ferramentas para implementar essas ideias.

O modelo que tem dominado o entendimento psicológico sobre a memória humana, ainda que impreciso ou incompleto em alguns aspectos (GAZZANIGA et al., 2012, cap. 7), foi proposto por Richard Atkinson e Richard Shiffrin em 1968 (ATKINSON; SHIFFRIN, 1968), sendo chamado de *modelo de memória modal*. Neste modelo, a memória humana é dividida em três: *memória sensorial*; *memória de curto prazo*, ou *memória de trabalho*; e *memória de longo prazo*. Conforme (GAZZANIGA et al., 2012, cap. 7), um estímulo sensorial é capturado pela memória sensorial, mas será logo esquecido caso não receba atenção. Ao receber atenção, a informação do estímulo adentra à memória de curto prazo, ou memória de trabalho, onde deve ser repetida para ser lembrada. Quando um conjunto de informações é codificado, ele é gravado na memória de longo prazo, onde as informações são mantidas por tempo indeterminado, pois podem ser esquecidas. É possível, também, que uma informação da memória de longo prazo seja recuperada para a memória de curto prazo. A Figura 2.8 ilustra o fluxo de informação dentro deste modelo.

Figura 2.8 – Modelo de memória modal, adaptado de (GAZZANIGA et al., 2012, cap. 7).

O modelo de memória modal contribui para a organização de um sistema robótico distribuído, pois sua abstração permite definir três categorias de dados: voláteis, temporários e permanentes:

- **Dados voláteis** seriam aqueles gravados na memória sensorial, possuindo um “tempo de vida” (TTL, do termo inglês *time to live*). Estes dados são disponibilizados para leitura a todos os módulos até atingirem seu TTL, quando são apagados. Quando um módulo lê um dado volátil, ele o copia como um dado temporário. Conforme ilustra a Figura 2.7, dados voláteis podem ser gerados por módulos de interface para hardware (dados sensoriais), por processadores de dados (informações), e pelo controlador (variáveis de controle).

- **Dados temporários** são os dados voláteis que, na linguagem do modelo modal, “receberam atenção” e, portanto, foram copiados para a memória de curto prazo dos módulos “interessados”. O resultado do processamento dos dados temporários pode gerar novos dados voláteis ou dados permanentes.
- **Dados permanentes** referem-se à memória de longo prazo e são, portanto, gravados para consultas posteriores pelos módulos da arquitetura de controle. Eventualmente, alguns dados deixarão de ser necessários e poderão ser apagados.

É importante ressaltar que os dados voláteis e os dados permanentes são acessíveis a todos os módulos da arquitetura de controle, existindo, portanto, numa memória global. Contudo, os dados temporários são acessíveis apenas aos módulos que os copiaram. Durante a execução, cada módulo constitui-se de um processo que possui memória local – equivalente à memória de trabalho, ou de curto prazo – para a qual os dados são copiados a fim de serem processados. Embora seja possível manter os dados temporários acessíveis a todos os demais processos, isso não é interessante do ponto de vista prático, pois acarretaria em gargalos de comunicação para a atualização da memória global sem contribuir para acelerar o processamento dos dados. Institui-se, portanto, dois níveis de memória: *global*, onde os módulos se comunicam criando dados voláteis e permanentes; e *local*, presente em cada módulo. Por praticidade, a memória global é tratada neste trabalho como *espaço de memória*, enquanto a memória local é referida como *memória de curto prazo*, conforme explicitado na Figura 2.7.

O sistema de comunicação descrito possui semelhança ao sistema computacional de *quadro branco* (*whiteboard system*), que por sua vez é uma extensão do conceito de *quadro negro* (*blackboard system*) da Inteligência Artificial. Em um sistema de quadro negro, diferentes softwares especialistas, chamados de “fontes de conhecimento”, atualizam iterativamente as informações num mesmo espaço de dados (o quadro negro) até que as soluções parciais de um problema fornecidas por cada fonte de conhecimento levem à solução final (CHU et al., 2013; CRAIG, 1995). Os quadros brancos, no entanto, servem como um meio de comunicação e armazenamento de dados, onde vários agentes podem colaborar para criar e coletar dados durante a solução de um problema (REILENT, 2012; THÓRISSON et al., 2005). De certa forma, o *espaço de memória* pode ser considerado um sistema de quadro branco.

Para compor o espaço de memória, foi utilizado um banco de dados (BD) NoSQL, do inglês “*not only structured query language*” (“não somente linguagem de busca estruturada”), nomenclatura dada à BDs não-relacionais, distribuídos, de código-aberto e horizontalmente

escaláveis (EDLICH, 2014). Muito embora os BDs NoSQL ainda possuam desempenho inferior aos BDs relacionais (FLORATOU et al., 2012; HAN et al., 2011), eles tendem a aceitar modelos de dados mais flexíveis (FLORATOU et al., 2012), além de oferecer uma alternativa à SQL, que pode gerar códigos complexos que não atendem as necessidades do desenvolvimento ágil moderno (LEAVITT, 2010). A flexibilidade de projeto e acesso aos dados em um BD NoSQL foram as razões que levaram à sua adoção para compor o espaço de memória, conforme será detalhado na Seção 3.4.

2.5.2 Interfaces para hardware

As interfaces para hardware correspondem ao módulo responsável pela aquisição e decodificação dos sinais dos sensores, e pelo acionamento dos atuadores. No mesmo sistema robótico pode existir uma ou mais interfaces para hardware.

Ao adquirir um *dado sensorial*, a interface para hardware escreve este dado no *espaço de memória* como um *dado volátil*, atribuindo-lhe um TTL compatível com a taxa de aquisição do sensor. Idealmente, o TTL deve ser igual ao período da taxa de amostragem do sensor, se apresentar uma taxa regular.

Quanto aos atuadores, a interface para hardware acessa periodicamente se há alguma *variável de controle* para algum de seus atuadores no *espaço de memória*. Caso encontre, esta variável é lida e utilizada como sinal de acionamento para o controlador do atuador correspondente. É importante salientar que a interface para hardware não apaga a *variável de controle* depois de uma leitura; a variável de controle deve ter um TTL estipulado pelo controlador.

2.5.3 Processadores de dados

Os processadores de dados são responsáveis por ler e processar os *dados sensoriais* para produzir alguma *informação* útil ao sistema. A definição destes módulos é ampla, pois têm a finalidade de prestar serviços de processamento ao controlador, reduzindo portanto a complexidade do controlador. Um exemplo de processador de dados é o servidor de visão computacional, descrito na Seção 3.6, que processa as imagens da câmera para detectar faces e QR codes (códigos QR). Outras possíveis aplicações que podem ser supridas pelos

processadores de dados são planejadores, geradores de relatórios, serviços de segurança, dentre outros.

2.5.4 Controlador

O controlador é o módulo que efetivamente aciona o robô móvel. Ele é composto por três “camadas”, conforme visto na Figura 2.7: emoções, deliberante e comportamentos. Esta Seção descreve, também, cada uma destas três “camadas”.

2.5.5 Emoções

Na Inteligência Artificial, os algoritmos de planejamento ou solução de problemas tradicionais são embasados em processos racionais e deliberativos. No entanto, este paradigma já se mostrou insuficiente para resolver os problemas enfrentados pelos robôs móveis (DUDEK; JENKIN, 2010; MATARIĆ, 2007; MEDEIROS, 1998) em tarefas simples como navegação. No escopo da Interação Humano-Robô, torna-se evidente que novas técnicas devem ser desenvolvidas para que os robôs resolvam problemas de forma socialmente adequada e natural para engajar as pessoas (MATARIĆ, 2007), cuja natureza é indiscutivelmente mais complexa e subjetiva. Foi com o intuito de desenvolver um sistema robótico capaz de expressar-se de forma natural que um módulo de emoções foi integrado à arquitetura de controle.

Apesar de estudada em diferentes áreas do conhecimento, não há uma definição consensual para “emoção” (MULLIGAN; SCHERER, 2012), dada sua complexidade e subjetividade. Para a Psicologia, a emoção refere-se aos sentimentos que envolvem avaliação subjetiva, processos fisiológicos e crenças cognitivas, além de serem respostas específicas a uma situação em um ambiente (GAZZANIGA et al., 2012, cap. 9). Os modelos psicológicos de emoções têm sido propostos sob duas teorias dominantes: *teorias de appraisal*, onde as emoções surgem de julgamentos subjetivo de eventos; e *teorias dimensionais*, que compreendem as emoções dentro de um espaço dimensional contínuo, não discreto (LARUE et al., 2013).

Neste trabalho, foi adotado o modelo circunflexo de Russel (POSNER et al., 2005; RUSSELL, 1980), onde as emoções são classificadas quanto a sua ativação (*arousal*) e valência (*valence*), conforme ilustra a Figura 2.9 (a). De acordo com este modelo, a ativação está

ligada ao grau de disposição ou agitação, enquanto a valência indica quão agradável ou desagradável é a experiência. Embora o modelo circunflexo defina a posição de 28 termos, este modelo foi reduzido para 11 termos com áreas bem definidas, conforme mostra a Figura 2.9 (b). Os termos escolhidos definem a emoção representada pelos demais termos originais, considerando também as seis expressões faciais universais de Ekman (1999): felicidade, tristeza, medo, raiva, surpresa e nojo. Portanto, os 11 termos são: raiva (*anger*), surpresa (*surprise*), excitação (*excited*), felicidade (*happy*), calma (*calm*), sonolência (*sleepy*), triste (*sad*), deprimido (*depressed*), nojo (*disgust*), medo (*fear*) e neutro (*neutral*).

Figura 2.9 – Diagramas representando (a) o Modelo circunflexo, adaptado de (RUSSELL, 1980), e (b) o modelo adotado neste trabalho (b), especificado pela Tabela 2.2.

Desta forma, dados os valores de valência v e ativação a , ambos contidos no intervalo $[-1; 1]$, é possível calcular o ângulo da emoção α_e e sua intensidade i , ou seja:

$$i = \sqrt{a^2 + v^2} \quad (2.1)$$

$$\alpha_e = \arctan\left(\frac{a}{v}\right) \quad (2.2)$$

A Tabela 2.2 mostra como o ângulo α_e é usado para classificar a emoção, considerando que os ângulos são dispostos no sentido horário. No entanto, se i for inferior ao limite da emoção neutra E_{Neutral} , a emoção será classificada como Neutra (*Neutral*).

Nesta arquitetura, o robô – na figura de seu controlador – possui humor, uma emoção duradoura representada pelos valores de valência e ativação (v_h, a_h) , respectivamente. Quando um estímulo dispara uma emoção com valência e ativação (v_e, a_e) ,

o valor atual $(v_{h,0}, a_{h,0})$ é interpolado em direção à (v_e, a_e) com uma magnitude m , onde $0 \leq m \leq 1$, especificada pelo estímulo enquanto a emoção durar, resultando num novo valor $(v_{h,1}, a_{h,1})$, conforme mostra a Equação (2.3). Por praticidade, as emoções definidas pelos 11 termos destacados pela Figura 2.9 são definidas tendo α_e como o valor da bissetriz entre os ângulos α_s e α_i correspondentes, ou seja:

$$[v_{h,1}, a_{h,1}] = [v_{h,0}, a_{h,0}] + ([v_e, a_e] - [v_{h,0}, a_{h,0}])m \quad (2.3)$$

Outros fatores podem acarretar mudanças no humor. Por exemplo, o decaimento da carga da bateria também afeta o valor de ativação a_h com o intuito de permitir ao robô expressar “sonolento”.

Tabela 2.2 – Classificação das emoções.

Emoção	Limite superior (α_s)	Limite inferior (α_i)
Excitado (Excited)	$\alpha_0 = 50^\circ$	$\alpha_1 = 20^\circ$
Felicidade (Happy)	α_1	$\alpha_2 = 340^\circ$
Calma (Calm)	α_2	$\alpha_3 = 300^\circ$
Sonolento (Sleepy)	α_3	$\alpha_4 = 240^\circ$
Tristeza (Sad)	α_4	$\alpha_5 = 195^\circ$
Deprimido (Depressed)	α_5	$\alpha_6 = 160^\circ$
Nojo (Disgust)	α_6	$\alpha_7 = 140^\circ$
Medo (Fear)	α_7	$\alpha_8 = 110^\circ$
Raiva (Anger)	α_8	$\alpha_9 = 80^\circ$
Surpresa (Surprise)	α_9	α_0

2.5.6 Comportamentos

Para a robótica, o conceito de *comportamento* é amplo, pois o termo é utilizado para se referir tanto ao entendimento global das ações exercidas pelo robô, quanto aos blocos básicos da arquitetura de controle. Esta seção preocupa-se em esclarecer os comportamentos enquanto blocos construtivos de uma arquitetura de controle comportamental.

Enquanto blocos construtivos, os comportamentos são análogos aos “estados” de uma máquina de estados finitos, que é consequentemente análoga à arquitetura de controle como um todo. Cada um destes comportamentos, ou estados, acionam o robô com o intuito

de atingir um objetivo local. A arquitetura de controle, portanto, tem como objetivo orquestrar estes comportamentos de tal modo que o cumprimento consecutivo dos objetivos locais dos comportamentos permita ao robô atingir seu objetivo global. O uso de máquinas de estados finitos (ARBIB et al., 1981) para definir uma arquitetura de controle é vantajoso, pois permite analisar formalmente as intenções do sistema por meio de uma linguagem de alto nível (ARKIN, Ronald C., 1998).

Dentre as arquiteturas comportamentais existentes, optou-se pelo princípio de organização de esquemas motores, proposta por Ronald Arkin (1987; 1989). Ele é baseado no conceito de “esquemas”, oriundo da Psicologia e Neurologia, além de incorporar conhecimento da Etologia e Inteligência Artificial. Primariamente, esta arquitetura se enquadra no paradigma reativo; no entanto, ela pode incorporar componentes deliberativos, tornando-a uma arquitetura híbrida, tal como a arquitetura híbrida AuRA (*Autonomous Robot Architecture*) (ARKIN, Ronald C.; BALCH, 1997), baseada em esquemas motores.

Um esquema motor é responsável por produzir um sinal R para acionar um atuador, e para tanto pode ser composto por um ou mais comportamentos. Cada comportamento β_i produz um sinal de resposta R_i para um conjunto de entrada S , formado pelos estímulos sensoriais s_i num dado instante de tempo t . Como vários comportamentos podem estar simultaneamente ativos, várias respostas R_i podem ser disponibilizadas para constituir o sinal R . Ao contrário das arquiteturas *subsumption* (BROOKS, R., 1985) e *action-selection methods* (MAES, 1990), onde os comportamentos são competitivos, os comportamentos de um esquema motor são cooperativos. Por essa razão, a abstração do neurônio artificial *Perceptron* é empregada com o intuito de integrar as várias respostas R_i , atribuindo-se um peso G_i para cada comportamento β_i . Consequentemente, o sinal de resposta R é obtido pela soma dos produtos entre R_i e G_i , conforme ilustra a Figura 2.10.

Figura 2.10 – Integração dos comportamentos por meio de soma, que se assemelha a um Perceptron.

A arquitetura de esquemas motores foi desenvolvida numa época onde o maior desafio para os robôs móveis era justamente navegar com segurança no ambiente.

Consequentemente, nos trabalhos originais, as respostas R_i e R consistiam em vetores de velocidades no plano $(\dot{x}, \dot{y})$ ou no espaço $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$. No entanto, este trabalho considera a resposta R como um sinal de acionamento para um atuador qualquer, que pode ser diferente do sistema de tração dos motores. Além disso, a mudança dinâmica dos pesos G_i é um meio prático para criar comportamentos adaptativos, sem ferir seu formalismo.

2.5.7 Deliberante

No mundo real, um robô móvel pode se deparar com situações imprevistas que podem comprometer a segurança ou o cumprimento da tarefa. De fato, é virtualmente impossível prever todos os desdobramentos que podem existir durante o funcionamento de um robô. Todavia, o robô deve atender ao menos os requisitos de segurança e da aplicação. Em casos onde o planejamento das ações, o mapa do ambiente, a presença de obstáculos ou mesmo o objetivo do robô estejam errados ou incompletos, o robô deve tomar uma decisão que, no caso de uma arquitetura comportamental, ative o comportamento correto para evitar acidentes e, se necessário, replaneje ou atualize os dados referentes ao mundo e à tarefa.

O módulo responsável por ativar e desativar comportamentos é chamado de *deliberante*, pois é aquele que conduz os comportamentos de modo que o robô atinja seu objetivo global, respondendo de forma imediata aos imprevistos para evitar acidentes. É importante ressaltar que em se tratando de um robô voltado para a IHM, cujo período de operação exceda o tempo necessário para cumprir tarefas, como no caso de um robô de companhia que está aguardando ordens, o *deliberante* deve, também, conduzir os comportamentos mesmo quando um objetivo global não for estipulado. Para este fim, o *deliberante* usa seu humor e emoções para manter-se regulado.

Visto que o *deliberante* deve tomar decisões (deliberar) sob circunstâncias diferentes – ocasionalmente com objetivos conflitantes –, é evidente a necessidade de um meio de organizar a escolha de objetivos a serem cumpridos. Inspirado pela hierarquia de necessidades de Maslow (1943), que define uma hierarquia para as necessidades humanas, foram definidas 3 camadas hierárquicas de uma pirâmide de necessidades (Figura 2.11) que o robô deve atender para operar satisfatoriamente: *plano*, *regulação* e *segurança*. A prioridade de cada camada foi definida levando-se em conta três diretrizes de ética apresentadas (ASIMOV, 1942; MURPHY, Robin; WOODS, 2009; WINFIELD, 2013).

Figura 2.11 – Necessidades do robô móvel.

Na base da pirâmide está a camada de *segurança*. Isso implica que qualquer comportamento disparado por razão de segurança tem prioridade sobre os demais comportamentos do robô. Isso não significa que o objetivo global do robô será sobrescrito; na verdade, ele será colocado em segundo plano até que o objetivo local de segurança seja atendido.

No meio da pirâmide, encontra-se a camada de *regulação*, que por sua vez é inspirada no conceito fisiológico de homeostasia. Homeostasia é a capacidade de um sistema biológico de manter estáveis e relativamente constantes as suas condições internas, por meio de mecanismos de regulação (JAKOI; CARBREY, 2015). Adaptando este conceito para um sistema robótico, define-se a *regulação* como um conjunto de processos cujo objetivo é manter a integridade interna e a operacionalidade do robô. Os processos desta camada têm como objetivo, por exemplo, manter a carga da bateria em níveis aceitáveis para trabalho, evitar a sobrecarga em seus atuadores, e verificar o sistema em busca de falhas. Por essa razão, a camada de regulação pode, eventualmente, disparar comportamentos que busquem auxiliar na manutenção da operacionalidade do robô.

No topo da pirâmide encontra-se a camada de *plano*, que contém o objetivo global do robô e o conjunto de ações necessárias para alcançá-lo. Os planos podem ser planejados sob demanda por um algoritmo planejador (implementado como um módulo *processador de dados*) ou pré-estabelecidos por um algoritmo ou por um especialista.

A simplicidade do deliberante proposto, por um lado, permite avaliar o desempenho da emoção, que se torna mais proeminente. Por outro lado, sua capacidade de inferência limitada o impede de realizar qualquer consideração a respeito das diretrizes de ética. Por esta razão, os comportamentos propostos e suas respectivas prioridades, bem como os demais módulos da arquitetura de controle, foram projetados para atender aos requisitos de segurança e ética, de tal modo que o deliberante acione comportamentos sem infringir qualquer regra, ainda que ele seja incapaz de raciocinar e compreender os desdobramentos éticos de suas ações.

3 ESTUDO DE CASO EM ROBÓTICA SOCIAL

ASSISTIVA

“Você não precisa prever o futuro. Só escolha um futuro – um futuro bom, um futuro útil – e faça o tipo de previsão que alterará as emoções e reações humanas de tal forma que o futuro que você previu seja criado. É melhor criar um futuro bom que prever um mau.”

Isaac Asimov (Prelude to Foundation, 1988, tradução nossa)

Todo robô é criado para um propósito. Sua finalidade impõe as características do seu corpo – sua estrutura mecânica, sensores e atuadores – e, também, os comportamentos que compõem sua arquitetura de controle. Na verdade, os robôs chamados de “propósito geral” se destinam a um nicho limitado de aplicações, e o mesmo se aplica às arquiteturas de controle. Ou seja, a organização da arquitetura de controle apresentada no Capítulo 2 é de “propósito geral” justamente porque está incompleta. É necessário, portanto, definir uma aplicação que permita completar a arquitetura de controle desenvolvida e avaliá-la.

