UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

Guilherme Baldo Carlos

CONTROLE DE ROBÔ SOCIAL BASEADO EM PROXÊMICA PARA INTERAÇÃO COM CRIANÇAS COM TRANSTORNO DO ESPECTRO AUTISTA

Vitória-ES

Dezembro/2018

Guilherme Baldo Carlos

CONTROLE DE ROBÔ SOCIAL BASEADO EM PROXÊMICA PARA INTERAÇÃO COM CRIANÇAS COM TRANSTORNO DO ESPECTRO AUTISTA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Guilherme Baldo Carlos, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

Dezembro/2018

Guilherme Baldo Carlos

CONTROLE DE ROBÔ SOCIAL BASEADO EM PROXÊMICA PARA INTERAÇÃO COM CRIANÇAS COM TRANSTORNO DO ESPECTRO AUTISTA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Guilherme Baldo Carlos, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 10, de Dezembro de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Teodiano Bastos Filho
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Dr. Carlos Torturella Valadão
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. André Ferreira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof.ª Dr.ª Eliete Caldeira
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Vitória-ES

Dezembro/2018

RESUMO

O transtorno do espectro autista (TEA) é uma condição de desenvolvimento neurológico que causa uma dificuldade de compreensão e engajamento em interações sociais e comunicação. Apesar de atualmente este transtorno não ter cura, o uso de terapias comportamentais pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida e o aumento da autonomia das pessoas acometidas por este transtorno. Estudos recentes indicam que a utilização do robôs na terapia de crianças com TEA tem resultados promissores. O Núcleo de Tecnologia Assistiva da UFES vem desenvolvendo um sistema robótico cuja finalidade é o auxílio em terapias com esse tipo de crianças. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um controlador para um robô móvel social, levando em consideração fatores não verbais de comunicação, e o gerenciamento do espaço pessoal (proxêmica).

Palavras-chave: Transtorno do Espectro Autista; Interação Humano-robô; Robótica Socialmente Assistiva; Proxêmica; Robótica Móvel.

ABSTRACT

Autism spectrum disorder (ASD) is a neurobehavioural developmental condition, without known ethiology or cure, that affects around 1% of the world population and affects comprehension, joint activities and, mainly, communication and socialization. Some therapies may be useful for those affected by such condition, which can improve the quality of life and independence of people affected by this disorder. Recent studies that apply robots in autistic children's therapy are presenting promising results. The Assistive Technology Group, from the Federal University of Espirito Santo, is developing a robot as an aid tool to be applied in therapies with these ASD children. This work proposes the development of a mobile robot control considering nonverbal communication factors, such as personal space management and proxemics.

Keywords: Autism Spectrum Disorder; Human Robot Interaction; Socially Assistive Robotics; Proxemics; Mobile Robotics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Abordagens de uma IHR. 14
Figura 2 – Espaços de interação definidos pela proxêmica. 17
Figura 3 – Robô-uniciclo ilustrando as variáveis que definem a sua pose. 18
Figura 4 – Robô de tração diferencial. 19
Figura 5 – Poses de origem e destino ilustradas no plano cartesiano. 21
Figura 6 – Erros lineares e angulares de acordo com a equação 2.5. 22
Figura 7 – Distância d_i medida na direção θ_i tomando o robô como referencial. . . 24
Figura 8 – Distância, d_i, medida na direção θ_i no contexto do referencial mundo. . 25
Figura 9 – Robô N-MARIA desenvolvido no NTA/UFES. 26
Figura 10 – Estrutura do robô N-MARIA. 27
Figura 11 – Pioneer 3-DX. 28
Figura 12 – Sensor de distância a laser RP LIDAR A2. 29
Figura 13 – Área do experimento. 29
Figura 14 – Medição de distância em 360 graus. 30
Figura 15 – Verificação da área do quadrado. 31
Figura 16 – Localização da criança. 32
Figura 17 – Espaços de interação propostos. 32
Figura 18 – Máquina de estados para definir distância de interação. 33
Figura 19 – Variáveis importantes para a lei de controle proposta. 35
Figura 20 – Ação de controle v em função de d e α. 37
Figura 21 – Ação de controle ω em função de d e α. 37
Figura 22 – $\dot{V}(e_d, \alpha)$. 40
Figura 23 – Fluxograma de funcionamento do sistema. 41
Figura 24 – Experimento 1. 43
Figura 25 – Trajetórias percorridas pelo robô. 44
Figura 26 – Erros e_d e α de acordo com destinos. 45
Figura 27 – Experimento 2. 46
Figura 28 – Resultado do experimento 2. 47
Figura 29 – Experimento 3. 48
Figura 30 – Valores de x_k e y_k da pessoa e velocidade (v e ω do robô). 49
Figura 31 – Experimento 4. 51
Figura 32 – Resultado do experimento 4. 52
Figura 33 – Resultado do experimento 5. 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Influência dos fatores nas ações de controle propostas. 36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Programming Interface
ARIA	Advanced Robotics Interface for Applications
ICR	Interação Criança-robô
IHR	Interação Humano-robô
N-MARIA	*New Mobile Autonomous Robot for Interaction with Autistics*
NTA	Núcleo de Tecnologia Assistiva
RA	Robótica Assistiva
RGB	Red, Green, Blue
RSA	Robótica Socialmente Assistiva
RSI	Robótica Socialmente Interativa
SLAM	*Simultaneous Localization and Mapping*
TEA	Transtorno do Espectro Autista
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 Objetivo geral 12
1.2 Objetivos específicos 12

2 EMBASAMENTO TEÓRICO 13
2.1 Interação Humano-Robô 13
2.2 Robótica Socialmente Assistiva 15
2.3 Proxêmica 16
2.4 Robótica móvel 17
2.4.1 Locomoção 19
2.4.2 Navegação 20
2.4.2.1 Prova de estabilidade 22
2.4.3 Localização 23
2.4.4 Percepção 24

3 METODOLOGIA 26
3.1 N-MARIA 26
3.2 Robô móvel 28
3.3 Sensor de distância 28
3.4 Área do experimento 29
3.5 Localização da criança 30
3.6 Distância de interação 32
3.7 Lei de controle proposta 33
3.7.1 Análise de estabilidade 39
3.8 Fluxograma 40

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS 42
4.1 Experimento 1 - Simulação 42
4.1.1 Resultados 43
4.2 Experimento 2 - Regra de segurança 45
4.2.1 Resultados 46
4.3 Experimento 3 - Área de interação 47
4.3.1 Resultados 48
4.4 Experimento 4 - Distâncias de interação 50
4.4.1 Resultado 51
4.5 Experimento 5 - Interação completa 52

4.5.1 Resultados 53

5 CONCLUSÃO 55
5.1 Trabalhos futuros 56

Bibliografia 57

1 INTRODUÇÃO

O transtorno do espectro autista (TEA) refere-se a uma condição de desenvolvimento neurológico que é caracterizada por uma dificuldade persistente em se engajar em comunicação e interação social. Dentre os sintomas apresentados, podem-se destacar, no campo social (AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION et al., 2013):

- Reciprocidade socio-emocional deficitária.
- Dificuldade em demonstrar e entender fatores não verbais em uma comunicação social.
- Dificuldade em desenvolver, manter e entender relacionamentos.

Além disso, existem outros sintomas que podem se manifestar, que incluem (AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION et al., 2013):

- Movimentos estereotipados e repetitivos.
- Aderência inflexível a rotinas e padrões verbais e não verbais de comportamento.
- Interesses muito restritos e intensos.
- Uma hiper ou hipossensibilidade a fatores sensoriais do ambiente como, por exemplo, temperatura, luz e toque.

Estudos atuais indicam que as causas do TEA são diversas. Dentre estas, pode-se citar fatores genéticos, aspectos socioambientais e fatores imunológicos. Porém, ainda é difícil afirmar com precisão, o peso que cada fator exerce na incidência deste transtorno (RATAJCZAK, 2011; BENVENUTO et al., 2009).

O TEA é um transtorno dito ser “incurável”, embora não seja uma doença. No entanto, procedimentos terapêuticos podem proporcionar uma melhoria de qualidade de vida e um aumento da autonomia de pessoas que sofrem com este transtorno. As terapias, de cunho comportamental, de crianças com este transtorno devem ser iniciadas logo após o diagnóstico, dentro dos primeiros anos de vida. (BUTTER; WYNN; MULICK, 2003; ROGERS et al., 2014). Estas terapias estimulam a interação da criança com outras pessoas por meio de jogos e brinquedos, visando o desenvolvimento de habilidades sociais de interação e comunicação.

A partir de resultados positivos alcançados com este tipo de terapia em crianças com TEA, novos estudos vêm sendo realizados para avaliar a utilização de robôs como ferramentas neste tipo de tratamento (KIM et al., 2013; SCASSELLATI; ADMONI; M. MATARIĆ, 2012; DIEHL et al., 2012). Dentre os trabalhos sendo realizados, pode-se destacar o uso de robôs antropomórficos como o KASPAR e o NAO, robôs não antropomórficos, mas miméticos, como o PLEO e o Keepon, além de robôs não miméticos como o Roball (CABIBIHAN et al., 2013).

Este tipo de interação criança-robô (ICR), pode ser classificada como socialmente assistiva, tendo uma grande importância social e visando melhorar a qualidade de vida de crianças com algum tipo de deficiência a partir do uso de robôs sociais.

Quanto a justificativa deste projeto, diversos estudos conduzidos com o intuito de testar a efetividade do uso de robôs como ferramenta de auxílio em terapia para crianças com TEA apontam resultados promissores (KIM et al., 2013; SCASSELLATI, 2007; RICKS; COLTON, 2010; DIEHL et al., 2012; VALADÃO et al., 2016), uma vez que indicam um aumento no nível de engajamento e atenção, além da observância de novos comportamentos sociais como atenção compartilhada e imitação, os quais são comumente comprometidos em uma criança com TEA.

Estes resultados podem ser atribuídos ao fato do robô prover novos estímulos a crianças, ou a figura do robô ocupar no imaginário da criança uma posição de destaque entre seres inanimados e seres animados, sendo que os seres inanimados não possuem comportamento social e, portanto, não causam confusão e estresse nas crianças. Já os seres animados, por sua vez, produzem comportamentos sociais e podem causar confusão e estresse nessas crianças (SCASSELLATI; ADMONI; M. MATARIĆ, 2012). Outros autores apontam que os robôs se comportam geralmente de forma mais previsível e simples, tornando-os mais fáceis de compreender que os humanos (DUQUETTE; MICHAUD; MERCIER, 2008; ROBINS et al., 2010).

Tendo em vista os resultados positivos obtidos pelos estudos citados, o NTA desenvolve o projeto N-MARIA (VALADÃO et al., 2016), o qual é realizado desde 2013 e tem como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma robótica socialmente assistiva com a função de servir de ferramenta de auxílio ao terapeuta durante sessões com crianças com TEA. Isto é feito por meio de uma ICR que estimula comportamentos sociais. Este projeto já alcançou resultados positivos, mostrando que o uso do robô conseguiu, de fato, estimular comportamentos sociais em 4 de cada 5 crianças submetidas aos testes (VALADÃO et al., 2016).

Neste contexto, o objetivo de melhorar os algoritmos de controle do sistema, de forma a torná-lo mais automático e capaz de responder efetivamente à interação com a criança, motivam a realização do presente trabalho, visto que a autonomia do robô é uma característica importante neste tipo de aplicação de ICR (SCASSELLATI; ADMONI; M. MATARIĆ, 2012; CABIBIHAN et al., 2013).

Desta forma, defini-se os objetivos do presente projeto de graduação.

1.1 Objetivo geral

Desenvolvimento e implementação de uma lei de controle para o robô N-MARIA, de forma a integrá-la ao sistema de controle atualmente existente no robô. Esta lei de controle será implementada levando em consideração variáveis proxêmicas[1], de forma a aumentar a efetividade da ICR, e terá por objetivo aumentar o grau de autonomia e flexibilidade do robô socialmente assistivo, além de adicionar reciprocidade na interação.

1.2 Objetivos específicos

- Estudar o atual modelo do robô;
- Entender as variáveis proxêmicas envolvidas na interação;
- Implementar regras de segurança para o controle;
- Adaptar o controle de posicionamento clássico para melhor se adequar à aplicação em questão.

[1] A proxêmica é o estudo do espaço pessoal que as pessoas mantêm a sua volta. O espaço pessoal na visão da proxêmica é um meio de comunicação não-verbal (HALL, 1966).

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho, os quais incluem a interação criança-robô, robótica socialmente assistiva, proxêmica e, por fim, conceitos de robótica móvel e controle de posicionamento.

2.1 Interação Humano-Robô

Interação humano-robô (IHR) é definida como o campo de pesquisa responsável pelo entendimento, projeto e avaliação de sistemas robóticos utilizados por humanos ou em conjunto com humanos (GOODRICH; SCHULTZ, 2007). Esta é uma área interdisciplinar, envolvendo diversos campos do conhecimento como: Robótica, Engenharia, Informática, Psicologia, Linguística, Ciência Cognitiva, Etologia, dentre outras (DAUTENHAHN, 2007). Esta pluralidade ocorre, pois, diferentemente da engenharia e robótica tradicionais, há, neste caso, a presença da dimensão humana na interação. Assim, fatores sociais como a comunicação verbal e não verbal entre os robôs e os seres humanos se tornam importantes (DAUTENHAHN, 2013).

A IHR pode ser categorizada em três abordagens não mutuamente exclusivas (DAUTENHAHN, 2007):

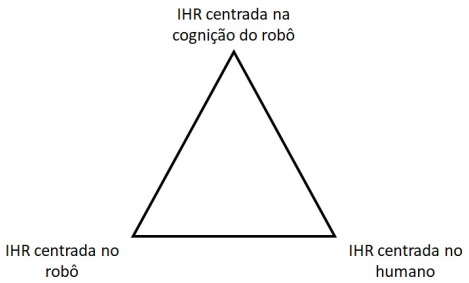
1. A IHR centrada no robô, que trata o robô como uma entidade autônoma que age de acordo com seus próprios objetivos. Neste tipo de interação, o humano atua de forma a satisfazer as necessidades do robô que foram estabelecidas na estrutura de controle interna do mesmo.

2. A IHR centrada no humano, a qual se preocupa com que o robô cumpra sua tarefa de uma forma socialmente aceitável e confortável. Também é importante nesta categoria de IHR como as pessoas reagem ao comportamento e aparência do robô.

3. A IHR centrada na cognição do robô, que enfatiza o robô como entidade inteligente. Assim, o robô deve tomar decisões e resolver problemas. Campos de pesquisa nesta categoria envolvem *machine learning* e o desenvolvimento de arquiteturas cognitivas de controle robótico.

Sendo as categorias não mutuamente exclusivas, a IHR pode ser posicionada no triângulo da Figura 1.

Figura 1 – Abordagens de uma IHR.



Fonte: Adaptado de Dautenhahn, 2007.