Dentre as numerosas áreas para as quais a organização de arquitetura de controle desenvolvida pode contribuir, destaca-se a área assistencial da saúde, em que as tecnologias assistivas têm favorecido pessoas com disfunção, ou até mesmo ausência, de uma estrutura anatômica, fisiológica ou cognitiva. Nesta área, o uso de robôs sociais assistivos é relevante, visto que podem auxiliar tanto no tratamento da disfunção, quanto na inclusão social do sujeito. De fato, estes robôs têm sido aplicados com êxito em exercícios de reabilitação (REINKENSMEYER et al., 2001; URIBE-QUEVEDO, 2011), para a interação com crianças com Transtorno do Espectro Autista (TEA) (COECKELBERGH et al., 2015; DAUTENHAHN; BILLARD, 2002; DUQUETTE et al., 2007; IACONO et al., 2011; KIM, Elizabeth et al., 2012; KIM, Elizabeth S. et al., 2013; MICHAUD; CLAVET, 2001; ROBINS, B. et al., 2005; ROBINS, Ben et al., 2010; WERRY; DAUTENHAHN, 1999), inclusão social para crianças com deficiências motoras severas (VALADAPO et al., 2011), e robôs de companhia para auxiliar pessoas com deficiência (REMAZEILLES et al., 2008). Consequentemente, a pertinência dessa área e o sucesso de iniciativas correlatas subsidiaram o desenvolvimento de um estudo de caso sobre o uso de robótica social assistiva como ferramenta auxiliar para educação especial de crianças com TEA, para o qual a organização da arquitetura de controle inteligente foi utilizada e avaliada.

Este capítulo, portanto, presta-se ao esclarecimento do estudo de caso em robótica social assistiva. Inicialmente, será apresentada a *contextualização* do ensino especial para crianças com TEA, enfatizando a análise de requisitos levantados junto a especialistas da área. Em seguida, o estudo de caso será descrito mediante os aspectos éticos e de IHR apresentados no Capítulo 2. As seções subsequentes descreverão o desenvolvimento técnico do estudo de caso, tendo início com a apresentação do robô móvel *Pomodoro*, desenvolvido especificamente para este estudo. Também será abordada a *arquitetura de software* adotada para o desenvolvimento do sistema completo, dando detalhes sobre: a implementação do *Espaço de memória* da arquitetura de controle; a especificação do *Sistema robótico* que diz respeito às *Interfaces para hardware*, ao *Processador de dados*, e ao *Controlador* da arquitetura de controle; e a elaboração de um *Sistema de informação* que estende a funcionalidade do robô desenvolvido.

Finalmente, a escolha de um “futuro bom”, no qual as pessoas estão incluídas na sociedade, a despeito de suas adversidades, e a subsequente previsão de que tecnologias assistivas reduzirão o impacto das disfunções na vida das pessoas foram, também, elementos motivadores deste trabalho.

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O uso da robótica social assistiva para a terapia de crianças com TEA tem obtido resultados positivos (COECKELBERGH et al., 2015; DAUTENHAHN; BILLARD, 2002; DUQUETTE et al., 2007; GOULART, Christiane et al., 2014; GOULART, C.M. et al., 2014; IACONO et al., 2011; KIM, Elizabeth et al., 2012; KIM, Elizabeth S. et al., 2013; MICHAUD; CLAVET, 2001; ROBINS, B. et al., 2005; ROBINS, Ben et al., 2010; WERRY; DAUTENHAHN, 1999). Acredita-se que a natureza artificial e previsível dos robôs os tornam facilmente compreensíveis para as crianças com TEA, ajudando a estimular as habilidades sociais delas (DUQUETTE et al., 2007), uma vez que eles podem utilizar a fala, sons, elementos visuais e gestos para estabelecer uma comunicação significativa (MICHAUD; CLAVET, 2001). Esse êxito das aplicações de robótica social assistiva para crianças com TEA incentivou o desenvolvimento de um estudo de caso para esta área.

Para concretizar este estudo de caso, foi realizada uma colaboração acadêmica com pesquisadores de outros dois grupos de pesquisa: o Grupo de Integração de Sistemas e Dispositivos Inteligentes (GISDI)⁴, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus de

---

⁴ Site do Grupo no diretório do CNPq: <<http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/5900607534436136>>.

Bauru, sob orientação do Prof. Dr. Humberto Ferasoli Filho; e o grupo de Robótica e Automação Industrial (LAI)⁵ da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), sob orientação do Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho. A colaboração entre os grupos de pesquisa foi fundamental para a criação do robô Pomodoro, cujo projeto e desenvolvimento foi realizado junto ao GISDI, e para a elaboração da proposta do estudo de caso, realizado com apoio do LAI, que viabilizou as entrevistas com especialistas da Associação dos Amigos dos Autistas do Espírito Santo (AMAES) e da Escola Municipal de Ensino Fundamental da UFES, além de profissionais do próprio grupo. Neste sentido, este estudo de caso inspirou-se nas experiências com o robô MARIA (*Mobile Autonomous Robot for Interaction with Autistics*) que é empregado no estudo do desenvolvimento de habilidades sociais em crianças com TEA (GOULART, Christiane et al., 2014; GOULART, C.M. et al., 2014), como mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Robô MARIA durante uma seção de terapia com uma criança com TEA, modificado de (GOULART, Christiane Mara, 2015).

Balizando-se, portanto, em trabalhos consolidados de ambos os grupos, foi proposto aqui um ambiente de educação especial onde as crianças com algum atraso cognitivo, tais com aquelas enquadradas com TEA, pudessem participar de atividades lúdicas com o apoio de um robô móvel. Neste ambiente, o robô interage autonomamente com a criança mediante a um repertório de atividades codificadas como comportamentos, que por sua vez são acionados de acordo com o estado emocional do robô. Deste modo, o robô se comporta como um “animal” que, quando recebe a atenção da criança, desenvolve as atividades lúdicas, mas quando se encontra sozinho ou ignorado, busca satisfazer suas

⁵ Site do Grupo no diretório do CNPq: <<http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupos/0394130757582217>>.

próprias necessidades. Além disso, o robô é capaz de expressar emoções por meio de sua “face”, propiciando atividades que trabalham o conceito de emoções para as crianças.

Os comportamentos do robô móvel, portanto, desempenham as atividades lúdicas e as ações que permitem ao robô operar de modo seguro, segundo a orientação dos especialistas consultados. São eles:

- **Jogo de dança**, onde o robô chama a atenção da criança para se movimentar enquanto o robô toca uma música e se movimenta. O objetivo desta atividade é desenvolver na criança habilidade de prestar atenção quando é chamada e, também, de usar seu corpo para se expressar.
- **Jogo de cartões**, onde o robô chama a atenção da criança para um jogo cujo objetivo é ensinar à criança alguns conceitos básicos. Para isso, são dispostos na mesa alguns cartões com figuras (por exemplo, frutas); o robô mostra uma das figuras e vocaliza seu nome (por exemplo, se ele mostrar a figura de uma maçã, ele sintetizará a palavra “maçã”), pedindo depois que a criança mostre o cartão. Se ela não mostrar nenhum cartão, o robô tenta por uma quantidade determinada de vezes a interação. Caso a criança mostre o cartão errado, o robô incentiva a criança a continuar tentando e, caso mostre o cartão certo, o robô a parabeniza.
- **Toque**, onde o robô apenas pede para que a criança toque em sua face. Apesar de simples, esta atividade tem por objetivo reduzir nas crianças com TEA a aversão ao toque.
- **Buscar pessoa**, onde o robô move-se livremente dentro da sua área de trabalho buscando por uma pessoa.
- **Descansar**, onde o robô simula estar dormindo.
- **Evitar perigo**, onde o robô aciona seus atuadores a fim de garantir sua integridade física e a segurança do usuário.

É importante esclarecer que o propósito dos comportamentos autônomos não é substituir a figura do terapeuta. Pelo contrário, o ambiente foi concebido para facilitar o trabalho do terapeuta, que pode voltar toda sua atenção para a criança, uma vez que o robô não precisa ser controlado remotamente. Por essa razão, foi criado, adicionalmente, um sistema de informação que permite ao terapeuta conduzir a terapia por meio de uma interface simples, além de fornecer meios para a coleta de dados para a avaliação automática do desempenho da criança conforme percebido pelo robô.

Outro aspecto diferenciador do ambiente proposto é seu tamanho. Consciente de que o espaço físico é, em geral, restritivo, o Robô Pomodoro foi proposto com dimensões adequadas para operar sobre uma mesa. Embora suas dimensões diminutas reduzam a quantidade de dispositivos que o robô pode comportar, o Pomodoro foi construído com sensores e atuadores de interesse para a robótica social assistiva, contando inclusive com uma base computacional embarcada, constituída por um *smartphone*. Conforme será explorado na seção subsequente, o *smartphone* oferece meios para reconhecimento e síntese de fala, comunicação visual, visão computacional e comunicação sem fio.

A complexidade e abrangência deste ambiente de educação especial exigiu o acompanhamento de uma equipe multidisciplinar, que envolveu pessoas das áreas de Engenharias, Sistemas de Informação, Biotecnologia, Pedagogia, Psicologia, Fonoaudiologia e Terapia Ocupacional – reforçando a importância da colaboração acadêmica firmada.

A discussão acima sobre a aplicação que compõe o ambiente proposto neste estudo de caso pode ser organizada de acordo com os cinco atributos da IHR apresentados pela Seção 2.2, conforme mostra a Tabela 3.1. A tabela também ajuda a avaliar a aplicação sob a ótica da ética para robôs, pois mostra que a aplicação não possui natureza danosa (primeira e terceira lei), ilegal (segunda lei), fraudulenta (quarta lei), ou espúria (quinta lei). Cabe aqui ressaltar que esta aplicação está, também, em consonância com os aspectos éticos inerentes à pesquisa com seres humanos, estabelecidos na Resolução nº 466/12 do Conselho Nacional de Saúde (2012) e em suas normas complementares.

Tabela 3.1 – Estudo de caso analisado conforme os cinco atributos da IHR apresentados pela Seção 2.2.

Atributo	Especificação
Natureza da tarefa	Educação especial para crianças com algum atraso cognitivo, tais como aquelas enquadradas com TEA, que participam das seguintes atividades lúdicas com um robô móvel: jogo de dança, jogo de cartões e toque. O robô também é capaz de buscar pessoas, descansar e evitar perigo.
Autonomia	O terapeuta determina o tempo de funcionamento do robô. Enquanto estiver funcionando, o robô desempenha seus comportamentos predefinidos.
Estrutura da equipe	Um robô; uma criança; e um ou mais terapeutas que conduzem e facilitam a interação entre a criança e o robô.
Comunicação	O robô comunica-se diretamente por meio de síntese de fala e por imagens projetadas em uma tela; indiretamente, por meio do sistema de informação, que mostra dados sensoriais e o estado emocional do robô.
Adaptação e aprendizagem	Os comportamentos se adaptam por meio das emoções sintéticas do robô. Não foi desenvolvido um algoritmo de aprendizagem de máquina.

Finalmente, a Tabela 3.2 apresenta uma discussão de como a aplicação desenvolvida se adequa às cinco leis apresentadas na Seção 2.1 (ENGINEERING AND PHYSICAL SCIENCES RESEARCH COUNCIL; ARTS AND HUMANITIES RESEARCH COUNCIL, 2010). Para a conveniência do leitor, as leis já apresentadas na Seção 2.1 foram reproduzidas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Adequação da aplicação proposta ao código de ética apresentado pela Seção 2.1.

Lei	Adequação da aplicação
Robôs são ferramentas multiuso. Robôs não devem ser projetados somente ou primariamente para matar ou ferir humanos, exceto quando de interesse para a segurança nacional.	A aplicação proposta tem caráter assistivo e, portanto, foi desenvolvida para garantir a segurança do usuário e contribuir para a melhora de seu quadro clínico por meio de atividades lúdicas
Humanos, não os robôs, são agentes responsáveis. Os robôs devem ser projetados e operados na medida do possível para obedecer às leis existentes, liberdades e direitos fundamentais, incluindo a privacidade.	O robô, apesar de ser o “coordenador” das atividades lúdicas, não é o responsável pela sessão de terapia, cuja responsabilidade e controle é do terapeuta. As atividades seguem as normas estabelecidas pelo conselho nacional de saúde. Ademais, os dados coletados são usados apenas para avaliar a evolução do quadro clínico do paciente.
Robôs são produtos. Eles devem ser projetados usando processos que garantam que sejam confiáveis e seguros.	O robô Pomodoro foi projetado com características que garantam a segurança de manipulação, enquanto sua arquitetura garante a segurança de operação.
Robôs são artefatos manufaturados. Eles não devem ser projetados de forma fraudulenta para explorar usuários vulneráveis; ao contrário, sua natureza mecânica deve ser transparente.	O robô Pomodoro tem aspecto artificial, não sendo possível confundi-lo com um ser natural. Apesar de poder ser utilizado para trabalhar o conceito de “emoções”, o robô não explora as emoções do paciente; pelo contrário, é o terapeuta que pode explorar as emoções sintéticas do robô para trabalhar este conceito.
Deve ser atribuída à uma pessoa a responsabilidade legal por um robô.	Certamente, durante a condução desta pesquisa, a responsabilidade legal é do autor deste trabalho. Numa aplicação real, o responsável é o terapeuta e a instituição.

3.2 ROBÔ POMODORO

Para compor o ambiente de educação especial descrito acima, foi desenvolvido o robô denominado Pomodoro, cuja inspiração vem de trabalhos anteriores sobre o entretenimento de crianças com deficiência motoras severas pelo GISDI e LAI (ALVES et al., 2013; FERASOLI FILHO et al., 2012). Com o objetivo de ser uma plataforma robótica experimental de baixo custo e fácil acesso para o público da IHR, o Pomodoro foi projetado segundo os conceitos de *design universal*, que é a disciplina que aborda o problema de desenvolver um produto ou ambiente para atender o maior número de pessoas de todas as

idades e habilidades para, assim, promover a inclusão de todas as pessoas em toda a atividade humana (STORY et al., 1998). Obviamente, é difícil desenvolver um produto que atende a todas as pessoas em todas as circunstâncias, portanto o design universal deve ser entendido como um processo cuja meta é abordar a maioria de seus princípios e objetivos (STEINFELD; MAISEL, 2012). Consequentemente, o processo criativo do robô Pomodoro foi orientado para o público infantil e, portanto, considerou aspectos que tratam das dimensões e formas físicas apropriadas, as cores e texturas, os materiais, as características de comunicação e de hardware. Este processo levou à enumeração dos seguintes requisitos para o robô:

- Ele deve ser pequeno o suficiente para que os experimentos sejam realizados sobre uma mesa, ou seja, não há a necessidade de grandes espaços;
- Sua estrutura mecânica deve ser facilmente replicável, e seus componentes, de baixo custo;
- Seu corpo não deve apresentar formas que possam causar desconforto ou machucar o usuário, como arestas afiadas ou orifícios que possam prender os dedos;
- Seu peso e forma devem facilitar o manuseamento do robô;
- Sua forma deve ser considerada amigável pelos usuários;
- Ele deve ser capaz de comunicar-se com as pessoas, seja de forma explícita ou implícita, verbal ou não-verbal;
- Ele deve possuir capacidade de processamento embarcada suficiente para não depender de processamento externo, mas deve apresentar meios para acessar uma base computacional externa quando necessário.

Estes requisitos levaram ao desenvolvimento do robô mostrado pela Figura 3.2. Suas cores são vivas, para chamar a atenção de usuários infantis, e seu corpo é desenhado com formas arredondadas, que proporcionam uma visão agradável do robô, ao mesmo tempo em que evita quinas que podem colocar em risco o usuário. Seu corpo é montado por peças acrílicas planas, mostradas pelo Apêndice C, que podem ser substituídas por outros materiais, caso necessário, e não requerem maquinário complexo para replicação.

Além disso, o robô possui alguns sensores e atuadores que o permitem locomover-se pelo ambiente de forma segura, evitando quedas e colisões, conforme apresenta a Tabela 3.3. Adicionalmente, como será discutido a seguir, foi proposto o uso de um telefone celular com sistema operacional moderno (*smartphone*) como a base computacional embarcada.

Figura 3.2 – Robô Pomodoro com o celular e sem a “roupa” protetora (a), e com a roupa protetora (b).

Tabela 3.3 – Sensores e atuadores do robô Pomodoro.

Dispositivo	Qtd.	Função
Sensor de refletância frontal	2	Evitar quedas
Sensor de refletância traseiro	3	Evitar quedas
Sensor de refletância central	2	Detectar faixas pretas no chão
Sensor de distância	1	Detectar obstáculos
Motor CC	2	Tração diferencial
Servo-motores	2	Movimentar (pan-tilt) o suporte do celular

Finalmente, o robô adotou o sistema de tração diferencial, que tem as vantagens de ser fácil de implementar mecanicamente e simples de modelar, mas cujo controle – principalmente para seguir uma linha reta – não é tão trivial (BORENSTEIN et al., 1995). Seu modelo cinemático é mostrado a seguir.

3.2.1 Modelo Cinemático

Considere OX_gY_g e CX_lY_l (Figura 3.3) como os planos global e local do robô móvel, respectivamente, C como o centro de massa do robô, r como o raio da roda, R como a distância entre as rodas, $\dot{\phi}_d$ e $\dot{\phi}_e$ como as velocidades angulares das rodas direita e esquerda,

v e ω como as velocidades linear e angular do robô, e θ como a orientação do robô, conforme mostra a Figura 3.3. No caso do robô Pomodoro, suas medidas, em milímetros, são $R = 62,0\text{mm}$ e $r = 43,0\text{mm}$.

Figura 3.3 – Modelo cinemático de um robô móvel de tração diferencial.

O modelo cinemático do robô pode ser descrito conforme a Equação (3.1) e também em termos de velocidades nos eixos e de rotação, como mostra a Equações (3.2), (3.3) e (3.4).

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_d \\ \dot{\phi}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{R}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{R}{r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\dot{x}_C = v \cos \theta \quad (3.2)$$

$$\dot{y}_C = v \sin \theta \quad (3.3)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3.4)$$

3.2.2 Arquitetura de Hardware

O hardware do robô, mostrado na Figura 3.4, é composto por dois módulos separados: um hardware integrado, com o circuito para ativar os motores e leitura de sensores, e um *smartphone*, que irá implementar a arquitetura de controle. O hardware embarcado implementa um sistema supervisor responsável por: ler sete sensores infravermelhos (IV) de refletância, utilizados para prevenir acidentes, como quedas, ou detectar a cor do solo; um sensor de distância infravermelho, usado para detectar obstáculos; ler o nível da bateria; ativar dois motores de corrente contínua (CC) ligados às rodas; e acionar dois servo-motores padrão, que estão ligados a um mecanismo que permite

que o robô possa alterar a inclinação e direção de um suporte que será usado para fixar um telefone celular. O supervisor não é autônomo; ele recebe comandos de uma base computacional através de uma ligação Bluetooth. Essa base computacional pode ser um computador remoto ou um *smartphone* embarcado no robô. O circuito eletrônico do robô Pomodoro é mostrado no Apêndice D.

Figura 3.4 – Arquitetura de hardware do robô Pomodoro.

Originalmente criado para ser usado como um assistente pessoal avançado, o *smartphone* aumentou sua relevância no mercado, expandiu suas funcionalidades, melhorou sua conectividade e eficiência energética, e teve seu custo reduzido. Em geral, os *smartphones* convergiram para um conjunto mínimo de dispositivos e interfaces, que estão disponíveis dentro das suas arquiteturas de hardware. Cada um desses dispositivos fornece um recurso a ser explorado na área de robótica, como será discutido a seguir.

Os sistemas operacionais móveis modernos exigem poder de processamento considerável, portanto, todo *smartphone* fornece um *microprocessador embarcado*. As características dos processadores embarcados, como quantidade de núcleos e taxa de clock, bem como a memória, variam de acordo com a classe do aparelho de telefonia. Isso permite que o usuário empregue um dispositivo que tem uma unidade de processamento adequada.

Todos os *smartphones* atuais possuem uma tela de LCD (*Liquid Crystal Display*) ou AMOLED (*Active-Matrix Organic Light-Emitting Diode*) utilizada para informações visuais ao usuário. Estas telas podem ser utilizadas para exibir dados a respeito do robô através de uma interface de usuário padrão, mas podem, também, exibir uma face virtual cuja expressão remete ao estado ou comportamento do robô móvel. Esta abordagem foi utilizada por (LEE, Jae-Joon et al., 2012) para estudar a interação robô-criança, e também pode ser utilizado para imitar as expressões utilizadas para comunicar com crianças autistas, como em (KIM, Elizabeth et al., 2012; SHAMSUDDIN et al., 2012).

A grande maioria das telas é sensível ao toque. A *tela sensível ao toque (touchscreen)* consiste na interface mais comuns para *smartphones*. Consiste em uma tela capacitiva capaz de monitorar, com precisão, o contato de um ou mais dedos. Assim, este dispositivo é geralmente utilizado como uma interface para acessar menus. No entanto, também pode ser usada para rastrear eventos tácteis na sua superfície, que podem ajudar no tratamento do autismo, tal como apresentado em (AMIRABDOLLAHIAN et al., 2011).