Por sua vez, os robôs sociais (robôs que têm por função se engajar na IHR) podem ser classificados nas seguintes categorias (DAUTENHAHN, 2007):

- Socialmente evocativo. São robôs que se baseiam na tendência humana de antropomorfizar e evocar sentimentos nos humanos.
- Socialmente situado. São robôs que estão situados em um ambiente social e devem ser capazes de entender e reagir ao ambiente, diferenciando agentes sociais de outros objetos.
- Sociável. São robôs que ativamente participam de interações sociais de forma a satisfazer seus objetivos estabelecidos pela arquitetura de controle.
- Socialmente inteligente. São robôs que mostram uma inteligência social que imita a humana. São baseados em modelos complexos cognitivos de competência social.
- Socialmente interativo. São robôs cuja interação entre os mesmos e os humanos é parte central de sua tarefa.

Taxonomicamente, a IHR pode ser classificada em diversas dimensões, como o tipo e importância da tarefa, a morfologia do robô, a composição dos mesmos (se trabalharem como um time utilizando diversos dispositivos robóticos), o nível de compartilhamento da tarefa por parte dos robôs, o papel deles na interação, a proximidade estabelecida entre os mesmos e os humanos, o nível de autonomia, dentre outras (YANCO; DRURY, 2004).

Desta forma, o objetivo principal de uma IHR é o desenvolvimento de sistemas robóticos cuja interação com os seres humanos seja eficiente e ocorra de forma socialmente aceitável e segura (DAUTENHAHN, 2013). Assim, por exemplo, uma tarefa como a navegação robótica se torna mais complexa, pois ela passa a exigir que o sistema compreenda o

"mundo humano", ou seja, é preciso que o modelo do ambiente social seja inserido na arquitetura de controle do robô.

Aplicações que envolvem a navegação de robôs nas proximidades de seres humanos exigem a incorporação de fatores sociais tanto na concepção do robô quanto no algoritmo de controle do mesmo. Portanto, o robô precisa compreender as chamadas *social cues* (pistas sociais) que incluem mensagens verbais e não verbais, expressões faciais, postura corporal, proximidade e atividade neuromuscular e fisiológica para que possa se comportar da maneira adequada (RIOS-MARTINEZ; SPALANZANI; LAUGIER, 2015). Vale ressaltar que quando a IHR ocorre especificamente com crianças, essa interação se denomina ICR (interaçao criança-robô).

2.2 Robótica Socialmente Assistiva

Dentre as diversas aplicações da robótica no campo da ICR, destaca-se as em três categorias (FEIL-SEIFER; MATARIC, 2005):

- Robótica assistiva (RA). Esta categoria lida com robôs que ajudam ou prestam suporte a algum usuário humano. Dentre estes robôs, podem ser citados robôs de reabilitação, cadeiras de rodas robóticas, outros robôs que auxiliam pessoas com mobilidade reduzida e até mesmo robôs educacionais.
- Robótica socialmente interativa (RSI). Esta classificação surgiu inicialmente para separar os robôs de teleoperação dos interativos no campo da IHR. Os robôs socialmente interativos são aqueles que interagem com humanos por meio de interações sociais como fala, gestos, etc.
- Robótica socialmente assistiva (RSA). A robótica socialmente assistiva é a intersecção entre a RA e RSI. Isto porque a RSA partilha do objetivo da RA de ajudar ou prestar suporte a seres humanos, enquanto usa os mesmos meios que a RSI que é a interação social.

Com relação às aplicações que vêm sendo pesquisadas para a RSA, podem-se citar: robôs tutores para estudantes, robôs que auxiliam em fisioterapia, robôs assistentes que auxiliam em tarefas diárias, robôs de companhia para idosos, e robôs de auxílio em terapias para crianças com TEA.

2.3 Proxêmica

Tendo em vista que a navegação robótica é parte fundamental da ICR proposta, devemos levar em consideração fatores proxêmicos na arquitetura de controle do robô para que a ICR seja efetiva, do ponto de vista de ser socialmente aceita e também segura.

A proxêmica é o estudo do espaço pessoal que as pessoas mantêm à sua volta (HALL, 1966), sendo fruto de uma comunicação não verbal que mantemos quando interagimos com outros seres. Desta maneira, a proxêmica pode ser vista como o estudo da comunicação não verbal através do espaço (HALL, 1963).

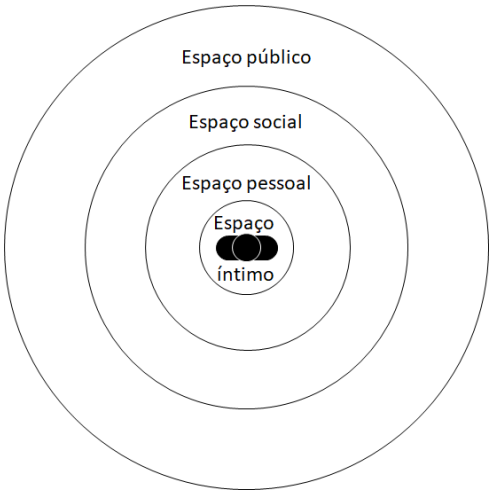
Existem três áreas fundamentais em que a proxêmica é dividida, que são proximidade, ambiente, e modos de comportamento e percepção (HALL, 1966). Do ponto de vista de proximidade, a proxêmica divide o espaço de interação pessoal em quatro categorias, como mostrado na Figura 2:

- Espaço íntimo (0-45cm): essa região é destinada principalmente para comunicação não verbal. Apenas membros da família e amigos íntimos podem entrar nesta área, sendo muitas vezes considerada imprópria para espaços públicos.
- Espaço pessoal (45-90cm): essa região é comumente conhecida como bolha, sendo destinada para interação com pessoas bem conhecidas.
- Espaço social (90cm-3,3m): essa região é destinada a interações gerais com pessoas não necessariamente próximas.
- Espaço público (3,3-7m): as interações que ocorrem nesta região normalmente têm caráter mais formal. As pessoas utilizam tom de voz mais alto e falam mais devagar para assegurar uma clareza maior no discurso.

É importante ressaltar que estas distâncias não são intervalos rígidos, e que existe uma série de fatores que influenciam nas distâncias estimadas, tais como, fatores sociais, pessoais e culturais, dentre outros (HALL, 1966).

Este conceito de distâncias de interação e proxêmica vem sendo amplamente estudado na robótica social (RIOS-MARTINEZ; SPALANZANI; LAUGIER, 2015; TAKAYAMA; PANTOFARU, 2009; MUMM; MUTLU, 2011; BARNAUD et al., 2014). Dentro da RSA, e em particular na interação com crianças com TEA, a proxêmica vem sendo utilizada para possibilitar uma interação efetiva de forma a modelar melhor o comportamento humano e

Figura 2 – Espaços de interação definidos pela proxêmica.



Fonte: Adaptado de Hall, 1963.

também para posicionar o robô de forma que os sensores possam adquirir informações proxêmicas da criança de forma mais eficiente (MEAD; M. J. MATARIĆ, 2017).

Outra utilidade da proxêmica em uma ICR é a classificação do comportamento da criança como positivo ou negativo em relação à interação com o robô, de forma que o mesmo possa agir de forma recíproca à atitude da criança (FEIL-SEIFER; M. J. MATARIĆ, 2011). Além disso, uma análise baseada na proxêmica pode ser utilizada como indicativo ou fator de avaliação da ICR (FEIL-SEIFER; M. MATARIĆ, 2010).

2.4 Robótica móvel

A robótica móvel é o ramo da robótica que lida com o controle de veículos autônomos ou semi-autônomos. O que diferencia a robótica móvel de outras áreas de pesquisa da robótica, como a robótica industrial (manipuladores), é o fato da robótica móvel lidar com espaços de escalas muito maiores que o robô em si (DUDEK; JENKIN, 2010). Desta forma, um robô móvel é um robô cuja base pode se locomover com certa liberdade por um espaço consideravelmente grande, enquanto um robô industrial possui base fixa.

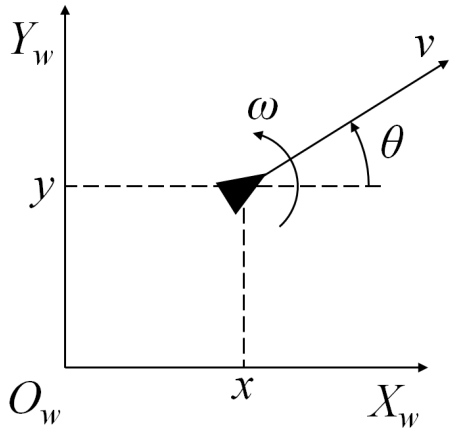
A partir desta descrição, podemos definir o conceito de pose, postura, estado ou configuração. Este conceito diz respeito a todas as variáveis que definem a configuração do robô em certo ambiente. Assim, a pose de um robô pode ser definida por $(x,\ y,\ \theta)$, sendo x e y as posições cartesianas do robô em relação a um referencial do mundo $<O_W,\ X_W,\ Y_W>$, e θ sua orientação definida pelo ângulo entre a frente do robô e o eixo X_W. A pose do robô varia temporalmente de acordo com a velocidade linear v e angular ω definida pelas ações

de controle, sendo que, esta variação obedece ao seguinte modelo cinemático (Equação 2.1):

$$\begin{cases} \dot{x} = vcos(\theta) \\ \dot{y} = vsin(\theta) \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \tag{2.1}$$

Assim, define-se o robô uniciclo (Figura 3) como uma abstração do robô móvel real, de acordo com sua pose (x, y, θ) e velocidades v e ω.

Figura 3 – Robô-uniciclo ilustrando as variáveis que definem a sua pose.



Fonte: Produção do próprio autor.

Desta forma, surgem três problemas fundamentais da robótica móvel, sendo eles (DUDEK; JENKIN, 2010):

- O problema da navegação ou *path planning*: é possível para o robô se mover de uma pose para outra no ambiente, de forma a não colidir com obstáculos? Se sim, como o robô deve realizar esta tarefa?
- O problema da localização: como um robô pode determinar sua pose em determinado ambiente? O completo conhecimento do ambiente é inútil se não pudermos saber como o robô se configura neste ambiente.
- O problema da percepção: como o robô é capaz de perceber quais partes do ambiente estão ocupadas (obstáculos) ou como é capaz de extrair informações do ambiente?

É possível notar que os três problemas, apesar de bem definidos, estão entrelaçados. Para o efetivo desenvolvimento de um sistema robótico móvel, é necessária a resolução desses três problemas (DUDEK; JENKIN, 2010).

2.4.1 Locomoção

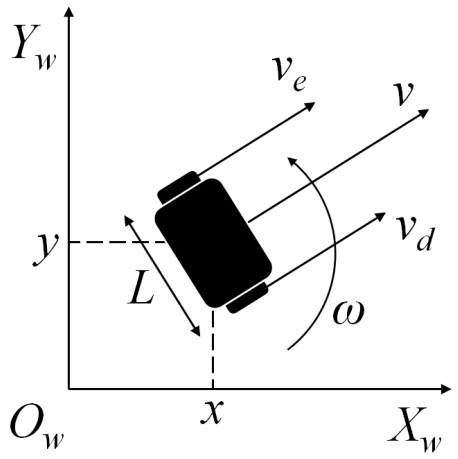
Para que se possam definir ações de controle para um robô móvel, é necessário responder duas perguntas básicas sobre como o robô se move no ambiente (DUDEK; JENKIN, 2010):

- Dadas ações de controle determinadas, como o robô vai se mover?
- Dado um movimento desejado, quais entradas de controle devem ser escolhidas?

As respostas a estas perguntas estão intimamente ligadas ao meio de locomoção e à construção do robô, ou seja, temos equações de locomoção diferentes para robôs aquáticos, terrestres e aéreos. Dentro da categoria dos robôs terrestres, ainda existem subdivisões que acarretam em equações diferentes para os robôs que utilizam patas e aqueles que utilizam rodas, e dentro de cada categoria temos diferentes variações.

O robô a ser utilizado neste projeto de graduação é classificado como um robô terrestre que faz uso de rodas para se locomover. Além disso, é um robô de tração diferencial, ou seja, utiliza duas rodas movidas por motores independentes para se movimentar (Figura 4).

Figura 4 – Robô de tração diferencial.



Fonte: Produção do próprio autor.

Podemos relacionar as velocidades linear v e angular ω do robô com as velocidades do motor direito, v_d, e do motor esquerdo, v_e, e L, que é distância entre os eixos, a partir da equação 2.2.

$$\begin{cases} v = \dfrac{v_d + v_e}{2} \\ \omega = \dfrac{v_d - v_e}{L} \end{cases} \tag{2.2}$$

Da mesma forma, se o objetivo for definir quais velocidades v_d e v_e devem ser aplicadas aos motores do robô para que se obtenha as velocidades v e ω, basta aplicar a equação 2.3,

$$\begin{cases} v_d = \dfrac{2v + \omega L}{2} \\ v_e = \dfrac{2v - \omega L}{2} \end{cases} \tag{2.3}$$

O controlador interno do robô consegue, por meio da equação 2.3, calcular quais velocidades devem ser aplicadas em cada roda para que estas gerem a velocidade linear e angular desejadas. Devido a isto, é possível abstrair os cálculos das velocidades das rodas e trabalhar diretamente com as velocidades linear e angular do robô, tal como descrito pelo modelo cinemático (Equação 2.1).

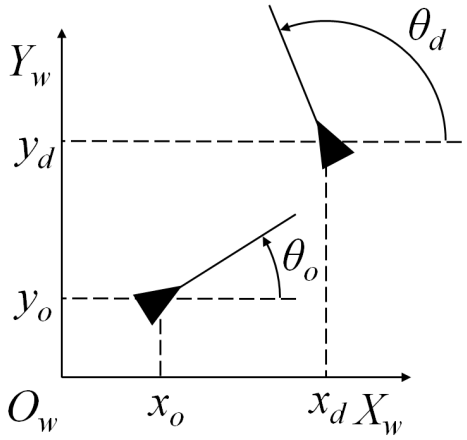
2.4.2 Navegação

A tarefa da navegação ou do planejamento de caminho pode ser ilustrada pela Figura 5. O objetivo é que o robô saia da pose de origem definida por (x_o, y_o, θ_o) e alcance a pose (x_d, y_d, θ_d). Para isso, devem ser definidas as ações de controle v e ω.

Dentre as diversas estratégias para resolver este problema, podem-se citar três abordagens gerais (SIEGWART; NOURBAKHSH; SCARAMUZZA, 2004),

- A elaboração de um roteiro ou *Road map* em que um conjunto de rotas num caminho livre é especificado (pode-se destacar o grafo de visibilidade e o diagrama de Voronoi nesta categoria).
- A decomposição de células em que se divide o espaço em células e identificam-se as células ocupadas e as livres e, a partir da adjacência de células livres, se traça um caminho.

Figura 5 – Poses de origem e destino ilustradas no plano cartesiano.