No que tange os sensores, a maioria dos *smartphones* está equipada com uma *câmera traseira* de alta qualidade. Alguns modelos trazem, também, uma *câmera frontal* de qualidade inferior, geralmente no padrão VGA (*Video Graphics Array*). Tais câmaras podem ser usadas para meios de navegação, para permitir o reconhecimento de um objeto dentro da arena, ou para reconhecer o rosto do usuário.

Outros sensores comumente encontrados são os acelerômetros e giroscópio, que permitem que o *smartphone* rastreie sua orientação no espaço tridimensional. Além de servirem como fonte de dados para o sistema de navegação inercial, o acelerômetro e o giroscópio podem ser utilizados como uma interface para controlar o robô, ou seja, convertendo sua orientação ou aceleração em comandos para o robô. Isso pode permitir que usuários com alguma dificuldade motora comandem o robô utilizando uma parte do corpo que possam efetivamente controlar.

Smartphones também são equipados com entrada e saída de áudio, que permitem ao usuário gravar e reproduzir estímulos sonoros. Para a robótica, tais sensores são de grande interesse, pois permitem criar uma interface de conversação. Alguns sistemas operacionais, como o Android, fornecem suporte ao reconhecimento e síntese de fala em muitas línguas, incluindo o português.

Além dos protocolos comuns da telefonia móvel, como GSM (*Global System for Mobile Communications*) ou CDMA (*Code Division Multiple Access*), os *smartphones* em geral fornecem dois meios de comunicação padrão: Bluetooth e Wi-Fi. Alguns modelos também oferecem outros protocolos, como o NFC (*Near Field Communication*) e IrDA (*Infrared Data Association*). Entre estes, os mais interessantes para a robótica são o Bluetooth e Wi-Fi, que permitem a conexão entre robôs e computadores que servem como base de processamento remoto.

Além disso, o usuário será capaz de verificar o estado do robô por meio das “faces” exibidas na tela e dos sons emitidos pelos alto-falantes. O usuário também será capaz de interagir com o robô por intermédio de toques na tela. A câmera do robô será utilizada para reconhecer objetos e a face do usuário, enquanto o acelerômetro será usado para auxiliar na navegação.

3.2.3 Expressões faciais

Recapitulando a discussão da Seção 2.2, a comunicação é um dos principais aspectos para a IHR, que hoje busca por interfaces mais naturais e intuitivas. A habilidade de expressar emoções é um aspecto fundamental da comunicação humana e, portanto, é de grande interesse para a robótica. Muito embora todo o corpo contribua para a comunicação não-verbal, a face se sobressai na capacidade de exprimir o estado emocional de alguém. Ter uma face é, portanto, importante para um robô móvel que possui emoções sintéticas, pois constitui uma interface intuitiva de comunicação.

Todavia, o projeto da aplicação de educação especial deve ser cauteloso no desenvolvimento de suas interfaces, pois seu público pode possuir dificuldades de compreender a informação complexa da face, tal como acontece com as crianças com TEA (THOMEER et al., 2015). Considerando esta dificuldade, a proposta dos especialistas consultados foi a adoção de pictogramas que representassem as faces do robô, pois assim apenas as estruturas mais relevantes da face – os olhos e a boca (GAZZANIGA et al., 2012) – seriam representados, reduzindo consideravelmente a complexidade gráfica da face do robô. Destarte, foram adotados pictogramas, fornecidos pela Freepik⁶, para cada uma das 11 emoções definidas na Seção 2.5.5. As cores utilizadas também variam de acordo com a emoção, com o intuito de ajudar no desenvolvimento do conceito de cores. Neste caso, as cores do plano de frente são mais escuras que as cores do plano de fundo para garantir o fácil reconhecimento dos pictogramas como faces. A relação das emoções e seus pictogramas e cores são dados pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Relação das emoções e seus pictogramas e cores respectivas.

	Emoções					
	Raiva	Surpresa	Excitação	Feliz	Calmo	Sonolento
Pictograma						
Cor	Vermelho	Amarelo	Verde escuro	Verde	Verde claro	Verde claro
	Triste	Deprimido	Nojo	Medo	Neutra	
Pictograma						
Cor	Azul	Azul escuro	Lilás	Roxo	Verde claro	

⁶ Freepik <<http://www.freepik.com>>.

3.3 MODELAGEM DO SISTEMA DE SOFTWARE

O desenvolvimento do sistema de software que compõe o ambiente de educação especial proposto foi iniciado com a sua modelagem. O processo de modelagem de software permite representar os diferentes aspectos do software em linguagem visual, com o intuito de facilitar a comunicação entre profissionais de áreas distintas a respeito do mesmo sistema – sendo este o motivo que levou a sua adoção neste trabalho. Dentre as ferramentas de modelagem, escolheu-se a linguagem UML (*Unified Modelling Language*), que padroniza diagramas capazes de representar tanto a estrutura quanto o comportamento (ou funcionamento) do software.

Primeiramente, a funcionalidade do sistema foi estudada utilizando-se *diagramas de caso de uso*, que descrevem os *objetivos de negócio* que os *atores* (usuários e sistemas autônomos) pretendem alcançar por intermédio do software. Em se tratando de um sistema assistivo, os objetivos terapêuticos podem ser, também, objetivos de negócio. Portanto, esta seção se atentou aos objetivos terapêuticos ligados ao uso do robô móvel, e apenas alguns aspectos básicos de um sistema de informações gerenciais. O diagrama de caso de uso que representa este *sistema de informação* é composto por quatro casos de uso básicos, conforme mostrado pela Figura 3.5. São eles:

- **Gerenciar pacientes** (*Manage patients*) permite ao *Terapeuta* adicionar, modificar e remover pacientes do banco de dados. Também permite a visualização do histórico do paciente
- **Gerenciar sistema** (*Manage system*) permite ao terapeuta verificar o estado dos servidores que compõe o sistema e, caso seja necessário, os ative por meio da interface web.
- **Gerenciar os parâmetros dos comportamentos** (*Manage behavior parameter*) permite ao *Terapeuta* modificar os parâmetros dos comportamentos do robô.
- **Executar terapia** (*Execute therapy*) inicia e conduz uma sessão de terapia que envolve o robô, o paciente e o terapeuta. Este caso de uso foi estudado num diagrama separado.

O caso de uso *Executar terapia*, conforme pode ser visto no diagrama de caso de uso da Figura 3.6, conta com três atores principais: o *Terapeuta* (*Therapist*), cujo papel é conduzir a sessão e avaliar o desempenho do paciente; o *Paciente* (*Patient*), que interage com o robô; e o *Robô* (*Robot*), que neste caso é o Pomodoro. Para a sessão de terapia, têm-se os seguintes casos de uso:

Figura 3.5 – Diagrama de caso de uso do sistema de informação.

Figura 3.6 – Diagrama de caso de uso do sistema proposto.

- **Atender paciente** (*Attend to patient*) é o principal caso de uso durante a sessão de terapia, pois é ele que implementa as atividades lúdicas. Participam deste caso de uso os atores: *Terapeuta*, *Paciente* e *Robô*. Enquanto o paciente e o robô desempenham os papéis principais deste caso de uso, o terapeuta tem como objetivo facilitar a aproximação da criança ao robô e, quando necessário, interferir no comportamento do robô para que ele se adeque à sessão de terapia. Descendem deste caso de uso:

- **Brincar de dança** (*Play dance game*), referente à atividade lúdica homônima descrita na Seção 3.1;
- **Brincar com cartões** (*Play card game*), referente à atividade lúdica homônima descrita na Seção 3.1;
- **Brincar com toque** (*Play touch game*), referente à atividade lúdica homônima descrita na Seção 3.1.

- **Monitorar paciente** (*Monitor patient*) ocorre junto ao caso de uso *Interação*. O Robô fornece, em tempo real, ao *Terapeuta* os dados a respeito dos sensores, do humor sintético e do comportamento acionado.

Depois de mapear a funcionalidade do ambiente de educação especial com os diagramas de caso de uso, deu-se início ao estudo de sua estrutura de software. Para mostrar a organização de hardware e software do sistema, foi desenvolvido o diagrama genérico (não UML) da Figura 3.7, onde são mostrados quatro dispositivos. O primeiro dispositivo refere-se ao Servidor (*Server*), que é um computador pessoal onde são executados o servidor Web que dá suporte ao sistema de informação e à face exibida pelo *smartphone*, o banco de dados que implementa o espaço de memória, o servidor do robô (*Robot server*), o servidor de visão computacional (*Vision server*), e o servidor de controle (*Control server*). O segundo dispositivo, Robô (*Robot*), refere-se neste caso ao Pomodoro, enquanto o *Smartphone* é o dispositivo acoplado ao Pomodoro para compor sua “cabeça”. O *Tablet* é usado pelo terapeuta para acessar o sistema de informação e monitorar o andamento da sessão de terapia.

A implementação do sistema seguiu um método de desenvolvimento de software em espiral (PRESSMAN, 2006) onde todos os módulos foram desenvolvidos concomitantemente em fases incrementais, e não sequencialmente. Este método incremental e progressivo de desenvolvimento facilita a detecção e correção de erros relacionados com os requisitos do sistema.

Figura 3.7 – Diagrama de implantação do sistema completo, englobando o sistema de informação e o sistema robótico.

3.4 ESPAÇO DE MEMÓRIA

Para compor o espaço de memória, discutido previamente na Seção 2.5.1, foi utilizado o Redis, versão 2.8.19, um banco de dados NoSQL do tipo chave-valor que mantém os conjuntos de dados na memória para rápido acesso. Ele pode ser utilizado tanto como meio de comunicação entre processos (módulos), quanto como armazenamento de dados para o sistema de informação. As chaves podem gravar cadeias de caracteres (*strings*), mapas associativos ou dicionários (*hashes*), listas (*lists*), conjuntos (*sets*), conjuntos ordenados (*sorted sets*), mapas de bits (*bitmaps*) e *hyperloglogs* (uma estrutura de dados probabilística usada para estimar a cardinalidade de um conjunto). Além disso, estas variáveis podem possuir um tempo de validade (TTL) definido pelo usuário. Outra característica notável deste banco de dados é sua capacidade de *publish-subscribe* (publicar-assinar) que permite a eficiente comunicação entre processos. Estas características evidenciam o alinhamento do Redis às necessidades do ambiente de educação especial e da arquitetura de controle, além de reforçarem a discussão apresentada na Seção 2.5.1.

Por fornecer o armazenamento de dados e a comunicação entre processos, o espaço de memória foi organizado para conter os dados voláteis, temporários e permanentes referentes ao sistema robótico e ao sistema de informação. O sistema robótico, conforme mostrado pela Figura 3.7, é composto pelas interfaces para hardware para o smartphone (*Head server*) e para o robô (*Robot server*), pelo processador de dados de visão computacional (*Vision server*), e pelo controlador (*Control server*).

A estruturação de um BD relacional segue, tradicionalmente, um Modelo Entidade-Relacionamento. No entanto, este diagrama não se adapta à BDs NoSQL, como o Redis, adotado por este trabalho. Ademais, atualmente não existe um modelo que permita representar graficamente a estrutura de BDs NoSQL, devido à grande flexibilidade por eles oferecida. Por essa razão, os dados gravados no BD serão explicados utilizando-se tabelas, ao contrário de diagramas.

Uma vez que os dados do espaço de memória estão fortemente ligados aos módulos que compõe a arquitetura de controle, eles serão discutidos nas seções seguintes. Os dados mantidos pelas interfaces de hardware – do robô e sua “cabeça” – são discutidos Seções 3.5.1 e 3.5.2. A Seção 3.6 apresenta os dados mantidos pelo servidor de visão computacional, enquanto a Seção 3.7 apresenta os dados mantidos pelo controlador. Os dados com os parâmetros dos comportamentos são mostrados no final da Seção 3.7.2. Finalmente, os dados do sistema de informação são apresentados pela Seção 3.8.

3.5 INTERFACES PARA HARDWARE

Conforme apresentado na Seção 2.5.2, as interfaces para hardware são responsáveis pela aquisição e decodificação dos sinais dos sensores, e pelo acionamento dos atuadores. Nesta Seção, serão apresentadas as duas interfaces para hardware do robô Pomodoro, desenvolvidas utilizando-se o *framework* Processing, versão 2.2.1.

3.5.1 Robô

A primeira interface refere-se ao “corpo” do robô, isto é, os sensores e atuadores ligados eletronicamente à placa de comando do robô móvel – em contraste com a “cabeça”, que consiste num *smartphone* que está eletronicamente desacoplado do robô (bluetooth).

Para que a arquitetura de controle seja capaz de trabalhar com o Pomodoro, foi desenvolvido o Servidor do robô (*Robot server*) utilizando-se o *framework* Processing 2.2.1. Este servidor é responsável por abrir um elo de comunicação serial Bluetooth com a placa do robô para ler seus sensores e acionar seus atuadores. Conforme mostra a Tabela 3.5, este servidor é responsável por manter na memória sensorial a estrutura de dados *robot*, que contém a leitura mais recente de todos os seus sensores e o sinal de acionamento de cada um de seus atuadores. Além disso, este servidor lê as variáveis v (velocidade linear) e ω (velocidade angular) para acionar os motores para que o robô descreva estas velocidades, e também os sinais de acionamento dos servos motores de *pan-tilt*, dados respectivamente por *servo_pan* e *servo_tilt*. Caso a opção *robot_auto_servo* esteja ativa, o servidor do robô realiza uma interpolação entre o sinal atual de acionamento do servo motor e o sinal desejado, com o intuito de controlar sua velocidade e evitar movimentos bruscos.

Figura 3.8 – Captura de tela (*screenshot*) do Servidor do robô.

Tabela 3.5 – Chaves mantidas pelo servidor do robô.

Nome	Tipo	Descrição
v	String	Define a velocidade linear do robô em m/s
om	String	Define a velocidade angular do robô em rad/s
servo_pan	String	Define o sinal de controle para o servo “pan” do <i>smartphone</i> em ms
servo_tilt	String	Define o sinal de controle para o servo “tilt” do <i>smartphone</i> em ms
robot_auto_servo	String	Aciona o controle automático de velocidade do servo motor
robot	Hash	Disponibiliza os dados sensoriais mais recentes do robô móvel

3.5.2 Cabeça do robô

Em geral, os *smartphones* convergiram para um conjunto mínimo de dispositivos e interfaces, que estão disponíveis dentro das suas arquiteturas de hardware. Cada um desses dispositivos fornece um recurso a ser explorado na área de robótica, sendo essa a razão pelo qual um *smartphone* foi escolhido para compor a “cabeça” do robô. A Figura 3.9 apresenta o Pomodoro com o *smartphone* exibindo duas expressões diferentes.

Figura 3.9 – Robô Pomodoro com a “cabeça”, isto é, o *smartphone* exibindo duas expressões: (a) alegria e (b) surpresa.

Como existem vários modelos, marcas e Sistemas Operacionais para *smartphones*, decidiu-se construir seu software como um aplicativo web, conforme mostra a Figura 3.7.

Desta forma, desde que haja um navegador instalado no *smartphone*, ou outro dispositivo, é possível carregar o aplicativo da “cabeça” do robô. O lado negativo desta abordagem, no entanto, é que o aplicativo da cabeça não pode utilizar todos os recursos do dispositivo, pois fica limitado aos recursos oferecidos pelo navegador. No entanto, o HTML5 (*Hypertext Markup Language, version 5*) junto ao Javascript, oferece acesso às novas mídias, permitindo ao aplicativo desenvolvido capturar a imagem da câmera frontal, detectar o toque na tela, sintetizar e reconhecer fala, além de exibir imagens na tela.

Os dados capturados pelo aplicativo da “cabeça” é enviado via HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) para os scripts, escritos em linguagem PHP, que implementam o Servidor da “cabeça” (*Head server*), conforme mostra a Tabela 3.6. O Servidor da “cabeça” é responsável por manter a estrutura de dados head, que contém as informações da expressão facial exibida, da emoção expressada por meio da cor de fundo, e se está reproduzindo alguma música. Além disso, o servidor lê os dados temporários *speak* para sintetizar fala, *face* para modificar a face, *emotion* para mudar a cor de fundo da face, *music* que especifica a música a ser reproduzida, e *listen* para acionar o reconhecimento de fala. Estas variáveis causam a atualização da estrutura head, ou na criação dos dados temporários *listened*, que contém a fala reconhecida, e *camera*, que contém a imagem mais recente capturada pela câmera do *smartphone*.

Tabela 3.6 – Chaves mantidas pelo servidor da “cabeça” do robô (*smartphone*).

Nome	Tipo	Descrição
<i>speak</i>	String	Define a frase o <i>smartphones</i> sintetizará
<i>face</i>	String	Define o pictograma de face que o <i>smartphone</i> exibirá
<i>emotion</i>	String	Define a “emoção” (cor de fundo) da face
<i>music</i>	String	Define o nome do arquivo de música que será reproduzido
<i>listen</i>	String	Define que o <i>smartphone</i> deve reconhecer fala
<i>touched</i>	String	Disponibiliza
<i>camera</i>	String	Disponibiliza a última imagem lida pelo <i>smartphone</i>
<i>head</i>	Hash	Disponibiliza qual a face sendo exibida pelo <i>smartphone</i> , se há alguma música sendo reproduzida e as frases reconhecidas

3.6 PROCESSADOR DE DADOS: VISÃO COMPUTACIONAL

O Servidor de visão computacional (*Vision server*) é o processador de dados responsável por ler o dado volátil camera, gerado pelo Servidor da “cabeça”, para detectar a presença de uma face ou de um código QR, conforme mostra a Figura 3.10. O código QR (*Quick Response*) é um código de barras matricial ou bidimensional, que atua como um marcador óptico legível por máquina contendo informações.

Figura 3.10 – Captura de tela (screenshot) da tela do Servidor de visão.

Para a detecção da face, é utilizado o algoritmo de Viola-Jones (VIOLA; JONES, 2001) fornecido pela biblioteca OpenCV; para a detecção do código QR, é utilizada a biblioteca ZXing (“Zebra Crossing”). Caso sejam reconhecidos, o servidor cria as estruturas de dados temporárias *detected_face*, com as informações da face (altura, largura, e posição), e *detected_qrcode*, com as informações do código QR (posição e dado recuperado). A Tabela 3.7 mostra as chaves mantidas pelo servidor de visão computacional.

Tabela 3.7 – Chaves mantidas pelo servidor de visão computacional.

Nome	Tipo	Descrição
<i>detected_qrcode</i>	Hash	Guarda os dados do código QR detectado
<i>detected_face</i>	Hash	Guarda os dados da face detectada

3.7 CONTROLADOR

Conforme discutido na Seção 2.5.4, o controlador, ou Servidor de controle (*Control Server*), é o módulo responsável pelo acionamento do robô móvel. Seu software foi desenvolvido utilizando-se o *framework* Processing, versão 2.2.1, e implementa as emoções sintéticas, o deliberante e os comportamentos. É ele, portanto, que mantém as informações a respeito do estado do robô no espaço de memória, como mostra a Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Chaves mantidas pelo *Control Server*.

Nome	Tipo	Descrição
humor	Hash	Disponibiliza os valores de ativação e valência do humor do robô
behavior	String	Disponibiliza o nome do comportamento em execução

As emoções sintéticas, conforme pode ser observado na Seção 2.5.5, independem da aplicação. Portanto, a seguir serão especificados os módulos influenciados pela aplicação: o deliberante, os comportamentos e os esquemas motores que compõem os comportamentos.

3.7.1 Deliberante

O deliberante, como colocado na Seção 2.5.7, é o módulo responsável por acionar os comportamentos adequados para cumprir com os objetivos da aplicação, apresentada na Seção 3.1. Para compor sua pirâmide de prioridades, foram considerados os seguintes comportamentos:

- **Segurança (nível 0):** *Evitar perigo (AvoidDanger)*.
- **Regulação (nível 1):** *Dormir (Sleep)*.
- **Plano (nível 2):** *Jogo de cartões (CardsPlay)*, *Jogo de dança (DancePlay)*, *Toque (Touch)* e *Buscar pessoa (SearchPerson)*.

Para evitar condições de corrida (quando processos diferentes concorrem para acessar o mesmo dado, deixando-o inconsistente) e garantir que os níveis mais baixos fossem acionados eficientemente, o deliberante foi desenvolvido como uma árvore de decisões que é acionada dentro de um laço de repetição no *thread* (linha de execução) principal. Quando o deliberante encontra uma condição onde um comportamento deve ser

acionado, ele cria uma nova instância deste comportamento em um *thread* separado e, então, o guarda num mapa associativo (*hash map*). Desta forma, o deliberante tem conhecimento de todos os *threads* em execução, podendo encerrá-los se necessário.

Para facilitar a compreensão do deliberante, seu código foi dividido em quatro algoritmos. O Algoritmo 3.1 representa o algoritmo principal, executado dentro do laço de repetição do *thread* principal. Seu funcionamento é direto: caso o robô se encontre em perigo, a rotina correspondente ao nível 0 (segurança) será executada; caso ele esteja cansado ou estressado, a rotina do nível 1 (regulação) é chamada; senão, o robô executa a rotina do nível 2 (plano), que contém os comportamentos da aplicação.

---

início

se estáEmPerigo(), **então**

nível0();

senão

se estáCansado() **ou** estáEstressado(), **então**

nível1();

senão

nível2();

fim se

fim se

fim

Algoritmo 3.1 – Algoritmo principal do deliberante.

O Algoritmo 3.2 implementa a rotina responsável pelo nível 0. Quando chamado, ele encerra os *threads* de nível 1 e 2, caso estejam em execução, e depois verifica a existência de um *thread* no nível 0: caso não exista, ele cria este *thread* com uma nova instância do comportamento *evitar perigo*; caso contrário, ele verifica se o comportamento foi encerrado para limpar o mapa associativo.

Dados: mapa

início

encerra e remove thread nível1 de mapa;

encerra e remove thread nível2 de mapa;

se não existir thread nível0 no mapa, **então**

adiciona ao mapa a tupla (thread nível0, **nova instância de** EvitarPerigo());

inicia a thread nível0 do mapa;

senão

se não existir thread nível0 em execução no mapa

remove thread nível0 de mapa;

fim se

fim se

fim

Algoritmo 3.2 – Algoritmo referente ao nível 0 da pirâmide de prioridades.

O Algoritmo 3.3, que implementa o nível 1, é semelhante ao Algoritmo 3.2. Quando chamado, ele encerra o *thread* de nível 2, caso esteja em execução, e depois verifica a existência de um *thread* no nível 1: caso não exista, ele cria este *thread* com uma nova instância do comportamento *dormir*; caso contrário, ele verifica se o comportamento foi encerrado para limpar o mapa associativo.

Dados: *mapa*

início

encerra e remove *thread nível2* de *mapa*;

se não existir *thread nível1* no *mapa*, **então**

adiciona ao *mapa* a tupla (*thread nível1*, **nova instância de Dormir()**);

inicia a *thread nível1* do *mapa*;

senão

se não existir *thread nível1* em execução no *mapa*

remove *thread nível1* de *mapa*;

fim se

fim se

fim

Algoritmo 3.3 – Algoritmo referente ao nível 1 da pirâmide de prioridades.

O Algoritmo 3.4 implementa o nível 2, que contém os comportamentos das atividades lúdicas. Ao ser executado, ele verifica se há um *thread* de nível 2 em execução. Se houver, ele verifica se o *thread* foi encerrado para retirá-lo do mapa associativo. Caso contrário, ele verificará qual o comportamento mais apropriado. Se nenhum paciente for detectado (pela presença de sua face no campo de visão do robô), o algoritmo executará aleatoriamente o comportamento de *buscar pessoa*, para procurar pelo paciente, ou o *jogo de dança*, para chamar sua atenção. Porém, se o paciente for detectado, o comportamento *buscar pessoa* não poderá ser acionado. Neste caso, o algoritmo verificará se ele está predisposto a alguma atividade por meio dos seus sensores: se o paciente estiver mostrando um cartão, o *jogo de cartões* será iniciado; se ele tocar na tela do *smartphone*, o comportamento de *toque* será ativado. Caso contrário, o algoritmo executará aleatoriamente um dos três comportamentos: *toque*, *jogo de cartões* e *jogo de dança*.

Muito embora existam técnicas mais elaboradas para a tomada de decisão, a presente implementação desta arquitetura utiliza uma árvore de decisão que determina a qual camada um comportamento pertence e qual sua prioridade dentro daquela camada. Apesar de ser possível desenvolver um deliberante capaz de planejar dinamicamente, isto não é de interesse para a aplicação, pois isso tornaria o robô muito imprevisível, o que iria contra as vantagens dos robôs socialmente assistivos para crianças com TEA (DUQUETTE et al., 2007).

Dados: mapa, a
início

```

se não existir thread nível2 no mapa, então
  se face foi detectada, então
    se cartão foi detectado, então
      adiciona ao mapa a tupla (thread nível2, nova instância de JogoDeCartões() );
    senão
      se robô foi tocado, então
        adiciona ao mapa a tupla (thread nível2, nova instância de Toque() );
      senão
        a ← aleatório(1.0);
        se a < 0.5, então
          adiciona ao mapa a tupla (thread nível2, nova instância de Toque() );
        senão
          se a < 0.8, então
            adiciona ao mapa a tupla (thread nível2, nova instância de JogoDeCartões () );
          senão
            adiciona ao mapa a tupla (thread nível2, nova instância de JogoDeDança() );
          fim se
        fim se
      fim se
    senão
      a ← aleatório(1.0);
      se a < 0.8, então
        adiciona ao mapa a tupla (thread nível2, nova instância de BuscarPessoa() );
      senão
        adiciona ao mapa a tupla (thread nível2, nova instância de JogoDeDança() );
      fim se
    fim se
  inicia a thread nível2 do mapa;
senão
  se não existir thread nível2 em execução no mapa, então
    remove thread nível2 de mapa;
  fim se
fim se
fim

```

Algoritmo 3.4 – Algoritmo referente ao nível 2 da pirâmide de prioridades.

3.7.2 Comportamentos

Conforme discutido na Seção 2.5.6, alguns comportamentos são mais bem compreendidos e representados por uma máquina de estados, enquanto outros são mais facilmente descritos por esquemas motores. Esta seção dedica-se a elucidar os comportamentos descritos por meio de diagramas de máquinas de estados, que são aqueles que implementam as atividades lúdicas e os comportamentos *Buscar pessoa* e *Chamar atenção*, cujo funcionamento foi estipulado na Seção 3.1.

O comportamento complexo *Chamar atenção*, conforme o nome indica, é utilizado para chamar a atenção do paciente. Como mostra o diagrama da Figura 3.11, o primeiro esquema motor acionado é o *Chamar pessoa* (*call_person*) que vocaliza o nome do paciente, previamente informado pelo sistema de informação. Depois, o estado *Aguarda atenção* (*wait_for_attention*) verifica se uma face foi detectada no campo de visão do robô dentro de um tempo limite – neste caso, 5 s, escolhido empiricamente. Se uma face for detectada, o comportamento é encerrado com o resultado *Conseguiu atenção* (*got attention*). Caso contrário, esse processo é repetido até uma face ser detectada ou o número máximo de tentativas ser atingido, encerrando o comportamento com o resultado *Desistiu* (*desist*).

O comportamento de *Jogo de cartões* (*card_play*), mostrado pela Figura 3.12, é iniciado com o comportamento *Chamar atenção*. Uma vez obtida a atenção do usuário, inicia-se um ciclo onde o robô pede para o paciente mostrar um cartão determinado. Caso o usuário mostre o cartão certo, ele será parabenizado pelo robô; porém, caso erre, ele será incentivado. Se o usuário não mostrar qualquer cartão, o robô irá novamente chamar sua atenção. O ciclo é repetido até que o robô esgote o número de pedidos e encerra o comportamento com o resultado *Cansado* (*tired*).

Figura 3.11 – Diagrama de máquina de estados do comportamento *Chamar atenção*.

Figura 3.12 – Diagrama de máquina de estados do comportamento *Jogo de cartões*.

Para desenvolver a aplicação *Jogo de cartões*, utilizaram-se códigos QR para que o robô seja capaz de identificar o significado do cartão eficientemente, sem necessidade de um processamento de imagens avançado para reconhecer os padrões das ilustrações presentes nos cartões, conforme mostra a Figura 3.13. O reconhecimento destes cartões é realizado pelo Servidor de visão computacional, descrito na Seção 3.6.

Figura 3.13 – Elementos utilizados na atividade lúdica *Jogo de cartões*, mostrando (a) os cartões utilizados e (b) o robô Pomodoro exibindo o cartão em sua face.

O comportamento do Jogo de dança (*dance_play*) consiste nesta sequência: *Chamar atenção* do paciente; executar o esquema motor Dança (*dance*); e *Aguardar atenção* do paciente. Seu funcionamento é exibido pela Figura 3.14.

Figura 3.14 – Diagrama de máquina de estados do comportamento *Jogo de dança*.

O comportamento do Toque (*touch*), que pode ser visto na Figura 3.15, consiste em *Chamar atenção* do paciente e executar o esquema motor *Pedir toque* (*ask_touch*). Se o

paciente tocar o *smartphone*, o esquema motor *Parabenizar* (*congratulate*) será acionado. Caso contrário, o robô chamará a atenção do usuário novamente.

Figura 3.15 – Diagrama de máquina de estados do comportamento *Toque*.

O comportamento *Buscar pessoa*, conforme mostra a Figura 3.16, tem como objetivo mover o robô aleatoriamente pela área de trabalho em busca de uma pessoa, detectada pelo rosto. Para isso, o robô *olha para frente* (*look_forward*), para a *esquerda* (*look_left*) e para a *direita* (*look_right*) em busca de um rosto. Não foi necessário olhar para cima e para baixo, pois o robô encontra-se sobre a mesa, e a imagem da câmera tem maior abertura no sentido vertical. Caso não o encontre, ele acionará o esquema motor de *Movimento aleatório* (*random_move*) e repetirá o ciclo. Caso contrário, ele encerrará com o resultado *Conseguiu atenção*.

Figura 3.16 – Diagrama de máquina de estados do comportamento *Buscar pessoa*.

A influência destes comportamentos sobre o humor e emoções do robô é apresentada pela Tabela 3.9, que associa as transações de comportamentos com as emoções por eles “despertadas”. Os comportamentos representados por máquinas de estados “despertam” emoções apenas durante a transição dos comportamentos mais simples, representados pelos esquemas motores.

Tabela 3.9 – Emoções “despertadas” por cada transição de comportamento.

Transição	Emoção ativada
<i>unknown</i>	<i>Neutral</i>
<i>start_play</i>	<i>Neutral</i>
<i>interrupted</i>	<i>Neutral</i>
<i>desist</i>	<i>Depressed</i>
<i>tired</i>	<i>Tired</i>
<i>awake</i>	<i>Happy</i>
<i>finish_speak</i>	<i>Neutral</i>
<i>no_attention</i>	<i>Sad</i>
<i>got_attention</i>	<i>Excited</i>
<i>no_touch</i>	<i>Sad</i>
<i>got_touched</i>	<i>Excited</i>
<i>no_card</i>	<i>Sad</i>
<i>right_card</i>	<i>Excited</i>
<i>wrong_card</i>	<i>Sad</i>
<i>finish_dancing</i>	<i>Tired</i>
<i>danger</i>	<i>Fear</i>
<i>safe</i>	<i>Happy</i>

A magnitude de influência de cada transição foi estipulada durante os testes para facilitar a demonstração do robô, conforme será descrito, mais a frente, pela Seção 4.1.

3.7.3 Esquemas Motores

Os comportamentos mais simples foram implementados utilizando-se esquemas motores. Ao contrário dos comportamentos modelados por estados de máquina que influem na emoção dos robôs somente durante a transição entre os estados, os esquemas motores influem na emoção sintética do robô enquanto são executados, como explicita a Tabela 3.10.

Outra característica importante a ser ressaltada é quanto à natureza dos sinais emitidos pelos esquemas motores e como são tratados. Conforme discutido na Seção 2.5.6, os esquemas motores propostos por Arkin produziam um sinal numérico equivalente ao sinal de acionamento de um motor. No entanto, este trabalha com sinais que não são numéricos, como no caso da fala (cadeia de caracteres) e face (ícones). Nestes casos, os dados são tratados conforme explica a Tabela 3.11.

O esquema motor *Aguardar atenção* (*Wait for attention*) é o mais simples de todos, pois nele o robô não realiza qualquer ação; apenas espera que o paciente lhe dê atenção. Nesta implementação, o robô reconhece que obteve atenção quando ele encontra uma face humana na imagem capturada pelo *smartphone*, dentro de um tempo predeterminado.

Tabela 3.10 – Emoções despertadas pelos esquemas motores.

Esquema motor	Emoção
<i>Wait for attention</i>	<i>Calm</i>
<i>Call person</i>	<i>Calm</i>
<i>Congratulate</i>	<i>Excited</i>
<i>Incentivate</i>	<i>Calm</i>
<i>Ask for touch</i>	<i>Calm</i>
<i>Ask for card</i>	<i>Calm</i>
<i>Dance</i>	<i>Excited</i>
<i>Sleep</i>	<i>Calm</i>
<i>Avoid danger</i>	<i>Fear</i>
<i>Wander around</i>	<i>Happy</i>

Tabela 3.11 – Função do operador Σ para cada tipo de dado.

Tipo de dado	Operador Σ
Numérico	Adição
Cadeira de caracteres	Concatenação
Ícone	Votação

Os esquemas motores *Chamar pessoa* (*Call person*), *Parabenizar* (*Congratulate*), *Incentivar* (*Incentivate*) e *Pedir toque* (*Ask for touch*) são similares, pois todos enviam uma frase a ser sintetizada pelo robô móvel enquanto mostram uma face que expresse felicidade. Esta similaridade faz com que o diagrama destes quatro esquemas motores sejam iguais, como representado pela Figura 3.17. A diferença entre eles se dá pela frase “dita” e pela emoção “despertada”. Para cada esquema motor há um conjunto de frases predefinido, do qual uma frase é escolhida por vez para ser sintetizada pelo robô.

Figura 3.17 – Diagrama dos esquemas motores *Chamar pessoa (Call person)*, *Parabenizar (Congratulate)*, *Incentivar (Incentivate)* e *Pedir toque (Ask for touch)*.

Embora também seja semelhante aos quatro esquemas motores previamente descritos, o esquema motor *Pedir cartão (Ask for card)* difere no modo com que a “face” é tratada, conforme visto no diagrama da Figura 3.18. Ao contrário dos demais esquemas motores onde os ícones, tais como as faces, são escolhidos por votação, neste esquema motor o ícone do cartão é mostrado independente das demais variáveis e comportamentos internos do robô. Essa diferença existe, pois quando *Pedir cartão* é executado, a tela de toque do celular deixa de atuar como uma “face” e passa a funcionar como um “cartão”.

Figura 3.18 – Diagrama do esquema motor *Pedir cartão (Ask for card)*.

Outro esquema motor que trata de forma diferente os ícones é o *Dormir (Sleep)*. Neste caso, ainda há a votação de qual ícone (no caso, face) melhor representa o estado do robô. Todavia, os “olhos” dos ícones são desenhados de forma que pareçam fechados. Além de mostrar uma face de sono, este comportamento reproduz uma música calma enquanto ativo, como mostra a Figura 3.19.

Figura 3.19 – Diagrama do esquema motor *Dormir (Sleep)*.

Responsável por acionar os motores para que o robô ande livremente pelo ambiente, o esquema motor *Passear* (Wander) apresenta três componentes: *mover para frente* (move forward), que, considerando o modelo cinemático apresentado na Seção 3.2.1, faz o robô andar com velocidade linear v constante; *mover oscilando* (move oscilate), que faz o robô oscilar ao alternar periodicamente sua velocidade angular ω ; e *mover aleatoriamente* (move random), que gera periodicamente velocidades lineares e angulares aleatórias, permitindo ao robô mudar sua rota. O diagrama deste esquema motor é mostrado pela Figura 3.20.

Figura 3.20 – Diagrama do esquema motor *Passear* (Wander).

Outro esquema motor que movimenta o robô é o *Dança* (Dance), que reproduz uma música enquanto dirige o robô. Para cada música carregada, cada um dos três componentes *Mover para frente* (move forward), *Mover oscilando* (move oscilate), e *Mover aleatoriamente* (move random) são parametrizados com constantes diferentes, tal como as velocidades e os períodos. A Figura 3.21 ilustra este esquema motor.

Figura 3.21 – Diagrama do esquema motor *Dança* (Dance).

Outro comportamento que rege o movimento do robô é o *Evitar perigo* (*Avoid danger*), cujo objetivo é impedir que o robô cause acidentes que venham a ferir alguém ou comprometer seus componentes. Ele é acionado quando uma colisão eminente é detectada, ou quando o robô se afasta da sua área de trabalho. Ao ser acionado, este comportamento aciona o robô no sentido contrário ao obstáculo, ou em direção à área de trabalho, conforme detectado por seus sensores. Seu diagrama é mostrado pela Figura 3.22.

Figura 3.22 – Diagrama do esquema motor *Evitar perigo* (*Avoid danger*).

O *Olhar social* (*social gaze*), apresentado na Seção 2.2, foi implementado como um esquema motor que funciona da seguinte forma: primeiro, a imagem da câmera do *smartphone* é capturada; em seguida, as faces são detectadas usando o algoritmo de Viola-Jones (VIOLA; JONES, 2001) fornecido pela biblioteca OpenCV; caso não haja faces, o sistema encerra a iteração e volta a esperar por uma nova imagem; caso seja detectada uma face, o algoritmo informa a posição (x, y) e largura e altura (l, h) da face aos controladores de *pan-tilt* e de tração; o controlador de *pan-tilt* aciona os servo-motores que fornecem a rotação do *smartphone* nos eixos X (*pan*) e Y (*tilt*) com o intuito de levar a face para o centro da imagem (C_x, C_y) ; depois da atuação do controlador, a iteração se encerra e o sistema volta a esperar uma nova imagem. Este esquema motor é mostrado pela Figura 3.23.

Figura 3.23 – Estrutura básica dos controladores de olhar social.

O controlador de *pan-tilt* consiste em um controlador proporcional que gera as variáveis de controle (u_0, u_1) , correspondente respectivamente aos sinais de acionamento dos servos-motores de *pan* e *tilt*, de forma a estabilizar em zero os erros de posição da face reconhecida na imagem nos eixos X e Y , dados respectivamente por $C_x - x$ e $C_y - y$. Este controlador, cujos ganhos são dados por $(K_{p,0}, K_{p,1})$, é mostrado pelas Equações (3.5) e (3.6).

Além disso, toma-se o cuidado de garantir que (u_0, u_1) estejam definidos dentro do intervalo $[0,8; 2,2]$, que corresponde aos limites mínimo e máximo do sinal de controle do servomotor.

$$u_0 = u_0 + K_{p,0}(C_x - x) \quad (3.5)$$

$$u_1 = u_1 + K_{p,1}(C_y - y) \quad (3.6)$$

Finalmente, os parâmetros que configuram os comportamentos do robô são mantidos no espaço de memória, e são dados pela Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Chaves com os parâmetros de configuração do robô.

Nome	Tipo	Descrição
param_verbal	Hash	Define os parâmetros de tom e velocidade de fala do sintetizador
param_proxemics	Hash	Define as distâncias dos espaços proxêmicos
param_transition	Hash	Define o peso de cada transição das máquinas de estados
param_initial	String	Define a magnitude de emoção inicial e o valor da emoção neutra
param_attention	String	Define as frases usadas para chamar a atenção do paciente
param_incentive	String	Define as frases usadas para incentivar o paciente
param_congratulation	String	Define as frases usadas para parabenizar o paciente
param_incentive_touch	String	Define as frases usadas para incentivar o paciente a tocar o robô

3.8 SISTEMA DE INFORMAÇÃO

O sistema de informação foi proposto para auxiliar o uso do sistema por parte do terapeuta, permitindo: gerir pacientes; gerir terapias; configurar parâmetros dos comportamentos do robô; monitorar e modificar a sessão de terapia. Por essa razão, ele é responsável por manter os dados da Tabela 3.13 no espaço de memória. O sistema de informação foi desenvolvido como um aplicativo para web (*web app*) e, para tanto, necessitou de tecnologias como um servidor web Apache com o motor PHP (ambos fornecidos pelo pacote XAMPP, versão 3.2.1). Usualmente, o BD MySQL é utilizado em aplicações PHP; no entanto, o sistema desenvolvido utiliza o BD Redis, apresentado na Seção 4.4. Além disso, o sistema foi escrito em HTML5 e Javascript, utilizando-se da biblioteca JQuery 1.1.11 e o *framework* JQuery Mobile 1.4.5. Este último foi empregado para que o

sistema de informação fosse acessível tanto para microcomputadores quanto para dispositivos móveis, como *tablets* e *smartphones*. A Figura 3.24 mostra a captura de tela da página principal do sistema de informação.

Tabela 3.13 – Chaves usadas pelo sistema de informação.

Nome	Tipo	Descrição
next_id_patient	String	Guarda o próximo ID (número inteiro) para um novo paciente
patients	Set	Guarda a lista de IDs válidos
patient	Hash	Guarda os dados dos pacientes (ID como namespace)
next_id_therapy	String	Guarda o próximo ID para uma nova sessão de terapia
therapy_in_session	String	Indica o ID da sessão de terapia em execução
therapy	Hash	Guarda os dados da sessão de terapia (data e ID do paciente)
log_face	String	Guarda as faces exibidas pelo robô durante a terapia
log_transition	String	Guarda os dados do robô (comportamento, transição, ativação e valência) a cada transição

Figura 3.24 – Página principal do sistema de informação.

Obedecendo ao caso de uso apresentado na Seção 3.3, o sistema permite o gerenciamento dos pacientes, como mostra a Figura 3.25. A partir do sistema, é possível adicionar pacientes com os dados relevantes para os terapeutas, como mostrado pela Figura 3.26.