Fonte: Produção do próprio autor.

- Por fim, existe a estratégia em que se produz uma função matemática que depende da diferença da pose atual do robô e da pose destino, além das distâncias para possíveis obstáculos (campos potenciais é uma estratégia nesta categoria).

Como a estratégia que será utilizada neste trabalho é baseada em funções matemáticas, definem-se abaixo algumas variáveis necessárias para a formulação das ações de controle.

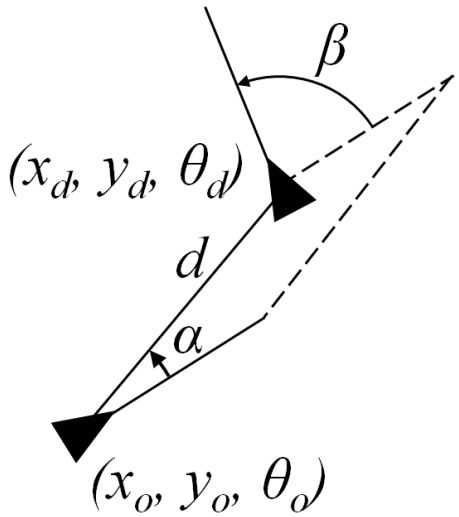
Visto que o objetivo do robô na tarefa de navegação é fazer sua pose atual (x, y, θ) se igualar à pose destino (x_d, y_d, θ_d), podem-se definir as distâncias entre o robô e o destino como erros (Equação 2.4):

$$\begin{cases} e_x = x_d - x \\ e_y = y_d - y \\ e_\theta = \theta_d - \theta \end{cases} \tag{2.4}$$

A partir de manipulações algébricas na Equação 2.4, os erros podem ser definidos como mostrado na Figura 6 e descritos na Equação 2.5:

$$\begin{cases} d = \sqrt[2]{e_x^2 + e_y^2} \\ \alpha = \arctan(\dfrac{e_y}{e_x}) \\ \beta = e_\theta \end{cases} \tag{2.5}$$

Figura 6 – Erros lineares e angulares de acordo com a equação 2.5.



Fonte: Produção do próprio autor.

Assim, o objetivo das ações de controle passa a ser levar os erros para zero, como mostrado na Equação 2.6, sendo t a variável tempo, de tal forma que:

$$\begin{cases} d \to 0 \\ \alpha \to 0 \quad \text{quando} \quad t \to \infty \\ \beta \to 0 \end{cases} \tag{2.6}$$

2.4.2.1 Prova de estabilidade

As ações de controle utilizadas para realização da tarefa de navegação, definidas como formulações de v e ω, devem obedecer a critérios que quando aplicadas ao sistema definido pela Equação 3, produzam um sistema estável, desta forma, garantindo o objetivo definido na Equação 2.6.

Um método geral para verificar a estabilidade de um sistema não linear é o método de Lyapunov (SLOTINE; LI et al., 1991). A filosofia deste método consiste em definir uma função candidata, V (função candidata de Lyapunov), na forma de uma função de energia, e mostrar que esta energia é dissipada com o tempo, fazendo o sistema chegar a um ponto de equilíbrio.

Para isto define-se, por exemplo, a seguinte função candidata de Lyapunov (Equação 2.7):

$$V(d, \alpha, \beta) = \frac{d^2}{2} + \frac{\alpha^2}{2} + \frac{\beta^2}{2} \tag{2.7}$$

A função candidata de Lyapunov precisa ser definida positiva, ou seja, ser positiva para todos valores de argumento diferente de zero, e ser zero apenas quando os valores de argumento forem zero, isto é, na origem (Equação 2.8).

$$\begin{cases} V(d, \alpha, \beta) = 0 & \text{se e somente se} \quad d = 0, \quad \alpha = 0 \quad \text{e} \quad \beta = 0 \\ V(d, \alpha, \beta) > 0 & \text{se e somente se} \quad d \neq 0, \quad \alpha \neq 0 \quad \text{e} \quad \beta \neq 0 \end{cases} \tag{2.8}$$

Continuando a prova de estabilidade, ainda é necessário demonstrar que a derivada primeira da função candidata de Lyapunov no domínio do tempo é negativa para todo argumento não nulo, ou seja, fora da origem (Equação 2.9).

$$\dot{V}(d, \alpha, \beta) < 0 \quad \text{para} \quad d \neq 0, \quad \alpha \neq 0 \quad \text{e} \quad \beta \neq 0 \tag{2.9}$$

Se for possível escolher uma função candidata de Lyapunov que obedeça a Equação 2.8 e a Equação 2.9, então o sistema controlado é considerado assintoticamente estável. O que significa que sua energia irá se dissipar até que o sistema chegue a um ponto de equilíbrio definido pela origem do domínio da função candidata de Lyapunov. No caso ilustrado, irá levar os erros para zero assintoticamente.

2.4.3 Localização

O problema da localização consiste em saber qual a pose do robô em todos instantes quando o mesmo se desloca de (x, y, θ) para ($x + \Delta x$, $y + \Delta y$, $\theta + \Delta\theta$).

Uma abordagem simples para resolver este problema em um robô de tração diferencial é a utilização de sensores internos, comumente *encoders* (codificadores ópticos), para se obter as velocidades de cada roda em cada intervalo Δt. A partir destas medições, aplicam-se os valores de v_d e v_e estimados na Equação 2.2. Uma vez com os valores de v e ω estimados, obtêm-se os valores de Δx, Δy e $\Delta\theta$ a partir da Equação 2.1. Assim, sabendo-se a pose inicial do robô, pode-se estimar a pose do robô em cada instante do movimento.

O problema desta abordagem é que as rodas do robô irão deslizar um pouco toda vez que o robô acelerar ou desacelerar, assim causando erro na estimativa de velocidade obtida pelo *encoder*. Inclusive, é possível demonstrar que este erro se acumula e tende a infinito quando o tempo tende a infinito (DUDEK; JENKIN, 2010).

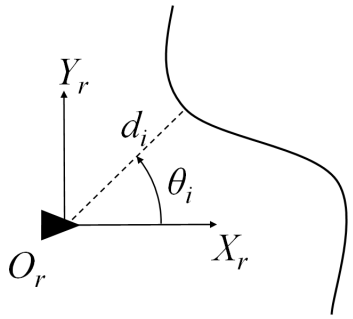
Para resolver esta questão, podem-se utilizar sensores externos como o GPS ou técnicas que combinam a localização e a percepção, como o Mapeamento e Localização simultânea (*SLAM - Simultaneous Localization and Mapping*).

2.4.4 Percepção

O problema da percepção será tratado do ponto de vista da robótica móvel nesta seção, desta forma, considera-se uma abstração um sensor laser que pode medir distâncias em qualquer direção. Também se assume que a pose do robô é conhecida.

Sabendo que as medições do sensor terão o robô como referencial, define-se o referencial do robô $<O_R,\ X_R,\ Y_R>$. A Figura 7 ilustra a medição da distância d_i na direção θ_i.

Figura 7 – Distância d_i medida na direção θ_i tomando o robô como referencial.



Fonte: Produção do próprio autor.

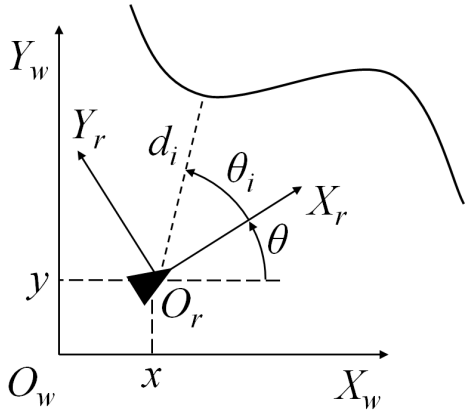
A partir desta medição, calcula-se a posição do obstáculo medido na direção θ_i com o referencial no robô, da seguinte forma (Equação 2.10):

$$\begin{cases} x_i^R = d_i cos(\theta_i) \\ y_i^R = d_i sin(\theta_i) \end{cases} \tag{2.10}$$

Da mesma forma, com relação ao referencial do mundo, tem-se o diagrama mostrado na

Figura 8. Assim, calcula-se a posição do obstáculo em relação ao referencial mundo, como mostrado na Equação 2.11,

Figura 8 – Distância, d_i, medida na direção θ_i no contexto do referencial mundo.



Fonte: Produção do próprio autor.

$$\begin{cases} x_i^W = x + d_i cos(\theta_i + \theta) \\ y_i^W = y + d_i sin(\theta_i + \theta) \end{cases} \tag{2.11}$$

3 METODOLOGIA

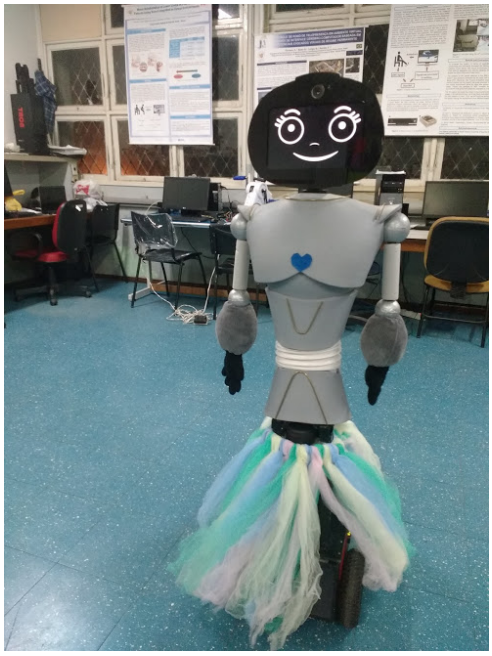
Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados para a execução do trabalho. A primeira seção é dedicada à apresentação do robô N-MARIA desenvolvido no NTA. A segunda seção descreve brevemente o sensor de distância utilizado. A terceira seção, por fim, apresenta a proposta de arquitetura de controle desenvolvida.

3.1 N-MARIA

O robô N-MARIA (Figura 9) é resultado de um projeto de pesquisa que vem sendo desenvolvido pelo NTA desde 2013. Seu nome é um acrônimo para *New Mobile Autonomous Robot for Interaction with Autistcs*. A palavra *New* foi acrescida em 2016 devido a mudanças no projeto e o desenvolvimento da nova versão do robô.

Este robô foi concebido de forma a atender, da melhor forma possível, os requisitos do terapeuta, ou seja, ser uma ferramenta de terapia eficiente e com boa usabilidade para atender às expectativas das crianças com TEA.

Figura 9 – Robô N-MARIA desenvolvido no NTA/UFES.

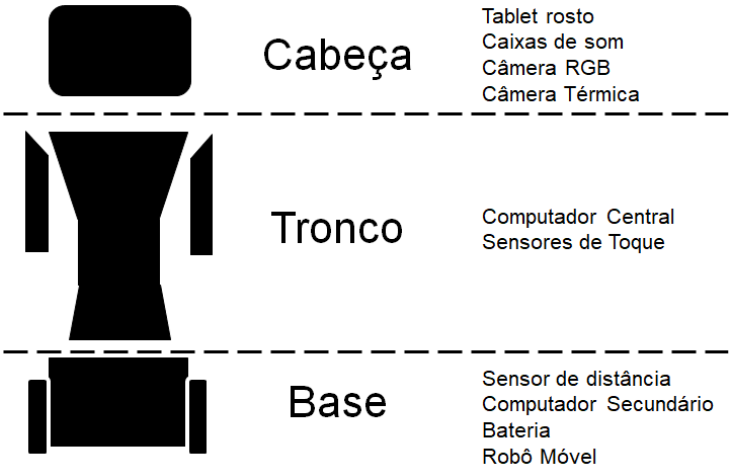


Fonte: Produção do próprio autor.

A estrutura do robô pode ser dividida, como mostrado na Figura 10, em três partes:

- Cabeça: Composta por uma estrutura que suporta um *tablet*, caixas de som, uma

Figura 10 – Estrutura do robô N-MARIA.



Fonte: Produção do próprio autor.

câmera RGB e uma câmera térmica, sendo o *tablet* responsável pela apresentação do rosto do robô que emula emoções. A caixa de som realiza a sintetização da voz do robô, possibilitando assim a comunicação verbal. Já as câmeras RGB e térmica têm a finalidade de capturar imagens que serão utilizadas para identificação das emoções da criança, seja por expressões faciais ou por variações de temperatura, respectivamente.

- Tronco: É a maior estrutura do robô, nele estão localizados o computador central e sensores de toque capacitivo espalhados pela superfície do robô. O computador central é um NUC Intel dedicado à centralização da informação, tomada de decisão de alto nível e comunicação com o banco de dados. Os sensores de toque instalados servem para que o sistema tenha a informação sobre a interação tátil da criança com o robô.

- Base: esta é a parte de interesse deste trabalho, visto que esta parte da estrutura é a responsável pela mobilidade do robô. Nela estão o sensor de distância, o computador secundário, as baterias e o robô móvel propriamente dito. O sensor de distância é um sensor laser omnidirecional capaz de medir distâncias de até 12 metros em 360 graus. O computador secundário, por sua vez, recebe as informações de alto nível do sistema central e do sensor de distância, calcula as ações de controle e controla o robô. As baterias garantem o funcionamento autônomo do robô, ou seja, sem estar conectado à rede elétrica. Por fim, esta parte móvel do robô é, na realidade, um robô de tração diferencial comercial (modelo Pioneer 3-DX) responsável pela locomoção da N-MARIA.

3.2 Robô móvel

O robô móvel utilizado no projeto é o Pionner 3-DX, mostrado na Figura 11, fabricado pela empresa *Adept Mobile Robots*, que possui três rodas sendo duas diferenciais e uma livre. O robô possui *encoders* nas rodas e um computador interno que envia as ações de comando para o acionamento dos motores.

O robô é programado a partir do uso da API ARIA (*Advanced Robotics Interface for Applications*). Escrita em C++, esta API provê acesso ao controlador interno do robô, *encoders* e motores. Assim, a localização do robô no mundo é realizada pelo sistema interno do robô a partir dos dados de odometria, em função das medidas realizadas pelos *encoders*.

Como discutido, a utilização da odometria para localização do robô no ambiente tem uma desvantagem associada ao acúmulo de erros com o tempo. Na aplicação atual, devido aos testes serem de curta duração, este problema não tem grande impacto.

Figura 11 – Pioneer 3-DX.

Fonte: MobileRobots, 2012.

3.3 Sensor de distância

O sensor de distância instalado no robô é o sensor laser RP LIDAR A2 da *Slamtec* (Figura 12). Como mencionado anteriormente, este sensor é capaz de realizar medidas de até 12 metros de distância em 360 graus. As medições são realizadas a 8000 amostras por segundo, com resolução de distância de 0,2 cm e resolução angular de 1 grau. Este sensor é utilizado para localização da criança na área aonde a terapia será realizada.