A interface 'Sistema de Informação para Reabilitação' possui um cabeçalho com o título e um ícone de ajuda. Abaixo, há dois botões: 'Voltar' (em um botão escuro) e 'Adicionar paciente' (em um botão claro). O texto instrutivo diz: 'Digite o nome, ou parte do nome, do paciente para encontrá-lo na lista.' Abaixo disso, há um campo de busca com o placeholder 'Nome do paciente...'. A lista de pacientes é organizada por letras: A, F, L, S. Cada letra serve de cabeçalho para uma lista de nomes, cada um com um ícone de seta para a direita. No rodapé, há o texto 'USP, UFES, UNESP - FAPESP, CAPES'.

Letra	Nome do paciente	Ação
A	Adriano Pereira Silva	➔
A	Antônio Lucas	➔
F	Felinto	➔
L	Lucas Antônio	➔
S	Silas Silovisky Silovitchy	➔

Figura 3.25 – Parte da interface usada para gerenciar os pacientes cadastrados.

A interface 'Adicionar paciente' possui um cabeçalho com o título e um ícone de ajuda. Abaixo, há uma mensagem: '*Todos os campos são obrigatórios.' Seguem os campos de formulário: Nome, Mãe, Pai, Nascimento, Telefone (formato: (__) - ____ - ____), Celular (formato: (__) - ____ - ____), E-mail e Medicamentos. No rodapé, há dois botões: 'Cancelar' (em um botão escuro) e 'Adicionar' (em um botão claro).

Figura 3.26 – Tela de cadastramento de paciente.

A captura de tela mostrada pela Figura 3.27 mostra a interface exibida durante a sessão de terapia. Por meio dessa interface, o terapeuta pode ver a imagem do paciente, o

estado do humor do robô, a condição dos servidores da arquitetura de controle, o comportamento em execução, o nível da bateria do robô e o tempo de atividade. Por ela, o terapeuta também pode encerrar a sessão de terapia.

Figura 3.27 – Tela do sistema durante a sessão de terapia.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

“É um pecado capital especular antes de ter informações. Desapercebidamente, começa-se a distorcer os fatos para concordar com as teorias, em vez de criar teorias que concordem com os fatos.”

Arthur Conan Doyle (A Scandal in Bohemia 1891, tradução nossa)

A avaliação de um sistema robótico pode ser realizada em um ambiente virtual ou real. Ambientes virtuais, certamente, por serem uma simplificação do mundo real, são mais fáceis de se trabalhar e fornecem resultados rápidos e reproduzíveis. Por outro lado, esses resultados não reproduzem a mesma riqueza de detalhes que existe no ambiente real, dada a impossibilidade e inviabilidade de modelar todos os aspectos do mundo físico. Como bem coloca Rodney Brooks (1991), o melhor modelo do mundo é o próprio mundo.

Tendo em vista a discussão do Capítulo 2, é perceptível a complexidade – para não dizer a impossibilidade – de simular situações que envolvam humanos. Por essa razão, a avaliação do estudo de caso em robótica social assistiva desenvolvido no Capítulo 3 foi realizada mediante experimentos práticos em laboratório. Estes experimentos foram realizados para demonstrar que a arquitetura de controle desenvolvida é capaz de atender aos requisitos de IHR do ambiente.

Em seguida, foi realizado um teste piloto junto ao público alvo da aplicação para avaliar sua conformidade com o esperado pelos especialistas consultados e, também, colher suas opiniões acerca do robô. É importante ressaltar que muito embora a proposta tenha sido desenvolvida mediante às especificações dos especialistas, obtidas por meio das entrevistas, não é parte do escopo deste trabalho demonstrar que o ambiente efetivamente resulta na melhora do quadro clínico de crianças com TEA, pois isso só pode ser comprovado mediante a um acompanhamento prolongado de uma população grande o suficiente para ser estatisticamente relevante. Tal estudo excede o tempo de desenvolvimento deste trabalho.

Portanto, este capítulo tem como objetivo apresentar o planejamento e execução dos experimentos, fornecendo, portanto, as informações necessárias para confrontar as teorias com os fatos. Com esta finalidade, a Seção 4.1 os experimentos realizados em laboratório, que demonstram o funcionamento do robô Pomodoro em condições ideais. Em

sequência, a Seção 4.2 aborda os experimentos realizados no teste piloto. Finalmente, a Seção 4.3 encerra o capítulo com uma discussão sobre os resultados obtidos nos experimentos laboratoriais e do teste piloto.

4.1 EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO

A fim de exemplificar a aplicação, uma sessão de terapia experimental foi realizada no laboratório, na qual um voluntário adulto desempenhou o papel da criança, como mostra a Figura 4.1. A área de trabalho do robô era uma mesa com tampo de cor clara, cujas extremidades lateral e frontal foram cobertas com fita adesiva preta para que o robô detectasse os limites da mesa. A iluminação ambiente foi controlada para melhorar a qualidade das imagens capturadas.

Com o intuito de reduzir o tempo necessário para executar os experimentos, os parâmetros do humor inicial do robô e a magnitude das transições das máquinas de estados dos comportamentos foram modificados para torná-lo mais “sensível” à interação com o usuário. Este ajuste de parâmetros é realizado por meio da interface gráfica disponibilizada pelo sistema de informação. Logo, o humor inicial do robô foi obtido por meio de um processo empírico, e é dado por $v = 0,4$ e $a = 0$, com $E_{Neutral} = 0,25$, sendo assim classificado como *feliz*. As magnitudes e as emoções correspondentes de cada transição estão dispostas na Tabela 4.1.

Figura 4.1 – Voluntário participando da atividade lúdica *Jogo de cartões*.

Tabela 4.1 – Valores da magnitude e emoção de cada transição.

Transição	Magnitude	Emoção
<i>Unknown</i>	0,00	<i>Neutral</i>
<i>Start play</i>	0,00	<i>Neutral</i>
<i>Interrupted</i>	0,00	<i>Neutral</i>
<i>Desist</i>	0,15	<i>Depressed</i>
<i>Tired</i>	0,10	<i>Sleepy</i>
<i>Awake</i>	0,80	<i>Happy</i>
<i>Finish-speak</i>	0,00	<i>Neutral</i>
<i>No-attention</i>	0,20	<i>Sad</i>
<i>Got-attention</i>	0,20	<i>Excited</i>
<i>No-touch</i>	0,10	<i>Sad</i>
<i>Got-touched</i>	0,25	<i>Excited</i>
<i>No-card</i>	0,10	<i>Sad</i>
<i>Right-card</i>	0,15	<i>Excited</i>
<i>Wrong-card</i>	0,15	<i>Sad</i>
<i>Finish-dancing</i>	0,20	<i>Spleey</i>
<i>Danger</i>	0,15	<i>Fear</i>
<i>Safe</i>	0,06	<i>Happy</i>

4.1.1 Olhar social

De todos os esquemas motores apresentados na Seção 3.7.3, o esquema motor que implementa o *olhar social* é de particular interesse, pois consiste em um controlador de malha fechada, em contraste com os demais que constituem-se de controladores de malha aberta. Nos testes realizados, adotaram-se os valores empíricos $(3 \times 10^{-4}; 3 \times 10^{-4})$ para os ganhos $(K_{P,0}, K_{P,1})$, apresentados nas Equações (3.5) e (3.6) da Seção 3.7.3.

Neste experimento, o voluntário se posicionou com o rosto desalinhado ao centro do campo de visão do robô, como ilustrado pela Figura 4.2, que mostra a posição da cabeça do voluntário, a posição do *smartphone* e o campo de visão de sua câmera embarcada no momento inicial, Figura 4.2(a), e final, Figura 4.2(b). É importante ressaltar que a Figura 4.2 mostra a vista superior do experimento, portanto apenas a rotação em relação ao eixo vertical Y (*pan*) é mostrada. No entanto, ocorre, também, a rotação em relação ao eixo horizontal X (*tilt*), como é apresentado a seguir no gráfico gerado pelo controlador.

Figura 4.2 – Vista superior do experimento, representando a (a) posição inicial e (b) posição final do *smartphone* em relação à cabeça do usuário.

O gráfico da Figura 4.3 mostra as variações do erro Δ_x relativo ao eixo X (com rotação em Y), e do erro Δ_y , relativo ao eixo Y (rotação em X), em relação ao tempo. Como pode ser observado, o controlador teve desempenho aceitável e foi capaz de centralizar a face, convergindo aos 4,5 s para a posição desejada. A oscilação que ocorre entre o período de 2 a 4,5 s é natural de um controlador proporcional; no entanto, sua amplitude é suficientemente pequena, inferior a 10 pixels, para ser desconsiderada nesta aplicação.

Figura 4.3 – Gráficos mostrando a variação dos erros nos eixos X e Y do controlador de olhar social.

4.1.2 Experimento 1

Durante o primeiro experimento⁷ o robô interage com o ambiente *sem a interferência do usuário*, conforme retrata a Figura 4.4. O objetivo é demonstrar como a ausência de contato social interfere no humor do robô e como ele reage frente a um estado emocional indesejado, tal como *raiva*, *deprimido* ou *nojo*. Conhecendo as estruturas que compõem o controlador, descritas na Seção 3.7, é possível prever o funcionamento do robô neste caso, conforme corrobora o resultado do experimento elucidado pela Figura 4.5.

Inicialmente, a arquitetura de controle aciona o comportamento *Buscar Pessoa*, levando o robô a mover-se pela área de trabalho em busca do usuário. A ausência dessa pessoa, no entanto, leva o robô a experimentar emoções tristes, como mostra a Figura 4.4 (a)-(k), reduzindo tanto sua ativação quanto sua valência. Próximo aos 30 s, a ativação e valência fazem com que a magnitude do humor do robô alcance um nível indesejado, o que leva o controlador da arquitetura a interromper o comportamento *Buscar Pessoa* e acionar o comportamento *Dormir*, ilustrado pela Figura 4.4 (l). Ao “dormir”, os níveis de ativação e valência do robô são incrementados gradualmente, de modo que ao “acordar” o humor do robô será classificado como “Alegria”, conforme ocorre aos 70 s, mostrado pela Figura 4.4 (m). A partir desse ponto, o robô volta a repetir este comportamento enquanto não encontrar uma pessoa.

A Figura 4.5 deixa evidente que o robô agiu conforme o esperado e permite ver como o humor do robô foi alterado durante o experimento. O comportamento exprimido pelo robô lembra aquele mostrado por indivíduos deprimidos, que acabam usando o sono como fuga das dificuldades sentidas (GAZZANIGA et al., 2012). Porém, não é objetivo deste experimento demonstrar que as estruturas da arquitetura de controle são fidedignas àquelas encontradas nos animais, mas sim evidenciar a semelhança entre o comportamento emergente (de fuga por meio do sono) do robô e um comportamento animal.

4.1.3 Experimento 2

O segundo experimento⁸ demonstra o funcionamento do robô durante uma sessão de terapia onde um voluntário adulto interpreta o papel do paciente. O objetivo é demonstrar que o robô é capaz de desenvolver as atividades lúdicas especificadas na Seção 3.1.

⁷ O vídeo do experimento encontra-se em: <<https://www.youtube.com/watch?v=gOrJPEIQsU0>>.

⁸ O vídeo do experimento encontra-se em: <<https://www.youtube.com/watch?v=K55eIU-Yva4>>.

Figura 4.4 – Retratos do Experimento 1, mostrando o robô: (a) em sua posição inicial, onde aciona o comportamento buscar pessoa; (b), (f), (j) olhando para a esquerda e (c), (g), (k) direita, em busca de um rosto; (d), (h) se movendo para uma (e), (i) nova posição; (l) com o comportamento dormir ativado para reestabelecer seu humor; (m) com seu humor estabilizado.

Figura 4.5 – Gráfico composto do Experimento 1.

Conforme esperado, ao iniciar a sessão de terapia o robô acionou o comportamento *Buscar Pessoa* para encontrar o usuário, que estava ao seu lado, como mostra a Figura 4.6 (a). Como o usuário ainda não era visível pela câmera, o robô não encontrou o usuário na primeira tentativa e teve uma queda nos valores de ativação e valência suficiente para que o humor fosse classificado como *Neutro*, como mostra a Figura 4.6 (b). No entanto, ao virar sua cabeça, o robô detectou a face do usuário, encerrando o comportamento *Buscar Pessoa* e acionando o comportamento *Jogo de Cartões* aos 7 s, como mostra a Figura 4.6 (d). Isso também aumentou os níveis de ativação e valência, fazendo o humor retornar ao estado de *Alegria*, como mostra a Figura 4.6 (c) e o gráfico da Figura 4.7.

Por cerca de 60 s, o robô solicitou cinco cartões (abacaxi; maçã; pera; abacaxi; e abacaxi) e o usuário respondeu corretamente aos pedidos, como mostra a Figura 4.6 (d)-(g). Isso causou o incremento dos valores da ativação e valência do robô, fazendo seu humor variar de *Alegria* para *Excitação*, como mostra a Figura 4.6 (f) e o gráfico da Figura 4.7.

Aos 67 s, o robô solicita a exibição do cartão “pera”, como mostra a Figura 4.6 (g), mas o usuário mostra, por cinco vezes, cartões errados, como mostra a Figura 4.6 (h). Na sexta repetição do pedido, o usuário ignora o pedido. Estas atitudes do usuário despertam emoções negativas no robô, reduzindo sua ativação e valência até que seu humor mude de *excitação*, Figura 4.6 (i), para *Neutro*, Figura 4.6 (k), e para *Tristeza*, Figura 4.6 (l). Esta variação pode ser observada, também, no gráfico da Figura 4.7. Somente na sétima repetição do pedido, aos 100 s, o usuário volta a responder corretamente aos pedidos do robô (em ordem: pera; abacaxi; pera; maçã; abacaxi), como ilustra a Figura 4.6 (m). Portanto, dos 100 s até os 152 s verifica-se a melhora do humor do robô pelo incremento dos níveis de ativação e valência, levando-o ao humor *Neutro*, Figura 4.6 (m), e depois *Excitação*, Figura 4.6 (n).

Em seguida, o robô encerrou o *Jogo de Cartões* para acionar o jogo *Tocar o robô*. Durante o jogo, o robô pediu para ser tocado em duas ocasiões. Na primeira, o usuário tocou o robô assim que solicitado, aos 164 s, como apresenta a Figura 4.6 (o). Na segunda, o usuário ignora o pedido do robô e se levanta, saindo do campo de visão da câmera do celular, como mostra a Figura 4.6 (p). Depois de esperar o robô insistir para que o tocasse, o usuário voltou a sentar – fazendo o robô ajustar a posição do celular por meio do comportamento de *Olhar social*, mostrado pela Figura 4.6 (q) – e tocou o robô aos 205 s, Figura 4.6 (r).

Depois disso, o usuário deixou de interagir com o robô, ficando numa posição onde seu rosto não era reconhecido. Isto fez o robô acionar novamente o comportamento *Buscar pessoa* novamente, como mostra a Figura 4.6 (s)-(t), mas não obteve êxito durante a busca, causando então um declínio em sua ativação e valência. Aos 226 s, o experimento foi encerrado, como mostra a Figura 4.7.

Figura 4.6 – Retratos do Experimento 2, onde: (a) o robô aciona o comportamento buscar pessoa; (b) o robô exibe emoção neutra e, depois, (c) feliz; (d) o robô inicia o comportamento jogo de cartões e solicita o cartão “abacaxi”; (e) o voluntário mostra o cartão “abacaxi” para o robô; (f) o robô parabeniza o voluntário; (g) o robô continua o jogo de cartões solicitando o cartão maçã; (h) o robô solicita o cartão “pera”, mas o voluntário responde intencionalmente com o cartão errado; (i) o robô incentiva o voluntário a continuar jogando, apesar do erro; (j) o voluntário continua a responder com os cartões errados; (k) conforme o voluntário erra, o humor do robô torna-se neutro e, depois, (l) triste; (m) quando o voluntário volta a responder corretamente, o humor do robô volta a ser neutro e, depois, (n) excitado; (o) o robô executa o comportamento toque; (p) o voluntário sai do campo de visão do robô, que continua solicitando o toque; (q) o voluntário volta ao seu lugar e o robô ajusta a posição de sua “cabeça”, em decorrência de seu olhar social; (r) o robô executa novamente o comportamento toque; (s) o voluntário sai do campo de visão do robô, que inicia o comportamento buscar pessoa e começa a (t) olhar para os lados.

Figura 4.7 – Gráfico do Experimento 2.

4.2 TESTE PILOTO

Após a validação experimental em laboratório, a aplicação foi levada a campo para ser avaliada junto ao público alvo. Em vista disso, a parceria com duas instituições de Bauru, SP, tornou possível a concretização do teste piloto, que envolveu crianças com desenvolvimento típico (DT) e TEA, além dos técnicos destas instituições.

Os experimentos⁹ foram desenvolvidos nas instituições, ou seja, em ambientes não-controlados. Por um lado, o sistema foi colocado numa situação desfavorável, prejudicando a captura dos dados sensoriais, tais como a câmera que é sensível às mudanças de iluminação ambiente. Por outro lado, ficou evidente que o sistema funciona mesmo em situações pouco ideais, diferentes daquelas produzidas em laboratório. As subseções a seguir apresentam os experimentos desenvolvidos em cada uma das instituições colaboradoras, RASC e AFAPAB.

4.2.1 RASC

A RASC (Rede de Assistência Socioeducacional Cristã) é uma entidade privada sem fins lucrativos que trabalha com o serviço de acolhimento institucional de crianças do sexo masculino na faixa etária de 4 a 10 anos junto à escola, família e comunidade. A entidade disponibilizou cinco crianças com idades de 2 a 8 anos com desenvolvimento típico, cuja participação foi acompanhada pelos técnicos da RASC.

A criança “DT1” tinha 8 anos de idade e, de acordo com os técnicos, possuía dificuldade de concentração, dispersando a atenção para qualquer estímulo externo. Apesar de sua habitual inquietude, a criança, para a surpresa da técnica, participou satisfatoriamente das atividades lúdicas com o Pomodoro, dando atenção ao robô mesmo quando este demorava em responder (Figura 4.8). De acordo com a avaliação da psicóloga da entidade, “o experimento realizado com [DT1] despertou o interesse dele de maneira satisfatória, apesar do mesmo dispersar-se com frequência”. Em seguida, ela acrescentou:

“Este recurso utilizado faz com que a criança perceba que um robô também pode auxiliá-la em suas dificuldades. Psicologicamente é um recurso que possibilita a criança desenvolver habilidades, manter o contato visual e a fala do robô estimula a linguagem correta dos mesmos”.

---

⁹ Os vídeos dos experimentos realizados para o teste piloto encontram-se na *playlist* disponível em: <<https://www.youtube.com/playlist?list=PLWemNloqxagVd7EgM0urWjml9d-SocOOq>>.

Figura 4.8 – Participação de DT1 na sessão experimental.

O experimento com DT1 foi o único no qual o técnico utilizou um *tablet* para acessar o Sistema de Informação durante a terapia, pois sua presença dispersava a atenção da criança. Nos demais experimentos, o Sistema de Informação foi operado pelo pesquisador, escondido das crianças.

A criança “DT2” tinha 2 anos de idade e, conforme relatado pelos técnicos, aprendia “muito rápido” quando estimulada, sendo “mais esperto” que algumas crianças mais velhas ali acolhidas. Ela se sentiu à vontade com o robô, brincando com ele como se fosse um “carrinho” enquanto o experimento era preparado, como mostra a Figura 4.9 (a). Durante o experimento, teve apenas alguma dificuldade para segurar nos cartões sem colocar os dedos sobre o código QR, tendo sido auxiliado pela técnica, conforme mostra a Figura 4.9 (b). De acordo com a psicóloga:

“Apesar de a criança ser pequena conseguiu realizar as atividades propostas, significa que qualquer criança tem condições de interagir com ele. Este fato é muito importante, pois as dificuldades que crianças apresentam começam muito cedo, e os recursos e trabalhos voltados para esta faixa etária é escasso. Psicologicamente a criança brinca, aprende e sente-se segura e estimulada a interagir cada vez mais”.

A terceira criança a participar, “DT3”, de 4 anos de idade, é irmão mais velho de DT2. Diferente do irmão, DT3 é inquieto, tendo dificuldade de concentração e coordenação motora, apontou a técnica. Apesar de estar animado para brincar com o robô, a agitação da criança ocasionalmente resultava na perda do foco da atividade, dificultando o cumprimento das ordens. O tempo tomado pelo robô para detectar a resposta também contribuiu para a dispersão da criança. A psicóloga realizou a seguinte avaliação:

“O [DT3] teve muita dificuldade de interagir e concentrar-se, mas realizou a atividade proposta. O [DT3] olhava para o robô procurando se existia alguém atrás do mesmo. Dispersava constantemente”.

(a)

(b)

Figura 4.9 – Participação de DT2 (a) na sessão experimental e (b) brincando com o robô como se fosse um carrinho de brinquedo.