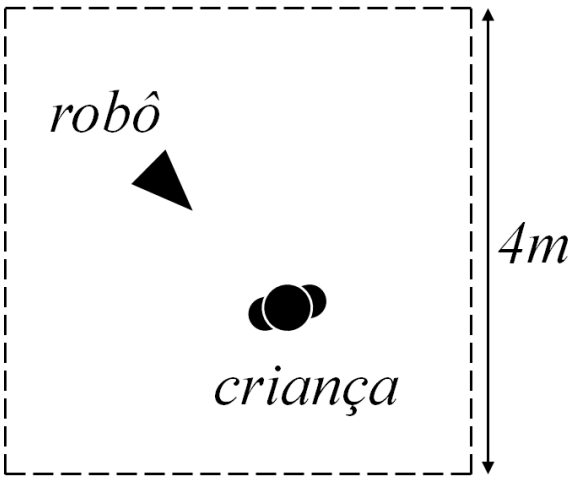
Figura 12 – Sensor de distância a laser RP LIDAR A2.

Fonte: SLAMTEC, 2016.

3.4 Área do experimento

Para realização dos experimentos, definimos uma área correspondente a um quadrado de 4 m de lado. Esta área diz respeito à região em que o robô terá liberdade para se locomover, ou seja, o robô não poderá sair desta área delimitada. Esta medida assegura um ambiente controlado para a execução do controle do robô, ou seja, apenas o robô e a criança estarão dentro desta região. Além disso, esta estratégia assegura que se a criança se sentir desconfortável, ela poderá sair da área de atuação do robô, e o mesmo cessará a interação. A área descrita está mostrada na Figura 13.

Figura 13 – Área do experimento.



Fonte: Produção do próprio autor.

Esta área é definida virtualmente pelo *software* do robô. Assim, o robô deve iniciar a execução de seus movimentos no centro da área para que, por meio do seu algoritmo de odometria, ele possa se localizar dentro desta área, utilizando seus *encoders*, e possa identificar se a leitura do sensor de distância está ou não dentro da área de interação.

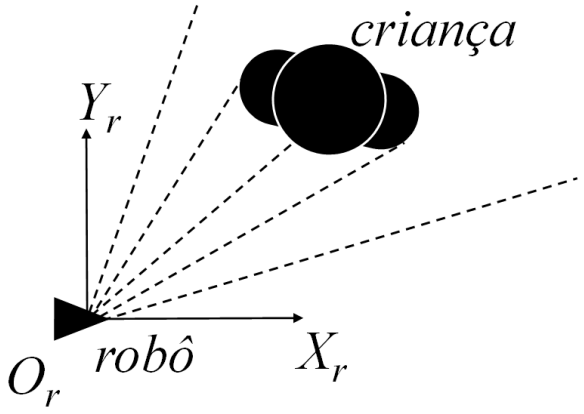
Outra medida de segurança é a de travamento dos motores se o robô estiver muito próximo da criança. Esta medida evitará qualquer tipo de colisão que possa ocorrer, sendo implicitamente considerada na lei de controle, como será mostrado mais a frente no trabalho.

3.5 Localização da criança

Sabendo que dentro da área do experimento, definida anteriormente, só existirão o robô e a criança, é possível definir um algoritmo simples para utilizar a informação do sensor de distância para localizá-la.

O algoritmo consiste em três etapas, sendo a primeira a aquisição da medição das distâncias em todas as direções e armazenamento das medidas em um vetor de 360 posições (1 posição para cada medição) (Figura 14).

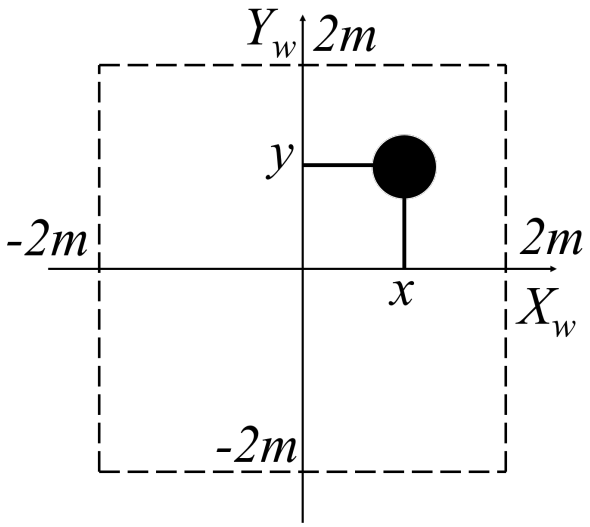
Figura 14 – Medição de distância em 360 graus.



Fonte: Produção do próprio autor.

A segunda etapa é eliminar os valores de leitura do sensor correspondentes a pontos fora da área de interação. Isto é realizado a partir da verificação das inequações, $|x^W| < 2m$ e $|y^W| < 2m$ (Figura 15). Se ambas inequações forem verdadeiras, o ponto se encontra dentro da área de interação, caso contrário, o ponto está fora da área de interação.

Figura 15 – Verificação da área do quadrado.



Fonte: Produção do próprio autor.

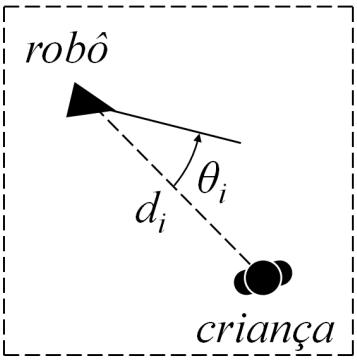
Para obter os valores de x^W e y^W associados a cada leitura do sensor, utiliza-se a Equação 3.1.

$$\begin{cases} x^W = x_{robô} + d_n cos(\theta_n + \theta_{robô}) \\ y^W = y_{robô} + d_n sin(\theta_n + \theta_{robô}) \end{cases} \tag{3.1}$$

Sendo d_n a leitura do sensor em uma direção θ_n.

A terceira etapa consiste em procurar o menor valor de distância do conjunto de pontos dentro da área de interação obtidos pelo sensor. Assim, considerando que a menor distância está na posição i, a criança estará localizada a uma distância d_i na direção θ_i, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Localização da criança.



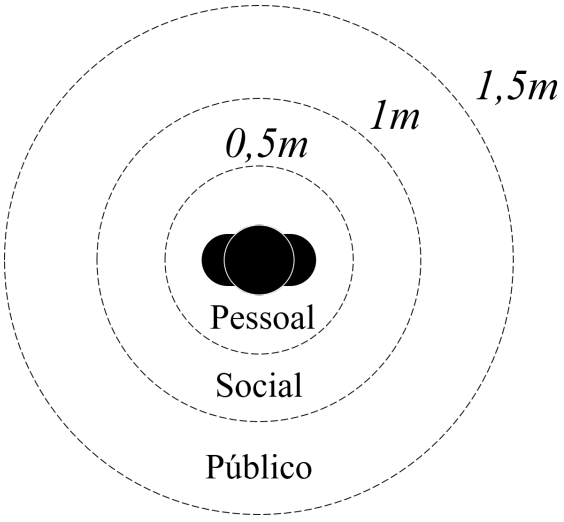
Fonte: Produção do próprio autor.

3.6 Distância de interação

No presente trabalho três espaços de interação foram considerados ao redor da criança, sendo eles: espaço de interação pessoal, espaço de interação social e espaço de interação público (Figura 17) .

Estes espaços serão referidos como distância de interação e serão enxergados como um círculo de raio igual à distância de interação localizado ao redor da criança. De forma análoga, estes espaços podem ser vistos como um círculo de raio igual à distância de interação localizado ao redor do robô, visto que o robô e a criança são os únicos na área de interação, e que a distância é medida entre os mesmos.

Figura 17 – Espaços de interação propostos.

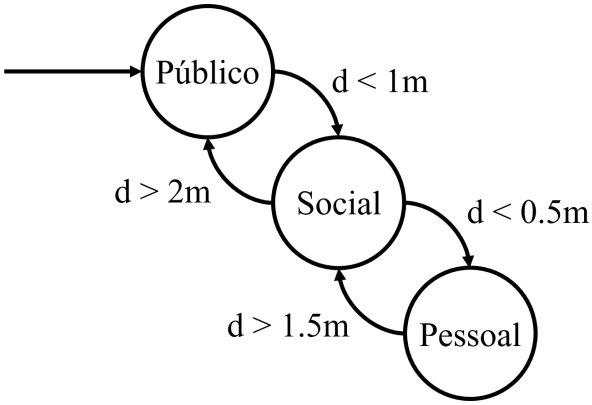


Fonte: Produção do próprio autor.

A distância de interação que o robô irá manter dependerá do nível de interação entre o mesmo e a criança. Este nível de interação pode ser estimado a partir do uso de múltiplos sensores que ajudem a definir como a criança está reagindo ao robô e também pode ser determinado por uma entrada de dados externa, vinda do terapeuta responsável.

No presente trabalho a distância de interação é definida diretamente a partir das distâncias que a criança mantém do robô. A partir desta abordagem define-se a máquina de estados finita, sendo d a distância entre o robô e a criança, com cada estado representando um nível de interação (Figura 18).

Figura 18 – Máquina de estados para definir distância de interação.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os diferentes espaços de interação e a transição entre eles têm o objetivo de adicionar reciprocidade à interação entre a criança e o robô. Desta maneira, se a criança se mantiver mais distante do robô, o mesmo respeitará esta distância assim como o robô irá interagir mais próximo à criança, caso a mesma se aproxime dele.

Os valores para distâncias de interação e para distâncias para a qual ocorre a transição entre os níveis de interação foram escolhidos de forma empírica em laboratório, de forma a ilustrar o comportamento do robô executando o controle proposto. No entanto, estes valores podem ser alterados livremente, por exemplo, por indicação do terapeuta, ou por limitações relacionadas à faixa de captura dos sensores (por exemplo, câmera térmica ou RGB) para se obter uma melhor resolução na medida.

3.7 Lei de controle proposta

A lei de controle proposta é uma modificação do controlador de posicionamento proposto em (SECCHI et al., 1998). O objetivo da lei de controle proposta é fazer com que o robô

se aproxime da criança a uma distância socialmente aceitável para possibilitar outros tipos de interação, tais como interação verbal, visual e tátil.

Outro aspecto importante é que esta lei de controle garante que o robô irá se orientar em relação à criança antes de se aproximar. Estes fatores possibilitam que sensores que são sensíveis à distância, como citados anteriormente, possam realizar aquisição de dados de uma forma mais confiável, visto que a visada entre o robô e a criança vai ser mantida e a distância será ajustada. Além disso, o movimento do robô fica mais suave e semelhante à movimentação humana, já que ele não fará curvas abertas e tampouco se movimentará de ré.

Quanto à distância de interação, esta é definida com base na proxêmica, como mostrado na Figura 17, a qual foi incluída na lei de controle proposta. Outro detalhe importante é a adição implícita da regra de segurança na lei de controle proposta, a qual impede que o robô se mova quando a criança estiver próxima do mesmo.

As ações de controle propostas são (Equação 3.2) (ver Figura 19):

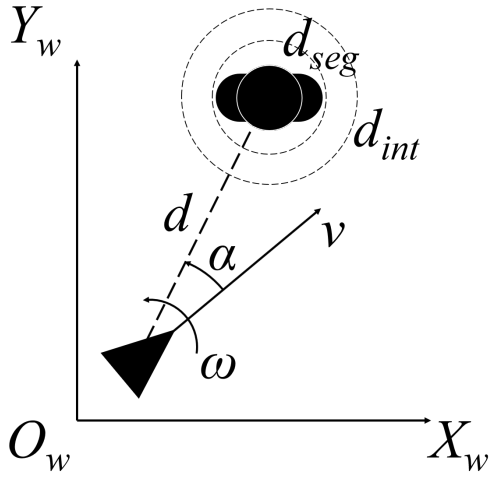
$$\begin{cases} v = \dfrac{K_v \tanh{(d - d_{int})} e^{-K_d \alpha^2}}{1 + e^{-K_s(d - d_{int})}} \\ \\ \omega = \dfrac{K_\omega \tanh{(\alpha)}}{1 + e^{-K_s(d - d_{seg})}} \end{cases} \tag{3.2}$$

onde,

K_v constante de máxima velocidade linear [m/s]
K_ω constante de máxima velocidade angular [rad/s]
K_d constante de diretividade
K_s constante de segurança
d distância entre o robô e a criança [m]
d_{int} distância de interação entre o robô e a criança [m]
d_{seg} distância de segurança entre o robô e a criança [m]
α ângulo entre o robô e a criança [rad]

Examinando separadamente cada componente da lei de controle, pode-se separar v em

Figura 19 – Variáveis importantes para a lei de controle proposta.

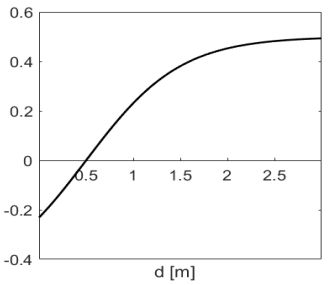
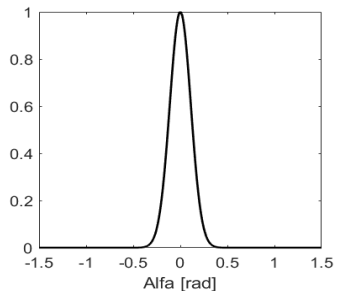
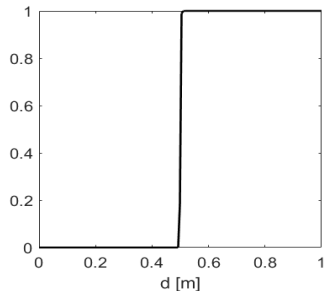
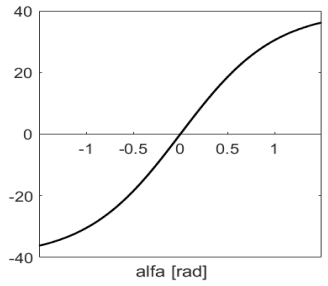
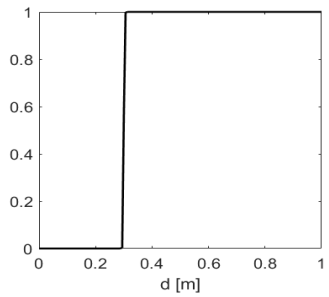


Fonte: Produção do próprio autor.

três fatores e ω em dois fatores (Equação 3.3).

$$\begin{cases} v = ABC \\ \\ \omega = DE \end{cases} \tag{3.3}$$

Assim, podemos construir a Tabela 1, que mostra o gráfico de cada fator com relação a d ou α (associados aos erros linear e angular do controlador), explicitando a contribuição de cada fator no controlador.