Figura 4.10 – Participação de DT3 na sessão experimental.

Apesar das dificuldades observadas, ela afirmou acreditar que o uso continuado da ferramenta pode vencer essa dificuldade:

“O objetivo do Robô é estimular a criança, despertar o interesse e favorecer a socialização. Acredito que com a utilização constante do recurso do robô a criança se desenvolverá cada vez mais”.

A criança “DT4”, com 6 anos de idade, participou satisfatoriamente da atividade, atendendo prontamente às ordens do robô, como mostra a Figura 4.11 (a). Mesmo quando o robô demorava em responder aos estímulos, DT4 esperava calmamente e não se dispersava mais que o esperado. Na visão da psicóloga, “[DT4] teve boa interação, participou satisfatoriamente. A atividade possibilitou concentração, reconhecimento das figuras, desenvolvimento cognitivo”.

Ao fim da atividade, DT4 quis ver o robô se mexer. Quando foi informado de que o robô só se movia para procurar alguém para brincar e que, por isso, ele não podia ficar na frente do robô, DT4 começou imediatamente a brincar de esconde-esconde com o

Pomodoro, interagindo como se o mesmo pudesse compreendê-lo, como mostrado na Figura 4.11 (b). Conforme a psicóloga relatou:

“A brincadeira de esconde-esconde demonstrou que a criança se sente segura com o robô, ou seja, apesar de ser uma máquina, significa que a criança interage socialmente”.

Finalmente, a quinta criança, “DT5”, é irmão mais velho de DT2 e DT3, tendo 6 anos de idade. Conforme foi colocado pela técnica, DT5 compartilha, em menor grau, da dificuldade de aprendizado de DT3. Durante a atividade, DT5 participou com entusiasmo, prestou atenção, e respondeu positivamente aos comandos, ficando visivelmente feliz por acertar os cartões e ser reconhecido pelo robô, como mostra a Figura 4.16 (a). Além disso, DT5 demonstrou afetividade e aceitação ao abraçar o robô que estava “com medo de cair”, como mostra a Figura 4.16 (b). Esta atitude foi vista positivamente pela assistente social que acompanhou a sessão de atividade. Segundo a psicóloga:

“O [DT5] interagiu satisfatoriamente. Reconheceu as frutas antes [de entrar no serviço de acolhimento] não sabia. Houve concentração, entusiasmo, atenção e coordenação motora. Demonstrou satisfação em realizar a atividade possibilitando o desenvolvimento cognitivo”.

(a)

(b)

Figura 4.11 – Participação de DT4 na sessão experimental.

(a)

(b)

Figura 4.12 – Participação de DT5 na sessão experimental.

4.2.2 AFAPAB

A AFAPAB (Associação de Familiares e Amigos de Portadores de Autismo de Bauru) é uma associação sem fins lucrativos que atende crianças diagnosticadas com TEA, tendo por objetivo a auxiliá-las no desenvolvimento da linguagem, comportamento e socialização para garantir a melhora de vida.

Inicialmente, foi agendada uma reunião onde o projeto foi apresentado à direção e aos técnicos da instituição. Após demonstrar o funcionamento do robô, a instituição escolheu quatro crianças com TEA cujo nível de desenvolvimento era compatível com o esperado pelas atividades. Todas as crianças eram calmas, não-agressivas, e tinham bom desenvolvimento social. Por acaso, as quatro crianças eram do sexo masculino.

Atendendo aos pedidos dos técnicos, a voz feminina do robô Pomodoro foi substituída por uma voz masculina, pois, de acordo com a experiência deles, as crianças poderiam apresentar apatia à voz feminina. As demais observações realizadas pelos técnicos da AFAPAB serão descritas na Seção 4.3. A seguir, serão descritas as sessões experimentais com as quatro crianças.

A primeira criança, “TEA1”, se sentiu à vontade e respondeu corretamente aos comandos do robô, como mostra a Figura 4.13. Muito embora a criança estivesse agindo corretamente, a técnica teve de intervir algumas vezes para posicionar o cartão corretamente em frente a câmera do smartphone do robô, para que este conseguisse reconhecer o cartão.

Figura 4.13 – Participação de TEA1 na sessão experimental.

A segunda criança, “TEA2”, estava tímida e não queria interagir com o robô, escondendo o rosto entre as mãos, demonstrando medo, como mostra a Figura 4.14 (a). Apesar de dizer que não queria brincar, TEA2 começou a interagir com o incentivo da técnica. Depois de algum tempo, a criança superou o medo do robô, deixou de esconder seu rosto e começou a brincar corretamente, sem a necessidade de intervenção constante da técnica, como visto na Figura 4.14 (b).

Figura 4.14 – No início da sessão experimental, (a) TEA2 demonstrava aversão ao robô. Depois de interagir com o apoio da técnica, (b) TEA2 passou a interagir normalmente com o robô.

Em seguida, a terceira criança, “TEA3”, estava “indisposta” e, de acordo com os técnicos, não estava interagindo como de costume durante as atividades pedagógicas. Durante o experimento, TEA3 não obedecia aos comandos sem o incentivo dos técnicos, embora não demonstrasse aversão ao robô. Após algum tempo, TEA3 começou a responder, ainda que lentamente, aos comandos do robô, como mostrado na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Participação de TEA3 na sessão experimental.

Finalmente, a quarta criança, “TEA4”, se sentiu à vontade na presença do robô e interagiu satisfatoriamente, sem a intervenção dos técnicos da instituição durante todo o experimento. Uma foto do experimento é mostrada na Figura 4.16.

Figura 4.16 – Participação de TEA4 na sessão experimental.

4.3 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS

Conforme já discutido no início deste capítulo, o objetivo do teste piloto foi verificar o funcionamento da aplicação desenvolvida junto ao público alvo, não a sua efetividade enquanto método de terapia para crianças com TEA. No entanto, o teste piloto fomentou um colóquio com os técnicos das instituições, no qual relataram suas opiniões acerca da aplicação, fornecendo uma valiosa realimentação que será discutida a seguir.

Uma das primeiras dificuldades identificadas foi quanto ao uso do Sistema de Informação. Ao contrário do esperado, seu uso durante a terapia não foi satisfatório, pois a presença do *tablet* dispersava a atenção das crianças. Por esta razão, o *tablet* não foi utilizado nas demais sessões experimentais, eliminando, assim essa distração. Contudo, os técnicos, em especial os que trabalham com crianças com TEA, afirmaram que gostariam de ser capazes de orientar o robô a dar preferência à uma atividade específica (como, por exemplo, o “toque”) durante a sessão. Logo, a interface do Sistema de Informação não deve ser eliminada, mas, sim, repensada para que seja sutil e discreta, permitindo ao técnico influenciar as atitudes do robô sem que a criança perceba.

O uso de pictogramas no lugar de faces reais foi bem recebido pelos técnicos, que afirmaram que este tipo de representação de imagem é mais facilmente compreendido pelas crianças com TEA. Por outro lado, a voz do robô recebeu uma avaliação positiva por ser “suave, firme e segura”, embora seu gênero deva ser escolhido de acordo com a aceitabilidade da criança. Quanto a inexpressividade emotiva da voz sintetizada, os técnicos não viram como um problema, pois, pelo menos no estágio de desenvolvimento psicopedagógico no qual a aplicação se encaixa, o uso de uma voz “constante” facilita que a criança a associe ao conceito sendo exposto.

A simplicidade dos pictogramas usados e a clareza do sintetizador de voz propiciaram a elaboração de atividades objetivas e diretas, que viabilizam um “canal de comunicação” com a criança autista. No entanto, a efetividade deste canal depende da rápida resposta do robô aos estímulos proporcionados pela criança – como, por exemplo, o reconhecimento do cartão que a criança está mostrando. Caso o robô demore em responder, a criança considera que houve uma falha neste canal de comunicação e dispersa a sua atenção para seu entorno. Isso reforça a necessidade de algoritmos mais rápidos e precisos para o processamento de sinais, principalmente daqueles provenientes da câmera do *smartphone* embarcado no robô.

Os técnicos da AFAPAB observaram que a facilidade de utilização do robô permitiria que a criança participasse das brincadeiras com o apoio de um cuidador que não possui formação específica na área. Ou seja, *a priori* o robô seria utilizado pelos terapeutas para ensinar a criança. Quando a criança já estiver habituada ao robô, o procedimento poderia ser realizado em casa com a ajuda dos responsáveis ou de um cuidador. Desta forma, os técnicos poderiam trabalhar no desenvolvimento de novas habilidades, enquanto os pais ou cuidadores trabalham a manutenção das habilidades aprendidas.

Outro ponto positivo observado pelos terapeutas é o fato do robô não se “cansar” de repetir as mesmas ações por várias vezes. Em geral, as atividades psicopedagógicas com crianças com TEA são repetitivas e, portanto, cansativas para o terapeuta, que pode, também, se sentir desanimado caso a criança não esteja respondendo adequadamente. O robô, por outro lado, não demonstra cansaço e repete as ações de modo constante, sem mudar o timbre da voz ou velocidade dos movimentos. Esta constância do robô facilita o trabalho do terapeuta com a criança por longos períodos.

A aplicação foi, portanto, recebida positivamente pelos técnicos de ambas as instituições. Certamente, há ajustes a serem feitos para que o sistema seja aplicado efetivamente em terapia, como a criação de mais cartões e a adição de mais movimentos ao robô durante as atividades. No entanto, ficou clara a correta adequação da aplicação desenvolvida aos requisitos estabelecidos. Portanto, este estudo piloto permite concluir que a aplicação atingiu aos objetivos propostos por esse trabalho.

5 CONCLUSÃO

“A máquina, que a princípio parecia afastá-lo, submete-o com mais rigor aos grandes problemas naturais”.

Antoine de Saint Exupéry (Terre des Hommes, 1939, tradução nossa)

A fascinação de Antoine de Saint Exupéry com o elo entre homem, máquina e natureza é fruto de sua vasta experiência frente as adversidades da sua profissão. Exímio piloto de linha aérea, Antoine reconhece que a sua máquina, o avião, tornava as forças da tempestade, do oceano e da montanha muito mais severas ao avião que ao camponês em terra firme. Semelhantemente, a robótica, cuja essência é sobretudo artificial, acaba por render o projetista não apenas aos problemas naturais, mas, também, às soluções concebidas pela própria natureza.

Este capítulo se inicia com uma revisão dos diversos problemas abordados no decorrer do desenvolvimento do trabalho. Durante esta revisão, as considerações finais sobre os diferentes aspectos da pesquisa são apresentadas com o intuito de evidenciar as contribuições do trabalho, como será visto na Seção 5.1. Finalmente, a presente tese de doutorado é encerrada pela Seção 5.2, que discute as diretrizes de desenvolvimento para trabalhos futuros que dela podem originar.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONTRIBUIÇÕES

A robótica constitui um campo do conhecimento indubitavelmente vasto e complexo. Seu objeto de estudo, o robô, é uma criatura artificial que deve ser capaz de “sobreviver” num ambiente altamente dinâmico para efetuar tarefas que demandam, gradativamente, da colaboração com pessoas. Consequentemente, são necessários meios que permitam ao robô adaptar-se aos contratempos ocasionados pela interação com o ambiente e pessoas, e que propiciem a comunicação efetiva entre máquina e humano. Buscando contribuir para a solução destes problemas, esta tese apresentou uma organização de arquitetura de controle comportamental e híbrida voltada para interação humano-robô, inspirada em modelos naturais vindos da psicologia, etologia e biologia. Seu

desenvolvimento balizou-se não apenas nos aspectos técnicos abarcados pela IHR e pela própria arquitetura de controle, mas também incorporou os aspectos de ética para robôs. Apesar dos trabalhos em robótica usualmente não se atentarem à ética para robôs – não por decorrência da negligência dos autores, mas em virtude do pragmatismo científico vigente que separa a causa tecnológica do efeito social –, tomou-se aqui o cuidado de atentar à ética sempre que cabível. Suportada, portanto, pelos pilares da ética para robôs, da IHR e das arquiteturas de controle, e motivada pela psicologia, etologia e biologia, a organização da arquitetura de controle propõe os seguintes módulos arquiteturais: espaço de memória, interfaces para hardware, processadores de dados e controlador.

O *espaço de memória* é o módulo central, inspirado nos modelos psicológicos da memória humana, que oferecem ideias de como a mente humana processa os vários estímulos e os organiza em nossa memória, e baseado em sistemas computacionais, tais como os bancos de dados e os sistemas de *whiteboard*. Este módulo é responsável pela viabilização de um sistema de software distribuído, constituído por módulos fracamente acoplados cuja manutenção, substituição, ou adição não impacta os demais módulos arquiteturais, além de limitar a propagação de falhas entre os módulos. Sua implementação baseou-se no software Redis, versão 2.8.19, que é banco de dados NoSQL tipo chave-valor que oferece meios de comunicação entre os processos dos módulos arquiteturais, e de armazenamento de dados. Este software, como demonstram os experimentos, atendeu plenamente os requisitos impostos pela arquitetura e pelo estudo de caso em robótica social assistiva, oportunizando também o levantamento de dados a respeito dos pacientes por intermédio da interação destes com o robô móvel.

Em se tratando do robô móvel, as *interfaces para hardware* são suficientes para a aquisição e decodificação dos sinais dos sensores, e para acionamento dos atuadores. Num sistema robótico complexo pode existir uma ou mais interfaces para hardware. Neste sentido, o robô Pomodoro proporciona a verificação das capacidades de suas duas interfaces para hardware: uma para o seu “corpo”, que se comunica via elo sem fio (*Bluetooth*); e outra para sua “cabeça”, composta por um *smartphone* com suporte à comunicação por Wi-Fi. Os benefícios de separar em módulos de software independentes (*stand-alone*) são a limitação da propagação de falhas e, principalmente, a facilitação da permuta do sistema robótico, pois não requer o retrabalho dos demais módulos.

Os dados existentes no espaço de memória, principalmente aqueles provenientes das interfaces para hardware, são utilizados pelos *processadores de dados* para produzir informações úteis, tal como o processador de dados de visão computacional desenvolvido. O processador de dados de visão computacional, implementado para o estudo de caso em

robótica social assistiva, retrata esta capacidade, pois utiliza dos dados sensoriais fornecidos pela câmera do *smartphone* para detectar faces ou códigos QR. O uso de processadores de dados distintos é útil, pois permite que eles sejam ativados ou desativados conforme a demanda, além de facilitar a adição de novos processadores de dados ao sistema.

O módulo que utiliza o espaço de memória para efetivamente controlar o robô é o *controlador*. Nesta organização, o controlador é dividido em três camadas: emoções, comportamentos e deliberante. A camada de *emoções*, baseada na teoria bidimensional da área de psicologia, possibilita a adaptação dinâmica do comportamento do robô em relação ao contexto, ou até mesmo a troca de comportamento. Esta adaptabilidade e flexibilidade no acionamento de comportamentos é interessante em situações onde o conhecimento disponível a respeito da tarefa ou ambiente é escasso, ou onde a complexidade do conhecimento acessível ultrapassa a capacidade de processamento ou inferência do robô. Isso é possível pois as emoções nesta arquitetura propiciam a avaliação subjetiva baseada em crenças cognitivas codificadas pelo projetista durante o processo de composição dos comportamentos e suas transições. Ademais, as emoções subsidiam a comunicação do estado interno do robô para o usuário de forma natural. Logo, os experimentos demonstraram que as emoções permitem a mudança de comportamentos e a representação do estado interno do robô por meio de expressões faciais mostradas pelo *smartphone*.

Os *comportamentos* do controlador, enquanto blocos construtivos de uma arquitetura de controle, determinam as ações por meio de esquemas motores e o encadeamento destas ações por artifício de uma máquina de estados finitos. Os esquemas motores baseiam-se em estudos de Psicologia e Neurologia, além de incorporar conhecimento da Etologia e Inteligência Artificial. Eles são proveitosos, pois permitem descrever controladores de baixo nível por meio de um processo formal que copia estruturas semelhantes aos neurônios. Por outro lado, as máquinas de estados finitos permitem delinear e analisar formalmente as intenções do sistema por meio de uma linguagem de alto nível. O potencial desta organização de comportamentos é demonstrado pelos experimentos, onde o esquema motor particular do olhar social é apresentado, e onde o funcionamento correto do robô é mostrado quando sozinho e na presença de uma pessoa.

O módulo responsável por ativar e desativar comportamentos é o *deliberante*, pois conduz os comportamentos de modo que o robô atinja seu objetivo global, respondendo de forma imediata aos imprevistos para evitar acidentes. Para garantir que este módulo atendesse em tempo hábil às variações do ambiente, ele foi dividido em três camadas: *segurança*, com maior prioridade e que garante a segurança do usuário e do robô; *regulação*, com prioridade intermediária e responsável por garantir o bom funcionamento dos

componentes do robô; e *plano*, que, embora tenha a menor prioridade, é responsável por executar os comportamentos adequados para cumprir com os objetivos da aplicação. No estudo de caso em robótica social, os três níveis foram implementados como árvores de decisão para tornar o robô mais previsível, que é um fator de interesse para a terapia de crianças com transtorno do espectro autista. Os experimentos demonstram a eficiência do deliberante desenvolvido para permutar os comportamentos de acordo com o estado emocional do robô, a presença de perigo, e a interação com o usuário.

Além de comprovar o funcionamento da organização de arquitetura de controle desenvolvida, os experimentos validam a adequação da arquitetura para o estudo de caso em robótica social assistiva. Os experimentos em laboratório e o teste piloto indicaram que a aplicação desenvolvida estava em consonância com os requisitos estipulados pela equipe de especialistas consultada. O robô desempenhou as atividades lúdicas conforme especificado pela equipe, e também executou os comportamentos que garantiam a segurança da aplicação quando necessário. O sistema de informação desenvolvido também atendeu às necessidades do projeto, já que fornece uma interface simples e compreensível para ajustar os parâmetros de configuração do robô, gerenciar os pacientes e executar as sessões de terapia.

As conclusões acima apresentadas referentes à organização da arquitetura de controle inteligente para IHR e ao estudo de caso em robótica social assistiva permitem enunciar as principais contribuições desta tese, a saber:

- Desenvolvimento de uma organização de arquitetura de controle inteligente para IHR capaz de comunicar seu estado interno e, também, de adaptar-se ao meio e à tarefa com o uso de emoções sintéticas embasadas na teoria bidimensional de emoções.
- Representar a avaliação subjetiva baseada em crenças cognitivas das emoções como as transições de uma máquina de estados finitos.
- Construção de um robô móvel de pequena dimensão, baixo custo e fácil replicação dedicado para aplicações de IHR, baseando-se em conceitos de design universal.
- Elaboração de um estudo de caso em robótica social assistiva, onde se propôs um ambiente de educação especial para que crianças com algum atraso cognitivo, tais como aquelas enquadradas com TEA, pudessem participar de atividades lúdicas com o apoio de um robô móvel.

5.2 DISCUSSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Decerto, vários aspectos deste trabalho poderiam ter sido explorados com mais afinco, ou terem empregado abordagens diferentes daquelas adotadas. Isto decorre da natureza multidisciplinar da robótica, que deve ser entendida como uma área de aplicação para a qual derivam vários ramos das ciências e, mais recentemente, das humanidades. Não raramente, os conhecimentos de áreas diferentes que num primeiro momento parecem convergir, podem apresentar particularidades que os fazem divergir. Exemplo disso são as áreas de IHR, agentes inteligentes e computação afetiva, que suprem abordagens distintas, cada qual com sua limitação, para a solução de um mesmo problema de interação com o usuário. O que acaba por distinguir, geralmente, a robótica das demais áreas de aplicação é a sua corporeidade: no exemplo anterior, os agentes inteligentes são, vias de regra, software e residem em ambientes virtuais, enquanto a computação afetiva considera a interação com um computador que, apesar de possuir uma estrutura física, não possui meios para reagir e alterar o ambiente. Possuir um corpo físico implica em lidar com as dificuldades de um mundo físico não-ideal. Outro fator menos genérico, mas igualmente restritivo, é o tempo, cujo limite acaba por obrigar a adoção de alternativas menos elaboradas, mas cuja implantação demanda menor prazo.

O espaço de memória implementou um sistema *whiteboard* para comunicação entre processos e armazenamento de dados. Seu modelo de memória leva em conta apenas a duração da validade do dado, não fazendo menção a sua natureza ou estrutura. Dessa forma, trabalhos futuros podem abordar como diferentes tipos de experiências do robô podem ser codificadas e gravadas neste espaço de memória, o que permitiria criar uma memória episódica. Além disso, os dados gravados podem ser analisados para fins de aprendizado de máquina, seja para melhor adequar os comportamentos do robô para as particularidades de cada usuário, seja para ajustar o robô às mudanças do ambiente dinâmico.

O controlador é, certamente, outro módulo na organização da arquitetura que merece atenção. Sua especificação está fortemente acoplada à aplicação, que define os comportamentos que o robô móvel deve exercer para alcançar seus objetivos. Nesta ótica, a aplicação escolhida não requeria um algoritmo complexo de tomada de decisão, principalmente quando ponderada a afinidade do público alvo com sistemas previsíveis. Por outro lado, a adição de mecanismos sofisticados de tomada de decisão constitui, por si só, um projeto de pesquisa.