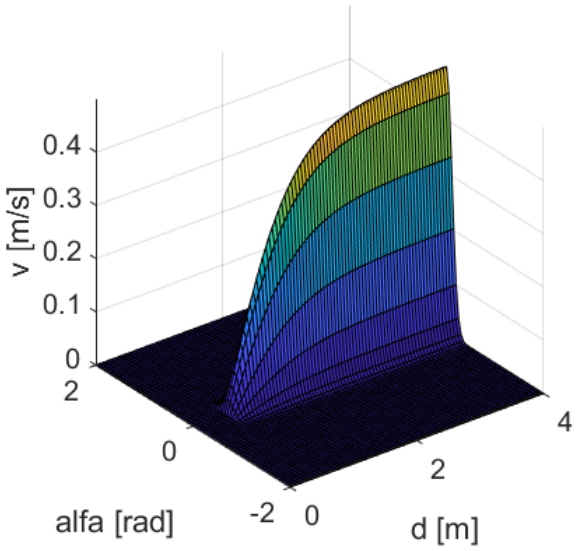
Identificação	Fator	Gráfico
A	$K_v \tanh(d - d_{int})$	
B	$e^{-K_d \alpha^2}$	
C	$\frac{1}{1 + e^{-K_s(d - d_{int})}}$	
D	$K_\omega \tanh(\alpha)$	
E	$\frac{1}{1 + e^{-K_s(d - d_{seg})}}$	

Para a construção dos gráficos:
$K_v = 0.5$, $K_s = 1000$, $K_d = 40$, $K_\omega = 40$, $d_{int} = 0.5m$, $d_{seg} = 0.3m$

Tabela 1 – Influência dos fatores nas ações de controle propostas.

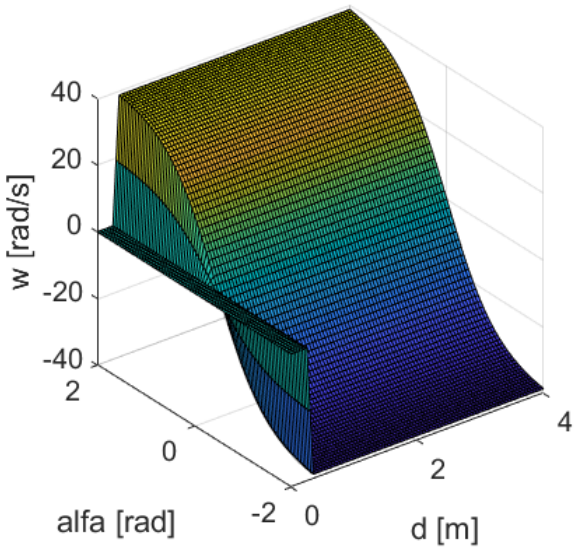
As Figura 20 e 21 mostram as ações de controle v e ω em função de d e α, respectivamente.

Figura 20 – Ação de controle v em função de d e α.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Ação de controle ω em função de d e α.



Fonte: Produção do próprio autor.

O fator A é responsável por fazer o robô se aproximar da distância de interação da criança, com velocidade proporcional a esta distância e saturando na velocidade máxima definida por K_v.

O fator B, por sua vez, garante que o robô só vai se aproximar da criança a partir do momento que o erro linear α for pequeno. Assim, o robô irá primeiro se alinhar com a criança e depois se aproximar. Este fator foi adicionado para que o robô não faça curvas

abertas, de forma a tornar o movimento mais semelhante ao humano. O gráfico de B fica mais estreito quando K_d é maior.

O fator C é uma sigmoide e funciona como um degrau, sendo que a função se assemelha mais a um degrau quando K_s é maior. Este fator tem a função de eliminar a parte negativa do fator A. Portanto, isso fará com que o robô nunca se mova para trás, ou seja, que tenha velocidade linear negativa. Este comportamento é desejado, pois garante que quando a criança se aproximar do robô por qualquer direção, o mesmo vai ficar parado, permitindo que o nível de interação aumente, como definido na Figura 18. Outro aspecto do fator C é sua função como regra de segurança, visto que este fator irá impedir que o robô tenha velocidade linear negativa quando a criança estiver mais próxima que a distância de interação.

De forma concisa, a ação de controle proposta v faz com que o robô se aproxime da distância de interação quando o mesmo já se encontra alinhado com a criança. Além disso, permite que a mesma se aproxime do robô de forma segura, de forma a reduzir a distância de interação com o robô.

O fator D é o responsável por fazer o robô se alinhar com a criança, ou seja, corrigir o erro angular α. A tangente hiperbólica utilizada na lei de controle é responsável por saturar a resposta do robô a uma velocidade angular máxima equivalente a K_ω.

Por sua vez, o fator E é semelhante ao fator C, e também funciona como uma regra de segurança, já que este fator faz com que o robô não possua velocidade angular quando a criança estiver a uma distância do robô menor que a distância de segurança definida, d_{seg}.

Assim, a lei de controle ω é responsável pelo alinhamento entre o robô e a criança, além de impedir que o robô gire quando a criança estiver muito próxima do mesmo.

Desta forma, é possível definir três regiões onde o controlador atua de forma distinta, como se houvesse algum tipo de chaveamento.

- Região $d > d_{int}$: nesta região, o controlador atua corrigindo o erro angular, se alinhando com a criança, e, posteriormente, corrigindo o erro linear, e se aproximando da criança a uma distância de interação definida (Figura 18).
- Região $d_{seg} < d < d_{int}$: dentro desta região, a velocidade linear do robô é mantida nula, por questões de segurança. No entanto, a velocidade angular do robô ainda atua, ajustando a orientação do robô para alinhar-se com a criança.

- Região para $d < d_{seg}$: já nesta região, por motivos de segurança, e por a criança estar muito próxima ao robô, este tem velocidades linear e angular nulas, mantendo-se, portanto, parado.

3.7.1 Análise de estabilidade

Para mostrar a estabilidade assintótica do sistema, definimos a candidata de Lyapunov (Equação 3.4).

$$V(e_d, \alpha) = \frac{e_d^2}{2} + \frac{\alpha^2}{2} \tag{3.4}$$

.

Sendo $e_d = d - d_{int}$, temos uma função candidata de Lyapunov definida positiva.

A partir da Figura 19, têm-se que,

$$\begin{cases} \dot{e_d} = -vcos(\alpha) \\ \dot{\alpha} = -\omega + \dfrac{vsin(\alpha)}{d} \end{cases} \tag{3.5}$$

Assim, pode-se encontrar a derivada de $V(e_d, \alpha)$ (Equação 3.6):

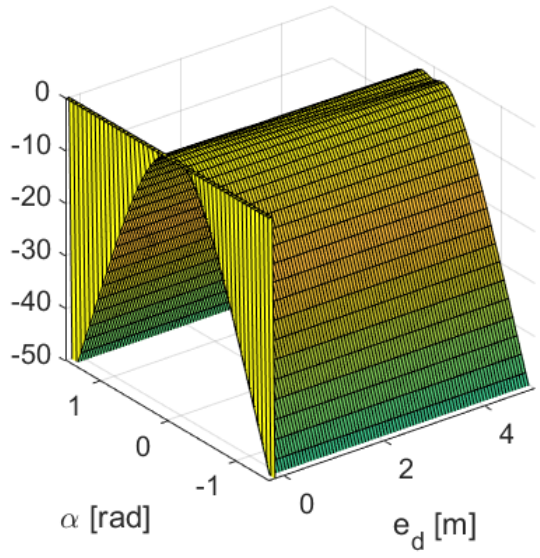
$$\dot{V}(e_d, \alpha) = -e_d vcos(\alpha) - \alpha\omega + \frac{\alpha vsin(\alpha)}{d} \tag{3.6}$$

A partir das Equações 3.2 e 3.6 , obtém-se (Equação 3.7):,

$$\dot{V}(e_d, \alpha) = \frac{-e_d K_v \tanh(e_d) e^{-K_d \alpha^2} cos(\alpha)}{1 + e^{-K_s(e_d)}} + \frac{-\alpha K_\omega \tanh(\alpha)}{1 + e^{-K_s(d - d_{seg})}} + \frac{-\alpha K_v \tanh(e_d) e^{-K_d \alpha^2} sin(\alpha)}{1 + e^{-K_s(e_d)} d} \tag{3.7}$$

Representando graficamente $\dot{V}(e_d, \alpha)$ (Figura 22), utilizando os valores de constante escolhidos para elaboração da Tabela 1, pode-se verificar que $\dot{V}(e_d, \alpha)$ é semi-definida negativa, sendo definida negativa para região $d \geq d_{int}$.

Figura 22 – $\dot{V}(e_d, \alpha)$.



Fonte: Produção do próprio autor.

Desta forma, pode-se mostrar que o controlador é assintoticamente estável para a região correspondente a $d > d_{int}$, ou seja, o controlador faz com que e_d e α convirjam para zero.

Por outro lado, para $d < d_{int}$ as regras de segurança entram em ação. Para a região correspondente a $d_{seg} < d < d_{int}$, temos que o fator da lei de controle responsável pela correção da orientação do robô permanece atuante. Assim, o erro fica limitado a $|e_d| < d_{int}$, visto que $d < d_{int}$.

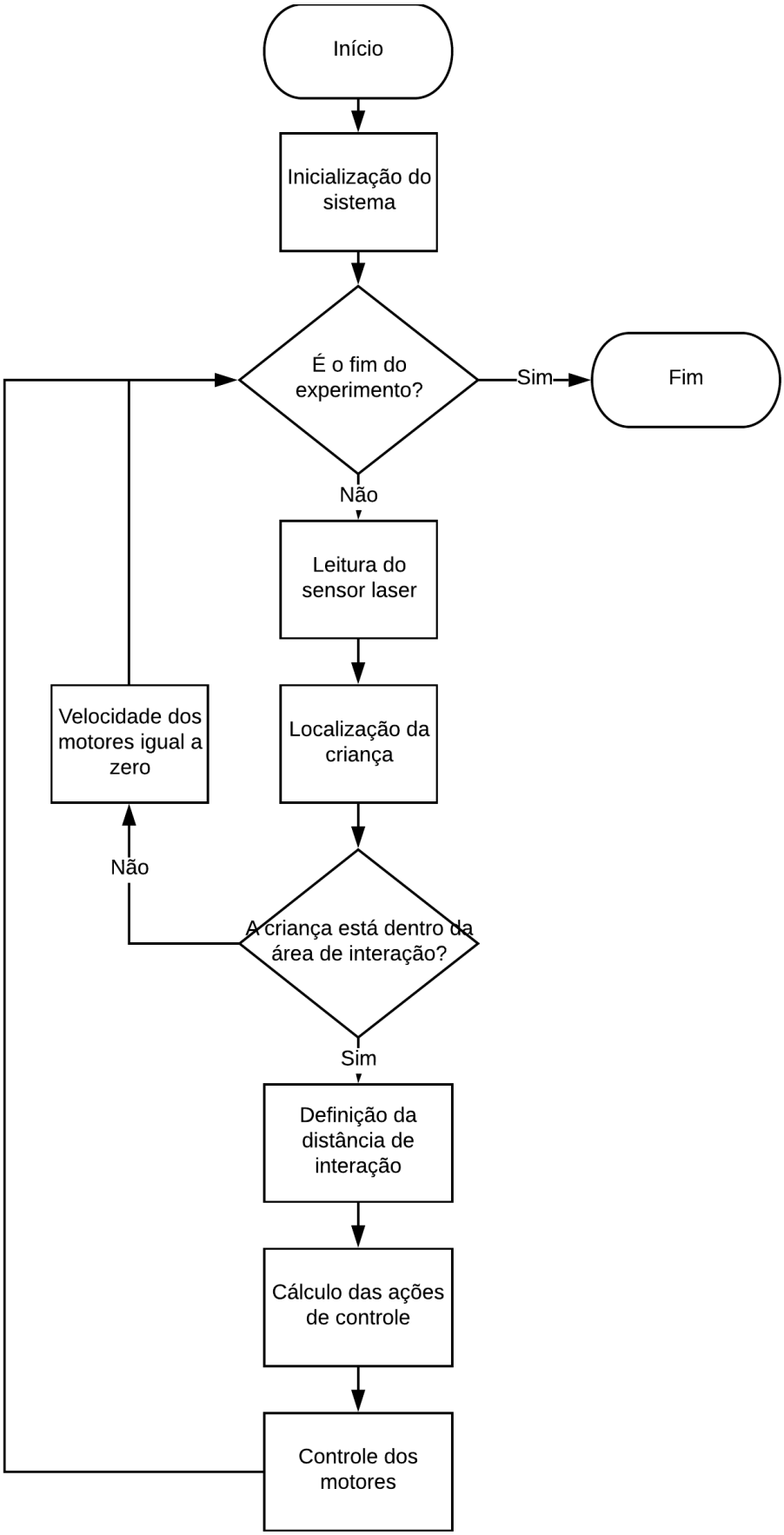
Para a região referente a $d < d_{seg}$, temos que tanto a velocidade linear quanto a angular do robô serão nulas. Desta forma, o erro angular fica limitado a $|\alpha| < \pi$ enquanto o erro linear fica limitado a $|e_d| < d_{seg}$.

Assim, para a região $d > d_{int}$ o controlador é assintoticamente estável, e para região $d < d_{int}$, correspondente a regra de segurança, o controlador mantém um erro limitado, ou seja, o controlador como um todo é estável.

3.8 Fluxograma

A Figura 23 mostra um fluxograma que ilustra o funcionamento do algoritmo proposto, o qual foi embarcado no robô.

Figura 23 – Fluxograma de funcionamento do sistema.



Fonte: Produção do próprio autor.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A fim de testar o sistema e o robô, foram realizados cinco experimentos de forma a examinar diferentes aspectos do controlador proposto.

O primeiro experimento trata-se de uma simulação para mostrar que a lei de controle é adequada para reduzir os erros de distância (e_d) e ângulo (α) a zero. Já o segundo, por sua vez, verifica o funcionamento da regra de segurança associada à proximidade da criança com o robô.

Prosseguindo com a sequência de testes, o terceiro experimento visa mostrar que o robô só interage dentro de uma área de definida, enquanto o quarto ilustra o funcionamento das transições entre as distâncias de interação. Por fim, o quinto experimento mostra a interação completa entre o robô e a criança, o que abrange vários itens dos experimentos anteriores, além de uma análise completa do sistema.

Para a realização dos experimentos supracitados, um adulto representa a criança, a fim de comprovação das técnicas e algoritmos de controle. O fato de ser um adulto quem faz o teste não compromete o comportamento do robô ou o funcionamento da lei de controle proposta, visto que a mesma utiliza um algoritmo baseado na localização da pessoa (leitura do ponto mais próximo do sensor laser cujo x e y esteja dentro da área de interação).

Dentro dos controladores programados, as constantes utilizadas para realização de todos os experimentos foram: $K_v = 0.5$, $K_s = 1000$, $K_d = 40$, $K_w = 40$, $d_{int} = 0.5m$ e $d_{seg} = 0.4m$.