Talvez, a aplicação desenvolvida não tenha sido a melhor alternativa para se demonstrar a flexibilidade da arquitetura quanto à comutação de comportamentos e

adaptação à situação. Um cenário mais simples de navegação, porém com dados mais fáceis de capturar e interpretar que aqueles relativos à IHR, poderia fornecer uma visão mais crítica e elaborada a respeito dos blocos arquiteturais que compõem esta arquitetura. Neste sentido, outras aplicações podem ser desenvolvidas e testadas.

Por outro lado, a atual aplicação poderia ser melhorada pela adição de sensores com o intuito de reduzir a complexidade de interpretação dos dados, como ocorre com o robô MARIA. Além de uma câmera de vídeo, principal sensor oferecido pelo Pomodoro por meio de seu *smartphone*, o robô MARIA dispõe de um sensor de profundidade (Microsoft Kinect 2.0) e uma câmera térmica (Therm-app), que permitem detectar padrões de formas e, também, variações de temperatura superficial da pele. Logo, adaptar novos sensores ao Pomodoro, ou adaptar a arquitetura de controle a outro robô, pode melhorar a qualidade das informações.

No entanto, a pequena quantidade de sensores não invalida, necessariamente, a aplicação desenvolvida com o robô Pomodoro. Os experimentos desenvolvidos com voluntários demonstraram que o robô opera conforme estipulado pela equipe terapêutica. Consequentemente, os próximos passos incluem a elaboração de parcerias e aprovação do comitê de ética para experimentar o ambiente de educação especial desenvolvido com crianças que atendam aos critérios de inclusão. Para isso, será necessário, também, determinar o conjunto de métricas que será usado para avaliar o desempenho do sistema, e a influência a curto e longo prazo da terapia com essas crianças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUS, J. S. **Outline for a theory of intelligence**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 21, n. 3, p. 473–509, 1991.

ALVES, Silas; SILVA, Ivan N.; RANIERI, Caetano; FILHO, Humberto Ferasoli; CALDEIRA, Marco; PEGORARO, Rene. A friendly mobile entertainment robot for disabled children. In: BIOSIGNALS AND BIOROBOTICS CONFERENCE (BRC), 2013, [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.

ALY, A.; TAPUS, A. A model for synthesizing a combined verbal and nonverbal behavior based on personality traits in human-robot interaction. In: 2013 8TH ACM/IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMAN-ROBOT INTERACTION (HRI), 2013, [S.l.: s.n.], 2013. p. 325–332.

AMIRABDOLLAHIAN, F.; ROBINS, B.; DAUTENHAHN, K.; JI, Z. Investigating tactile event recognition in child-robot interaction for use in autism therapy. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY, EMBC, 2011, [S.l.: s.n.], 2011. p. 5347–5351.

ARBIB, M. A.; KFOURY, A. J.; MOLL, R. N. **A Basis for Theoretical Computer Science**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1981.

ARKIN, R.C. Motor schema based navigation for a mobile robot: An approach to programming by behavior. In: 1987 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. PROCEEDINGS, Mar 1987, [S.l.: s.n.], Mar 1987. p. 264–271.

ARKIN, Ronald C. **Behavior-based Robotics**. [S.l.]: MIT Press, 1998.

ARKIN, Ronald C. **Motor Schema — Based Mobile Robot Navigation**. The International Journal of Robotics Research, v. 8, n. 4, p. 92–112, 8 Jan 1989.

ARKIN, Ronald C.; BALCH, Tucker. **AuRA: Principles and practice in review**. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, v. 9, n. 2–3, p. 175–189, 1997.

ARKIN, Ronald C.; FUJITA, Masahiro; TAKAGI, Tsuyoshi; HASEGAWA, Rika. **An ethological and emotional basis for human–robot interaction**. Robotics and Autonomous Systems, v. 42, n. 3, p. 191–201, 2003.

ARMOUR, Thomas; GUNNING, David. **Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA)**. Disponível em: <http://web.archive.org/web/20050204035454/http://www.darpa.mil/ipto/solicitations/open/05-18_PIP.htm>. Acesso em: 16 jun 2016.

ASIMOV, Isaac. **Runaround**. Astounding Science Fiction, v. 29(3), p. 94–103, Mar 1942.

ATKINSON, Richard C.; SHIFFRIN, Richard M. **Human memory: A proposed system and its control processes**. The psychology of learning and motivation, v. 2, p. 89–195, 1968.

BAJRACHARYA, M.; MAIMONE, M.W.; HELMICK, D. **Autonomy for Mars Rovers: Past, Present, and Future**. Computer, v. 41, n. 12, p. 44–50, 2008.

BEGUM, M.; KARRAY, F.; MANN, G. K I; GOSINE, R. A probabilistic approach for attention-based multi-modal human-robot interaction. In: THE 18TH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOT AND HUMAN INTERACTIVE COMMUNICATION, 2009. RO-MAN 2009, 2009, [S.l: s.n.], 2009. p. 200–205.

BIOLOGICALLY INSPIRED COGNITIVE ARCHITECTURES SOCIETY. **Comparative Table of Cognitive Architectures**. Disponível em: <<http://bicasociety.org/cogarch/architectures.htm>>. Acesso em: 17 jun 2016.

BORENSTEIN, J.; EVERETT, H. R.; FENG, L. **Where am I? Sensors and Techniques for Mobile Robot Positioning**. [S.l.]: AK Peters, Ltd., Wellesley, MA), 1st ed., Ch. 2, pp. 28-35 and pp. 71-72, 1995.

BREAZEALE, Cynthia. A motivational system for regulating human-robot interaction. 1998, [S.l: s.n.], 1998. p. 54–61. Disponível em: <<http://www.aaai.org/Papers/AAAI/1998/AAAI98-008.pdf>>. Acesso em: 9 jul 2013.

BROEK, Egon L. Van den. Affective Computing: A Reverence for a Century of Research. ESPOSITO, A.; ESPOSITO, A. M.; VINCIARELLI, A.; HOFFMANN, R.; MÜLLER, V. C. (Org.). . Cognitive Behavioural Systems. Lecture Notes in Computer Science. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 434–448.

BROOKS, R. Visual map making for a mobile robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1985, [S.l: s.n.], 1985. p. 824–829.

BROOKS, Rodney A. **Intelligence without representation**. Artificial Intelligence, v. 47, n. 1–3, p. 139–159, Jan 1991.

BURGHART, C.; HOLZAPFEL, H.; HAEUSSLING, R.; BREUER, S. Coding interaction patterns between human and receptionist robot. In: 7TH IEEE-RAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS, 2007, [S.l: s.n.], 2007. p. 454–460.

BURKE, J.L.; MURPHY, R.R.; ROGERS, E.; LUMELSKY, V.J.; SCHOLTZ, J. **Final Report for the DARPA/NSF Interdisciplinary Study on Human-Robot Interaction**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), v. 34, n. 2, p. 103–112, Maio 2004.

CHATILA, Raja. **Deliberation and reactivity in autonomous mobile robots**. Robotics and Autonomous Systems, v. 16, n. 2–4, p. 197–211, Dez 1995.

CHU, R. Z.; SUN, S. J.; YANG, L. **Design and Realization of System Structure Based on Blackboard System**. Indonesian Journal of Electrical Engineering, v. 11, n. 8, p. 4580–4586, 2013.

COECKELBERGH, Mark; POP, Cristina; SIMUT, Ramona; PECA, Andreea; PINTEA, Sebastian; DAVID, Daniel; VANDERBORGHT, Bram. **A Survey of Expectations About**

the Role of Robots in Robot-Assisted Therapy for Children with ASD: Ethical Acceptability, Trust, Sociability, Appearance, and Attachment. Science and Engineering Ethics, p. 1–19, 17 Abr 2015.

CONSELHO NACIONAL DE SAÚDE (BRASIL). **Resolução nº 466, de 12 de dezembro de 2012.** . Brasília: [s.n.], 2012.

CRAIG, I. **Blackboard systems.** Norwood, N.J: Ablex Pub. Corp., 1995.

DAUTENHAHN, K. **Socially intelligent robots: dimensions of human-robot interaction.** Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 362, n. 1480, p. 679–704, 29 Abr 2007.

DAUTENHAHN, K.; BILLARD, A. **Games children with autism can play with Robota, a humanoid robotic doll.** Universal access and assistive technology, p. 179–190, 2002.

DUCH, Włodzisław; OENTARYO, Richard J.; PASQUIER, Michel. Cognitive Architectures: Where Do We Go from Here? In: FIRST CONFERENCE ON ARTIFICIAL GENERAL INTELLIGENCE, 2008, Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands. Anais... Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands: IOS Press, 2008. p. 122–136. . Acesso em: 16 jun 2016.

DUDEK, Gregory; JENKIN, Michael. **Computational Principles of Mobile Robotics.** [S.l.]: Cambridge University Press, 2010.

DUQUETTE, Audrey; MICHAUD, François; MERCIER, Henri. **Exploring the use of a mobile robot as an imitation agent with children with low-functioning autism.** Autonomous Robots, v. 24, n. 2, p. 147–157, 26 Out 2007.

EDLICH, Stefan. **NoSQL Databases.** Disponível em: <<http://nosql-database.org/>>. Acesso em: 26 ago 2014.

EKMAN, Paul. Basic Emotions. SCIENTIST, T. D. R.; PSYCHOLOGY, M. J. P. OF C. (Org.). . Handbook of Cognition and Emotion. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 1999. p. 45–60.

ENGINEERING AND PHYSICAL SCIENCES RESEARCH COUNCIL; ARTS AND HUMANITIES RESEARCH COUNCIL. **Principles of robotics: Regulating robots in the real world.** Disponível em: <<https://www.epsrc.ac.uk/research/ourportfolio/themes/engineering/activities/principlesofrobotics/>>. Acesso em: 14 ago 2015.

FEIL-SEIFER, D.; MATARIC, M. Using proxemics to evaluate human-robot interaction. In: 5TH ACM/IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMAN-ROBOT INTERACTION, HRI, Mar 2010, [S.l.: s.n.], Mar 2010. p. 143–144.

FERASOLI FILHO, Humberto; CALDEIRA, M. A. C.; PEGORARO, R.; ALVES, Silas Franco dos Reis; VALADÃO, C.; BASTOS FILHO, T.F. Use of Myoelectric Signals to Command Mobile Entertainment Robot by Disabled Children: Design and Control Architecture. In: 3RD IEEE BIOSIGNALS AND BIOROBOTICS CONFERENCE (ISSNIP), 2012, Manaus. Anais... Manaus: [s.n.], 2012. p. 1–5.

FLORATOU, Avriia; TELETIA, Nikhil; DEWITT, David J.; PATEL, Jignesh M.; ZHANG, Donghui. **Can the Elephants Handle the NoSQL Onslaught?** Proceedings of the VLDB Endowment, v. 5, n. 12, p. 1712–1723, Ago 2012.

FRANZ, M. O; MALLOT, H. A. **Biomimetic robot navigation**. Robotics and autonomous Systems, v. 30, n. 1–2, p. 133–154, 2000.

GATES, Bill. **A Robot in Every Home**. Scientific American, v. 296, p. 58–65, Jan 2007.

GAZZANIGA, Michael; HEATHERTON, Todd; HALPERN, Diane. **Psychological Science**. 4. ed. New York, NY: W. W. Norton & Company, 2012.

GOODRICH, Michael A.; SCHULTZ, Alan C. **Human-robot interaction: a survey**. Foundations and Trends in Human-Computer Interaction, v. 1, n. 3, p. 203–275, 2007.

GOULART, Christiane; CASTILLO, Javier; VALADÃO, Carlos; BASTOS, Teodiano; CALDEIRA, Eliete. **EEG analysis and mobile robot as tools for emotion characterization in autism**. BMC Proceedings, v. 8, n. 4, p. 85, 2014.

GOULART, Christiane Mara. **Uma Contribuição ao Estudo de Sinais de EEG para Avaliar Estados Emocionais e Mentais de Crianças com Autismo na Interação com Robô Móvel**. 2015. 143 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

GOULART, C.M.; CASTILLO, J.; VALADO, C.T.; CALDEIRA, E.; TRAUERNICHT, M.; BASTOS-FILHO, T.F. Proposal of evaluation methods of interaction between a mobile robot and children with Autism Spectrum Disorder. In: 5TH ISSNIP-IEEE BIOSIGNALS AND BIOROBOTICS CONFERENCE (2014): BIOSIGNALS AND ROBOTICS FOR BETTER AND SAFER LIVING (BRC), Maio 2014, [S.l.: s.n.], Maio 2014. p. 1–4.

HAN, Jing; HAIHONG, E.; LE, Guan; DU, Jian. Survey on NoSQL database. In: 2011 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERVASIVE COMPUTING AND APPLICATIONS (ICPCA), Out 2011, [S.l.: s.n.], Out 2011. p. 363–366.

HARA, F. Artificial emotion of face robot through learning in communicative interactions with human. In: 13TH IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ROBOT AND HUMAN INTERACTIVE COMMUNICATION, ROMAN, 2004, [S.l.: s.n.], 2004. p. 7–15.

HIRTH, J.; SCHMITZ, N.; BERNES, K. Emotional Architecture for the Humanoid Robot Head ROMAN. In: 2007 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2007, [S.l.: s.n.], 2007. p. 2150–2155.

HIRTH, Jochen; BRAUN, Tim; BERNES, Karsten. Emotion Based Control Architecture for Robotics Applications. HERTZBERG, J.; BEETZ, M.; ENGLERT, R. (Org.). . KI 2007: Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 464–467.

HIRTH, Jochen; SCHMITZ, Norbert; BERNES, Karsten. **Towards Social Robots: Designing an Emotion-Based Architecture**. International Journal of Social Robotics, v. 3, n. 3, p. 273–290, 1 Ago 2011.

- HOFFMAN, Matthew W.; GRIMES, David B.; SHON, Aaron P.; RAO, Rajesh P.N. **A probabilistic model of gaze imitation and shared attention**. *Neural Networks*, v. 19, n. 3, p. 299–310, Abr 2006.
- HOWARD, A.M.; CRUZ, G. Adapting Human Leadership Approaches for Role Allocation in Human-Robot Navigation Scenarios. In: **WORLD AUTOMATION CONGRESS, WAC '06**, Jul 2006, [S.l.: s.n.], Jul 2006. p. 1–8.
- HUDLICKA, Eva. **Affective BICA: Challenges and open questions**. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, v. 7, p. 98–125, Jan 2014.
- IACONO, I.; LEHMANN, H.; MARTI, P.; ROBINS, B.; DAUTENHAHN, K. Robots as social mediators for children with Autism - A preliminary analysis comparing two different robotic platforms. In: **2011 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENT AND LEARNING (ICDL)**, Ago 2011, [S.l.: s.n.], Ago 2011. p. 1–6.
- IEEE. **Robot Ethics - IEEE Robotics and Automation Society**. Disponível em: <<http://www.ieee-ras.org/robot-ethics>>. Acesso em: 14 ago 2015.
- INFANTES, Guillaume; GHALLAB, Malik; INGRAND, Félix. **Learning the behavior model of a robot**. *Autonomous Robots*, v. 30, n. 2, p. 157–177, Out 2010.
- JAKOI, Emma; CARBREY, Jennifer. **Introductory Human Physiology**. [S.l.: s.n.], 2015.
- JURAFSKY, Daniel; MARTIN, James H. **Speech And Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing , Computational Linguistics, and Speech Recognition**. [S.l.]: Prentice Hall, 2009.
- KIM, Elizabeth; PAUL, Rhea; SHIC, Frederick; SCASSELLATI, Brian. **Bridging the Research Gap: Making HRI Useful to Individuals with Autism**. *Journal of Human-Robot Interaction*, p. 26–54, 1 Ago 2012.
- KIM, Elizabeth S.; BERKOVITS, Lauren D.; BERNIER, Emily P.; LEYZBERG, Dan; SHIC, Frederick; PAUL, Rhea; SCASSELLATI, Brian. **Social Robots as Embedded Reinforcers of Social Behavior in Children with Autism**. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, v. 43, n. 5, p. 1038–1049, Maio 2013.
- KIM, Young-Min; KOO, Seong-Yong; LIM, Jong-Gwan; KWON, Dong-Soo. **A robust online touch pattern recognition for dynamic human-robot interaction**. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, v. 56, n. 3, p. 1979–1987, 2010.
- KOAY, Kheng Lee; SYRDAL, D.S.; WALTERS, M.L.; DAUTENHAHN, K. Five Weeks in the Robot House - Exploratory Human-Robot Interaction Trials in a Domestic Setting. In: **2ND INTERNATIONAL CONFERENCES ON ADVANCES IN COMPUTER-HUMAN INTERACTIONS, ACHI '09.**, Fev 2009, [S.l.: s.n.], Fev 2009. p. 219–226.
- KOSUGE, K.; HAYASHI, T.; HIRATA, Y.; TOBIYAMA, R. Dance partner robot - Ms DanceR. In: **2003 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2003. (IROS 2003). PROCEEDINGS, 2003**, [S.l.: s.n.], 2003. p. 3459–3464 vol.3.

LABORATOIRE D'ANALYSE ET D'ARCHITECTURE DES SYSTÈMES. **Adream - Architectures dynamiques reconfigurables pour systèmes embarqués autonomes mobiles**. Disponível em: <<http://www.laas.fr/ADREAM/>>. Acesso em: 3 maio 2012.

LAIRD, John E.; NEWELL, Allen; ROSENBLOOM, Paul S. **SOAR: An Architecture for General Intelligence**. *Artif. Intell.*, v. 33, n. 1, p. 1–64, Set 1987.

LARUE, Othalia; POIRIER, Pierre; NKAMBOU, Roger. **The emergence of (artificial) emotions from cognitive and neurological processes**. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, v. 4, p. 54–68, Abr 2013.

LEAVITT, N. **Will NoSQL Databases Live Up to Their Promise?** *Computer*, v. 43, n. 2, p. 12–14, Fev 2010.

LEE, Jae-Joon; KIM, Dae-Won; KANG, Bo-Yeong. **Exploiting Child-Robot Aesthetic Interaction for a Social Robot**. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, p. 1–9, 2012.

LEE, JaeMoon; CHOI, JongSuk; PARK, Mignon. Design of the robotic system for human-robot interaction using sound source localization, mapping data and voice recognition. In: ICCAS-SICE ICROS-SICE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE, 2009, [S.l.: s.n.], 2009. p. 1143–1147.

LUCENTINI, Danilo Fernando; GUDWIN, Ricardo Ribeiro. A Comparison Among Cognitive Architectures: A Theoretical Analysis. In: 6TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOLOGICALLY INSPIRED COGNITIVE ARCHITECTURES, BICA 2015, *Procedia Computer Science*, 2015, Lyon, France. Anais... Lyon, France: [s.n.], 2015. p. 56–61.

MAES, Pattie. **Situated agents can have goals**. *Robotics and Autonomous Systems, Designing Autonomous Agents*. v. 6, n. 1–2, p. 49–70, Jun 1990.

MASLOW, Abraham Harold. **A theory of human motivation**. *Psychological review*, v. 50, n. 4, p. 370–396, 1943.

MATARIĆ, Maja J. **Behavior-Based Control: Main Properties and Implications**. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Workshop on Architectures for Intelligent Control Systems*, p. 46–54, 1992.

MATARIĆ, Maja J. **The robotics primer**. [S.l.]: MIT Press, 2007.

MEAD, R.; MATARIC, M.J. A probabilistic framework for autonomous proxemic control in situated and mobile human-robot interaction. In: 7TH ACM/IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMAN-ROBOT INTERACTION (HRI), 2012, [S.l.: s.n.], 2012. p. 193–194.

MEDEIROS, A. A.D. **A survey of control architectures for autonomous mobile robots**. *Journal of the Brazilian Computer Society*, v. 4, 1998.

MICHAUD, Francois; CLAVET, André. **Robotoy contest-designing mobile robotic toys for autistic children**. *Proc. of the American Society for Engineering Education (ASEE'01)*, 2001.