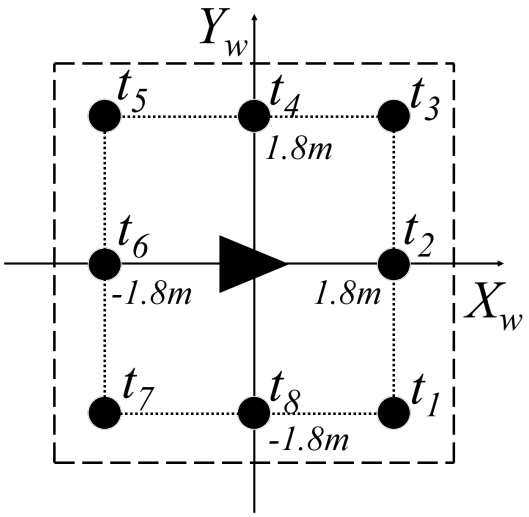
4.1 Experimento 1 - Simulação

O primeiro experimento foi realizado via simulação através do software *MobileSim* da própria empresa fabricante do robô móvel utilizado (*Adept/Omron*). O experimento tem como objetivo mostrar que o robô é capaz de se posicionar adequadamente a partir da lei de controle proposta.

Neste experimento, o robô simulado vai se deslocar da pose de origem para determinados destinos localizados dentro da área de interação simulada, reduzindo os erros e_d e α a zero.

A Figura 24 ilustra a posição de origem do robô e os destinos escolhidos para ilustração da execução da lei de controle.

Figura 24 – Experimento 1.



Fonte: Produção do próprio autor.

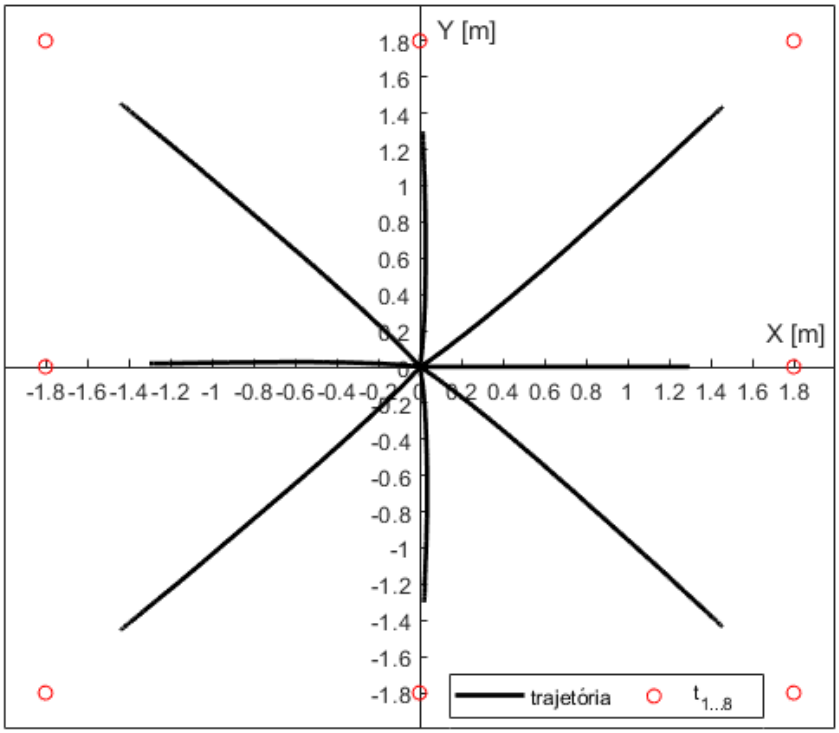
Os destinos, $t_{1...8}$ foram distribuídos de acordo com a Figura 24 em um quadrado de lado $1.8m$ interno a área de interação.

4.1.1 Resultados

Os caminhos seguidos pelo robô durante a simulação estão mostrados na Figura 25.

É possível notar que o robô não faz curvas abertas, apresentando apenas curvas bem suaves durante seu deslocamento. Isto é um reflexo da lei de controle que impede que o robô tenha velocidade linear quando o erro angular é grande. Desta forma, verifica-se o comportamento de correção da orientação do robô e, posteriormente, a correção do erro linear.

Figura 25 – Trajetórias percorridas pelo robô.

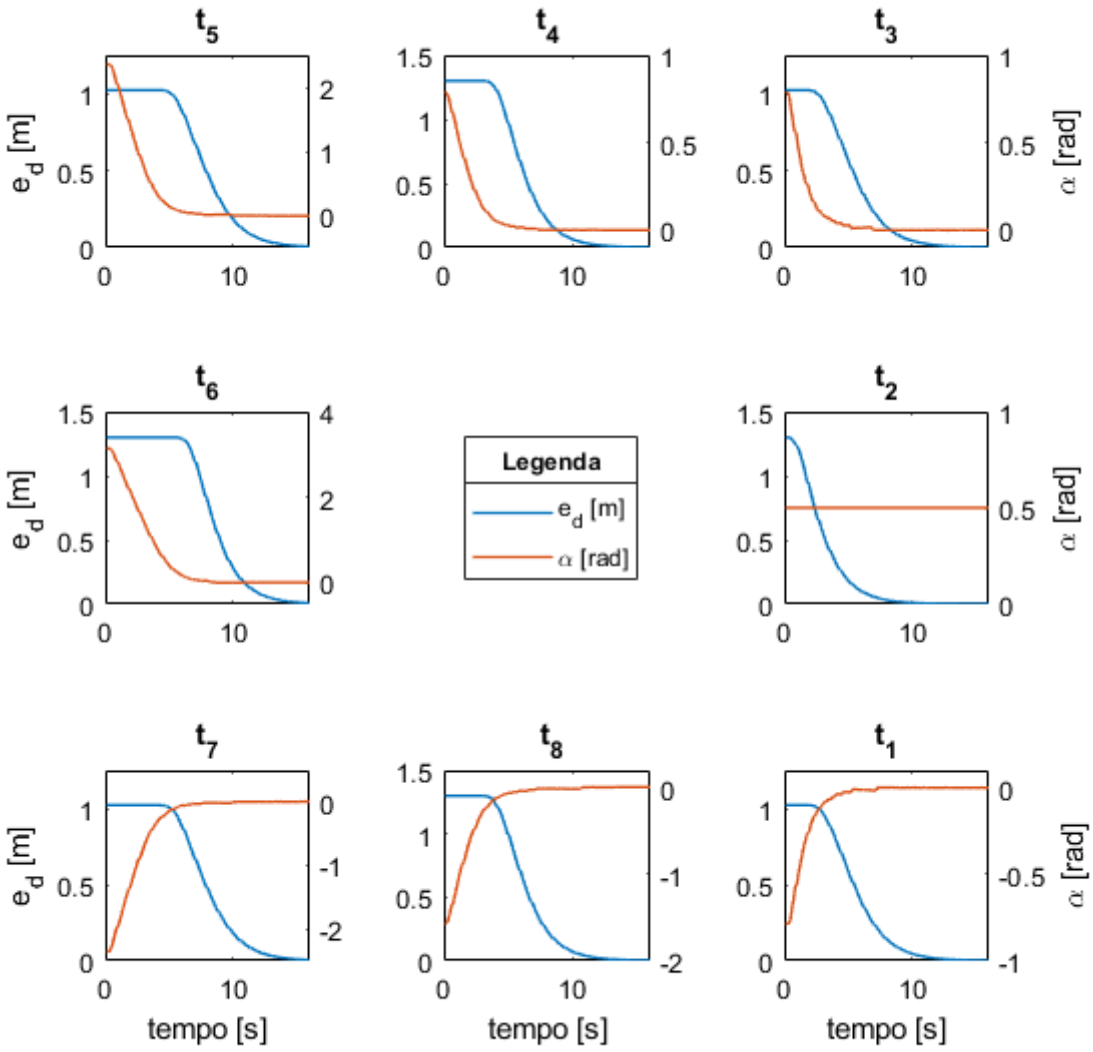


Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 26 mostra o comportamento dos erros linear e angular em função do tempo, seguindo a mesma posição da Figura 24.

Pode-se notar que o controlador teve sucesso em levar os erros e_d e α para zero para todos os destinos, de t_1 até t_8. Além disso, observa-se que, novamente, a correção do erro angular ocorre antes da correção do erro linear, como previsto na lei de controle.

Figura 26 – Erros e_d e α de acordo com destinos.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 Experimento 2 - Regra de segurança

Este experimento visa verificar o funcionamento das regras de segurança associadas à distância entre o robô e a criança. O procedimento executado neste experimento consiste na aproximação de uma pessoa ao robô, de forma que as regras de segurança entrem em ação de forma consecutiva.

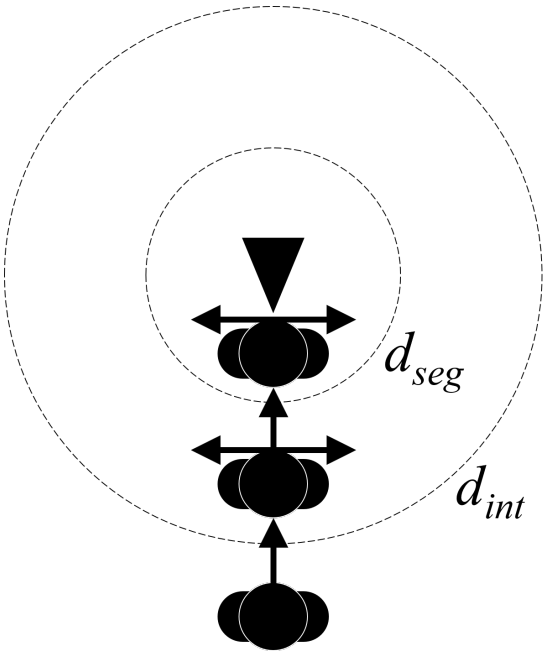
Em outras palavras, a pessoa primeiramente vai se aproximar do robô, de forma a manter uma distância $d_{seg} < d < d_{int}$. Nesta região, o robô deveria apresentar velocidade linear

nula e apenas deveria atuar corrigindo sua orientação em relação à pessoa.

Em um segundo momento, a pessoa vai se aproximar ainda mais do robô, a uma distância $d < d_{seg}$. Por sua vez, nesta região, o robô vai ficar parado, com velocidades tanto linear como angular nulas, de forma a garantir a interação segura com a pessoa.

A Figura 27 ilustra o procedimento para execução do primeiro experimento.

Figura 27 – Experimento 2.



Fonte: Produção do próprio autor.

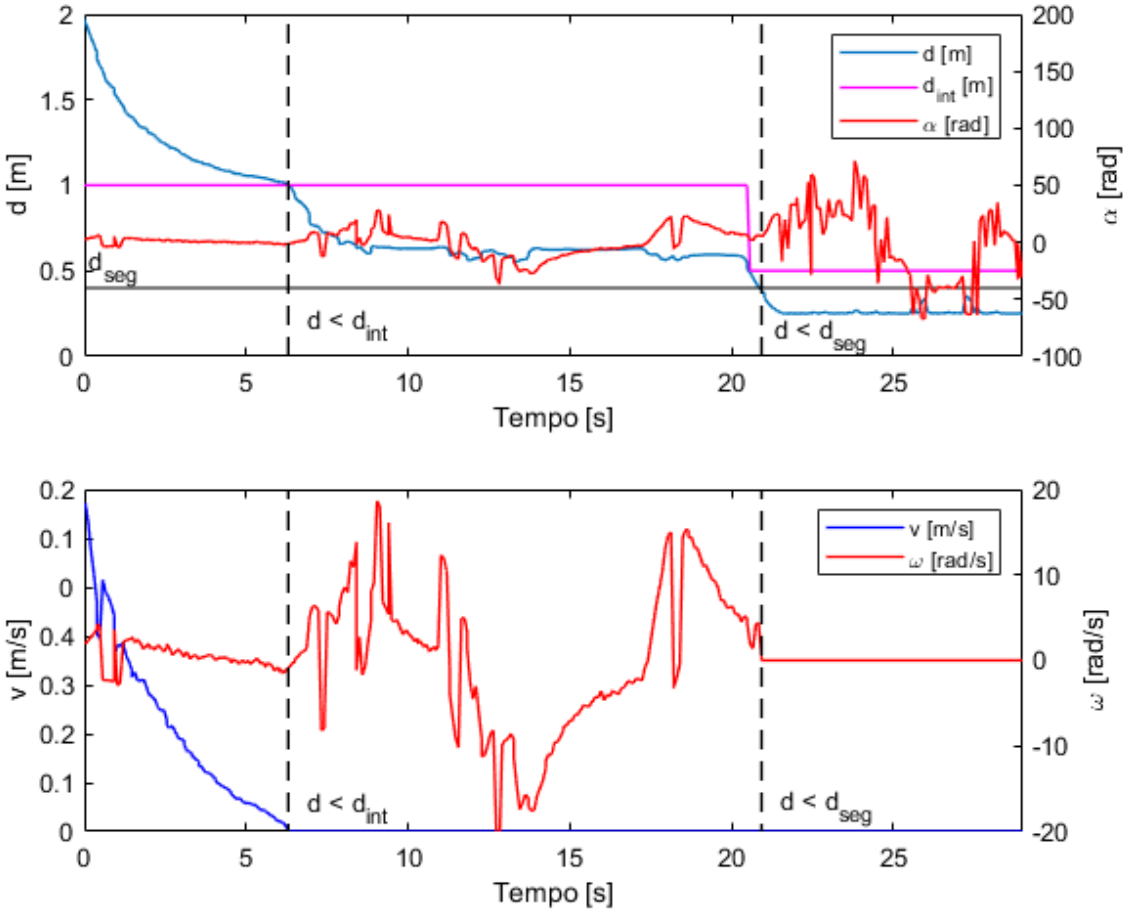
4.2.1 Resultados

O gráfico da Figura 28 mostra os resultados do experimento 2. As duas linhas tracejadas verticais exibem a transição entre os momentos descritos no procedimento. É possível notar que inicialmente o robô apresenta tanto velocidade linear quanto angular, e isso ocorre pois o mesmo está a uma distância $d > d_{int}$, ou seja, nenhuma regra de segurança foi ativada até o momento.

Quando a distância d diminui, indicando uma aproximação relativa entre o robô e a pessoa, a partir do momento indicado pela primeira linha tracejada vertical, temos $d < d_{int}$. Nesta região, a regra de segurança que zera a velocidade linear do robô v entra em ação. Destaca-se, entretanto, que o robô ainda é capaz de ter velocidade angular, como visto no gráfico de velocidades da Figura 28.

Como a distância d continua a diminuir, ao chegar na segunda linha tracejada, há a ativação da segunda regra de segurança (quando $d < d_{seg}$). Dentro desta faixa, temos que tanto a velocidade linear v quanto a velocidade angular ω permanecem nulas, devido à primeira e segunda regras de segurança. Assim, o robô não apresenta movimento algum, de forma a garantir a segurança da pessoa envolvida na interação, já que está muito próxima do robô.

Figura 28 – Resultado do experimento 2.



Fonte: Produção do próprio autor.

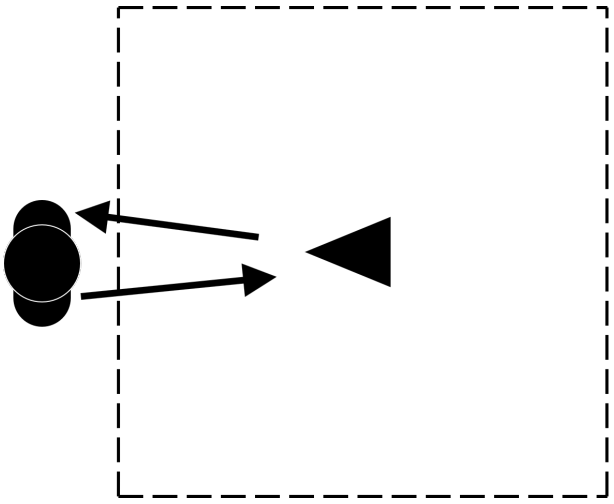
4.3 Experimento 3 - Área de interação

Partindo da premissa que na área de interação só existirão o robô e a criança, o objetivo do terceiro experimento é mostrar que o robô ignora objetos localizados fora da área de interação definida (um quadrado de 4 m de lado). Para a realização deste experimento, o robô foi inicialmente localizado no ponto central da área de interação. Em seguida, uma

pessoa entrou dentro dessa área, de forma que o robô respondesse à presença da mesma, a qual, por sua vez, saiu logo em seguida (Figura 29).

Este processo foi repetido, de forma a mostrar as quatro condições ($x_k > 2$ m, $x_k < -2$ m, $y_k > 2$ m, $y_k < -2$ m) para as quais o algoritmo de localização da criança atua, indicando que a mesma se encontrava fora da área de interação. A Figura 29 ilustra o procedimento para execução do segundo experimento.

Figura 29 – Experimento 3.



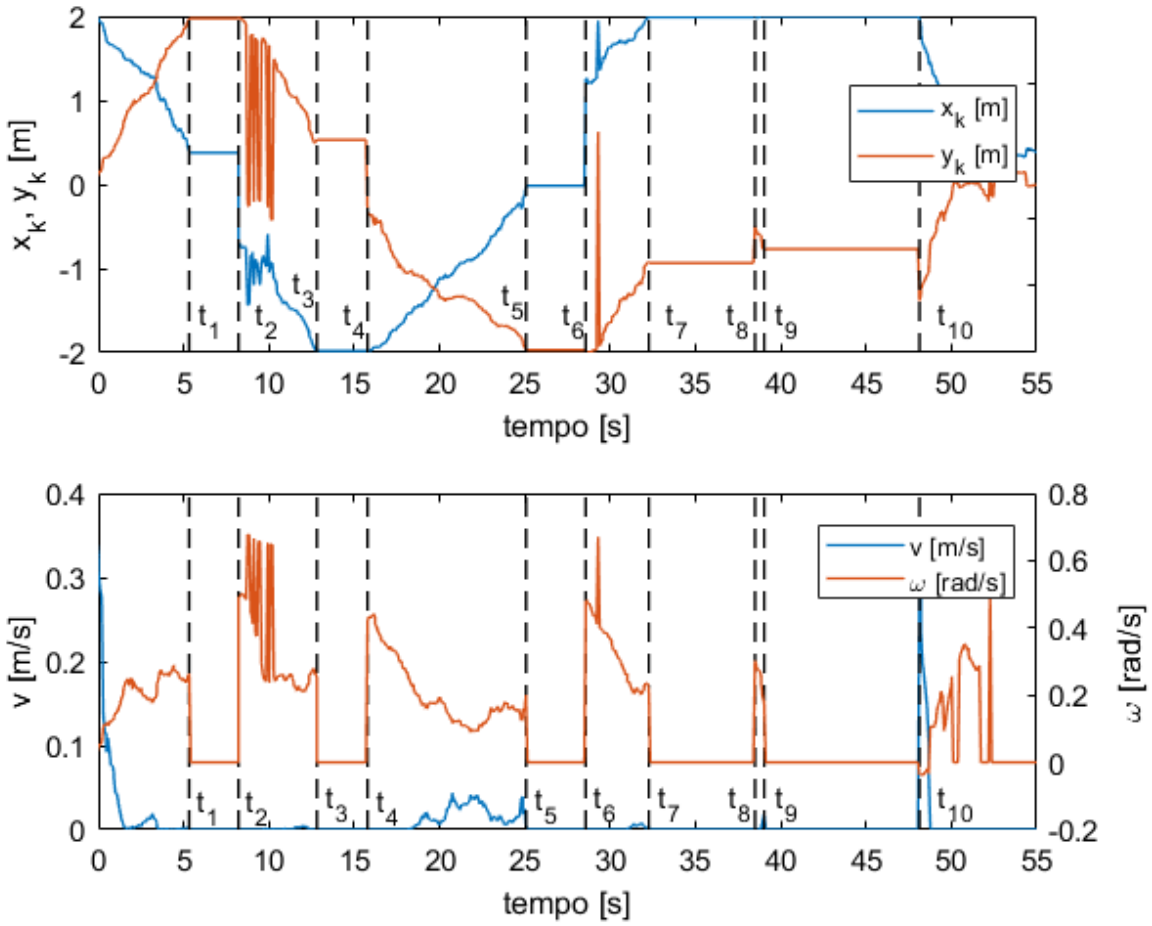
Fonte: Produção do próprio autor.

Durante o período que a pessoa não estiver dentro da área de interação, o robô deverá permanecer parado, ou seja, ter ambas velocidades, linear e angular, nulas.

4.3.1 Resultados

A Figura 30 mostra o resultado obtido com o experimento. Marcações de tempo de t_1 a t_{10} foram feitas no gráfico da figura para indicar os momentos em que a pessoa entra ou sai da área de interação.

Figura 30 – Valores de x_k e y_k da pessoa e velocidade (v e ω do robô).



Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se observar que em t_1 o y_k da pessoa alcança 2 m, indicando que a mesma saiu da área de interação. Em t_2 a pessoa retorna à área de interação.

No instante t_3 o x_k da pessoa alcança o limite inferior de -2 m, que, da mesma forma, indica que a pessoa está deixando a área de interação por outro lado do quadrado virtualmente definido. A pessoa, então, retorna à área de interação em t_4.

Em t_5 a pessoa deixa a área de interação novamente, porém, agora com a condição de y_k ter alcançado -2 m. Mais uma vez, a pessoa retorna à área de interação no instante t_6.

Em seguida, a pessoa deixa a área de interação com a condição de x_k maior que 2 m no instante t_7. Logo após, retorna à área de interação uma última vez no instante t_{10}.

É possível notar que entre t_7 e t_{10} há uma curta resposta do robô, o que mostra que o mesmo detectou a pessoa dentro da área de interação. Isto pode indicar duas possibilidades, sendo a primeira a possibilidade da pessoa estar na região limítrofe da área de interação, fazendo com que, por um momento, a pessoa estivesse dentro do quadrado no intervalo entre t_8 e t_9. A segunda possibilidade é a existência de algum ruído na leitura do sensor de distância.

Ressalta-se que entre os intervalos $t_1 - t_2$, $t_3 - t_4$, $t_5 - t_6$, $t_7 - t_8$, $t_9 - t_{10}$, tanto a velocidade linear, v, do robô quanto a velocidade angular, ω, permaneceram nulas, visto que o robô fica parado quando não detecta a pessoa dentro da área de interação.

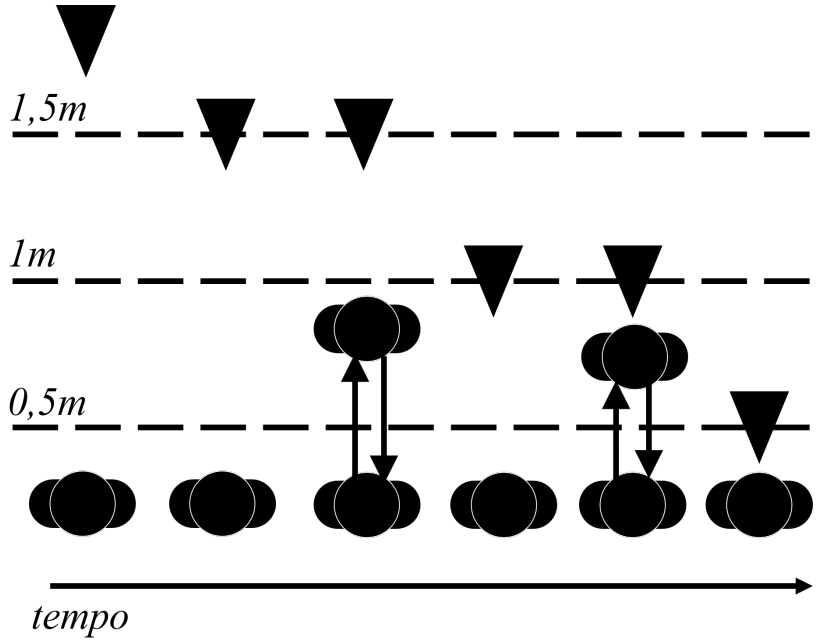
4.4 Experimento 4 - Distâncias de interação

O objetivo do quarto experimento é verificar o funcionamento da máquina de estados definida na Figura 18 e, além disso, mostrar a transição entre as distâncias de interação estabelecidas. Para isso, durante este experimento, a pessoa irá se aproximar do robô de modo a aumentar o nível de interação e se afastar em seguida, para que a lei de controle atue de forma a igualar d a d_{int}.

Este procedimento será repetido progressivamente de forma a ilustrar os três níveis de interação definidos. Por fim, a pessoa irá se afastar do robô de forma a mostrar as transições no sentido de induzir a diminuição do nível de interação.

A Figura 31 ilustra o procedimento do quarto experimento, exibindo como será feito o aumento do nível de interação. Para diminuição do mesmo, basta que a pessoa se afaste do robô.

Figura 31 – Experimento 4.



Fonte: Produção do próprio autor.

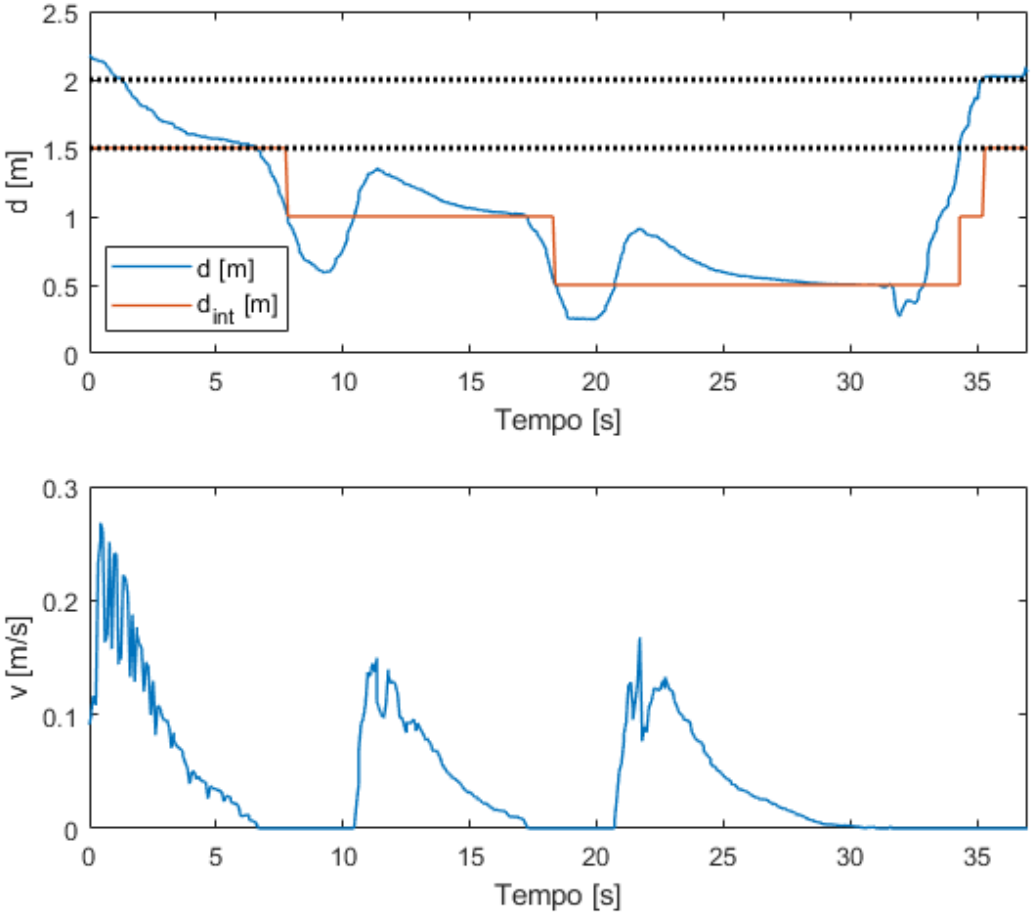
4.4.1 Resultado

Os gráficos mostrados na Figura 32 mostram os resultados obtidos durante o experimento. Inicialmente, a pessoa está a cerca de 2 m do robô. Neste momento, o robô se aproxima da pessoa de forma a manter a distância de interação inicial de 1,5 m, definida como região de interação pública (Figura 17). Em seguida, a pessoa se aproxima mais, de forma que d seja menor que 1 m e, de acordo com a máquina de estados (Figura 18), $d_{int} = 1$ m. A pessoa então se afasta para que o controlador possa agir novamente.

A ação de controle pode ser vista no gráfico inferior da Figura 32, sendo que a redução do erro linear para zero pode ser verificada no gráfico superior. Este processo foi repetido de forma a ilustrar todos os níveis de interação.

Depois que o nível de interação pessoal é demonstrado, a pessoa se afasta para cerca de 2 m de distância novamente, de modo a ilustrar as transições da máquina de estado que ocorrem respectivamente em $d = 1.5$ m e $d = 2$ m, como previsto e mostrado na Figura 18.

Figura 32 – Resultado do experimento 4.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.5 Experimento 5 - Interação completa

O último experimento foi realizado para ilustrar uma interação completa entre a pessoa e o robô. Desta forma, o objetivo foi mostrar, de forma integrada, o funcionamento das características mostradas anteriormente, como o funcionamento da regra de segurança, da área de interação, da máquina de estados que define a distância de interação, e também da própria lei de controle.

Neste experimento, a pessoa entra na área de interação e fica à vontade para interagir com o robô como desejar. A ideia, portanto, é justamente tentar imitar o que uma criança faria durante a interação com o robô, e por à prova tanto as leis de controle como as regras de segurança testadas nos experimentos anteriores. Esse teste serviu para demonstrar que o

robô poderá ser útil em aplicações de interação com crianças, envolvendo todos os aspectos de controle e segurança planejados e citados anteriormente.