- MITCHELL, Tom M.; THRUN, Sebastian B. **Learning analytically and inductively**. Mind matters: A tribute to Allen Newell, p. 85–110, 1996.
- MITSUNAGA, N.; SMITH, C.; KANDA, T.; ISHIGURO, H.; HAGITA, N. **Adapting Robot Behavior for Human–Robot Interaction**. Robotics, IEEE Transactions on, v. 24, n. 4, p. 911–916, Ago 2008.
- MOON, A.; CALISGAN, Ergun; OPERTO, Fiorella; VERUGGIO, Gianmarco; VAN DER LOOS, HF Machiel. Open Roboethics: Establishing an Online Community for Accelerated Policy and Design Change. In: WE ROBOT, 2012, [S.l: s.n.], 2012. p. 1–6.
- MUKAWA, Michal; LIM, Joo-Hwee. A Review of Cognitive Architectures for Visual Memory. CHELLA, A.; PIRONE, R.; SORBELLO, R.; JÓHANNSDÓTTIR, K. R. (Org.). . Biologically Inspired Cognitive Architectures 2012. Advances in Intelligent Systems and Computing. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 233–238. . Acesso em: 21 jun 2016.
- MULLIGAN, Kevin; SCHERER, Klaus R. **Toward a Working Definition of Emotion**. Emotion Review, v. 4, n. 4, p. 345–357, 1 Out 2012.
- MUMM, J.; MUTLU, B. Human-robot proxemics: Physical and psychological distancing in human-robot interaction. In: 6TH ACM/IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMAN-ROBOT INTERACTION (HRI), Mar 2011, [S.l: s.n.], Mar 2011. p. 331–338.
- MURATA, K.; NAKADAI, K.; TAKEDA, R.; OKUNO, H.G.; TORII, T.; HASEGAWA, Y.; TSUJINO, H. A beat-tracking robot for human-robot interaction and its evaluation. In: 8TH IEEE-RAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS, 2008, [S.l: s.n.], 2008. p. 79–84.
- MURPHY, Robin. **Introduction to AI robotics**. [S.l.]: MIT Press, 2000.
- MURPHY, Robin; WOODS, David D. **Beyond Asimov: The Three Laws of Responsible Robotics**. IEEE Intelligent Systems, v. 24, n. 4, p. 14–20, 2009.
- MURPHY, R.R.; LISETTI, C.L.; TARDIF, R.; IRISH, L.; GAGE, A. **Emotion-based control of cooperating heterogeneous mobile robots**. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v. 18, n. 5, p. 744–757, 2002.
- MUTLU, B.; FORLIZZI, J.; HODGINS, J. A Storytelling Robot: Modeling and Evaluation of Human-like Gaze Behavior. In: 6TH IEEE-RAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS, Dez 2006, [S.l: s.n.], Dez 2006. p. 518–523.
- NICOLESCU, M.N.; MATARIĆ, Maja J. **Learning and interacting in human-robot domains**. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, v. 31, n. 5, p. 419–430, 2001.
- O'REILLY, Randall C.; HAZY, Thomas E.; HERD, Seth A. The Leabra Cognitive Architecture How to Play 20 Principles with Nature and Win! CHIPMAN, S. (Org.). . The Oxford Handbook of Cognitive Science. [S.l: s.n.], 2015. v. 1. .
- POLICASTRO, Claudio A.; ROMERO, Roseli A.F.; ZULIANI, Giovana; PIZZOLATO, Ednaldo. **Learning of shared attention in sociable robotics**. Journal of Algorithms, v. 64, n. 4, p. 139–151, Out 2009.

POSNER, Jonathan; RUSSELL, James A.; PETERSON, Bradley S. **The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology**. Development and psychopathology, v. 17, n. 3, p. 715–734, 2005.

PRESSMAN, Roger S. **Engenharia de software**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.

RAM, A.; BOONE, G.; ARKIN, R.; PEARCE, M. **Using genetic algorithms to learn reactive control parameters for autonomous robotic navigation**. Adaptive Behavior, v. 2, n. 3, p. 277–305, 1994.

REILENT, ENAR. **Whiteboard Architecture for the Multi-agent Sensor Systems**. 2012. 137 f. Tese de Doutorado – Tallinn University of Technology, Tallinn, Estônia, 2012. . Acesso em: 9 dez 2014.

REINKENSMEYER, David J; PANG, Clifton T; NESSLER, Jeff A; PAINTER, Chris C. **Java Therapy: Web-Based Robotic Rehabilitation**. Integration of Assistive Technology in the Information Age, v. 9, p. 66–71, 2001.

REMAZEILLES, A.; LEROUX, C.; CHALUBERT, G.; CEA, L.; AUX ROSES, F. SAM: a robotic butler for handicapped people. 2008, [S.l.: s.n.], 2008. p. 315–321.

REN, Dongchun; WANG, Peng; QIAO, Hong; ZHENG, Suiwu. **A biologically inspired model of emotion eliciting from visual stimuli**. Neurocomputing, Advances in Artificial Neural Networks and Machine Learning Selected papers from the 2011 International Work Conference on Artificial Neural Networks (IWANN 2011). v. 121, p. 328–336, 9 Dez 2013.

ROBINS, B.; DAUTENHAHN, K.; BOEKHORST, R.Te.; BILLARD, A. **Robotic assistants in therapy and education of children with autism: Can a small humanoid robot help encourage social interaction skills?** Universal Access in the Information Society, v. 4, n. 2, p. 105–120, 2005.

ROBINS, Ben et al. **Human-centred design methods: Developing scenarios for robot assisted play informed by user panels and field trials**. International Journal of Human-Computer Studies, v. 68, n. 12, p. 873–898, Dez 2010.

RUSSELL, James A. **A circumplex model of affect**. Journal of Personality and Social Psychology, v. 39, n. 6, p. 1161–1178, 1980.

SAFFIOTTI, A. **The uses of fuzzy logic in autonomous robot navigation**. Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, v. 1, n. 4, p. 180–197, 1997.

SAMSONOVICH, Alexei V. **Emotional biologically inspired cognitive architecture**. Biologically Inspired Cognitive Architectures, BICA 2013: Papers from the Fourth Annual Meeting of the BICA Society. v. 6, p. 109–125, Out 2013.

SCHEUTZ, Matthias; SCHERMERHORN, Paul; KRAMER, James. The utility of affect expression in natural language interactions in joint human-robot tasks. In: 1ST ACM SIGCHI/SIGART CONFERENCE ON HUMAN-ROBOT INTERACTION, 2006, [S.l.: s.n.], 2006. p. 226–233. . Acesso em: 9 jul 2013.

SELLERS, Michael. **Toward a comprehensive theory of emotion for biological and artificial agents**. Biologically Inspired Cognitive Architectures, v. 4, p. 3–26, Abr 2013.

SHAMSUDDIN, S.; YUSSOF, H.; ISMAIL, L.; HANAPIAH, F. A.; MOHAMED, S.; PIAH, H. A.; ZAHARI, N. I. Initial response of autistic children in human-robot interaction therapy with humanoid robot NAO. In: IEEE 8TH INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON SIGNAL PROCESSING AND ITS APPLICATIONS, CSPA, 2012, [S.l.: s.n.], 2012. p. 188–193. . Acesso em: 6 jan 2013.

SILVA, Bento C. D. **A Face Tecnológica dos Estudos da Linguagem: o processamento automático das línguas naturais**. 1996. 274 f. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 1996.

SIMMONS, R.; LIN, L.-J.; FEDOR, C. Autonomous task control for mobile robots. In: 5TH IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT CONTROL, 1990, [S.l.: s.n.], 1990. p. 663–668 vol.2.

SLOVIC, Paul; FINUCANE, Melissa; PETERS, Ellen; MACGREGOR, Donald G. The Affect Heuristic. GILOVICH, T.; GRIFFIN, D.; KAHNEMAN, D. (Org.). . *Heuristics and biases: The psychology of intuitive judgment*. New York, NY, USA: Cambridge University, 2002. p. 397–420. Disponível em: <http://faculty.psy.ohio-state.edu/peters/lab/pubs/publications/2002_Slovic_etal_Affect_Heuristic.pdf>. Acesso em: 26 jan 2016.

STEINFELD, Edward; MAISEL, Jordana. **Universal Design: Creating Inclusive Environments**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

STORY, Molly Follette; MUELLER, James L.; MACE, Ronald L. **The Universal Design File: Designing for People of All Ages and Abilities. Revised Edition**. . [S.l.]: NC State University, Center for Universal Design, 1998. . Acesso em: 17 jan 2013.

TAKAYAMA, Leila; PANTOFARU, C. Influences on proxemic behaviors in human-robot interaction. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, IROS, 2009, [S.l.: s.n.], 2009. p. 5495–5502.

TANI, Jun. **Model-based learning for mobile robot navigation from the dynamical systems perspective**. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, IEEE Transactions on, v. 26, n. 3, p. 421–436, 1996.

THE NEW YORK TIMES. **A Robotic Dog's Mortality**. The New York Times, 17 Jun 2015. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2015/06/18/technology/robotica-sony-aibo-robotic-dog-mortality.html>>. Acesso em: 6 fev 2016.

THOMEER, Marcus L.; SMITH, Rachael A.; LOPATA, Christopher; VOLKER, Martin A.; LIPINSKI, Alanna M.; RODGERS, Jonathan D.; MCDONALD, Christin A.; LEE, Gloria K. **Randomized Controlled Trial of Mind Reading and In Vivo Rehearsal for High-Functioning Children with ASD**. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, p. 1–13, 3 Fev 2015.

THÓRISSON, Kristinn R.; LIST, Thor; PENNOCK, Christopher; DIPIRRO, John. Whiteboards: Scheduling blackboards for semantic routing of messages & streams. In: AAAI-05 WORKSHOP ON MODULAR CONSTRUCTION OF HUMAN-LIKE INTELLIGENCE, 2005, [S.l.: s.n.], 2005. p. 8–15. . Acesso em: 12 ago 2015.

URIBE, A.; ALVES, S.; ROSARIO, J. M.; FILHO, H. F.; PEREZ-GUTIERREZ, B. Mobile robotic teleoperation using gesture-based human interfaces. In: ROBOTICS SYMPOSIUM, 2011 IEEE IX LATIN AMERICAN AND IEEE COLOMBIAN CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL AND INDUSTRY APPLICATIONS (LARC), 1 Out 2011, [S.l.]: IEEE, 1 Out 2011. p. 1–6.

URIBE-QUEVEDO, Alvaro J. **Desenvolvimento de dispositivo para membro inferior com deficiência parcial**. 2011. 175 f. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, 2011.

VALADÃO, C.; BASTOS, T.F.; BÔRTOLE, M.; PERIM, V.; CELINO, D.; RODOR, F.; GONÇALVES, A.; FERASOLI, H. Educational Robotics as a Learning Aid for Disabled Children. In: BIOSIGNALS AND BIOROBOTICS CONFERENCE (BRC), 2011 ISSNIP, 2011, [S.l: s.n.], 2011. p. 1–6.

VERSCHURE, Paul F. M. J. **Distributed Adaptive Control: A theory of the Mind, Brain, Body Nexus**. Biologically Inspired Cognitive Architectures, v. 1, p. 55–72, Jul 2012.

VERSCHURE, Paul F. M. J.; KRÖSE, Ben J. A.; PFEIFER, Rolf. **Distributed adaptive control: The self-organization of structured behavior**. Robotics and Autonomous Systems, v. 9, n. 3, p. 181–196, 1 Jan 1992.

VERUGGIO, G. The EURON Roboethics Roadmap. In: 2006 6TH IEEE-RAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID ROBOTS, Dez 2006, [S.l: s.n.], Dez 2006. p. 612–617.

VIOLA, Paul; JONES, Michael. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In: IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, CVPR, 2001, [S.l: s.n.], 2001. p. I-511–I-518. . Acesso em: 25 jul 2013.

WERRY, Iain; DAUTENHAHN, Kerstin. Applying mobile robot technology to the rehabilitation of autistic children. In: 7TH SYMP ON INTELLIGENT ROBOTIC SYSTEMS, 1999, [S.l: s.n.], 1999. p. 265–272. . Acesso em: 15 ago 2015.

WINFIELD, Alan F. T. **Ethical robotics: Some technical and ethical challenges**. . Falmer/Brighton, UK: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=McZQWFP3AoY>>. Acesso em: 14 ago 2015. , 24 Out 2013

WÖLLMER, M.; WENINGER, F.; STEIDL, S.; BATLINER, A.; SCHULLER, B. **Speech-based non-prototypical affect recognition for child-robot interaction in reverberated environments**. Proc. of Interspeech, Florence, Italy, p. 3113–3116, 2011.

YAMAMOTO, Y.; SATO, M.; HIRAKI, K.; YAMASAKI, N.; ANZAI, Y. A request of the robot: an experiment with the human-robot interactive system HuRIS. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ROBOT AND HUMAN COMMUNICATION, Set 1992, [S.l: s.n.], Set 1992. p. 204–209.

APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES

Artigos publicados em periódicos

1. URIBE-QUEVEDO, A. J. ; ALVES, S. F. R. . **Rastreamento de rosto como ferramenta interativa e de monitoramento do estado emocional do usuário**. Revista Científica General José María Córdova, v. 13, p. 245-255, 2015.

Artigos aceitos para publicação

1. ALVES, S.; SILVA, I. N.; RANIERI, C. M., FERASOLI-FILHO, H. **Intelligent Control Architecture for Assistive Mobile Robots**. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. p. 1-12. 2016.

Livros organizados

1. BASTOS FILHO, T. F. (Org.) ; ALVES, SILAS (Org.) . **Proceedings of the International Workshop on Assistive Technology**. 1. ed. Vitória, Espírito Santo: UFES, 2015. 388p.

Artigos publicados em eventos

1. ALVES, S.; SILVA, I. N.; RANIERI, C. M., FERASOLI-FILHO, H.; CALDEIRA, M.; PEGORARO, R. **A friendly mobile entertainment robot for disabled children**. ISSNIP Biosignals and Biorobotics Conference (BRC), 2013, Rio de Janeiro. p. 1-5.
2. RANIERI, C. M.; ALVES, S. F. R. ; FERASOLI FILHO, H. ; CALDEIRA, M. A. C. ; PEGORARO, R. . **Um Ambiente para Interação entre Robôs Móveis e Crianças com Deficiências Motoras Severas**. V Jornada AITADIS de Tecnologias de Apoio a Pessoas com Deficiência, 2012, Vitória, ES. p. 25-30.
3. ALVES, S. F. R. ; ROSÁRIO, J. M. ; FERASOLI FILHO, H. ; SILVA, I. N. . **TAO - A Software Platform for Autonomous Mobile Robots**. Proceedings of the 12th International Conference on Control, Automation and Systems, 2012. p. 964-969.

4. ALVES, S. F. R., ROSÁRIO, J. M., FERASOLI FILHO, H., SILVA, I. N. **TAO - Uma Plataforma de Software para Robôs Móveis Autônomos**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande.
5. URIBE, Alvaro ; PÉREZ-GUTIÉRREZ, Byron ; ALVES, S. F. R. . **Video Game Interfaces for Interactive Lower and Upper Member Therapy**. In: Medicine Meets Virtual Reality 20, 2013, San Diego, California, USA. Medicine Meets Virtual Reality 20, 2013. p. 465-467.
6. RANIERI, C. M. ; ALVES, Silas ; FERASOLI FILHO, Humberto ; SILVA, Ivan N. . **Inclusive Robotic Environment for Teaching**. In: IV Workshop of Robotics in Education (WRE), 2013, Arequipa. Proceedings of the IV Workshop of Robotics in Education (WRE), 2013.
7. RANIERI, C. M. ; ALVES, Silas; FERASOLI FILHO, Humberto. **Interface Humano-Robô e Arquitetura de Controle para Robôs Móveis controlados por Smartphones**. In: Workshop of Graduate and Undergraduate Works on Robotics (WUWR) 2013, 2013, Arequipa. Proceedings of the Workshop of Graduate and Undergraduate Works on Robotics (WUWR) 2013, 2013.
8. ALVES, Silas ; RANIERI, C. M. ; SILVA, I. N. ; FERASOLI FILHO, Humberto . **Assisted Robot Navigation based on Speech Recognition and Synthesis**. In: 5th IEEE Biosignals and Biorobotics conference (ISSNIP), 2014, Salvador, Bahia. Proceedings of the 5th IEEE Biosignals and Biorobotics conference (ISSNIP), 2014.
9. ALVES, Silas ; URIBE, Alvaro ; SILVA, Ivan N. ; FERASOLI FILHO, Humberto. **Pomodoro, a Mobile Robot Platform for Hand Motion Exercising**. In: 5th IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2014), 2014, São Paulo, SP. Proceedings of the 5th IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2014), 2014.
10. RANIERI, C. M. ; ALVES, Silas ; SILVA, Ivan N. ; FERASOLI FILHO, Humberto. **Navegação Assistida de Robôs Baseada em Reconhecimento e Síntese de Fala**. In: 20º Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2014, Belo Horizonte, MG. Anais do 20º Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 2014.
11. ALVES, Silas ; SILVA, Ivan. N. ; FERASOLI FILHO, Humberto . **Intelligent Control Architecture for Human-Robot Interaction**. In: ROBOCONTROL 2014 - 6th Workshop on Applied Robotics and Automation, 2014, São Carlos, SP. Proceedings of ROBOCONTROL 2014 - 6th Workshop on Applied Robotics and Automation, 2014.

12. ALVES, SILAS ; SILVA, I. N. ; FERASOLI FILHO, H. ; BASTOS FILHO, T. F. . **Intelligent Control Architecture for Assistive Mobile Robots**. In: International Workshop on Assistive Technology, 2015, Vitória, Espírito Santo. Proceedings of the 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, 2015. p. 173-176.
13. ALVES, SILAS ; SIME, M. M. ; BASTOS FILHO, T. F. . **Proposta de Sistema de Informação para Controle de Ambientes Inteligentes por Sinais Biomédicos**. In: 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, Vitória, Espírito Santo. Proceedings of the 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, 2015. p. 199-202.
14. ALVES, SILAS ; APPEL, V. C. R. ; BASTOS FILHO, T. F. ; CAURIN, G. A. P. ; SILVA, I. N. ; FERASOLI FILHO, H. . **Multimodal Method for Detecting Emotion of Autistic Children**. In: 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, Vitória, Espírito Santo. Proceedings of the 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, 2015. p. 192-194.
15. COTRINA-ATENCIO, A. ; BENEVIDES, A. B. ; ALVES, SILAS ; GARCIA, J. F. C. ; FERREIRA, A. ; BASTOS FILHO, T. F. . **Towards a BCI-Speller Based on Binary Selection**. In: 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, Vitória, Espírito Santo. Proceedings of the 1st International Workshop on Assistive Technology, 2015, 2015. p. 221-224.
16. ALVES, SILAS ; SILVA, I. N. ; URIBE-QUEVEDO, A. J. ; FERASOLI FILHO, H. . **Learning Escape Routes with Mobile Robots**. In: International Workshop on Serious Gaming = Serious Business, 2015, Hamamatsu, Shizuoka. Proceedings of the International Workshop on Serious Games = Serious Bussiness, 2015.
17. SOUZA, A. M. ; ALVES, SILAS ; LISBOA, C. O. ; PEGORARO, R. . **Educating Recycling with Robotics**. In: International Workshop on Serious Gaming = Serious Business, 2015, Hamamatsu, Japão. Proceedings of the International Workshop on Serious Games = Serious Bussiness, 2015.
18. ALVES, SILAS F.R. ; SILVA, I. N. ; FERASOLI FILHO, H. . **Intelligent Control Architecture for Human-Robot Interaction**. In: 2014 Joint Conference on Robotics: SBRLARS Robotics Symposium and Robocontrol (SBR LARS Robocontrol), 2014, Sao Carlos. 2014 Joint Conference on Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol. p. 259.

Repercussões na mídia

1. FERASOLI FILHO, H., ALVES, S. F. R., RANIERI, C. M. **Unesp Ciência - Robótica**, 2013. (Entrevista, TV). Disponível em: <http://www.tv.unesp.br/noticia/2016>
2. LOPES, REINALDO JOSÉ. **Mascote eletrônico**. Revista Unesp Ciência, março de 2013 – Ano 4 – nº 39. Disponível em: http://www.unesp.br/aci_ses/revista_unespciencia/acervo/39/como-se-faz
3. LOPES, REINALDO JOSÉ. **Brinquedos que Pensam**. Revista Inovação!Brasileiros, junho/julho de 2013 – nº 9. Disponível em: <http://www.revistabrasileiros.com.br/inovacao-edicao-9/>

APÊNDICE B – VÍDEOS

Laboratório: Experimento 1

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=gOrJPEIQsU0>>

Laboratório: Experimento 2

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=K55e1U-Yva4>>

Teste Piloto: DT1

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=JJRAL19HiAQ>>

Teste Piloto: DT2 (1 de 2)

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Zhzj5PXjEp0>>

Teste Piloto: DT2 (2 de 2)

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-amq99mh-Qg>>

Teste Piloto: DT3

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=mFiEv3NuT3w>>

Teste Piloto: DT4 (1 de 2)

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=dSNNLldYrSk>>

Teste Piloto: DT4 (2 de 2)

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=J0vZfkuTrVM>>

Teste Piloto: DT5

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=i9TsC98psk8>>

Teste Piloto: TEA1

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tWsNwOsMS0o>>

Teste Piloto: TEA2

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=yguZSOXm-rs>>

Teste Piloto: TEA3

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=LIYyy3Cbw2A>>

Teste Piloto: TEA4

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=mGw12NZlgEA>>

APÊNDICE C – PEÇAS DO ROBÔ POMODORO

B3

APÊNDICE D – DIAGRAMA DE CIRCUITO