4.5.1 Resultados

Os gráficos mostrados na Figura 33 mostram os resultados obtidos durante o experimento 5. O gráfico superior mostra os valores de x e y da pessoa durante o experimento. Já o segundo gráfico, de cima para baixo, mostra os valores de erro linear e angular do controlador obtidos. O terceiro gráfico, por sua vez, contém os valores das ações de controle. E, por fim, o último gráfico mostra os valores da distância entre o robô e a pessoa, e também a distância de interação.

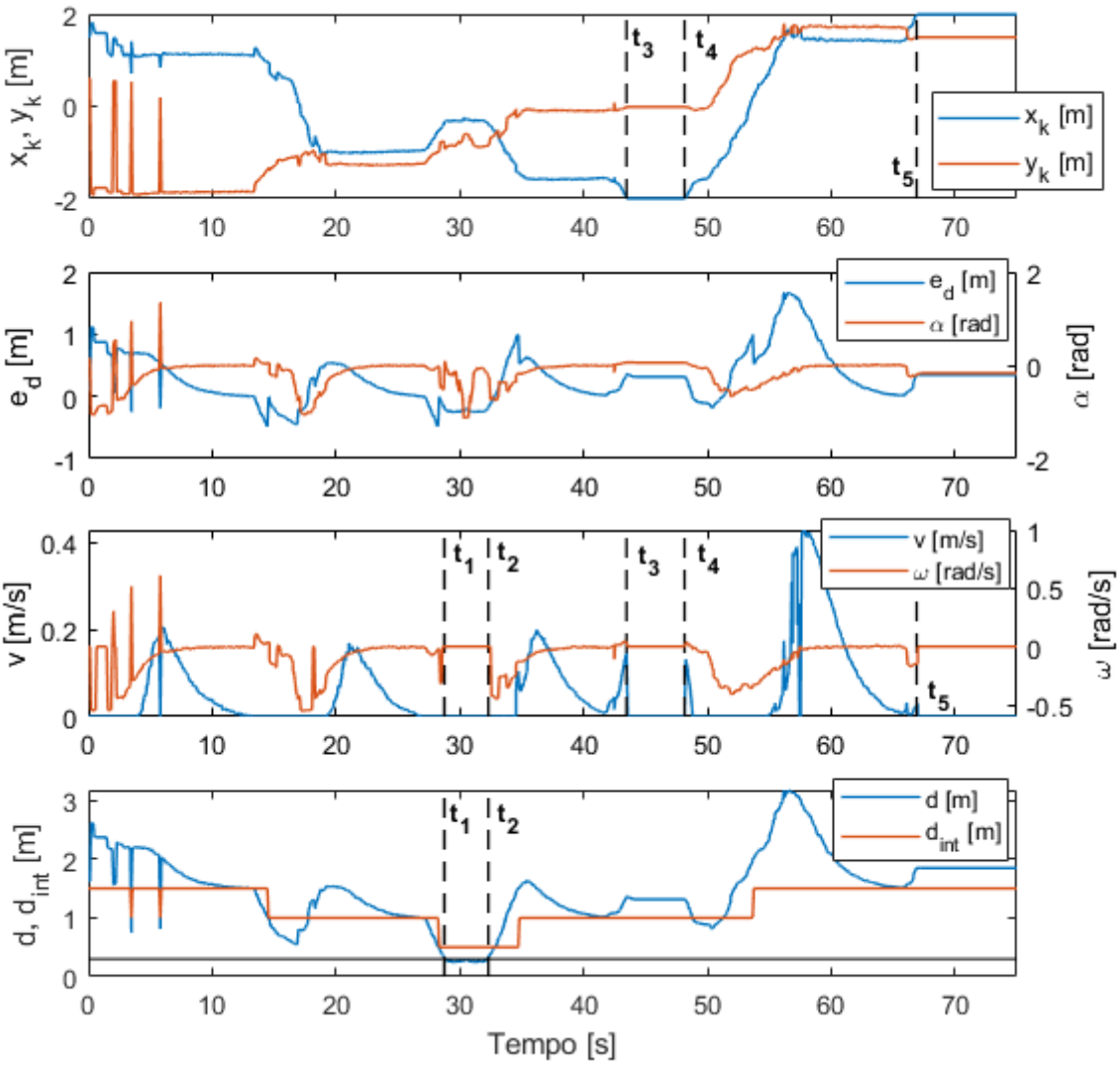
Pelo gráfico superior, pode-se notar a saída da pessoa da área de interação nos intervalos $t_3 - t_4$ e $t_5 -$ fim do teste. Nestes intervalos verifica-se, a partir do gráfico das ações de controle do robô, que o mesmo mantém as velocidades nulas.

Observando o gráfico inferior que contém os valores de d e d_{int} ao longo do tempo, verifica-se que o robô respondeu de forma a alterar as distâncias de interação, de acordo com o comportamento da pessoa. Além disso, a pessoa explorou todos os três níveis de interação propostos, equivalentes às distâncias de 0.5 m, 1 m e 1,5 m.

Quanto à regra de segurança, observa-se que no intervalo $t1 - t2$, a distância entre a criança e o robô ultrapassou o limiar inferior referente à distância de segurança d_{seg}. Isto fez com que o robô permanecesse completamente parado neste intervalo. Pode-se verificar que o robô tem ambas as velocidades nulas quando e_d é menor que zero.

Por fim, verifica-se que os erros têm a tendência de oscilar ao redor de zero. Isto ocorre devido à movimentação da pessoa, causando aumento do erro, e ao controlador, que causa a diminuição do mesmo (considerando a região para as quais a regra de segurança não entra em ação).

Figura 33 – Resultado do experimento 5.



Fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÃO

O controlador utilizado demonstrou grande eficiência em todos os experimentos e na simulação realizados com o robô N-MARIA, o qual, através da implementação do controlador proposto neste trabalho, apresentou uma movimentação suave, com velocidades limitadas e baseadas na proxêmica. Com estas características, o robô foi capaz de se movimentar de uma forma mais natural e socialmente aceitável, uma vez que não foram produzidos movimentos como ré, curvas abertas ou velocidades incompatíveis com uma interação desejada com uma criança com TEA.

Além disso, pôde-se verificar, por meio dos experimentos, que o robô respeitou as regras de segurança associadas à proximidade da pessoa, de forma a garantir a segurança da interação, impedindo totalmente o movimento do robô quando a pessoa estava muito próxima, permitindo apenas o movimento angular quando a pessoa estivesse a uma distância definida como segura.

Ainda dentro da questão de segurança, verificou-se que o robô se manteve dentro da área de interação e ignorou objetos externos à mesma. Isto é importante, pois caso a criança sinta-se desconfortável, pode deixar a área delimitada, e a interação cessará até que a criança volte para dentro da área de interação.

Quanto ao comportamento do robô com relação à proxêmica, pôde-se visualizar nos resultados que o robô respondeu de forma satisfatória, já que a distância de interação utilizada na lei de controle foi alterada de forma coerente quando a pessoa se aproximava ou se afastava do robô. Desta forma, o robô apresentou, de forma autônoma, uma reciprocidade na interação, comportamento este que pode ser bastante útil em terapias com crianças com TEA, visto que essas crianças têm muita dificuldade na interpretação de formas de comunicação não verbal, além de engajamento em tarefas compartilhadas.

Outro ponto importante que vale a pena ressaltar é que a criança tem o papel de iniciar e definir a distância de interação. Desta forma, ela pode aumentar ou diminuir esta distância a seu critério, ou seja, caso se sinta desconfortável, pode diminuir o nível de interação, aumentando assim a distância. Por outro lado, na situação de sentir-se confortável, ela pode diminuir a distância e, consequentemente, aumentar o nível de interação.

Em termos de flexibilidade da lei de controle proposta, esta possibilita que sensores sensíveis à distância e que necessitem de visada para captar as informações da criança possam ser

utilizados. Além disso, a lei de controle está preparada para que o nível de interação seja definido pelo terapeuta ou por informações externas de diferentes algoritmos e sensores.

Dado todos estes aprimoramentos realizados na lei de controle e no comportamento do robô, o mesmo poderá ser uma ferramenta bastante útil para ser utilizada por terapeutas no auxílio à melhoria da sociabilidade das crianças com TEA.

5.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, novos testes podem ser realizados, porém, desta vez, com crianças com TEA e com o apoio de terapeutas.

Tendo em vista o aprimoramento do sistema de controle do robô, podem-se propor também melhorias no processamento dos sinais sensoriais procedentes do sensor de distância laser utilizado.

Outro ponto importante é a possibilidade de incremento do robô a partir de adições de uma gama de novos sensores, com o intuito de adquirir mais dados da criança ou da interação, permitindo assim o desenvolvimento de novos algoritmos que possam auxiliar a tornar a ICR mais efetiva.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION et al. **Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®)**. [S.l.]: American Psychiatric Pub, 2013.

BARNAUD, Marie-Lou et al. Proxemics models for human-aware navigation in robotics: Grounding interaction and personal space models in experimental data from psychology. In: PROCEEDINGS of the 3rd IROS'2014 workshop "Assistance and Service Robotics in a Human Environment". [S.l.: s.n.], 2014.

BENVENUTO, Arianna et al. Syndromic autism: causes and pathogenetic pathways. **World journal of pediatrics**, Springer, v. 5, n. 3, p. 169–176, 2009.

BUTTER, Eric M; WYNN, Jacqueline; MULICK, James A. Early intervention critical to autism treatment. **Pediatric annals**, SLACK Incorporated, v. 32, n. 10, p. 677–684, 2003.

CABIBIHAN, John-John et al. Why robots? A survey on the roles and benefits of social robots in the therapy of children with autism. **International journal of social robotics**, Springer, v. 5, n. 4, p. 593–618, 2013.

DAUTENHAHN, Kerstin. Human-robot interaction. **The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.**, The Interaction Design Foundation, 2013.

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

DIEHL, Joshua J et al. The clinical use of robots for individuals with autism spectrum disorders: A critical review. **Research in autism spectrum disorders**, Elsevier, v. 6, n. 1, p. 249–262, 2012.

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**, Springer, v. 24, n. 2, p. 147–157, 2008.

FEIL-SEIFER, David; MATARIĆ, Maja. Using proxemics to evaluate human-robot interaction. In: IEEE. HUMAN-ROBOT Interaction (HRI), 2010 5th ACM/IEEE International Conference on. [S.l.: s.n.], 2010. p. 143–144.

FEIL-SEIFER, David; MATARIC, Maja J. Defining socially assistive robotics. In: IEEE. REHABILITATION Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on. [S.l.: s.n.], 2005. p. 465–468.

FEIL-SEIFER, David; MATARIĆ, Maja J. Automated detection and classification of positive vs. negative robot interactions with children with autism using distance-based features. In: IEEE. HUMAN-ROBOT Interaction (HRI), 2011 6th ACM/IEEE International Conference on. [S.l.: s.n.], 2011. p. 323–330.

GOODRICH, Michael A; SCHULTZ, Alan C. Human-robot interaction: a survey. **Foundations and trends in human-computer interaction**, Now Publishers Inc., v. 1, n. 3, p. 203–275, 2007.

HALL, Edward T. A system for the notation of proxemic behavior. **American anthropologist**, Wiley Online Library, v. 65, n. 5, p. 1003–1026, 1963.

_____. The Hidden Dimension, Double Day & Co. **Garden City: New York**, 1966.

KIM, Elizabeth S et al. Social robots as embedded reinforcers of social behavior in children with autism. **Journal of autism and developmental disorders**, Springer, v. 43, n. 5, p. 1038–1049, 2013.

MEAD, Ross; MATARIĆ, Maja J. Autonomous human–robot proxemics: socially aware navigation based on interaction potential. **Autonomous Robots**, Springer, v. 41, n. 5, p. 1189–1201, 2017.

MOBILEROBOTS, Adept. Pioneer P3-DX. **Website. http://www. mobilerobots. com/ResearchRobots/PioneerP3DX. aspx**, 2012.

MUMM, Jonathan; MUTLU, Bilge. Human-robot proxemics: physical and psychological distancing in human-robot interaction. In: ACM. PROCEEDINGS of the 6th international conference on Human-robot interaction. [S.l.: s.n.], 2011. p. 331–338.

RATAJCZAK, Helen V. Theoretical aspects of autism: Causes—A review. **Journal of immunotoxicology**, Taylor & Francis, v. 8, n. 1, p. 68–79, 2011.

RICKS, Daniel J; COLTON, Mark B. Trends and considerations in robot-assisted autism therapy. In: IEEE. ROBOTICS and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. [S.l.: s.n.], 2010. p. 4354–4359.

RIOS-MARTINEZ, Jorge; SPALANZANI, Anne; LAUGIER, Christian. From proxemics theory to socially-aware navigation: A survey. **International Journal of Social Robotics**, Springer, v. 7, n. 2, p. 137–153, 2015.

ROBINS, Ben et al. Tactile interaction with a humanoid robot for children with autism: A case study analysis involving user requirements and results of an initial implementation. In: IEEE. RO-MAN, 2010 IEEE. [S.l.: s.n.], 2010. p. 704–711.

ROGERS, SJ et al. Autism treatment in the first year of life: a pilot study of infant start, a parent-implemented intervention for symptomatic infants. **Journal of autism and developmental disorders**, Springer, v. 44, n. 12, p. 2981–2995, 2014.

SCASSELLATI, Brian. How social robots will help us to diagnose, treat, and understand autism. In: ROBOTICS research. [S.l.]: Springer, 2007. p. 552–563.

SCASSELLATI, Brian; ADMONI, Henny; MATARIĆ, Maja. Robots for use in autism research. **Annual review of biomedical engineering**, Annual Reviews, v. 14, p. 275–294, 2012.

SECCHI, Humberto et al. Control de vehıculos autoguiados con realimentación sensorial. **Master's thesis, Facultad de Ingenerıa de la Universidad Nacional de San Juan, San Juan-Argentina**, 1998.

SIEGWART, Roland; NOURBAKHSH, Illah R; SCARAMUZZA, Davide. Autonomous mobile robots. **Massachusetts Institute of Technology**, 2004.

SLAMTEC, RPLIDAR. **A2 Specifications**. [S.l.: s.n.], 2016.

SLOTINE, Jean-Jacques E; LI, Weiping et al. **Applied nonlinear control**. [S.l.]: Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991. v. 199.

TAKAYAMA, Leila; PANTOFARU, Caroline. Influences on proxemic behaviors in human-robot interaction. In: IEEE. INTELLIGENT robots and systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ international conference on. [S.l.: s.n.], 2009. p. 5495–5502.

VALADÃO, Carlos Torturella et al. Analysis of the use of a robot to improve social skills in children with autism spectrum disorder. **Research on Biomedical Engineering**, SciELO Brasil, v. 32, n. 2, p. 161–175, 2016.

YANCO, Holly A; DRURY, Jill. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy. In: IEEE. SYSTEMS, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 2841–2846.